



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**Implementación de la Señalización de una  
Estación Base GSM**

**GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES**

Autor: BORJA GENOVÉS GUZMÁN

Tutor: DR. VÍCTOR P. GIL JIMÉNEZ

*Leganés, Junio de 2013*

# Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer al Dr. Víctor P. Gil Jiménez por darme la oportunidad de poder trabajar con él en un proyecto de comunicaciones móviles. Por confiar en mi trabajo y tener la paciencia para atender todas las dudas que hayan surgido en todo este período de tiempo. Gracias de verdad por adentrarme en este mundo.

A todos y cada uno de los profesores de los que he podido disfrutar a lo largo de todos estos cuatro años. De todos me llevo un poco y los recuerdo como si fuese ayer el primer día de sus clases.

También quiero agradecer a todos mis amigos por poder despejarme con ellos en aquellos momentos en los que uno se siente apartado un poco del mundo con tanto estudio. No puedo nombrarlos uno a uno porque son muchos, pero todos ellos saben lo importante que son para mí. Desde los amigos del barrio y equipo de fútbol, sin olvidarme de los del pueblo, hasta los más allegados de clase que han hecho que esos largos días en la universidad sean un poco más amenos.

También gracias a mi pareja sobre todo por sacarme una sonrisa en los momentos duros y por su predisposición a ayudarme en todo cuanto ha podido.

Por último agradecer a la familia. Ellos sí que saben lo que es aguantar a un estudiante. Gracias de verdad por apoyarme en todos los momentos por los que he pasado en la carrera, buenos y malos, llenos de altibajos, alegrías y tristezas, pero que a pesar de todo siempre me han hecho ver el lado bueno de las cosas. Gracias por todo vuestro amor y cariño en todo este tiempo.

Especial mención a mis cuatro abuelos: Tomás y Luchi, Goyo y Luz. Sé que durante este tiempo ha habido momentos en los que no he podido estar con ellos y me hubiera encantado. Gracias por sentirnos orgullosos de vuestro nieto, pero más me siento yo de vosotros.

Espero no olvidarme de nadie. Gracias a todos de nuevo.

# Contenido

Índice de figuras .....	III
Índice de tablas.....	VI
Glosario.....	VII
<i>Selected Sections in English</i> .....	XIII
A. <i>Extended Abstract</i> .....	XIII
B. <i>Introduction</i> .....	XVII
C. <i>Conclusions</i> .....	XXI
<i>General Conclusions</i> .....	XXI
<i>Further Work</i> .....	XXII
1. Introducción .....	1
1.1. Objetivos .....	2
1.2. Planteamiento del problema .....	3
1.2.1. Análisis del estado del arte.....	3
1.2.2. Marco regulador .....	4
1.3. Descripción de la memoria .....	6
1.4. Cronograma .....	7
2. Estándar GSM.....	10
2.1. Historia de GSM .....	10
2.2. Diseño celular .....	14
2.3. Arquitectura.....	16
2.4. Nivel físico .....	20
2.4.1. Canales: lógicos y físicos.....	20
2.4.2. El recurso físico.....	23
3. Herramientas hardware y software utilizadas .....	32
3.1. Instrumentación utilizada .....	32
3.1.1. Transceptor NI USRP 2920.....	32
3.1.2. Generador vectorial de señales de Agilent ESG E4438C.....	34
3.1.3. Analizador vectorial de señales de Agilent VSA 89600 .....	34
3.2. LabVIEW.....	35
3.3. Instrumentación en el laboratorio.....	36

4.	Diseño y desarrollo.....	39
4.1.	Sistemas diseñados.....	39
4.1.1.	BTS Estructurada .....	40
4.1.2.	BTS-Control Básico.....	47
4.2.	Fases de trabajo .....	51
4.2.1.	Planificación.....	51
4.2.2.	Diseño y construcción.....	53
4.2.3.	Pruebas, validación y conclusiones .....	54
4.3.	Módulos .....	56
4.3.1.	<i>Random bits.vi</i> .....	58
4.3.2.	Implementación de los canales .....	58
4.3.3.	<i>Bursts.vi</i> .....	64
4.3.4.	<i>CreateMF-51.vi</i> .....	65
4.3.5.	<i>Modulador.vi</i> .....	67
4.3.6.	<i>ConformaTrama.vi</i> .....	69
4.3.7.	<i>FrameComprobaton.vi</i> .....	71
4.3.8.	<i>TxTramaUSRP.vi</i> .....	72
5.	Pruebas y Validación .....	74
5.1.	Cumplimiento de tiempos .....	74
5.2.	Forma de onda.....	76
5.3.	Pruebas de la BTS Estructurada .....	78
5.4.	Pruebas de la BTS-Control Básico .....	82
6.	Presupuesto.....	87
7.	Conclusiones.....	90
7.1.	Conclusiones generales.....	90
7.2.	Futuras líneas de trabajo .....	91
	Referencias bibliográficas.....	93
	ANEXO A. Bandas de frecuencias GSM.....	98
	ANEXO B. Características de NI USRP-2920.....	100

# Índice de figuras

<i>Figure 0.1 (Extended Abstract): MF-51</i> .....	XVI
<i>Figure 0.2 (Extended Abstract): MF-51 Dedicated</i> .....	XVI
<i>Figure 0.3 (Extended Abstract): MF-26</i> .....	XVI
<i>Figure 0.4 (Extended Abstract): Framed BTS</i> .....	XVII
<i>Figure 0.5 (Extended Abstract): Basic Control BTS</i> .....	XVII
Figura 1.1: Diagrama de Gantt (parte 1) .....	8
Figura 1.2: Diagrama de Gantt (parte 2) .....	8
Figura 1.3: Diagrama de Gantt (parte 3) .....	9
Figura 2.1: Representación de un teléfono en un vehículo [17] .....	11
Figura 2.2: Representación de un teléfono móvil de 1988 [18].....	11
Figura 2.3: Representación del diseño celular de GSM [24] .....	15
Figura 2.4: Ejemplo de BTS trisectorial [Figura 6.2 [25]] .....	15
Figura 2.5: Planificación celular GSM [Figura 6.4 [25]] .....	16
Figura 2.6: Planificación celular con células trisectoriales [Figura 6.7 [25]] .....	16
Figura 2.7: Subsistemas de GSM [Fig. 2.9 [22]] .....	16
Figura 2.8: Representación de la arquitectura de GSM [Fig. 2.10 [22]] .....	17
Figura 2.9: Componentes MS [26] .....	17
Figura 2.10: Componentes BSS [27] .....	18
Figura 2.11: BTS real [28].....	18
Figura 2.12: BSC real [29] .....	18
Figura 2.13: MSC [27] [30] .....	18
Figura 2.14: HLR [27] [31] .....	19
Figura 2.15: Recurso físico [34] .....	24
Figura 2.16: Representación del retraso de 3 <i>timeslots</i> entre UL y DL.....	24
Figura 2.17: <i>Normal Burst</i> .....	25
Figura 2.18: <i>Frequency correction Burst</i> .....	25
Figura 2.19: <i>Synchronization Burst</i> .....	25
Figura 2.20: <i>Dummy Burst</i> .....	25
Figura 2.21: <i>Access Burst</i> .....	25
Figura 2.22: Jerarquía de acceso GSM [Fig. 3.37 [22]] .....	26
Figura 2.23: Proceso codificación canal tráfico (voz) [Figura 7.15 [25]] .....	28
Figura 2.24: Proceso codificación canal de control [Figura 7.17 [25]] .....	29

Figura 3.1: NI USRP 2920 [2].....	32
Figura 3.2: Diagrama de bloques del sistema NI USRP-2920 [38].....	33
Figura 3.3: Agilent ESG E4438C [4] .....	34
Figura 3.4: Agilent VSA 89600 [5] .....	35
Figura 3.5: Área de trabajo .....	37
Figura 4.1: Diagrama de bloques BTS Estructurada .....	40
Figura 4.2: <i>MF51 y MF51 Dedicated</i> [43] .....	42
Figura 4.3: MF-26.....	42
Figura 4.4: <i>BTS Estructurada.vi</i> .....	45
Figura 4.5: Interfaz usuario BTS Estructurada .....	46
Figura 4.6: Diagrama de bloques BTS-Control Básico .....	47
Figura 4.7: <i>BTS-Control Básico.vi</i> .....	49
Figura 4.8: Interfaz usuario BTS-Control Básico .....	50
Figura 4.9: Diagrama Dinámica de Trabajo durante TFG .....	56
Figura 4.10: <i>Random bits.vi</i> .....	58
Figura 4.11: <i>BCCH.vi</i> .....	60
Figura 4.12: <i>SCH.vi</i> .....	61
Figura 4.13: <i>TCH.vi</i> .....	63
Figura 4.14: <i>Bursts.vi</i> (Caso FB) .....	64
Figura 4.15: <i>Bursts.vi</i> (Caso NB).....	64
Figura 4.16: <i>Bursts.vi</i> (Caso SB) .....	65
Figura 4.17: <i>CreateMF-51.vi</i> (case A).....	66
Figura 4.18: <i>CreateMF-51.vi</i> (case B).....	66
Figura 4.19: <i>CreateMF-51.vi</i> (case C).....	66
Figura 4.20: <i>CreateMF-51.vi</i> (case D) .....	66
Figura 4.21: <i>Modulador.vi</i> .....	68
Figura 4.22: <i>ConformaTrama.vi</i> .....	70
Figura 4.23: <i>FrameComprobation.vi</i> .....	72
Figura 4.24: <i>TxTramaUSRP.vi</i> .....	73
Figura 5.1: Marca temporal de referencia VSA .....	75
Figura 5.2: Marca temporal <i>slot</i> .....	75
Figura 5.3: Marca temporal trama .....	76
Figura 5.4: Comparación FCCH MATLAB .....	77
Figura 5.5: Comprobación sincronización FCCH.....	78
Figura 5.6: Configuración <i>Broadcast High Capacity</i> .....	79
Figura 5.7: Resultado <i>Broadcast High Capacity</i> .....	80

Figura 5.8: Configuración TCH en BTS Estructurada .....	81
Figura 5.9: Resultado Configuración TCH en BTS Estructurada .....	81
Figura 5.10: Ejemplo configuración incorrecta BTS Estructurada.....	82
Figura 5.11: Configuración SCH+TCH en BTS-Control Básico .....	83
Figura 5.12: Resultado en SCH capturado con BTS-Control Básico.....	84
Figura 5.13: Resultado en TCH capturado con BTS-Control Básico.....	84
Figura 5.14: Configuración FCCH .....	85
Figura 5.15: Resultado FCCH .....	85

# Índice de tablas

<i>Table 0.1 (Introduction): Maximum levels to electric, magnetic and electro-magnetic fields</i> .....	XX
Tabla 1.1: Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos .....	6
Tabla 5.1: Secuencias de entrenamiento <i>Normal Burst</i> .....	79
Tabla 6.1: Desglose de tareas y horas .....	87
Tabla 6.2: Tiempo real empleado cada mes.....	88
Tabla 6.3: Costes de personal.....	88
Tabla 6.4: Costes de materiales.....	89
Tabla 6.5: Costes Totales .....	89
Tabla ANEXO B: Especificaciones NI USRP-2920 .....	101



# Glosario

<b>ADC</b>	<i>Analog to Digital Converter</i>	Conversor analógico digital
<b>AGCH</b>	<i>Access Grant CHannel</i>	Canal de concesión de acceso
<b>AMPS</b>	<i>Advanced Mobile Phone System</i>	Sistema telefónico móvil avanzado
<b>AuC</b>	<i>Authentication Center</i>	Centro de Autenticación
<b>BCCH</b>	<i>Broadcast Control CHannel</i>	Canal de control de difusión
<b>BSC</b>	<i>Base Station Controller</i>	Controlador de estación base
<b>BSIC</b>	<i>Base Station Identity Code</i>	Código de Identidad de la Estación Base
<b>BSS</b>	<i>Base Station Subsystem</i>	Subsistema de estación base
<b>BTS</b>	<i>Base Transceiver Station</i>	Transceptor de estación base
<b>CBCH</b>	<i>Cell Broadcast Channel.</i>	Canal de difusión de celda
<b>CCCH</b>	<i>Common Control CHannel</i>	Canal de Control Común
<b>CCH</b>	<i>Control CHannel</i>	Canal de control
<b>CEPT</b>	<i>Conférence Européenne des Postes et Télécommunications</i>	Conferencia europea de correo postal y telecomunicaciones
<b>DAC</b>	<i>Digital to Analog Converter</i>	Conversor digital analógico
<b>DCS1800</b>	<i>Digital Cellular System 1800.</i>	Sistema móvil digital 1800.
<b>EDGE</b>	<i>Enhanced Data rate for Global Evolution</i>	Tasas de Datos Mejoradas para la evolución de GSM
<b>E-FACCH/F</b>	<i>Enhanced circuit switched full rate Fast Associated Control Channel.</i>	Canal lógico de control asociado al E-TCH/F

<b>EIR</b>	<i>Equipment Identity Register</i>	Registro de identidades de equipos
<b>E-TCH/F</b>	<i>Enhanced circuit switched Full rate Traffic CHannel</i>	Canal de tráfico mejorado de conmutación de circuitos a velocidad completa
<b>E-TCH/F28.8</b>	<i>Full rate 28.8 kbps Enhanced circuit switched Traffic Channel</i>	Canal de tráfico mejorado de conmutación de circuitos a velocidad completa de 28.8kbps para datos de usuario
<b>ETSI</b>	<i>European Telecommunication Standard Institute</i>	Instituto europeo de estándares de telecomunicaciones
<b>FACCH/F</b>	<i>Full rate fast Associated control Channel.</i>	Canal de control rápido asociado al TCH/F.
<b>FACCH/H</b>	<i>Fast TCH/F Associated Control CHannel</i>	Canal de control rápido asociado al TCH/F
<b>FCCH:</b>	<i>Frequency Control CHannel</i>	Canal de Control de Frecuencia
<b>FDD</b>	<i>Frequency Division Duplexing</i>	Duplexación por División en la Frecuencia
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple por División en la Frecuencia
<b>GMSK</b>	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>	Modulación por desplazamiento mínimo con pulsos <i>gaussianos</i>
<b>GPRS</b>	<i>Global Packet Radio Service</i>	Servicio General de Paquetes vía Radio
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile</i>	Sistema Global para las comunicaciones Móviles
<b>HLR</b>	<i>Home Location Register</i>	Registro local de abonados
<b>IMSI</b>	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>	Identidad internacional del abonado móvil
<b>ISDN</b>	<i>Integrated Services Digital Network</i>	Red digital de servicios integrados
<b>LabVIEW</b>	<i>Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench</i>	

<b>LAI</b>	<i>Localization Area Identity</i>	Identidad de Área de Localización
<b>LTE</b>	<i>Long-Term Evolution</i>	Evolución a largo plazo
<b>ME</b>	<i>Mobile Equipment</i>	Equipo móvil
<b>MoU</b>	<i>Memorandum of Understanding</i>	Memorándum de entendimiento
<b>MS</b>	<i>Mobile Station</i>	Estación Móvil.
<b>MSC</b>	<i>Mobile Switching Center</i>	Centro de conmutación móvil
<b>MSISDN</b>	<i>Mobile Subscriber ISDN Number</i>	Número de abonado móvil para ISDN
<b>MSRN</b>	<i>Mobile Subscriber Roaming Number</i>	Numero de abonado móvil para itinerancia
<b>NCH</b>	<i>Notification CHannel</i>	Canal de notificaciones
<b>NI</b>	<i>National Instruments</i>	
<b>NMC</b>	<i>Network Management Center</i>	Centro de gestión de red
<b>NMT</b>	<i>Nordic Mobile Telephony</i>	Telefonía móvil nórdica
<b>NSS</b>	<i>Network and Switching Subsystem</i>	Subsistema de red y conmutación
<b>OMC</b>	<i>Operation and Maintenance Center</i>	Centro de mantenimiento y operación
<b>OMSS</b>	<i>Operation and Maintenance SubSystem</i>	Subsistema de operación y mantenimiento
<b>OSI</b>	<i>Open System Interconnection</i>	Interconexión de sistema abierta
<b>PC</b>	<i>Personal Computer</i>	Ordenador Personal
<b>PCH</b>	<i>Paging CHannel</i>	Canal de localización
<b>PCS</b>	<i>Personal Communications Service</i>	Servicio de comunicaciones personal

<b>PDN</b>	<i>Public Data Network</i>	Red pública de datos
<b>PDTCH</b>	<i>Packet Data Traffic CHannel</i>	Canal de tráfico de paquetes de datos
<b>PLMN</b>	<i>Public Land Mobile Network</i>	Red móvil pública terrestre
<b>PSTN</b>	<i>Public Switched Telephone Network</i>	Red telefónica pública conmutada
<b>RACH</b>	<i>Random Access CHannel</i>	Canal de Acceso Aleatorio
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i>	Radio Frecuencia
<b>RFCH</b>	<i>Radio Frequency CHannel</i>	Canal de Radio Frecuencia
<b>RFN</b>	<i>Reduced Frame Number</i>	Número de trama reducido
<b>RPE-LTP</b>	<i>Regular Pulse Excitation – Long Term Prediction</i>	Predicción a largo plazo por excitación del pulso regular
<b>SACCH/C4</b>	<i>Slow SDCCH/4 Associated Control Channel</i>	Canal de control asociado a SDCCH/4
<b>SACCH/C8</b>	<i>Slow SDCCH/8 Associated Control Channel</i>	Canal de control asociado a SDCCH/8
<b>SACCH/M</b>	<i>Slow TCH/F o E-TCH/F Associated Control Channel for Multislot configurations</i>	Canal de control asociado a TCH/F o E-TCH/F para configuraciones <i>multislot</i>
<b>SACCH/TF</b>	<i>Slow TCH/F o E-TCH/F Associated Control CHannel</i>	Canal de control lento asociado al TCH/F, o E-TCH/F.
<b>SACCH/TH</b>	<i>Slow TCH/H Associated Control Channel</i>	Canal de control lento asociado al TCH/H
<b>SAR</b>	<i>Specific Energy Absorption Rate</i>	Índice de absorción específico de energía
<b>SCH</b>	<i>Synchronization CHannel</i>	Canal de sincronización
<b>SDCCH</b>	<i>Stand-alone Dedicated Control CHannel</i>	Canal de control dedicado
<b>SDR</b>	<i>Software Defined Radio</i>	Radio definido por software

<b>SIM</b>	<i>Subscriber Identity Module</i>	Módulo de Identidad del abonado
<b>SMG</b>	<i>Special Mobile Group</i>	Grupo especial para móviles
<b>SMS</b>	<i>Short Message Service</i>	Servicio de mensajes cortos
<b>SS7</b>	<i>Signalling System #7</i>	Sistema de señalización número 7
<b>TACS</b>	<i>Total Access Communication System</i>	Sistema de comunicación de acceso total
<b>TCH/EFS</b>	<i>Enhanced Full Speech Traffic CHannel</i>	Canal de tráfico de voz a velocidad mejorada completa
<b>TCH/F</b>	<i>Full rate Traffic CHannel</i>	Canal de tráfico a tasa completa
<b>TCH/F9.6</b>	<i>Full rate-9.6kbps Traffic Channel</i>	Canal de tráfico para datos de usuario a velocidad completa
<b>TCH/FS</b>	<i>Full rate Speech Traffic CHannel</i>	Canal de tráfico para voz a velocidad completa
<b>TCH/H</b>	<i>Half rate Traffic CHannel</i>	Canal de tráfico a velocidad mitad
<b>TCH/H4.8</b>	<i>Half rate-4.8kbps Traffic Channel</i>	Canal de tráfico para datos de usuario a velocidad mitad, 4.8 kbps
<b>TCH/HS</b>	<i>Half rate Speech Traffic CHannel</i>	Canal de tráfico de voz a velocidad mitad
<b>TCH</b>	<i>Traffic CHannel</i>	Canal de tráfico
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i>	Acceso múltiple por división en el tiempo
<b>TFG</b>		Trabajo Fin de Grado
<b>TIC</b>		Tecnologías de la Información y la Comunicación
<b>TMSI</b>	<i>Temporary Mobile Subscriber Identity</i>	Identidad temporal del abonado móvil
<b>TN</b>	<i>Time Slot Number</i>	Número de intervalo de tiempo ( <i>time slot</i> )
<b>TS</b>	<i>Training Sequence</i>	Secuencia de entrenamiento

<b>TSC</b>	<i>Training Sequence Code</i>	Código de la secuencia de entrenamiento
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal
<b>USRP</b>	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>	Software universal para radio periférico
<b>VI</b>	<i>Virtual Instrument</i>	Instrumento Virtual
<b>VLR</b>	<i>Visitor Location Register</i>	Registro de Localización de Visitantes
<b>WCDMA</b>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha
<b>WP</b>	<i>Working Party</i>	Grupo de Trabajo

# Selected Sections in English

## A. Extended Abstract

This section presents the dissertation here included, and also its abstract and its most important items.

The topic of this dissertation is mobile communications. This concept may sound very recent, above all for teenagers, but older people may know that this concept is well settled since many years ago. Nowadays, there are people who think it is something necessary to our life, and many people have become dependent on the mobile telephone. It is a very common disease among young people and unfortunately it is increasing.

Apart from the problems that anyone likes talking about, mobile communications have made our lives easier. They have made possible to have access to an emergency number in Europe (112), people who use this technology are available everywhere, and moreover, nowadays they allow us to do a lot of things that some years ago they would have been unthinkable, such as checking our bank account activity or setting a doctor's appointment.

Mobile communications have been developed a lot since its origin. In Spain, they started in the 80's with the deployment of the first mobile generation (NMT and TACS), in which the voice transmission was analogue with a frequency modulation. Just after I had been born, the second mobiles generation (2G) was deployed with GSM (1991). It is funny to think how I've been working on something that was created on the same year I was born. Leaving jokes out, the mobile network continued growing with the 3G in the 00's, reaching 2 Mb/s. Currently it is starting the installation of the 4G, reaching 100 Mb/s in the downlink, and 50 Mb/s in the uplink.

It could be said that mobile communications have been growing on a new standard per decade approximately.

The choice of the mobile generation to make the dissertation was the biggest problem. Finally, I decided to choose the mobile generation which more influenced the world: the second one (2G) [1]. It was the first time that digital transmission was used, and also it was the first to establish an emergency number in Europe (112), and also in USA and Australia, although in these two last countries it is directed to the local emergency number 911 and 000, respectively.

Regarding more technical issues, this dissertation offers a design on GSM base station (BTS) functionalities, in particular some of its control channels and its procedures. A BTS is a base transceiver station that is a fixed installation which performs like a transmitter and a receiver with mobile stations and works as the access point of the network.

The design has been made using a platform Software Defined Radio (SDR), which gives capacity to make hardware stuff with software. The device used is NI USRP, and the programming language is LabVIEW.

At the beginning of the work both components (NI USRP [2] and LabVIEW [3]) were unknown for the student, because of that before doing any implementation a lot of time getting to know them has been spent.

Below, all the specific devices used in the dissertation are defined:

- Transceiver NI USRP: Built by National Instruments and very useful in radio frequency and communications laboratories, with wide frequency coverage, multiple RF configurations and one transmission port and two reception ports.

- Vector signal generator Agilent ESG E4438C [4]: It is used to check that the signal sent by the USRP was equal to generated by this one which is the correct signal. It can work with standards such as GSM, UMTS (WCDMA) or WiFi.

- Vector signal analyzer Agilent VSA 89600 [5]: This analyzer is formed by two well differenced parts: the hardware which receives the signals in RF and base band, and the software which analyzes the received signals and gives the results. Therefore, these components have been used to evaluate if my signal was right or wrong. Like the Agilent ESG E4438C, this device can work with a lot of standards.

These are the most specialized tools which have been used, although I also used a PC with a network card of 1 GHz in order to communicate itself with the NI USRP.

As to the software, the whole dissertation has been designed in a graphical programming language called LabVIEW, a very useful development environment for this kind of projects, because it is provided with many necessary tools to engineering issues.

The final objective of this dissertation was the fact that the system could be used by Mobile Communications students in their laboratory practices. So, this work gives a



closer vision of the GSM standard. This is the first version, because the whole system should be formed by a receiver as well so as to interact with the transmitter. Therefore, the developed functions point to the user and how a user will be able to interact with the devices and the designed program.

The dissertation started very early to avoid any unexpected event, above all the hardware part which was unknown for me. The working period goes from 1<sup>st</sup> June to 30<sup>nd</sup> April. Firstly, it started getting to know and studying the GSM standard, but also the devices which were going to be used. Later, it was a stage of deciding and designing. What functionalities of the BTS were going to be installed were decided. Finally, the installation of the design, tests and conclusions were made.

The functionalities of the BTS are based on what channels had to be installed. The logical channels tell us what kind of information wants to be transmitted. Later, these channels are transmitted in physical channels, which are the transmission mode that is the time interval and the frequency.

In this way, what logical channels were the most important to build were decided. These are:

- TCH/FS: Traffic channel which send voice information to 13 Kbit/s.
- BCCH: It contains general information about the base station and the configuration of other control channels.
- FCCH: It is used for the acquisition of the frequency. It is a pilot signal so as to settle the mobile stations' reception.
- SCH: It contains frame synchronization information and identity of the base station (BSIC, Base Station Identity Code).
- PCH: It is used sending page requests to mobile stations.
- AGCH: It is used for allocating a dedicated control channel to a mobile station.
- SDCCH/C8: It is a control channel which signalises the TCHs.
- SACCH/C8: It is a control channel associated to SDCCH/8.
- SACCH/TF: It is a control slow channel associated to TCH/F.

These channels form a hierarchical structure called multiframe. On the one hand, with control channels there is a multiframe 51 (MF-51), formed by 51 frames. On the other hand, with traffic channels there is a multiframe 26 (MF-26), formed by 26 frames.

This project performs in this way: firstly multiframe of every type are created, and later frames (8 intervals) are formed taking out information from there. When the multiframe are empty, they are created again. Concretely, 4 multiframe are formed:

- One MF-51 which carries high capacity broadcast channels (FCCH, SCH, BCCH, AGCH and PCH).
- Two MF-51 which carry dedicated channels (SDCCH/C8 and SACCH/C8), because each one of them can signalise to 8 traffic channels, and the system has been designed to be able to signalise 16.
- One MF-26 which carries traffic channels and its slow signalization.

Respectively, the LabVIEW units which create each multiframe are showed in the Figure 0.1, Figure 0.2 and Figure 0.3:

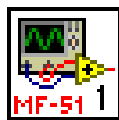


Figure 0.1 (Extended Abstract):  
**MF-51**



Figure 0.2 (Extended Abstract):  
**MF-51 Dedicated**



Figure 0.3 (Extended Abstract):  
**MF-26**

Above it is explained the design of one of the two options which is given to the user (Framed BTS), because apart from making this design which is more approximate to the reality (where the channels are transmitted in the right order), other option has been designed whose BTS functionalities are more reduced (Basic Control BTS). Here in this last one, only the SCH, FCCH and TCH/FS channels can be transmitted. However, it is really useful because you can analyze their details and understand better the system performance.

In both designs, the user can configure the frame in the way he wants. Therefore he chooses what kind of channels goes in each time interval (slot). In the Framed BTS, the user only can choose the type of channels because these are introduced in multiframe as I said. Besides, if the user makes a wrong configuration, the programme does not work, and it displays a message explaining the error. Otherwise, in the Basic Control BTS it has been explained that the user only can transmit those three channels, thus the user only will be able to choose between those ones instead of choosing the type.

The interfaces which the user interacts with in both designs are the followings Figure 0.4 and figure 0.5:

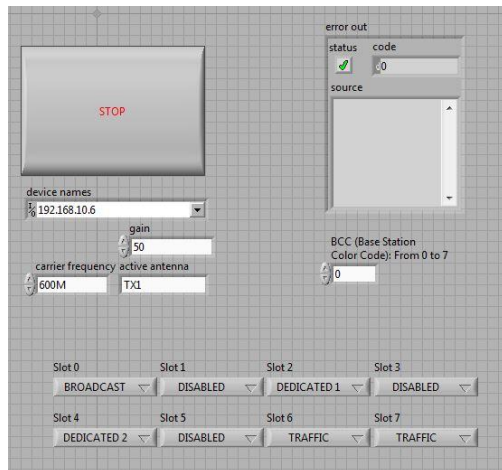


Figure 0.4 (Extended Abstract): **Framed BTS**

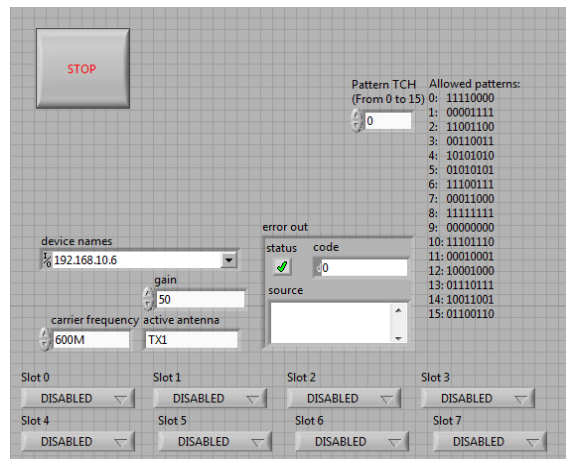


Figure 0.5 (Extended Abstract): **Basic Control BTS**

From my point of view, I think that the installed system can be very useful in mobile communications laboratories to make some subject's practices, because it offers a great and real view about GSM. Of course, it is a first version because it is possible to continue working on the same line and make many more real designs, with more functionalities and completing this one, making a receiver which is able to interact with the transmitter and so on.

So, there are a lot of opened doors to future projects and versions of this dissertation. If my opinion is used for something, I would recommend anyone who likes the mobile communications world trying to do a similar design or a better version, because it provides you with a lot of knowledge of signal processing and the performance of the standard in which you work. Also, you feel really satisfied when you realize that your project works like the real one does.

## B. Introduction

How often do you hear that there are no better results than those achieved with teamwork? To tell the truth, the history shows it.

This dissertation is about GSM, the second mobile generation and a clear example of getting excellent results throughout teamwork, concretely a lot of European countries working together.

This work is focused on the physical implementation of some BTS (Base Transceiver Station)'s functionalities in a Software Defined Radio platform based on USRP (Universal Software Radio Peripheral) equipments manufactured by National Instruments.

This dissertation is considered being up to date because mobile communications are used by most people, and moreover, the GSM standard is the most extended in the

world, having 82% of terminals operating in the market belonging to this standard. Besides, GSM is one of the earliest standards of the digital mobile telephony, serving as a base on the following standards. Because of that, apart from reinforcing the knowledge relating to this standard, it will make easier understanding the new ones like UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [6] and LTE (Long Term Evolution) [7]. Therefore, not only does this dissertation offer new knowledge and new learning techniques, but also it makes the student reinforce the awareness learned at the university.

## **Objectives**

The purpose of this project was focused on just one point: To develop the Implementation of one BTS's functionalities of the GSM standard. Concretely, this work is destined for teaching, and this is going to be used by students. Therefore, the developed functions have to be designed thinking in the user and how the student will be able to interact with the devices and the designed program. It should be flexible enough and robust as well to avoid any problem.

A completed system would be composed by a transmitter and a receiver. However, due to the dissertation is very enclosed temporally, the transmitter has been chosen, leaving the receiver to be done in further work.

To conclude, the work that is presented here has been made while the student enjoyed a fellowship at the Signal Theory and Communications Department, funded by the Spanish Ministry.

## **Approaching the problem**

Below, the technological and regulatory settings are going to be presented.

### **State of the art:**

This dissertation is inside of a changeable technological setting. It's known that the mobile communications are changing constantly.

The designed system can be compared with a GSM BTS with reduced functionalities. However, devices capable of performing these functions have already been brought onto the market. In particular, in the Mobile Communications laboratory at the university there are outstanding hardware such as Agilent E4438C and Agilent VSA 89600. The first one performs as a receiver or transmitter, and the second one performs as a receiver. Apart from these devices, there is similar hardware. Concretely manufactured hardware by Rohde&Schwarz such as the R&S SMW200A Vector Signal

Generator [8], and the R&S FSQ Signal Analyzer [9], that they are able to work with a great variety of standards like WLAN 802.11a/b/g/j/p/n/ac, WCDMA/HSPA/HSPA+, 3GPP LTE or GSM/EGPRS/EDGE, among others.

Although nowadays the laboratory practices are made with Agilent's hardware, this project goes one step beyond. The aim is that the students stop seeing GSM like something abstract in which some parameters are configured and you have whatever you want. With this design, the students will be able to see the GSM standard like something closer, and they will implement BTS's functionalities.

So, the designed project and the devices situated in the laboratory are really different because the first one is made in a SDR platform in order to make easier the students' understanding. The choice of software like the tool so as to make this project has been decided because it's thought that it is easier building something with software than with hardware.

The programming language used is LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) and the main hardware is the NI USRP, explained in following chapters in detail.

### **Regulatory framework:**

The regulatory framework of this project is based on Telecommunications General Law in 1998, with its subsequent change in 2003. This law is about the whole telecommunications topic. Because of that, here are the four main points:

- Article 43, point 2: Where the radio electric spectrum management rules are established.
- Article 44, point 1, section a): Where it's said that the Government is the organism that decides, controls and check the tolerable radio electric transmission levels.
- Article 45, point 44: Where one technical inspection is established before the use of the radio electric spectrum in anywhere.
- Twelfth extra regulation: Where the radio communication infrastructure deployment is established.

The use of broadcasting services has increased, and therefore the citizens are suffering the transmissions of these technologies. To avoid injuring people, the Royal Decree 1066/2001 establishes the maximum levels to electric, magnetic and electro-magnetic fields (Table

Frequency	E field intensity (V/m)	H field intensity (A/m)	B field ( $\mu\text{T}$ )	Power density equal to plain wave ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
400-2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	$f/200$

Table 0.1 (Introduction): **Maximum levels to electric, magnetic and electro-magnetic fields**

The designed BTS transmits a maximum of 100mW. It has been chosen 600MHz to transmit because there isn't any interference there. So, the allowed power density is  $600/200=3\text{W}/\text{m}^2$ , that is really above the BTS's power, and therefore the designed BTS is right regarding the rules.

### **Dissertation's description**

To write this dissertation, a practical work has been carried out before. Moreover, a lot of theoretical studies have been made before any practical work, and firstly a theoretical basis has been studied in order to get to know the size of the problem in addition to the environment in which is worked.

Mainly, this dissertation is divided into these two parts:

- 1) The theoretical part, which encompasses the chapters 2 and 3 where the history and the principal features of GSM are explained, and later in the chapter 3 the hardware and software that have been used.
- 2) The practical part in chapters 4 and 5, where is the project development. Later, some tests are presented to show the results of the project.

To conclude, a budget and conclusions are presented.

### **Schedule**

The project has been developed from the 1<sup>st</sup> of October to the 20<sup>th</sup> of June.

The tasks succession has been as follows:

1. Search of GSM standard documentation and study of it.
2. Study of the existing channels and decision of which were going to be implemented.
3. Study of the devices, blocks implementation allowed by the devices and the main channels as well.
4. Testing, results writing and validation.
5. Obtaining conclusions.
6. Writing the dissertation.

To conclude, it must be said that there are a lot of overlaps among the different work phases, because some of them are closely related. For example, many tests have been made while blocks implementations were being developed, and so it was being checked in order to be corrected in case it was wrong.

## **C. Conclusions**

In this chapter, the general conclusions developed from this work are presented. Moreover, the further work that can be elaborated is included.

### **General Conclusions**

As you have been able to check, in this dissertation one part of a Base Transceiver Station's functionality has been designed, concretely its signaling and traffic channels.

From the beginning, the objective was more than understood. It was going to be intended as a teaching tool for students, so they could make their laboratory practices. Because of that, the work had to be flexible and robust enough so that students can handle it and get to know the GSM standard in the best possible way.

Two different designs were decided. On the one hand we have the Framed BTS, and on the other hand the Basic Control BTS. The first one was designed in order to be adjusted to reality, with the channels ordered correctly and being allowed only some real configurations. As for the second one, it is much more flexible than the first one and it was more thought to the university teaching than the other one.

Both of their cores are really similar, because they make use of the same functions, except the nearest functions students. The reason is that the Basic Control BTS must be more flexible than the Framed BTS to avoid some problem when students do their practices.

The whole design has been created in a SDR (Software Defined Radio) platform. Although it seems easier, it is sometimes difficult to control. That is the first time the student has made a work like this, using this kind of tools, devices and programming language (LabVIEW).

However, finally the student has learnt a lot about mobile communications and this type of design, and he is able to try to make any work referred to this topic.

At the beginning, one of the weakest points predicted was the hardware. It had just been bought by the university and nobody was sure about if it was going to succeed. The technical provisions were known, but not the practical ones. It has some limitations such as the fact that two signals cannot be transmitted at the same time, or

that it has difficulties in sending and receiving signals at once. However, in spite of these two limitations, the hardware election has been a complete success, and the designed BTSs can work perfectly using it.

Regarding the length of the dissertation, the expectations have been met. There were some delays but they were made up successfully.

To conclude, the prediction made about the dissertation's technical implementation has been reached. The further students will be able to use this design to understand better the GSM standard, besides analyzing it and seeing the limitations or improvements that could be made in the following mobile communications generations 3G and 4G.

### **Further Work**

This dissertation leaves the door open for a great variety of further works. This BTS is a first version, and from it a lot of versions and improvements can be made, such as:

- One BTS with more functionality can be designed, supporting more channels like the Half rate Speech Traffic Channel (TCH/HS) and its associated signaling SACCH/TH.
- Taking advantage of this BTS belonging to the second mobile communications generation (2G), more progresses can be made and why not trying the 2.5G with its 8PSK modulation, either the third or fourth generation (3G and 4G), previously being sure of the hardware limitations and if this one is going to support it.
- Apart from transmitters, creating some receiver would be interesting. For example one mobile station's receiver that is able to interact with the designed transmitter and receive some *sms* or simulating a call. So, there would be a complete system, although it is more difficult because synchronization algorithms and demodulating should be created.
- So far, it has been worked with the downlink, but also it could be possible to design some channels functionalities on the uplink. Therefore the system would be more adjusted to reality. In these two last cases it would be necessary the use of two NI USRP so as to perform as transmitter and the receiver.

Definitely, as many versions as you want can be designed or as many as were supported by the hardware.



# 1. Introducción

¿Cuántas veces le han dicho que no hay mejores resultados que los que se obtienen cuando se trabaja en equipo? Yo, como estudiante, he oído centenares de veces esa frase y la verdad es que la historia lo demuestra.

En este Trabajo Fin de Grado se tiene un claro ejemplo de los exitosos resultados que se obtienen cuando se trabaja en equipo. Así fue como nació GSM (*Global System for Mobile*) [1], por una labor en conjunto de algunos de los países de Europa.

Este trabajo se centra en la implementación física de parte de la funcionalidad de una estación base de GSM en una plataforma *Software Defined Radio* (SDR) basada en equipos de *National Instruments USRP (Universal Software Radio Peripheral)*. Más adelante se explicará con mayor detalle las herramientas utilizadas y las fases por las que se ha pasado para su realización.

Como en la gran mayoría de los proyectos, este comienza con una parte de análisis y estudio del tema del que trata, así como de los entornos y tecnologías utilizadas para su elaboración, y finaliza con las pruebas para demostrar que se ha cumplido con el objetivo final.

Se ha podido comprobar que en este TFG se trata un asunto tan actualizado hoy en día como es la telefonía móvil. Si además se tiene en cuenta que el estándar con el que se trabaja es GSM [1] que es el más extendido en el mundo, todo cobra mayor sentido y fundamento, sobre todo hacia el alumno que lo ha trabajado ya que le abastece de grandes conocimientos estrechamente relacionados con el grado estudiado, y más concretamente con las comunicaciones móviles.

El estándar GSM cuenta con el 82% de los terminales mundiales en uso, da servicio a más de 3000 millones de usuarios en 212 países distintos, siendo el estándar predominante en Europa, América del Sur, Asia y Oceanía, y con gran extensión en América del Norte.

Además, GSM es uno de los estándares de la telefonía móvil digital más prematuros en el mundo, sirviendo de base a los que surgieron posteriormente, lo cual quiere decir que teniendo afianzados los conocimientos relativos a este estándar, se podrá comprender con mayor facilidad los estándares más nuevos como pueden ser UMTS [6] o LTE [7].

Por lo tanto, el TFG además de ofrecer nuevos conocimientos y nuevas técnicas de aprendizaje, servirá para afianzar los temas aprendidos en el grado estudiado y para avanzar en nuevos aspectos sobre las comunicaciones móviles.

## **1.1. Objetivos**

En este apartado de la memoria se van a tratar los objetivos que a priori debían de cumplirse, y que posteriormente en el apartado de pruebas se demostrará si ha sido así o no.

El fin de este proyecto estaba centrado en un único punto: Desarrollar la implementación de funcionalidades de una Estación Base de GSM (BTS) en una plataforma *Software Defined Radio* a través del NI USRP [2]. En concreto se propuso implementar varios de los canales de control y sus procedimientos para que futuros estudiantes de los grados Ingeniería en Sistemas de Comunicaciones e Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación puedan realizar unas prácticas de laboratorio más reales en las asignaturas Comunicaciones Móviles y Planificación de Redes Móviles. Por tanto, las funciones a desarrollar van orientadas al usuario y a cómo un alumno podrá interactuar con los dispositivos y el programa diseñado [10].

Un sistema completo estaría compuesto por un transmisor y un receptor. Sin embargo, debido a que el TFG está muy acotado en el tiempo, se ha preferido optar por el transmisor en primer lugar y dejar el receptor para futuras líneas de trabajo.

Para que se puedan realizar prácticas de manera adecuada utilizando el trabajo desarrollado, el sistema deberá ser flexible de tal forma que se pueda manipular por parte de usuarios que no estén familiarizados con el entorno, ofreciendo así una interfaz intuitiva con los pasos bien definidos [10].

Los párrafos anteriores hablan del mayor propósito que se planteó cuando se comenzó el TFG. Sin embargo, es evidente que para conseguir ese resultado hay que pasar por unas fases previas e ir cumpliendo paso a paso los hitos marcados. Esto se verá en el Cronograma y se explicará en profundidad en el apartado de Diseño y Desarrollo.

Por último, decir que el trabajo aquí presentado ha sido realizado mientras se ha llevado a cabo una beca de colaboración con el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, beca financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

## **1.2. Planteamiento del problema**

A continuación se va a exponer el entorno tecnológico y regulador en el que este TFG se incluye.

### **1.2.1. Análisis del estado del arte**

Este Trabajo Fin de Grado se enmarca dentro de un entorno tecnológico en continuo cambio. En concreto trata de las comunicaciones móviles, un tema que como se sabe está continuamente actualizándose y mejorándose cada día.

El sistema aquí diseñado se puede comparar con una estación base de GSM con funcionalidades reducidas, es decir, que no tenga toda la capacidad que una BTS real porque eso llevaría años de trabajo y habría que adquirir un hardware que lo soporte, sino que realice las funcionalidades necesarias para que los estudiantes de las asignaturas anteriormente citadas puedan hacer sus prácticas de laboratorio y comprendan el funcionamiento del sistema GSM [1].

Sin embargo, ya se han sacado al mercado productos que realizan funciones bastantes parecidas al que aquí se ha diseñado. En concreto, en el laboratorio de Comunicaciones Móviles se tiene hardware puntero como es el Agilent ESG E4438C [4] o el Agilent VSA 89600 [5], explicados en el apartado Instrumentación utilizada. Ambos pueden trabajar con muchos estándares además de GSM [1], pero aquí nos centraremos en este. El primero de ellos puede actuar como receptor, o como transmisor, pudiéndose diversos los canales en los intervalos de tiempo deseados, mientras que el segundo ejerce la función de receptor para que en el PC se pueda analizar la señal recibida.

Además de la instrumentación que existe en el laboratorio de comunicaciones móviles de la universidad, existen otros aparatos de características similares como por ejemplo los fabricados por Rohde&Schwarz [11]. En concreto el generador de señales vectoriales R&S<sup>®</sup> SMW200A *Vector Signal Generator* [8] y el analizador de señales R&S<sup>®</sup> FSQ *Signal Analyzer* [9], que pueden trabajar con numerosos estándares como por ejemplo WLAN 802.11a/b/g/j/p/n/ac, WCDMA/HSPA/HSPA+, 3GPP LTE o GSM/EGPRS/EDGE *Evolution*, entre muchos otros. Estos nuevos mencionados son análogos al Agilent ESG E4438C y Agilent VSA 89600, respectivamente.

Actualmente, las prácticas de Comunicaciones Móviles se realizan con los instrumentos fabricados por Agilent Technologies, lo que puede hacer pensar que este TFG no tiene gran aplicación puesto que las funciones que con él se quieren realizar ya las realiza este hardware. Sin embargo, con este TFG se quiere ir más allá, y la intención es que los estudiantes dejen de ver este sistema como algo abstracto en el

que se configuran unos parámetros y ya tienes lo deseado. Con el diseño de este TFG se podrá adquirir una visión más cercana de GSM, observando que la implementación de algunas de las funcionalidades de una BTS pueden realizarse por ellos mismos, y además se adquirirá una visión más clara del proceso a seguir desde que se crea una información que se desea transmitir hasta que finalmente se transmite.

El hardware actualmente instalado en el laboratorio no quedará inutilizado por supuesto, ya que sólo hay uno disponible en la universidad, además de que se tratan de unos dispositivos caros y bastantes más completos que el que aquí se diseña, pero que al ser de fabricantes profesionales no se puede comprender bien la manera en la que están diseñados porque para nosotros es todo hardware. Con ellos sólo se pueden configurar unos parámetros para generar una señal o recibirla, mientras que con el trabajo aquí presentado se podrá implementar partes del estándar de GSM. En este TFG no se trata de todo hardware, y es que como se ha mencionado se utilizará una plataforma *Software Defined Radio* en la que la mayor parte del hardware estará suplementado por software.

Por ello se ha elegido este diseño en el que prácticamente todo está realizado por software, porque se piensa que las implementaciones realizadas de esa manera serán más fáciles de comprender por los estudiantes.

Por último especificar que el lenguaje de programación utilizado es LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) [3] y el hardware que forma parte del sistema diseñado es el NI USRP [2], ambos presentados en el capítulo Herramientas hardware y software utilizadas.

### **1.2.2. Marco regulador**

El marco regulador del presente TFG principalmente está basado en la Ley General de Telecomunicaciones del año 1998 [12], con su posterior modificación en el 2003 [13]. Esta ley se divide en 8 títulos que son:

- Título I. Disposiciones generales
- Título II. Explotación de redes y prestación de servicios de comunicaciones electrónicas en régimen de libre competencia.
- Título III. Obligaciones de servicio público y derechos y obligaciones de carácter público en la explotación de redes y en la explotación de servicios de comunicaciones electrónicas.
- Título IV. Evaluación de la conformidad de servicios y aparatos.
- Título V. Dominio público radioeléctrico.
- Título VI. La administración de las telecomunicaciones.

Título VII. Tasas en materia de telecomunicaciones.

Título VIII. Inspección y régimen sancionador.

Sin embargo, en lo que aquí respecta nos centraremos en las emisiones radioeléctricas de las bandas de GSM, ya que esta ley como se puede comprobar trata todos los asuntos del ámbito de las telecomunicaciones. Por lo tanto, de esta ley sólo citaremos cuatro puntos principales:

- Artículo 43, punto 2: Donde se establecen las normas de la gestión del espectro radioeléctrico, es decir, a todo lo que se sujeta cualquier entidad que tenga uso del espectro radioeléctrico y los procedimientos de administración, gestión, planificación y control del mismo.
- Artículo 44, punto 1, apartado a): Donde se establece que el gobierno es quien determina, controla e inspecciona los niveles de emisión radioeléctrica tolerable.
- Artículo 45, punto 4: Donde se establece una inspección previa al uso del dominio público radioeléctrico por parte de cualquier entidad sea cual sea, para asegurar que se cumplen las condiciones impuestas.
- Disposición adicional duodécima: Donde se reglamenta el despliegue de infraestructuras de radiocomunicación.

Los límites de exposición a las emisiones radioeléctricas están regulados en el Real Decreto 1066/2001 [14]. Con el incremento del uso de los servicios de radiodifusión por parte de los ciudadanos, estos mismos se han visto sometidos a la exposición de campos electromagnéticos, los cuales no son buenos para la salud. Por ello, el objetivo de este Real Decreto es establecer unos máximos de radiación, dependiendo de las características de cada antena transmisora.

A continuación se establecen los niveles máximos de las bandas de 900 MHz y 1800 MHz, que son las más usadas por parte de GSM en España:

“Entre 100 kHz y 10 GHz se proporcionan restricciones básicas del SAR para prevenir la fatiga calorífica de cuerpo entero y un calentamiento local excesivo de los tejidos” [ANEXO II, Apartado 2c) [14]], donde el SAR es el índice de absorción específica de energía (SAR, *Specific energy Absorption Rate*).

Con referencia al cuadro 1 del Real Decreto 1066/2001 donde se establecen las restricciones de 0 Hz a 300 GHz, para nuestras bandas obtenemos lo siguiente:

- Un SAR en medio cuerpo entero de 0.08 W/kg
- Un SAR localizado (cabeza y tronco) de 2 W/kg

- Un SAR localizado (miembros) de 4 W/kg

Además, respecto al cuadro 2 del Real Decreto 1066/2001 en el cual se establecen los niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, obtenemos los siguientes datos incluidos en la Tabla 1.1.

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B ( $\mu$ T)	Densidad de potencia equivalente de onda plana ( $W/m^2$ )
400-2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	$f/200$

Tabla 1.1: Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos

donde f es según se indica en la columna de Gama de frecuencia.

Para demostrar que la BTS diseñada se encuentra dentro de la normativa, se calculará la densidad de potencia equivalente de onda plana permitida a la frecuencia de trabajo en esta BTS (600MHz) y se comparará con la máxima emitida por el NI USRP:

Según el ANEXO B donde se incluyen las especificaciones del USRP, la máxima potencia transmitida por este dispositivo es de 100 mW. Si tenemos en cuenta que la densidad de potencia de referencia a 600 MHz es de  $600/200=30W/m^2$ , se puede concluir que por muy cerca que se esté de la antena del NI USRP nunca alcanzará esos valores impuestos por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo y por lo tanto la BTS diseñada cumple con la normativa.

Por último, decir que todos los ciudadanos tienen a su disposición la web del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, donde podemos comprobar los niveles de radiación de cualquier estación base que esté instalada en el territorio español medidos por profesionales capacitados para ello [15].

### 1.3. Descripción de la memoria

Para la realización de esta memoria, previamente se ha llevado a cabo un trabajo práctico. Además, todo lo que en esta memoria se comenta ha sido contrastado previamente con su estudio teórico, por lo que antes de implementar cualquier diseño se ha pasado por una fase con un fundamento teórico para conocer las dimensiones del mismo y el entorno en el que se trabaja.

Principalmente esta memoria se divide en las dos partes que se acaban de comentar.

Por un lado se plasma una parte teórica en los puntos 2 y 3. En ellos, en primer lugar se presenta una visión al lector del tema del trabajo, comentando la historia del sistema GSM además de sus principales características. En segundo lugar, se detalla toda la instrumentación hardware y software utilizada.

Por otro lado, existe la parte práctica que se documentan en los puntos 4 y 5, donde se comenta el desarrollo del proyecto desglosando más profundamente los módulos más importantes para la consecución de los objetivos. Posteriormente, se exponen las pruebas que demuestran el cumplimiento de los mismos.

Para finalizar, se presenta un presupuesto del trabajo realizado, así como unas conclusiones y las futuras líneas de trabajo del mismo.

## **1.4. Cronograma**

El TFG comienza el 1 de octubre y finaliza el 20 de junio, habiendo transcurrido 8.5 meses entre las fechas de inicio y fin.

A continuación se muestra de manera esquemática la planificación y distribución temporal del trabajo. El tiempo empleado para cada una de las fases de trabajo no incluye ni fines de semana ni festivos universitarios, locales o nacionales, como fueron los días: 11 y 12 de octubre; 1 de noviembre; 6, 17, 24, 25 y 31 de diciembre; 1 y 7 de enero; 18, 28 y 29 de marzo; 1, 2 y 3 de mayo. Además, la duración de cada etapa indica el comienzo y fin de cada una de ellas, pero no el empleado exclusivamente a la correspondiente tarea ya que como se verá a continuación en el diagrama de Gantt existen numerosos solapamientos entre las mismas:

1. Documentación sobre el estándar GSM y su estudio en profundidad
  - 1.1. Búsqueda de documentación del estándar GSM: 3 días.
  - 1.2. Estudio en profundidad del mismo: 15 días.
2. Evaluación de los canales descendentes a implementar
  - 2.1. Estudio de los canales existentes en GSM: 13 días.
  - 2.2. Decisión de los canales a implementar: 13 días.
3. Analizar las características del equipo (NI USRP-2920 [2]) para determinar qué bloques implementar y llevarlo a cabo
  - 3.1. Estudio del funcionamiento de los dispositivos a utilizar: 15 días.
  - 3.2. Implementar finalmente los bloques que nos permite el equipo: 78 días.
    - 3.2.1. Implementar cada uno de los canales que se han decidido implementar
4. Obtención de resultados

- 4.1. Realización de pruebas de cada uno de los módulos del proyecto: 61 días.
- 4.2. Documentar los resultados obtenidos: 61 días.
- 4.3. Validación de pruebas: 61 días.
5. Sacar conclusiones: 4 días.
6. Realización de la memoria: 30 días.

De un modo general se puede decir que el trabajo fin de grado ha tenido una duración de 38 semanas (8,5 meses aproximadamente). El número de horas para cada día empleado en el TFG es de una media de 3.

Para tener una visión de manera gráfica de las actividades que se preceden, del orden que se ha seguido para realizarlas y de las fechas de inicio y fin de cada una de ellas, se adjuntan en Figura 1.1, Figura 1.2 y Figura 1.3 tres gráficos con un diagrama de Gantt.

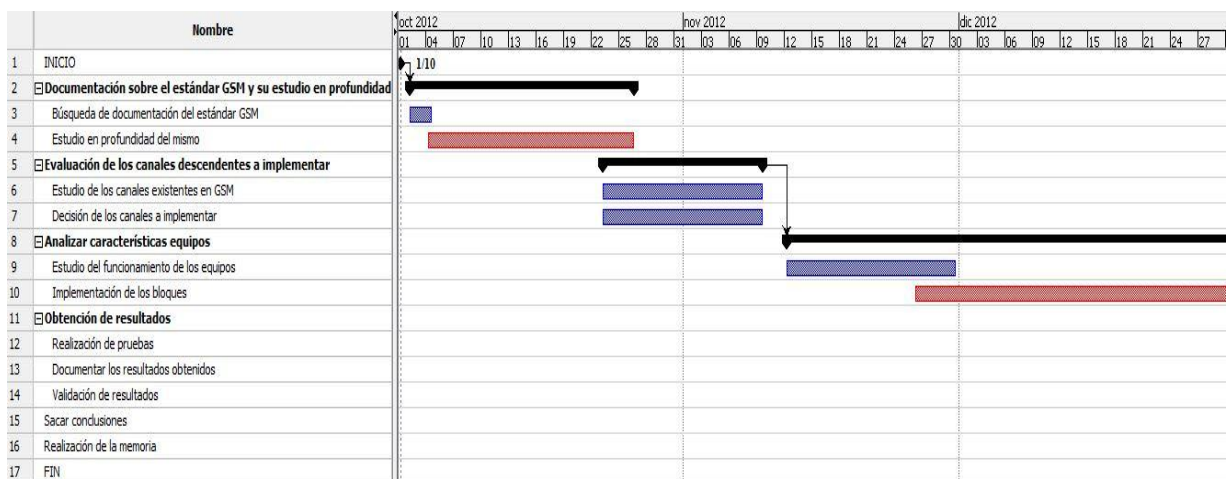


Figura 1.1: Diagrama de Gantt (parte 1)

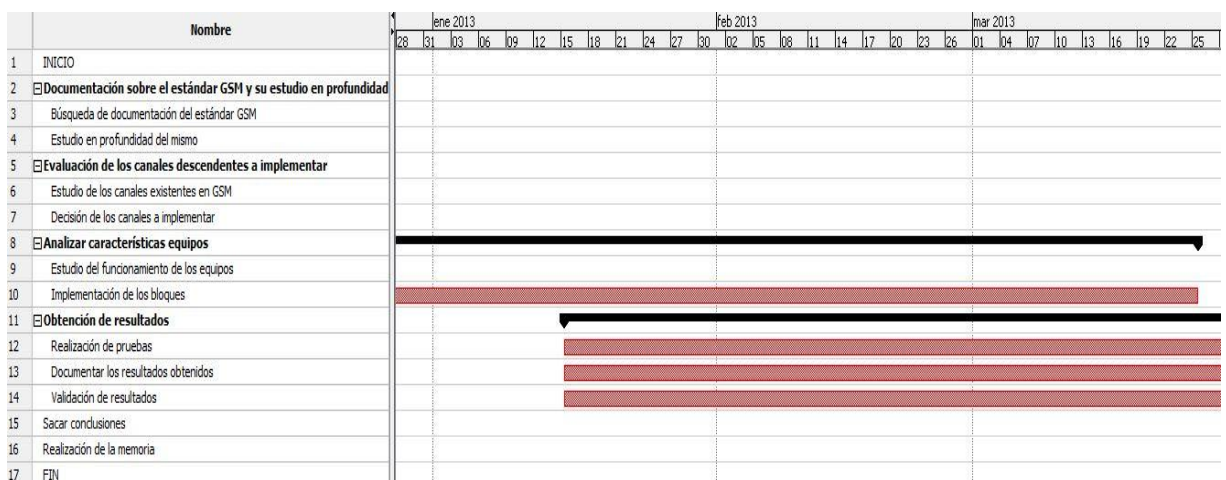


Figura 1.2: Diagrama de Gantt (parte 2)





## 2. Estándar GSM

En este capítulo se expone una visión extendida del sistema de comunicaciones móviles GSM. Se comienza explicando los orígenes del sistema, el porqué de su diseño, y se acabará presentando su arquitectura y el nivel físico que es el pilar básico en el que se sustenta este trabajo.

### 2.1. Historia de GSM

Hasta la puesta en marcha del sistema GSM (1991), en el ámbito nacional gobernaban dos sistemas móviles: NMT (*Nordic Mobile Telephony*) y TACS (*Total Access Communication System*) [pp. 24-39 [16]].

- El primero de ellos fue desarrollado en los países nórdicos de Europa, que comenzó a dar cobertura en Suecia en septiembre de 1981 y poco después en Noruega, Dinamarca y Finlandia.
- El segundo nació como un derivado del AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) estadounidense, y comenzó a dar servicio en 1985 en Reino Unido.

Estos sistemas móviles están basados en la transmisión de voz de forma analógica con una modulación en frecuencia. Usaban bandas alrededor de 450 MHz (NMT) y de 900 MHz (TACS).

Para que nos hagamos una idea de lo rápido que evolucionó la telefonía móvil en la década de los 80, al principio sólo podían ser construidos equipos de telefonía móvil sobre un vehículo (Figura 2.1). A mediados de los 80 apareció un equipo portátil que pesaba unos pocos kilogramos y tenía una autonomía de unas pocas horas. Sobre 1988 surgieron los primeros equipos que se podían llevar en la mano, pero aún eran lo suficientemente grandes como para llevarse en un maletín (Figura 2.2). Sin embargo, no fue hasta 1990 cuando aparecieron los primeros terminales que podían ser guardados en un bolsillo y que pesaban menos de 400 gramos.



Figura 2.1: Representación de un teléfono en un vehículo [17]



Figura 2.2: Representación de un teléfono móvil de 1988 [18]

Junto con esta evolución del tamaño de los terminales móviles, fueron decreciendo enormemente los precios.

Tras el funcionamiento exitoso del sistema NMT, algunos países europeos se estaban dando cuenta de que los sistemas analógicos tenían algunas limitaciones:

- La demanda del servicio móvil en Europa era bastante mayor que la capacidad que podían proporcionar las redes analógicas existentes.
- Las redes móviles existentes (TACS y NMT) no eran interoperables.

Esto, y el hecho de que ningún país europeo individualmente podía hacer frente a una inversión tan elevada para desarrollar un nuevo sistema móvil que mejorase estas carencias, hicieron que algunos países llevasen a cabo este proyecto conjuntamente. Ya sólo quedaba distribuirse el trabajo. Dentro del CEPT<sup>1</sup> (*Conférence Européenne des Postes et Télécommunications* [19]) se creó un grupo (GSM: "*Groupe Spécial Mobile*") cuya principal función fue la de crear un nuevo estándar que sostenga las bases de un nuevo sistema de radiocomunicación para Europa que trabaje en la banda de los 900 MHz. Por ello, se considera primordial para la creación de GSM el hecho de haber reservado dos bandas de frecuencia de ancho 25 MHz, decisión que se tomó en 1978 pensando en una futura comunicación móvil en Europa.

El primer encuentro de este grupo fue en diciembre de 1982 en Estocolmo bajo la presidencia de Thomas Haug.

La elaboración del estándar llevó casi una década de trabajo, con múltiples pruebas y cambios funcionales sobre la marcha. Además, y por petición de Reino Unido, se creó una versión de GSM en las frecuencias de los 1800 MHz, con dos bandas de 75 MHz cada una. A esta variante se la llamó DCS1800 (*Digital Cellular System 1800*) y su objetivo era alcanzar mayores capacidades en zonas urbanas. Con el paso del

---

<sup>1</sup> CEPT: organismo de estandarización que se encuentra en cada país europeo y que se encarga de la administración pública de las comunicaciones postales y de telecomunicaciones.

tiempo se han ido reservando más bandas de frecuencia para GSM que se pueden consultar en el ANEXO A.

El trabajo para la elaboración del sistema se subdividió y dio lugar a tres “*working parties*” en 1984:

- WP1 (*Working Party 1*): encargado de los servicios.
- WP2 (*Working Party 2*): encargado de la transmisión radio.
- WP3 (*Working Party 3*): para otros asuntos como la arquitectura de red, el protocolo de señalización, interfaces abiertas entre nodos de la red, etc.

Más tarde, apareció un WP4 en el que se hablaba de la implementación de servicios de datos.

En 1988, el ETSI (*European Telecommunications Standard Institute* [20]) fue creado y todas las actividades técnicas del CEPT fueron transferidas al ETSI, incluido GSM. Al contrario que el CEPT, el ETSI no tenía ningún tipo de restricción para las administraciones. En ese momento, los *Working Parties* fueron llamados “*Sub Technical Committees*” (GSM1, GSM2, GSM3 y GSM4).

Al final del año 1991, año en el que se implanta el sistema de 900 MHz, las actividades referentes a la generación de comunicaciones móviles post-GSM pasaban a formar parte del *GSM Technical Committee* (renombrado como SMG<sup>2</sup>, “*Special Mobile Group*”), cuyos “*Sub Technical Committees*” pasaron a llamarse SMG1, SMG2, SMG3 y SMG4, con la adhesión del SMG5 dedicado a la generación post-GSM, el UMTS.

Al igual que el comité de GSM trabajaba para establecer los mismos desarrollos y avances del sistema por toda Europa, los operadores de telecomunicación públicos europeos también lo hacían. Así, el 7 de septiembre de 1987 firmaron el MoU (*Memorandum of Understanding in Copenhagen* [21]). A mediados del 1991, se incorporaron al *memorandum* países no pertenecientes al CEPT, y como era de esperar, finalmente GSM se expandió por fuera de Europa. Así, muchos operadores de países no europeos se preveía que iban a adoptar los estándares de GSM, como por ejemplo: Emiratos Árabes Unidos, Hong Kong, Nueva Zelanda y Australia, este último convirtiéndose oficialmente en el primer país no europeo que firmó el GSM MoU.

Durante la década de los 80, período en el cual se elaboró el sistema GSM, se fueron estableciendo una serie de objetivos que debía cumplir el nuevo sistema de comunicaciones [pp. 24-39 [16]]. Se pueden dividir en ocho:

---

<sup>2</sup> El nombre del grupo fue cambiado de GSM a SMG para distinguirlo del sistema que trabaja en los 900 MHz, que es conocido desde entonces como GSM (*Global System for Mobile communications*).

1. Itinerancia internacional: El sistema debe ser diseñado de tal manera que las estaciones móviles se puedan usar en todos los países con el sistema implantado.
2. Interoperabilidad de equipos: El nuevo sistema debe ofrecer esta característica tanto en la red como en el acceso radio.
3. Interfuncionamiento con redes existentes: PSTN (*Public Switched Telephone Network*), ISDN (*Integrated Services Digital Network*) and PDN (*Public Data Network*).
4. Amplia gama de servicios y facilidades.
  - 4.1. Voz.
  - 4.2. Datos.
  - 4.3. Servicios suplementarios: reencaminamiento o reenvío de llamadas, restricción de llamadas, identificación de línea llamante, etc.
5. Servicios en un amplio conjunto de estaciones móviles: Además de estaciones móviles implantadas en vehículos, el sistema debe ser capaz de dar servicio a estaciones móviles portátiles y transportables.
6. Elevadas prestaciones
  - 6.1. Cobertura: El sistema deberá permitir la implementación de la cobertura común PLMNs (*Public Land Mobile Networks*).
  - 6.2. Capacidad: Se debe ofrecer un sistema cuya capacidad sea bastante mayor que la ofrecida en los sistemas de la primera generación.
  - 6.3. Calidad de servicio: El sistema debe garantizar una calidad de servicio igual o superior a la del primer sistema analógico de 900 MHz, así como una encriptación de la información de usuario sin que esto influya en el coste.
7. Uso eficiente del espectro: Debe permitir la utilización de la banda de frecuencia completa comprendida en 890-915 MHz y 935-960 MHz.
8. Económicamente atractivo: El sistema debe ser enfocado hacia un coste adecuado, sobre todo en las unidades móviles.

Como la mayoría de los sistemas, es muy difícil crearlo sin tener ninguna referencia en otro. Así pues, en este caso, el sistema que mayor influenció en el desarrollo de GSM fue la ISDN, tanto en la definición de servicios como en los protocolos de señalización (SS7 para el núcleo de la red, *Signalling System #7*) [pp. 41-42 [22]]. Un ejemplo de esa gran influencia se puede ver en el modelo de capas (OSI, *Open System Interconnection*) utilizado para la definición de protocolos. Otra característica clave de GSM es que el sistema está basado en la transmisión digital, decisión que no fue

tomada hasta el 1987. Además, otros hechos claves en cuanto al método de transmisión que se decidieron fueron:

- Utilización de “bandas medias” (200 kHz de separación entre portadoras), diferenciándose de los sistemas de banda estrecha (12.5 o 25 kHz) y banda ancha<sup>3</sup>.
- Transmisión de voz digital a una tasa que no excede los 16 kbit/s.
- Multiplexación en el tiempo de orden 8.
- Prestación de salto lento de frecuencia (*slow frequency hopping*).

## 2.2. Diseño celular

Para cumplir algunos de los objetivos que se propusieron en el desarrollo de GSM como por ejemplo proporcionar elevadas prestaciones de cobertura, capacidad y uso eficiente del espectro, se decidió hacer de GSM un sistema celular, un concepto ideado por D.H. Ring en 1947 [23].

Este nuevo concepto se basaba primordialmente en dos principios:

- 1) La zona de cobertura se divide en zonas más pequeñas llamadas células (Figura 2.3), cuyo tamaño depende de la demanda de tráfico en esa zona.
- 2) Se reutilizan las frecuencias en distintas células separadas una distancia suficiente para que la interferencia cocanal sea pequeña.

A su vez, la zona de cobertura está dividida en agrupaciones, que son el conjunto de células que utilizan distintas frecuencias. Una decisión importante en el diseño de un sistema celular es el tamaño de la agrupación, ya que se debe encontrar un equilibrio entre capacidad, rendimiento espectral e interferencia (cuanto menor sea el tamaño de la agrupación, menos frecuencias serán necesarias y menor distancia cocanal, lo que supone una mayor probabilidad de interferencia en la célula cocanal).

---

<sup>3</sup> De entre los sistemas de banda ancha, uno de los sistemas propuestos tenía 6 MHz de espacio entre portadoras.

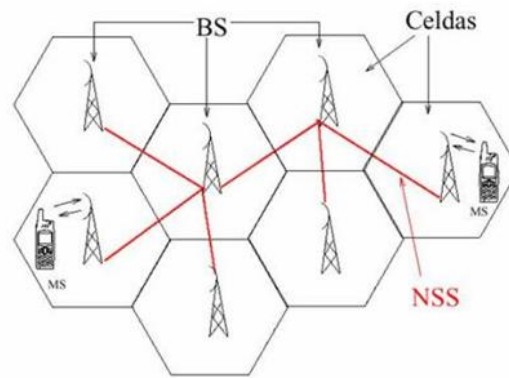


Figura 2.3: Representación del diseño celular de GSM [24]

En entornos de cobertura difícil y urbanos por su densidad de tráfico se suelen utilizar antenas directivas en cada estación base, de tal manera que cada célula se divide en 3 sectores y cada antena tenga un diagrama de radiación que abarque  $120^\circ$  (Figura 2.4). Con ello se consigue una menor radiación en direcciones distintas a su vector principal de radiación, ya que es una característica propia de las antenas directivas.

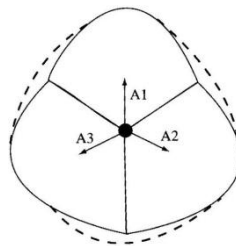


Figura 2.4: Ejemplo de BTS trisectorial [Figura 6.2 [25]]

Para la planificación celular (Figura 2.5, Figura 2.6) se utilizan formas poligonales que cubran toda la zona geográfica sin solapes. Esta característica la cumplen los triángulos, los cuadrados y los hexágonos, siendo este último el más utilizado porque es el que más superficie abarca a igual radio de cobertura  $\mathcal{R}$ . Así pues, la planificación celular de GSM está basada en hexágonos, porque es la forma geométrica que permite tener un menor número de células y por lo tanto ahorrar costes.

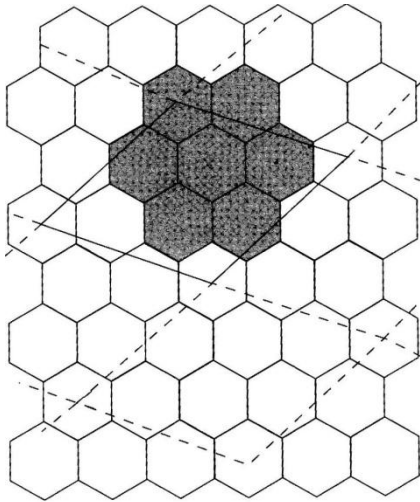


Figura 2.5: Planificación celular GSM [Figura 6.4 [25]]

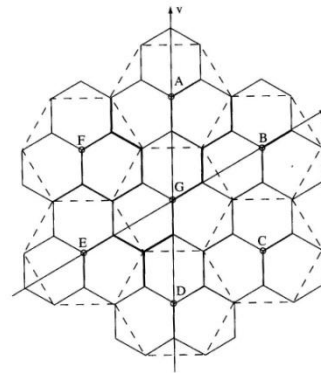


Figura 2.6: Planificación celular con células trisectoriales [Figura 6.7 [25]]

## 2.3. Arquitectura

Ya nos podemos hacer una idea de la complejidad de GSM. Precisamente por eso, la arquitectura de la red GSM se divide en subsistemas que se muestran en la Figura 2.7 y que son un conjunto de equipos que realizan una tarea específica. La red se subdivide en 3 subsistemas:

- Subsistema de estaciones base, BSS (*Base Station Sub-System*).
- Subsistema de red, NSS (*Network and Switching Sub-System*).
- Subsistema de operación y mantenimiento, OMSS (*Operation and Maintenance Sub-System*).

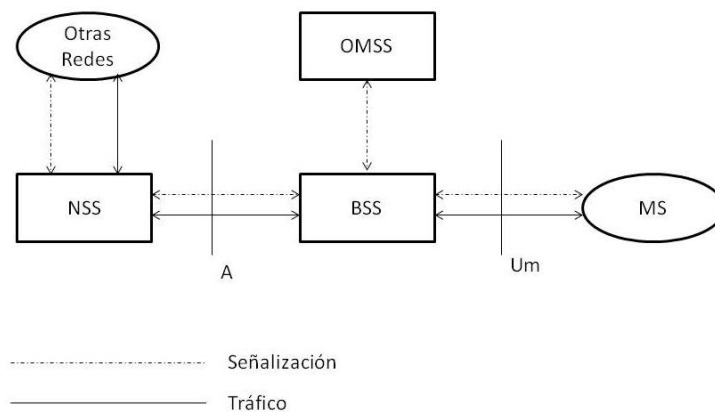


Figura 2.7: Subsistemas de GSM [Fig. 2.9 [22]]

Como se ha comentado, cada subsistema se encuentra dividido por varios equipos que se intercomunican a través de interfaces mediante protocolos de señalización. En la Figura 2.8 se puede observar de forma gráfica esta disposición y la comunicación entre los distintos elementos de la red.



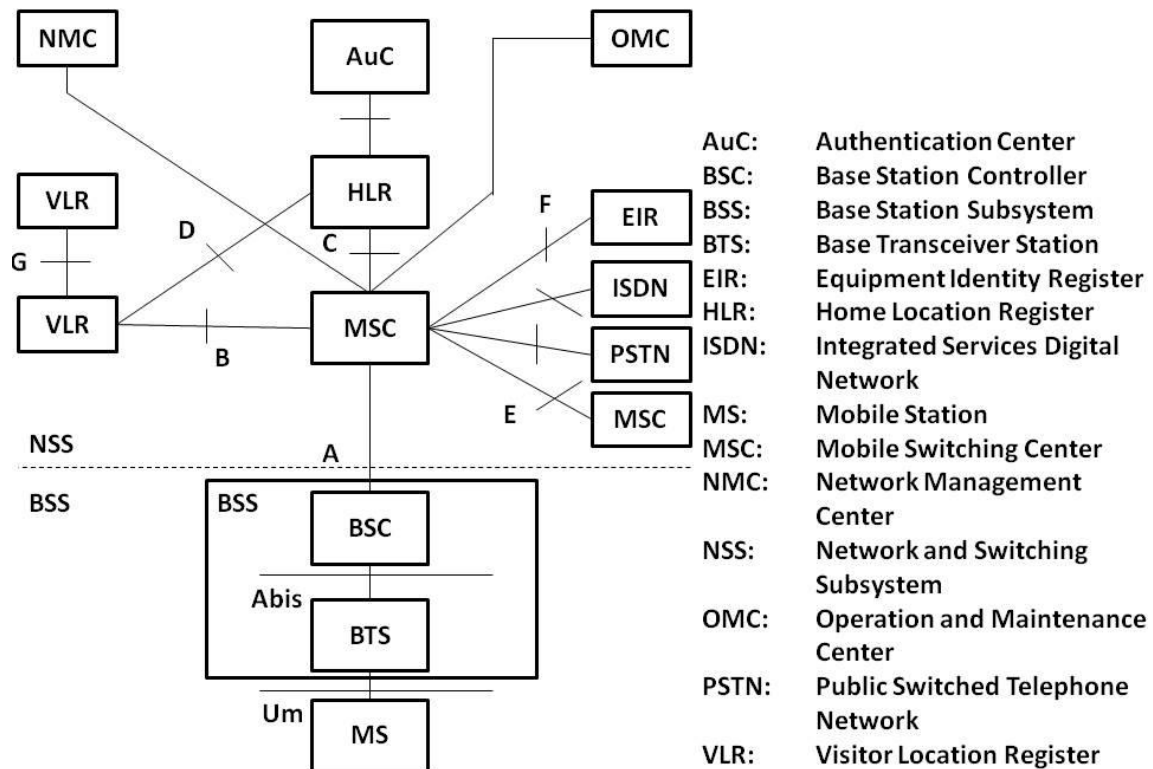


Figura 2.8: Representación de la arquitectura de GSM [Fig. 2.10 [22]]

A continuación se explica brevemente cada uno de los subsistemas de los que está formado GSM, así como de sus módulos, incluyéndose en alguno de los casos figuras para facilitar su comprensión (Figura 2.9, Figura 2.10, Figura 2.11, Figura 2.12, Figura 2.13, Figura 2.14).

**Estación móvil (MS, Mobile Station)**

Formada por:

- SIM (*Subscriber Identity Module*): Es la parte de usuario, es decir, una tarjeta inteligente donde se almacena la información relativa al abonado de la interfaz radio.
- Equipo Móvil (ME, *Mobile Equipment*): Se trata de la parte de equipo, la encargada de llevar a cabo las funciones de transmisión y señalización con la red.

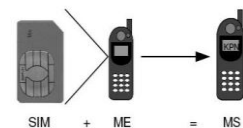


Figura 2.9: Componentes MS [26]

Las funciones principales de la estación móvil son:

- Interfaz para comunicar usuario y red radio.
- Transmisión y recepción de información de usuario y señalización por la interfaz radio ( $U_m$ ).

- Iniciación de la conexión con la red.
- Sintonización de frecuencias y seguimiento automático de las BTS.
- Procesamiento de voz: ADC (*Analog-to-Digital Converter*) y DAC (*Digital-to-Analog Converter*).
- Adaptación de señales y velocidades para señales de datos.

### **Subsistema de estaciones base (BSS)**

Formado por:

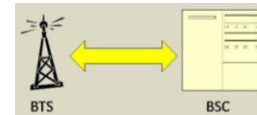


Figura 2.10:  
**Componentes BSS [27]**

- Transceptores de estación base (BTS, *Base Transceiver Station*): Su principal función es la transmisión y recepción radio, aunque también tiene dispositivos de procesado digital.



Figura 2.11: **BTS real [28]**

- Controladores de BTS (BSC, *Base Station Controller*): Controla los recursos radio de varias BTS (asignación/liberación de frecuencias, traspasos, saltos de frecuencias, etc.) y es el encargado de la conexión con la central de conmutación (MSC).



Figura 2.12: **BSC real [29]**

Las funciones principales del subsistema de estaciones base son:

- Transmisión y recepción por el recurso radioeléctrico.
- Localización de las MS para su registro inicial o actualización.
- Establecimiento, supervisión y finalización de llamadas.
- Realización de *handover* (traspaso) intra-BSC (entre BTS dentro de un mismo BSS).
- Procesado de voz y adaptación de velocidades.
- Control de equipos y funciones de reconfiguración.
- Control de mantenimiento rutinario.

### **Subsistema de red (NSS)**

Se trata de la parte núcleo de la red y se forma por:

- Centrales de conmutación (MSC, *Mobile services Switching Centre*): Son centrales telefónicas que realizan las funciones de encaminamiento y conmutación de llamadas.



Figura 2.13: **MSC [27] [30]**

Además sustenta la movilidad y organiza la asignación de los recursos radioeléctricos.

- Registro de usuarios (HLR, *Home Location Register*): Es una base de datos donde están registrados todos los abonados de un operador.



Figura 2.14: HLR [27] [31]

- Se almacenan dos tipos de datos:
  - Permanentes: IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*), MSISDN (*Mobile Subscriber ISDN Number*) e información sobre los servicios.
  - Temporales (actualizables): MSRN (*Mobile Subscriber Roaming Number*), dirección del VLR y dirección de la MSC visitada.
- Registro de usuarios visitantes (VLR, *Visitor Location Register*): Es una base de datos con información de usuarios pasajeros (no permanentes) en esa MSC.
  - Se almacenan datos como: IMSI, TMSI (*Temporary Mobile Subscriber Identity*), MSISDN, MSRN, LAI (*Localization Area Identity*) y datos del abono del usuario.

### **Subsistema de operación y mantenimiento (OMSS)**

Subsistema encargado de la gestión de red y de la seguridad del acceso a la red para usuarios y equipos. Se compone de:

- Centro de autenticación (AuC, *Authentication Centre*): Realiza funciones de seguridad, en concreto, se centra en la autenticación de los usuarios.
  - Almacena los IMSI y las claves de identificación secretas  $k_i$  de cada usuario.
- Base de datos de equipos (EIR, *Equipment Identity Register*): Realiza funciones de seguridad, especialmente en la autenticación de los equipos. Para ello contiene 3 listas:
  - Blanca: equipos homologados.
  - Gris: equipos que es necesario localizar.
  - Negra: equipos robados o defectuosos que no pueden utilizar el sistema.
- Centro de operación y mantenimiento (OMC, *Operation and Maintenance Centre*): Realiza y supervisa las funciones de control y gestión de la red de carácter técnico y/o administrativo.
- Centro de gestión de red (NMC, *Network Management Centre*): Realiza funciones de gestión similares al OMC, pero son más generales ya que su ámbito es toda la PLMN (*Public Land Mobile Network*).

## 2.4. Nivel físico

El nivel físico del sistema GSM viene caracterizado por una serie de normas que establecen el modo de utilización de los recursos radioeléctricos disponibles. Por ello, es de especial importancia para el TFG aquí presente ya que la mayor parte del mismo reside en el nivel físico.

A continuación se presentan esos requerimientos para el correcto funcionamiento de la interfaz Um.

### 2.4.1. Canales: lógicos y físicos

En GSM existen dos tipos de canales:

- 1) Por un lado se encuentran los canales lógicos, que son aquellos que agrupan el mismo o similar tipo de información que se quiere transmitir.
- 2) Por otro, se encuentran los canales físicos, que son sobre los que se transmiten los canales lógicos, es decir, que un canal físico viene determinado por el *slot* (tiempo y frecuencia) que se va a usar para transmitir.

A continuación, se centra la atención en los primeros y se detalla cada uno de ellos:

#### 2.4.1.1. Canales lógicos

En GSM existen dos tipos de canales lógicos: Canales de tráfico (TCH, *Traffic Channel*) y canales de control (CCH, *Control Channel*) [32] [33].

##### Canales de tráfico:

Son utilizados principalmente para llevar la voz codificada del usuario.

Existen unos canales lógicos de tráfico para conmutación de paquetes (PDTCH/U, PDTCH/D, *Packet Data Traffic Channel UpLink/DownLink*) que se originaron con la aparición de las redes 2.5G (GPRS, *Global Packet Radio Service*; EDGE, *Enhanced Data rate for Global Evolution*; EDGE Evolution). Sin embargo, como este TFG se centra en el sistema GSM donde existe una conmutación de circuitos, nos centraremos únicamente en los canales de esta segunda generación de móviles:

- 1) *Full rate Traffic CHannel* (TCH/F): 22.8kbps.
- 2) *Half rate Traffic CHannel* (TCH/H): 11.4 kbps.
- 3) *Enhanced circuit switched Full rate Traffic CHannel* (E-TCH-F): 69.6 kbps.

Los tres canales son bidireccionales, es decir, pueden ir en el enlace de subida (*UpLink*) o en el de bajada (*DownLink*). A su vez, estos canales se pueden dividir en

canales para llevar voz codificada y canales para llevar datos de usuario. Aquí se incluyen los más importantes:

a) Canales para llevar voz codificada:

- I. TCH/FS (*Full rate Speech*): tráfico de voz a velocidad total.
- II. TCH/HS (*Half rate Speech*): tráfico de voz a velocidad mitad.
- III. TCH/EFS (*Enhanced Full Speech*): tráfico de voz a velocidad total mejorado.

b) Canales para llevar datos de usuario:

- I. TCH/F9.6 (*Full rate-9.6kbps*): para datos de usuario a velocidad total para 9.6 kbit/s.
- II. TCH/H4.8 (*Half rate-4.8kbps*): datos de usuario a velocidad mitad para 4.8 kbit/s.
- III. E-TCH/F28.8 (*Full rate-28.8kbps*): datos de usuario a velocidad total para 28.8 kbit/s.

Se pueden realizar configuraciones *multislots* para conexiones de conmutación de circuitos, es decir, las que existen en GSM. Se definen como múltiples canales *full rate* (de 1 a 8 canales) asignados al mismo MS. La configuración *multislot* será simétrica si todos los canales son bidireccionales (TCH/F) y asimétrica si al menos uno es unidireccional (TCH/FD).

**Canales de control:**

Este tipo de canales están destinados a llevar información de señalización y sincronización.

Aquí se incluyen los más relacionados con el TFG. Sin embargo, también existen otros canales como los llamados compactos, utilizados en determinados tipos especiales de BTS. Se pueden subdividir en cuatro categorías:

1. Canales de difusión (*broadcast*).

1.1. Canales de corrección de la frecuencia (*Frequency Correction CHannel*, FCCH): transmite información de corrección de la frecuencia de la MS.

1.2. Canales de sincronización.

1.2.1. *Synchronization CHannel* (SCH): contiene 2 parámetros codificados.

- Código de la identidad de la BTS (BSIC): 6 bits antes de la codificación del canal que corresponden a 3 del código de color PLMN y 3 del código de color de la BS.
- Nº de la trama TDMA reducido (RFN): 19 bits antes de la codificación del canal:

- $T1: 11 \text{ bits} = FN \text{ div}(26 \times 51)$
- $T2: 5 \text{ bits} = FN \text{ mod}(26)$
- $T3': 3 \text{ bits} = (T3-1) \text{ div } 10$

donde:

- $T3 (6 \text{ bits}) = FN \text{ mod } 51$
- $FN = n^\circ \text{ de trama TDMA}$

1.3. *Broadcast Control CHannel* (BCCH): difunde información general de la estación base y parámetros de configuración de otros canales de control como son:

- CCCH\_CONF: Parámetro que indica la configuración de los canales de control comunes (CCCH).
- BS\_AG\_BLKRES: Indica el número de bloques de los CCCH reservados para mensajes de AGCH.
- BS\_PA\_MFRMS: indica el número de multitramas 51 (véase [El recurso físico](#)) entre transmisión de mensajes de PCH a móviles del mismo grupo de *paging*.
- Un último parámetro que indica si se admite el uso de conmutación de paquetes.

2. Canales de control comunes (CCCH, *Common Control CHannels*):

- 2.1. *Paging CHannel* (PCH): descendente, para avisar a los móviles de una llamada entrante.
- 2.2. *Random Access CHannel* (RACH): ascendente, para solicitar la asignación de un SDCCH.
- 2.3. *Access Grant CHannel* (AGCH): descendente, para asignar un SDCH o directamente un TCH.
- 2.4. *Notification CHannel* (NCH): descendente, para notificar a estaciones móviles de grupo de voz y llamadas de difusión de voz.

3. Canales de control dedicados.

- 3.1. *Slow TCH/F* o *E-TCH/F Associated Control CHannel* (SACCH/TF): Canal de control lento asociado al TCH/F, o E-TCH/F.
- 3.2. *Full rate fast Associated control CHannel* (FACCH/F): Canal de control rápido asociado al TCH/F.
- 3.3. *Slow TCH/H Associated Control CHannel* (SACCH/TH): Canal de control lento asociado al TCH/H.
- 3.4. *Fast TCH/F Associated Control CHannel* (FACCH/H): Canal de control rápido asociado al TCH/F.

- 3.5. *Stand-alone Dedicated Control CHannel (SDCCH/8)*: Cuatro de ellos se corresponden con un canal físico básico separado, combinados con CCCH.
  - 3.6. *Slow SDCCH/8 Associated Control CHannel (SACCH/C8)*: Asociados a los SDCCH/8.
  - 3.7. *Stand-alone Dedicated Control CHannel (SDCCH/4)*: Cuatro de ellos se corresponden con el mismo canal físico básico que los CCCH.
  - 3.8. *Slow SDCCH/4 Associated Control CHannel (SACCH/C4)*: Asociados a los SDCCH/4.
  - 3.9. *Slow TCH/F o E-TCH/F Associated Control Channel for Multislot configurations (SACCH/M)*: Es análogo al SACCH/TF. Su parte descendente es SACCH/MD.
  - 3.10. *Enhanced circuit switched full rate Fast Associated Control Channel (E-FACCH/F)*: Canal lógico de control asociado al E-TCH/F.
4. *Cell Broadcast CHannel (CBCH)*: de bajada, para llevar la información del servicio de mensajes cortos (SMS) de difusión (SMSCB). Usa el mismo canal físico que el SDCCH.

#### **2.4.2. El recurso físico**

En el sistema GSM existe tanto un acceso por división en el tiempo (TDMA) como un acceso por división en la frecuencia (FDD/FDMA). Es decir, el recurso físico de GSM se encuentra dividido en tiempo y en frecuencia:

- Frecuencia dividida por los canales de radiofrecuencia (RFCH's) dentro de las bandas de GSM, cada uno de los cuales se encuentran separados 200 kHz.
- Tiempo particionado por intervalos (*timeslots*) numerados del 0 al 7 (TN, *Time slot Number*) y tramas TDMA de 0 a  $26 \times 51 \times 2048 - 1 = 2715647$ .

Como se muestra en la Figura 2.15, cada división del recurso físico en tiempo (*timeslot*) tiene una duración de  $3/5200$  segundos ( $\approx 577\mu s$ ), mientras que una trama TDMA, que está formada por 8 *timeslots*, dura aproximadamente 4.62 ms [33].

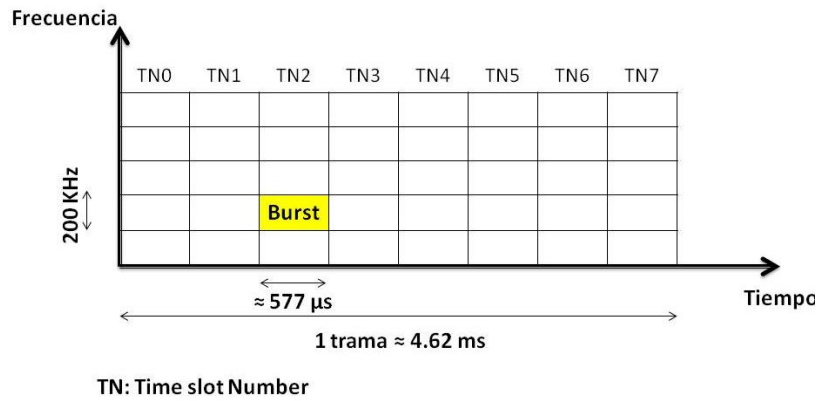


Figura 2.15: Recurso físico [34]

En la Figura 2.16 se puede observar que los *timeslots* en transmisión y en recepción tienen el mismo número pero existe un desplazamiento temporal de 3 intervalos entre ellos. Es decir, el enlace de subida va retrasado 3 *timeslots* con respecto al enlace de bajada para así evitar el uso de duplexores en los terminales móviles. Este tiempo es suficiente para realizar la alineación temporal adaptativa, la sintonización del transceptor y la conmutación entre recepción y transmisión.

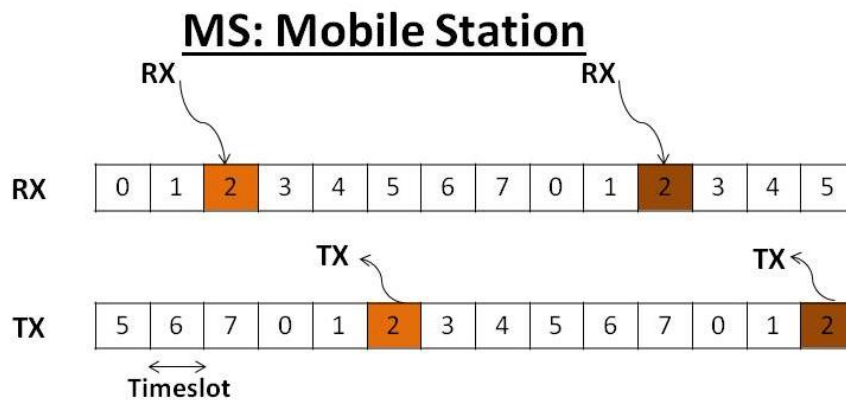


Figura 2.16: Representación del retraso de 3 *timeslots* entre UL y DL

### Burst

Ya se ha comentado que el recurso físico en tiempo está dividido en intervalos (*timeslots*). Ahora queda por saber qué es lo que contiene cada uno de esos intervalos.

Pues bien, a la secuencia que se transmite dentro de cada intervalo se le denomina ráfaga (*burst*) de bits, y está formada por 148 bits más un período de guarda equivalente a 8.25 bits. Dependiendo del tipo de ráfaga que sea, estos números cambiarán como podremos ver a continuación, pero se seguirá cumpliendo que un *timeslot* se encuentra dividido en 156.25 períodos de símbolo (en la modulación de GSM, GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*), un símbolo se corresponde con un bit):



1. Ráfaga Normal (NB, *Normal Burst*) (Figura 2.17):

Para información de canales de tráfico y canales de control, excepto RACH.

Bits de cola 3 bits	Bits encriptados 58 bits = 57 de info. + 1 flag	Secuencia de entrenamiento 26 bits	Bits encriptados 58 bits = 57 de info. + 1 flag	Bits de cola 3 bits	Período de guarda 8.25
------------------------	--	---------------------------------------	--	------------------------	---------------------------

Figura 2.17: *Normal Burst*

2. Ráfaga de corrección de Frecuencia (FB, *Frequency correction Burst*) (Figura 2.18)

Para sincronización de la frecuencia del móvil. Una repetición de FBs es igual al FCCH.

Bits de cola 3 bits	Bits fijos 142 bits 0	Bits de cola 3 bits	Período de guarda 8.25 bits
------------------------	--------------------------	------------------------	--------------------------------

Figura 2.18: *Frequency correction Burst*

3. Ráfaga de Sincronización (SB, *Synchronization Burst*) (Figura 2.19)

Para sincronización del tiempo del móvil. Una repetición de SBs se dice que es un SCH.

Bits de cola 3 bits	Bits encriptados 39 bits	Secuencia de entrenamiento 64 bits	Bits encriptados 39 bits	Bits de cola 3 bits	Período de guarda 8.25 bits
------------------------	-----------------------------	---------------------------------------	-----------------------------	------------------------	--------------------------------

Figura 2.19: *Synchronization Burst*

4. Ráfaga de relleno (DB, *Dummy Burst*) (Figura 2.20)

Se transmiten una serie de bits conocidos y se utiliza para rellenar la transmisión desde la estación base cuando no hay canales de tráfico que transmitir.

Bits de cola 3 bits	Bits fijos 142 bits	Bits de cola 3 bits	Período de guarda 8.25 bits
------------------------	------------------------	------------------------	--------------------------------

Figura 2.20: *Dummy Burst*

5. Ráfaga de Acceso (AB, *Access Burst*) (Figura 2.21)

Para acceso aleatorio y se caracteriza por un largo período de guarda de 68.25 bits o 252  $\mu$ s. Permite distancias de 35 km y se usa en el RACH para el primer acceso del móvil o después de hacer *handover*.

Bits de cola 8 bits	Secuencia de sincronización 41 bits	Bits encriptados 36 bits	Bits de cola 3 bits	Período de guarda 68.25 bits
------------------------	--	-----------------------------	------------------------	---------------------------------

Figura 2.21: *Access Burst*

La descripción de canal físico será hecha en términos de intervalos de tiempo y tramas TDMA y no en términos de ráfaga porque la correspondencia a los canales físicos no se hace en ráfagas.

### **Multiacceso en GSM**

Con lo que se sabe ya del estándar GSM, se puede presuponer que existe una jerarquía de acceso en GSM para facilitar un poco el sistema. Esta jerarquía es la siguiente:

- ⇒ 1 intervalo (*timeslot*)
- ⇒ 8 *timeslots* (TN0 a TN7) forman 1 trama.
- ⇒ 26 tramas forman 1 multitrama MF-26<sup>4</sup>
  - ⇒ 51 MF-26 forman 1 supertrama.
- ⇒ 51 tramas forman 1 multitrama MF-51<sup>5</sup>
  - ⇒ 26 MF-51 forman 1 supertrama.

Finalmente, 2048 supertramas forman una hipertrama, o lo que es lo mismo, una hipertrama está formada por 2715648 tramas (FN0 a FN2715647).

En la Figura 2.22 se muestra un gráfico donde se ve de forma más clara la jerarquía de acceso del sistema:

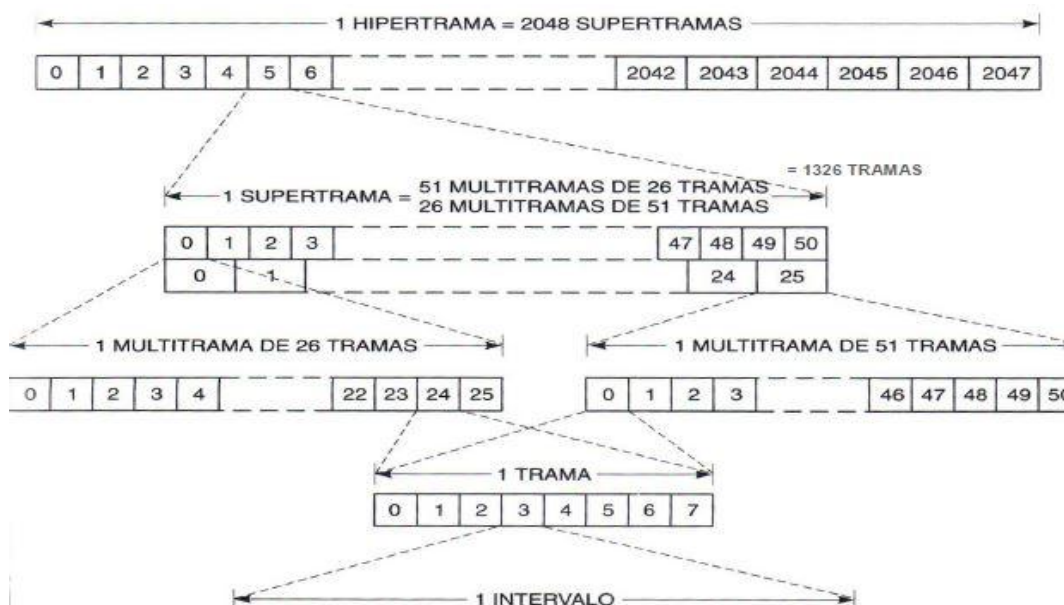


Figura 2.22: Jerarquía de acceso GSM [Fig. 3.37 [22]]

Teniendo en cuenta que la referencia temporal es la duración de una MF-26 que es de 120 ms, se puede extraer bastante información de velocidades y duraciones:

<sup>4</sup> MF-26: utilizada para canales de tráfico (TCH, SACCH/T, FACCH)

<sup>5</sup> MF-51: utilizada para canales de señalización (BCCH, CCCH (NCH, AGCH, PCH, RACH), SDCCH, SACCH/C)

- Duración de una trama:  $120/26 \approx 4.615$  ms.
- Duración de un *timeslot*:  $(120/26)/8 \approx 0.577$  ms.
- Duración multitrama MF-51:  $(120/26) \cdot 51 \approx 235.385$  ms.
- Duración de la supertrama:  $51 \cdot 120 = 6.12$  s. Este tiempo es el período para el cual se repite la organización de todos los canales.
- Velocidad de transmisión:  $156.25 \text{ bits} / 0.577 \text{ ms} \approx 270.833$  kbps.
- Eficiencia espectral:  $\frac{114 \text{ bits de info.}}{0.577 \times 10^{-3} \text{ seg}} \div 200 \text{ kHz} \div 8 \approx 0.1235$  bps/Hz.

## **Procesado en banda base**

Tanto las señales de voz como datos se deben tratar y acomodar para transmitirse en unas condiciones óptimas por el canal radio. Por ello se debe hacer lo siguiente:

- 1- Codificación de fuente (sólo para canales de voz).
  - Consiste en minimizar la información a transmitir pero siempre manteniendo un nivel mínimo de calidad.
  - En GSM, una secuencia de 20 ms de voz compuesta por 160 muestras y estas a su vez por 13 bits/muestra (2080 bits) se consigue reducir en 260 bits.
  - Se realiza mediante una codificación predictiva lineal (RPE-LTP, *Regular Pulse Excited – Long Term Prediction*).
- 2- Codificación de canal.
  - El objetivo de este tipo de codificación es proteger la información que se transmite de posibles perturbaciones en el canal.
  - Para ello se utilizan técnicas de detección y corrección de errores como códigos bloque y convolucional (corrigen errores), códigos *Fire* (detecta y corrige errores de ráfaga) o códigos de paridad (detecta errores).
  - A la salida de la codificación de canal suelen resultar 456 bits.
- 3- Entrelazado.
  - Consiste en “mezclar” los bits para que los errores producidos en la transmisión no afecten a bits consecutivos.
- 4- Cifrado: lo realiza la SIM.

De manera más particular, la voz, una vez fuera del codificador de fuente con 260 bits y ordenados de mayor a menor importancia y sensibilidad ante errores, se procesa de la siguiente manera, mostrada gráficamente en la Figura 2.23:

- Con 260 bits queda la siguiente clasificación:
  - Clase 1A: 50 bits.
  - Clase 1B: 132 bits.

- Clase 2: 78 bits.
- Los 50 bits de clase 1A se pasan por un codificador bloque (53,50) y resultan 53 bits.
- A los 53 bits anteriores junto con los 132 bits de la clase 1B se les añade 4 bits de cola y se pasan por un codificador convolucional  $\frac{1}{2}$  y longitud obligada 5, dando lugar a 378 bits.
- Por último, se añaden a estos 378 bits los 78 bits de la clase 2, formándose los 456 bits resultantes.
- Finalmente se aleatorizan y se dividen en 8 sub-bloques de 57 bits cada uno (semiráfaga), para posteriormente entrelazarse con otros sub-bloques formados a partir de otra secuencia diferente de 120 ms de voz.

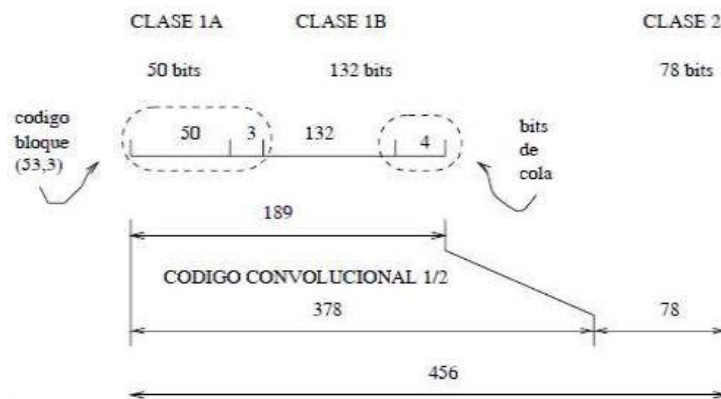


Figura 2.23: Proceso codificación canal tráfico (voz) [Figura 7.15 [25]]

En el procesamiento de los canales de señalización (todos menos SCH y RACH), mostrado gráficamente en la Figura 2.24, el proceso es parecido a la voz, a excepción de que todos los bits son codificados y se utilizan otros tipos de códigos:

- Se tienen 184 bits iniciales que se pasan por un código *Fire*, lo que da lugar a 224 bits.
- Se añaden 4 bits de cola (228 bits).
- Se pasa por un código convolucional  $\frac{1}{2}$  para dar lugar a 456 bits.
- Finalmente se realiza un entrelazado extendido a 4 tramas completas, ya que se utilizan los dos campos de 57 bits en cada una de las ráfagas.

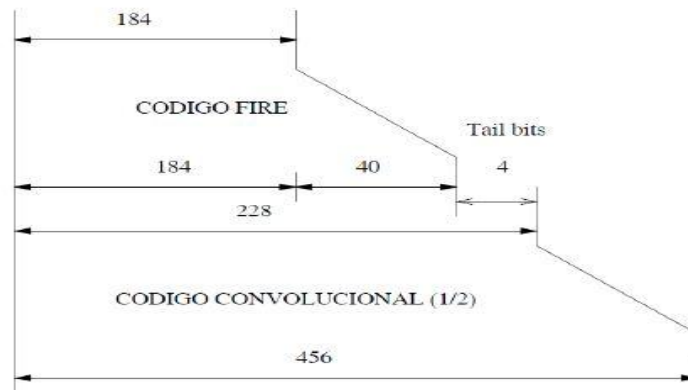


Figura 2.24: Proceso codificación canal de control [Figura 7.17 [25]]

## **Modulación**

Como en la gran mayoría de los sistemas de comunicaciones, antes de transmitir al medio se debe modular la señal para así ser más robusta ante posibles perturbaciones en el canal de transmisión y conseguir una eficiencia espectral alta, entre otras cosas. Con el tipo de modulación de GSM se consigue una continuidad de fase, una envolvente de la señal constante y que la modulación y demodulación que es un proceso delicado en todo sistema sean sencillas.

Digamos que la función de la modulación es transportar información a través de una onda portadora variando alguno de sus parámetros en función de la información que se quiere transmitir.

El tipo de modulación que utiliza el sistema GSM es GMSK, que se trata de una modulación variando mínimamente la fase de la portadora. Se utiliza un filtro *gaussiano* de premodulación para reducir los niveles de los lóbulos secundarios del espectro transmitido, ya que estabiliza las variaciones de frecuencia instantánea a través del tiempo haciendo menos cambiante la trayectoria de fase de la señal.

El proceso de modulación en GSM se compone de lo siguiente:

### 1) Codificación diferencial:

Los bits de entrada se codifican diferencialmente obteniéndose la salida  $\hat{d}_i = d_i \oplus d_{i-1}$ , donde  $d_i$  puede tener los valores de 1 ó 0 ya que son bits, y  $\oplus$  es una XOR, es decir, una suma módulo 2.

Con ello, se obtiene el símbolo modulador:  $\alpha_i = 1 - 2\hat{d}_i$

### 2) Filtrado:

Los símbolos anteriores se representan por moduladores que son pulsos de Dirac y que se definen por la siguiente convolución:

$$g(t) = h(t) * \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$$

donde:

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} \frac{1}{T} & \text{para } |t| < \frac{T}{2} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

h(t) viene definido por:

$$h(t) = \frac{\exp\left(\frac{-t^2}{2\delta^2 T^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\delta T}$$

donde

$$\delta = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{2\pi BT} \text{ y } BT=0.3$$

B es el ancho de banda a 3 dB del filtro con la respuesta al impulso h(t) y T es la duración de un bit (6/1625000 segundos), es decir, que la tasa de bit de modulación es  $1/T=1625/6$  kbit/s ( $\approx 270,833$  kbit/s).

3) Fase a la salida:

La fase de la señal modulada es:

$$\varphi(t') = \sum_i \alpha_i \pi h \int_{-\infty}^{t'-iT} g(u) du$$

Donde h es un índice de modulación de valor  $\frac{1}{2}$ .

4) Modulación:

Por último, la señal modulada en radio frecuencia es:

$$x(t') = \sqrt{\frac{2E_c}{T}} \cdot \cos(2\pi f_0 t' + \varphi(t') + \varphi_0)$$

Donde  $E_c$  es la energía por bit,  $f_0$  la frecuencia portadora y  $\varphi_0$  es una fase aleatoria que se mantiene invariable en cada ráfaga.

## **Ecualización**

En GSM, igual que en muchos otros sistemas de comunicaciones, existe la llamada ecualización. Se basa en un proceso para evitar que afecte demasiado la propagación multitrayecto, es decir, que un receptor recibe una misma señal en diferentes instantes de tiempo ya que han seguido diferentes caminos de distinta longitud desde que el transmisor la envió.

El receptor consigue compensar esta diferencia de tiempo de llegada mediante las secuencias de entrenamiento que se incluyen en cada una de las ráfagas, las cuales son conocidas por el receptor. Así pues, en la recepción sólo se queda con la secuencia emitida más probable aplicando el algoritmo de Viterbi [35].

## 3. Herramientas hardware y software utilizadas

En este capítulo se va a exponer el diseño realizado para el proyecto. Ya se han clarificado en el Capítulo 1 los objetivos y los requerimientos del mismo. Ahora se va a dar forma al trabajo.

En primer lugar se presentan las herramientas utilizadas, tanto hardware como software, para posteriormente explicar una visión global del diseño del TFG.

### 3.1. Instrumentación utilizada

La instrumentación utilizada en el desarrollo de este proyecto puede clasificarse en instrumentación básica y específica.

- En cuanto a la instrumentación básica se ha precisado de un ordenador (PC) con tarjeta Ethernet de capacidad 1GHz, ya que los dispositivos que posteriormente se mencionan y los cuales han sido utilizados requieren de esa característica para poder comunicarse con el ordenador.
- Referente a la instrumentación específica se ha utilizado lo siguiente:

#### 3.1.1. Transceptor NI USRP 2920

Se trata de un transceptor (Figura 3.1) de National Instruments muy utilizado en laboratorios de Radio Frecuencia y Comunicaciones, así como en educación en Comunicaciones.



Figura 3.1: NI USRP 2920 [2]

Estos transceptores aprovechan el software *NI Labview* (lenguaje de programación utilizado en este TFG) y el hardware *Ettus Research* para trabajar con la parte radio pero definido por software (SDR) para comunicaciones en múltiples bandas de frecuencia.

Las características de este TFG que más se ven involucradas en el USRP [36] son:

- Frecuencia en transmisión: Se transmite a 600 MHz, frecuencia que se encuentra dentro de la banda utilizada para la televisión y que no existen riesgos de interferencias en el laboratorio [37].



- Se transmite con una potencia de entre 17 y 20 dBm, pero es una característica a elegir por el usuario en su interfaz.
- El ancho de banda instantáneo utilizado es de 200 kHz ya que sólo se tiene una portadora con la que transmitir.
- La tasa de transmisión es de aproximadamente 2.17 Mmuestras/s, y el USRP en transmisión permite hasta 400 Mmuestras/s.
- Utilizamos el puerto TX1 para transmitir porque que se han implementado canales del enlace de bajada de una BTS y no se necesita ningún otro puerto de transmisión ni recepción.
- La conexión con el PC es *Gigabit Ethernet*, por lo que necesitamos una tarjeta *GigaEthernet* en el mismo.

Para información más detallada de las características técnicas del NI USRP-2920 véase el ANEXO B.

Para conocer cómo trabaja el hardware, se incluye un diagrama de bloques del sistema en la Figura 3.2 y una breve explicación del mismo.

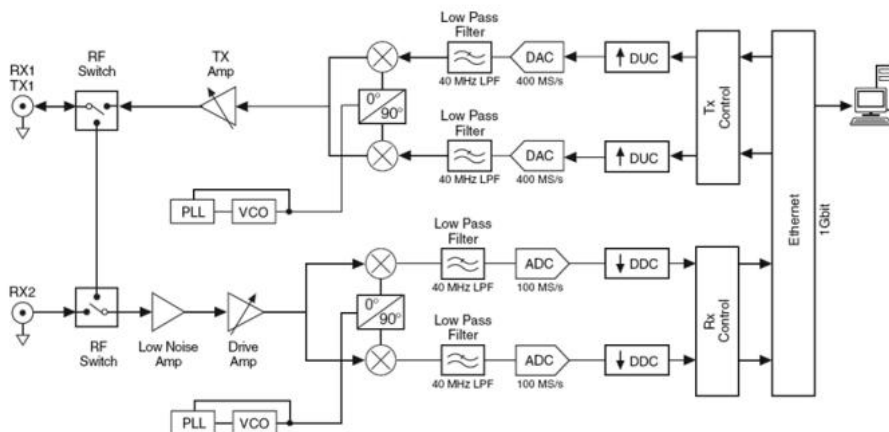


Figura 3.2: Diagrama de bloques del sistema NI USRP-2920 [38]

El NI USRP se conecta con el PC para trabajar como radio definido por software. Para la transmisión, que es el modo en el que nosotros utilizamos este hardware, el PC transmite las muestras de la señal en banda base I/Q a 20MS/s como máximo a través de *Gigabit Ethernet*. El hardware interpola la señal de entrada a 100MS/s usando un conversor digital (DUC, *Digital UpConversion*) y a continuación se convierte a una señal analógica (16-bit DAC, *Digital-to-Analog Converter*) con dos canales. Posteriormente la señal se modula con la frecuencia especificada, se amplifica y se transmite.

Debido al amplio rango de frecuencias con el que puede trabajar este dispositivo, se pueden experimentar y prototipar algoritmos de protocolos como GSM, WCDMA, 802.11 (Wi-Fi) o ZigBee, entre otros.

### 3.1.2. Generador vectorial de señales de Agilent ESG E4438C

Se trata de un generador de señales vectoriales (Figura 3.3) utilizado para comprobar el funcionamiento de un receptor o para analizar el comportamiento de diferentes efectos en las señales. En este TFG, se ha utilizado principalmente para el segundo caso ya que el objetivo era comprobar que se transmitía correctamente, es decir, se comparaba la verdadera señal que es la que genera este dispositivo con la señal que se transmite a través del NI USRP, y mediante esa comparación podemos corregir errores viendo los efectos en las señales. En particular, este dispositivo se ha utilizado para analizar, validar y comprobar el funcionamiento real del sistema GSM.



Figura 3.3: Agilent ESG E4438C [4]

### 3.1.3. Analizador vectorial de señales de Agilent VSA 89600

Este analizador consta de dos partes bien diferenciadas. Por un lado tenemos la parte hardware, que es la responsable de recibir las señales tanto en RF como en banda base, y por otro lado se compone de una parte software encargada de analizar las señales recibidas y presentar los resultados (Figura 3.4). Al igual que el generador vectorial, para este TFG este dispositivo se utiliza como analizador de señales GSM, pero también puede trabajar con señales UMTS (WCDMA, *Wideband Code Division Multiple Access*) o WiFi.



Figura 3.4: Agilent VSA 89600 [5]

### 3.2. LabVIEW

Como se ha explicado, este TFG consistía en realizar las funcionalidades básicas del canal de bajada de GSM. Para ello se ha tenido que programar y se ha hecho en un lenguaje de programación específico. El software utilizado es NI LabVIEW [3], un entorno de desarrollo para ingenieros y científicos ya que integra todas las herramientas que estos necesitan.

Se trata de una herramienta creada por National Instruments que salió al mercado por primera vez en 1986 (LabVIEW 1.0 para Mac OS), estando actualmente por la versión LabVIEW 2012 disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux [39].

LabVIEW [3] es un entorno de desarrollo gráfico que puede integrar hardware sin precedentes. Se trata de una plataforma flexible que se puede utilizar con muchos fines, desde el desarrollo de pruebas a diseños de proyectos, ya sean grandes o pequeños. Además, debido a que se trata de una programación gráfica dejando a un lado la programación a bajo nivel, y a que contiene unas herramientas necesarias para construir sistemas de medida y control, agiliza en gran medida los procesos.

Como se ha comentado, LabVIEW [3] se integra perfectamente con dispositivos de medida y control, teniendo una amplia gama de dispositivos controlables por este software, mientras que lo común es que cada hardware tenga asociado su software. En este último caso, cuando se quiere utilizar el software para otros ámbitos, como añadir múltiples dispositivos, añadir procesamiento o generar informes, ocurre el problema de utilizar un hardware en un entorno de software diferente. Con LabVIEW esto no ocurre porque permite utilizar todo el hardware con un único entorno de desarrollo [40].

Puede llamar la atención el número tan elevado de funciones que esta herramienta proporciona [41], todas ellas de análisis y procesamiento de señal que es el tema que aquí concierne. Entre ellas, se incluye una librería específica de funciones de MATLAB® [42], un lenguaje de alto nivel también muy utilizado en ingeniería, lo cual proporciona una interoperabilidad e integración de este lenguaje en LabVIEW.

### ¿Cómo es una instancia en LabVIEW?

Como se ha comentado, LabVIEW [3] es un lenguaje de programación gráfica, por lo que se puede decir *grosso modo* que en LabVIEW no se escribe, se dibuja. Este entorno ya se ha dicho que tiene multitud de funciones implementadas, lo que permite al usuario utilizarlas y desarrollar su programa rápidamente para invertir un poco más de tiempo en la interfaz gráfica para el usuario.

Todo programa de LabVIEW se compone de *Vis (Virtual Instruments)*, equivalente a páginas de texto en programas a bajo nivel. En cada *VI* se pueden diferenciar dos partes:

- Panel Frontal: Es la parte del *VI* utilizada para interactuar con el usuario, donde se incluyen los controles (son entradas al programa) y los indicadores (son salidas del programa, sólo para poder ser visualizados), los primeros pudiéndose manipular en la ejecución del programa.
- Diagrama de bloques: Se trata de la parte del *VI* donde se encuentra el desarrollo del programa propiamente dicho, es decir, donde se encuentran los iconos haciendo el papel de funciones que se interconectan entre sí.

A lo largo de este TFG se podrá obtener una visión más cercana de cómo se realiza un programa en LabVIEW.

## **3.3. Instrumentación en el laboratorio**

La única finalidad de este subcapítulo es que se vea y entienda la disposición real en el laboratorio de comunicaciones móviles de la universidad de todos estos dispositivos y herramientas nombradas aquí.

Así se pone al lector en situación y con la Figura 3.5 se muestra la manera en la que se ha trabajado a lo largo de este TFG. En ella se pueden ver cada uno de los dispositivos anteriormente descritos.

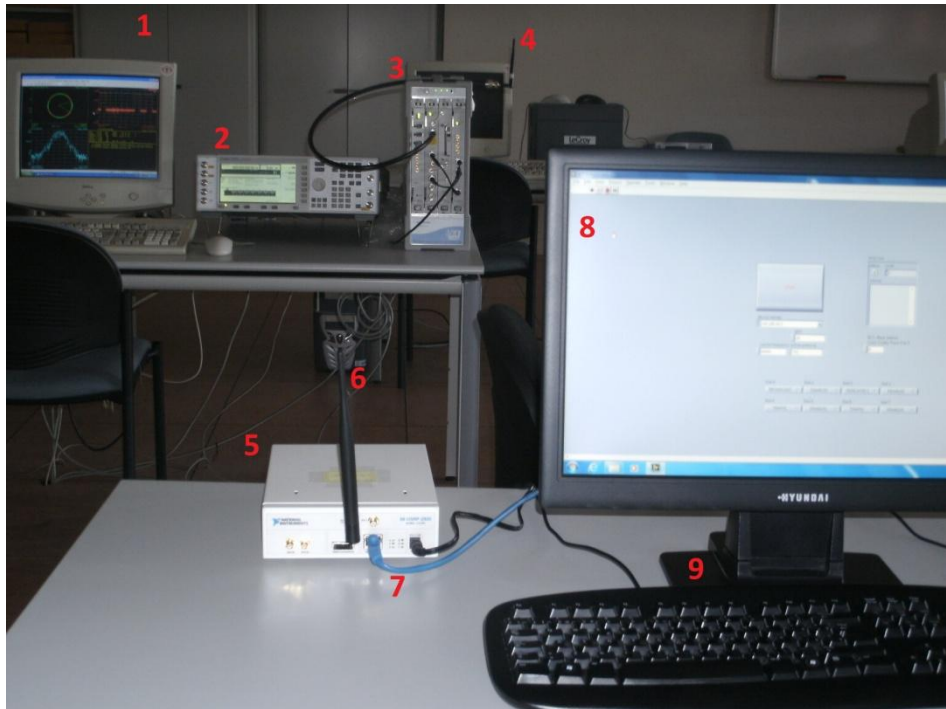


Figura 3.5: Área de trabajo

A continuación se pasa a la enumeración a los diferentes dispositivos y herramientas utilizados durante el Trabajo Fin de Grado y que aparecen en la Figura 3.5:

- 1) Analizador vectorial de señales de Agilent VSA 89600: Se trata de la parte software, y como se ha mencionado anteriormente es usado para analizar la señal recibida a través de la parte hardware.
- 2) Generador vectorial de señales de Agilent ESG E4438C: Es el dispositivo utilizado para configurarlo de la misma manera que lo que se envía por el USRP y mediante comparación de esas dos señales decidir si la diseñada en este TFG es correcta o no.
- 3) Analizador vectorial de señales de Agilent VSA 89600: Es la parte hardware del VSA, es decir, el encargado de recibir la señal, procesarla y enviársela a la parte software para mostrar los resultados en la pantalla del ordenador.
- 4) Antena receptora de hasta 2.4 GHz para recibir la señal enviada por el NI USRP.
- 5) NI USRP: Aparato que puede funcionar como transmisor o receptor pero que en este trabajo ha sido utilizado en el primer caso. Han sido recién adquiridos por la universidad.
- 6) Antena transmisora para enviar las señales que el NI USRP le manda.
- 7) Conectores del NI USRP al ordenador (*Gigabit Ethernet*, cable azul) y a la luz (6VDC y 3A, cable negro).

- 8) LabVIEW: Herramienta principal de trabajo en la cual se ha llevado a cabo una programación gráfica. En la imagen se muestra la interfaz de usuario (panel frontal) de una de las BTS diseñadas que está transmitiendo y en el VSA se observan la señal enviada y por tanto los resultados.
- 9) PC de altas prestaciones para poder soportar la ejecución del sistema diseñado.

Así se ha obtenido una visión más clara de la forma de trabajo durante todo este período del TFG. La síntesis es que se envían señales con determinadas características impuestas por el usuario, se reciben por una antena situada a unos 4 metros y se observan los resultados para ver si es correcta tal y como indica el estándar GSM.

El resultado final ha sido un sistema capaz de transmitir los canales más importantes de una BTS del estándar de comunicaciones móviles GSM, con la posibilidad de ver y comprender su diseño mediante diagramas de bloques que se mostrarán en el capítulo Módulos.

## 4. Diseño y desarrollo

En este capítulo se van a presentar los diferentes tipos de BTS que han sido diseñadas e implementadas, así como la consecución de las actividades para su desarrollo.

### 4.1. Sistemas diseñados

En este TFG se ha realizado el diseño de una BTS de GSM [1] que sea capaz de realizar funcionalidades básicas, en concreto implementar varios de los canales de control y sus procedimientos. Como se ha dicho, el diseño estará orientado a que se pueda utilizar para la realización de prácticas de laboratorio. Por ello, se han pensado dos modos de ejecución:

- Por un lado se ha realizado el diseño y la implementación de un sistema con mayores funcionalidades que se lanza desde *BTS Estructurada.vi* y a la que se ha llamado **BTS Estructurada**. Esta es capaz de transmitir:
  - Canales de control de difusión y comunes (BCCH, FCCH, SCH, PCH, AGCH) que forman parte de una multitrama 51.
  - Canales de control dedicados (SDCCH/8, SACCH/C8) que forman una multitrama 51 distinta de la anterior.
  - Canales de tráfico (TCH/FS), que junto con su canal de control asociado (SACCH/TF) forman una multitrama 26.
- Por otro, se realiza el diseño de una BTS cuyas funcionalidades son mucho menores que la anterior pero que sin embargo puede resultar bastante interesante de cara a la realización de prácticas. Este programa se lanza desde *BTS-Control Básico.vi* y ha sido denominada como **BTS-Control Básico**. La BTS que aquí se presenta, en lugar de enviar todos los canales en el orden de tiempo real como la BTS anterior y tener las restricciones que tiene la anterior a la hora de configurar los canales, puede transmitir los siguientes canales por separado:
  - FCCH: Muy útil para poder estudiar su espectro en frecuencia, el cual es un pulso que se encuentra en un offset de 67.5 kHz con respecto a la frecuencia portadora.
  - SCH: Bastante interesante para detectar su secuencia de entrenamiento extendida, una característica muy peculiar de este canal.
  - TCH: Se puede enviar este canal cuyos bits de información es un patrón definido. Se da la opción al usuario de elegir uno de entre 16 patrones de 8 bits cada uno, y se puede comprobar en el Agilent VSA 89600 [5]

cómo la secuencia de entrenamiento recibida corresponde al *slot* de tráfico que se está transmitiendo.

En este capítulo se va a proporcionar una visión de la ejecución de cada diseño, sin entrar a analizar la forma en la que se programa cada uno de los módulos de los que están compuestos los mismos. Esto se realizará en el apartado Módulos.

#### 4.1.1. BTS Estructurada

A continuación, en la Figura 4.1 se muestra el esquema del sistema diseñado de la BTS con funcionalidades reales. Se trata de los pasos que sigue el VI principal del programa, cuyo nombre es *BTS Estructurada.vi*.

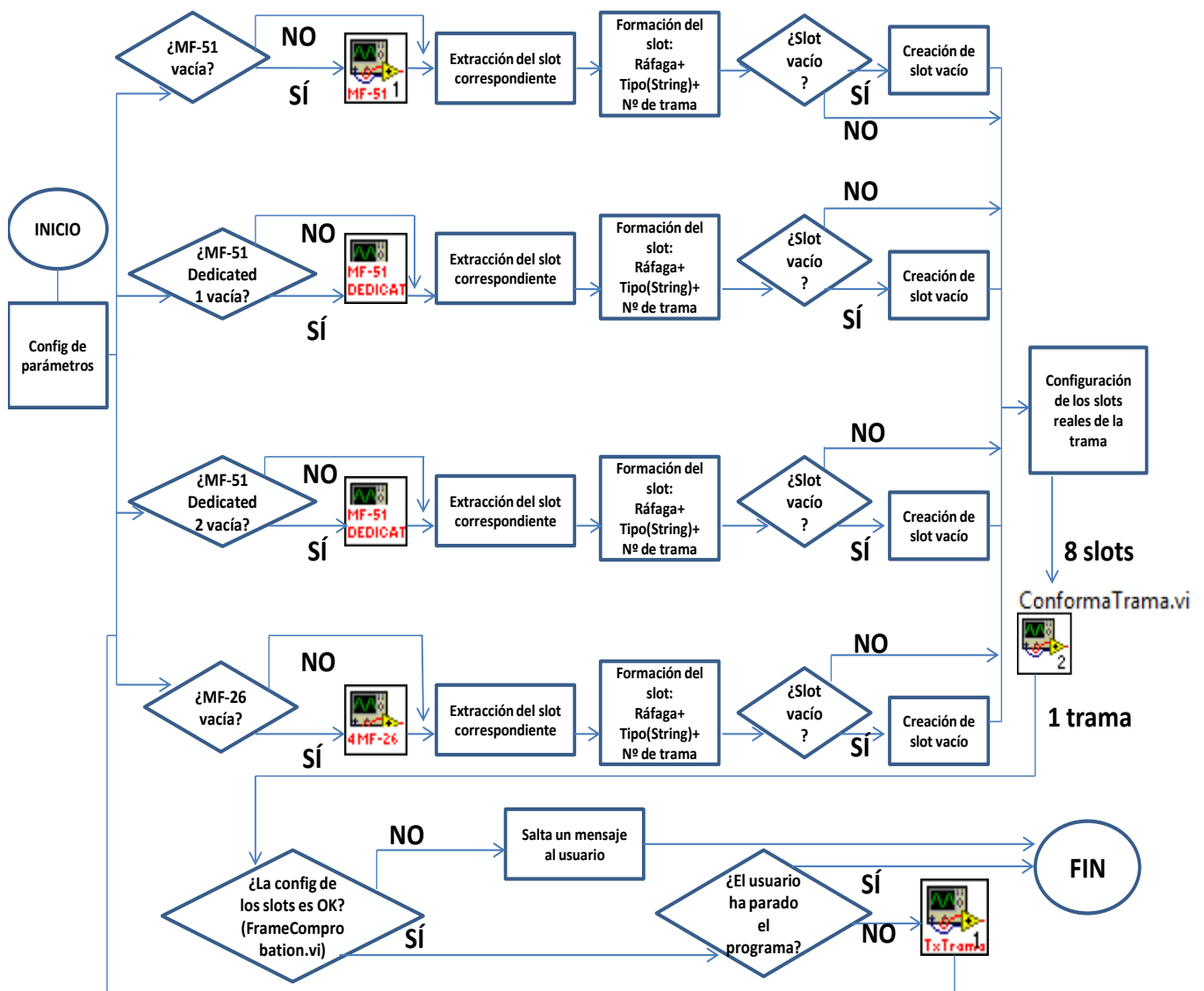








Figura 4.1: Diagrama de bloques BTS Estructurada

Donde:



- 1)     son los VI encargados de formar las correspondientes multitramas.

ConformaTrama.vi

- 2)  es el encargado de formar una trama completa.
- 3)  es el responsable de la transmisión de una trama a través del NI USRP.

Aunque el diagrama de bloques es bastante intuitivo, se incluye una explicación del mismo. Las actividades llevadas a cabo en este diagrama se encuentran dentro de un bucle del que no sale hasta que se llega a FIN. De ahí que una vez que se transmite la trama se vuelva al inicio del programa:

1º) Se hace una configuración de los parámetros correspondientes a la transmisión, es decir, se configura en primer lugar el NI USRP [2] mediante software para que esté preparado para transmitir en cualquier momento.

2º) El funcionamiento del programa es crear cada una de las multitramas inicialmente, y de ahí ir sacando slots hasta vaciarlas. Posteriormente, una vez que se han vaciado, se vuelven a crear. Por ello, en cada iteración del bucle se comprueba si se ha vaciado alguna de las multitramas creadas.

En GSM se utilizan distintos tipos de multitrama 51, en función de si se requiere una gran capacidad en la celda, en cuyo caso se utiliza una señalización de máxima capacidad, o por el contrario se prefiere una señalización combinada para ahorrar recursos cuando la densidad de tráfico es menor [pp. 215-216 [16]]. En este TFG se ha diseñado una BTS con máxima capacidad, por lo que la señalización es “descombinada”.

En la Figura 4.2 y Figura 4.3 se incluyen unos esquemas de la composición de cada multitrama para tener una mejor visión de las mismas. Cada fracción que hay significa una ráfaga de bits, que representan un determinado slot en cada trama, y se corresponde cada una de estas ráfagas con tramas diferentes.

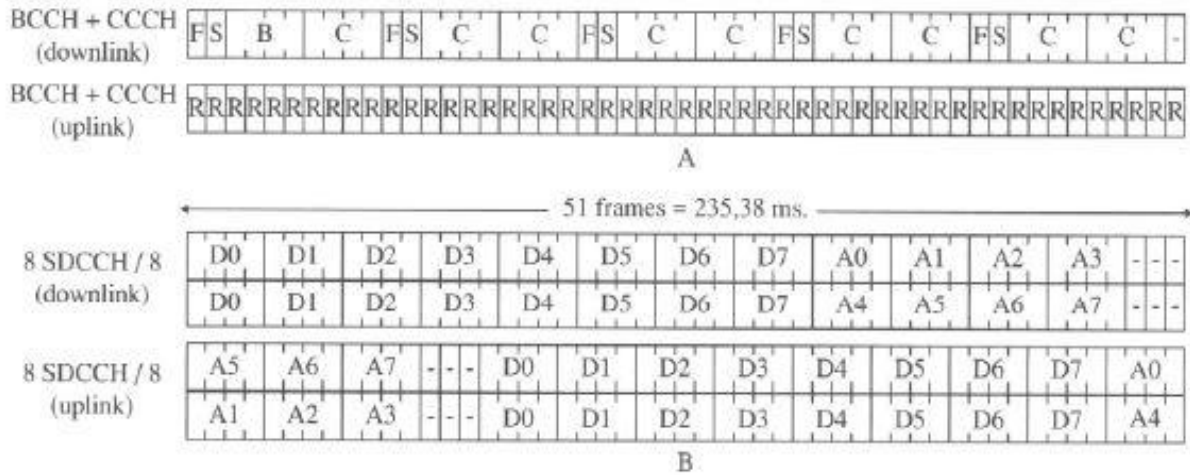


Figura 4.2: **MF51 y MF51 Dedicated [43]**

Donde:

F: FCCH; S: SCH; B: BCCH; C: AGCH o PCH; R: RACH; D: SDCCH/8; A: SACCH/C8.

Como ya se ha mencionado, este TFG se ocupa del enlace de bajada, por lo que de los canales aquí enumerados, se diseñan los siguientes: FCCH, SCH, BCCH, AGCH, PCH, SDCCH, SACCH.

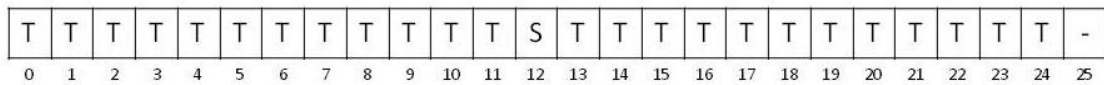


Figura 4.3: **MF-26**

Donde:

T: TCH/FS; S: SACCH/TF.

3º) Si alguna de las multitramas está vacía, se crea de nuevo. Aquí es conveniente tener estas consideraciones:

- Se crean dos *MF-51 Dedicated* (102 tramas en total) porque 8 SDCCH/8 están señalizados a su vez por 8 SACCH/C8, y estos 8 SACCH caben en 2 MF-51 en lugar de en una.
- Se crean cuatro MF-26 porque el canal SACCH/TF que señala a los TCHs es capaz de señalar a 4 MF-26.

4º) Se extrae el slot que corresponda de cada multitrama en esa iteración del bucle.

5º) Se forma un *cluster* con la ráfaga de bits del slot, el tipo de slot que se trata con una cadena de caracteres (“MF-51”, “MF-51Dedicated”, “MF-26 o “”) y el número de trama al que corresponde.

6º) Se comprueba si se trata de un slot vacío (*idle*), en cuyo caso se sustituirá el *cluster* anterior por uno correspondiente a estas características.

7º) Una vez que se tienen las ráfagas preparadas para hacerlas corresponder con los slots reales de una trama, se lee la configuración del usuario para saber qué tipo de ráfaga y en qué slot va cada una. Por lo tanto, se sacan 8 *slots*, dentro de los cuales van las ráfagas que el usuario ha elegido.

8º) En *ConformaTrama.vi* se crea la trama. Se juntan los 8 *slots* que recibe y se saca una trama con *slots* ya modulados, con sus secuencias de entrenamiento correspondientes y los períodos de guarda, es decir, lista para transmitirse.

9º) Se comprueba si la configuración por parte del usuario es correcta. El usuario no puede configurar más de un canal de difusión de alta capacidad (*Broadcast High Capacity*), ni tampoco más de un *Dedicated 1* ni *Dedicated 2*, puesto que este sistema está diseñado para que nada más se pueda señalizar hasta 16 canales de tráfico.

10º) Si no es correcta la configuración, se presenta un mensaje por pantalla y finaliza la ejecución del programa. Por el contrario, si es correcta, se comprueba si el usuario ha pulsado STOP y ha parado el programa, en cuyo caso finaliza el mismo, y si no lo ha hecho se transmitirá la trama para posteriormente comenzar desde el principio del VI comprobando si está vacía cada multitrama.

Esta explicación se trata de un seguimiento global de todo el programa. Evidentemente, cada uno de los bloques contiene dentro otra secuencia de actividades importantes. La presentación de cada uno de los bloques se realizará más adelante en el apartado de Módulos.

Por último, se adjunta la Figura 4.4 correspondiente al diagrama de bloques real del *BTS Estructurada.vi*. Para tener una mejor concepción de los pasos que sigue el programa, en la imagen se incluye la numeración que se ha ido comentando anteriormente (pasos del 1 al 10).

Algunas de las consideraciones que se deben tener con las siguientes:

- En el paso 3º, se observa cómo en los dos primeros casos no se ha vaciado aún la multitrama y por eso no se elabora una nueva, mientras que en las dos últimas esto sí ha ocurrido, por lo que se llaman a las funciones

correspondientes que forman esa multitrama. Esa caja corresponde a un `Case` en cualquier lenguaje de programación, donde se compara la variable que devuelve el paso 2º para que cuando se haya vaciado se cree una nueva, y si no, no hace nada y deja pasar la multitrama recibida.

- En los pasos 6º y 7º se puede observar cómo se crea un slot vacío en los últimos cuatro slots, los cuales el usuario ha preferido dejarlos vacíos, mientras que los 4 primeros sí tienen un tipo de canal específico y por ello no se crea un slot vacío.
- En el paso 10º, de nuevo hay una estructura `Case`, y aquí se muestra un caso en el que el usuario haya parado el programa, en el cual se cierra la sesión del USRP y se acaba el programa. En este mismo caso también se incluye la función para mostrar un mensaje al usuario en caso de que su configuración haya sido incorrecta, y también aquí seguidamente se finaliza el programa.

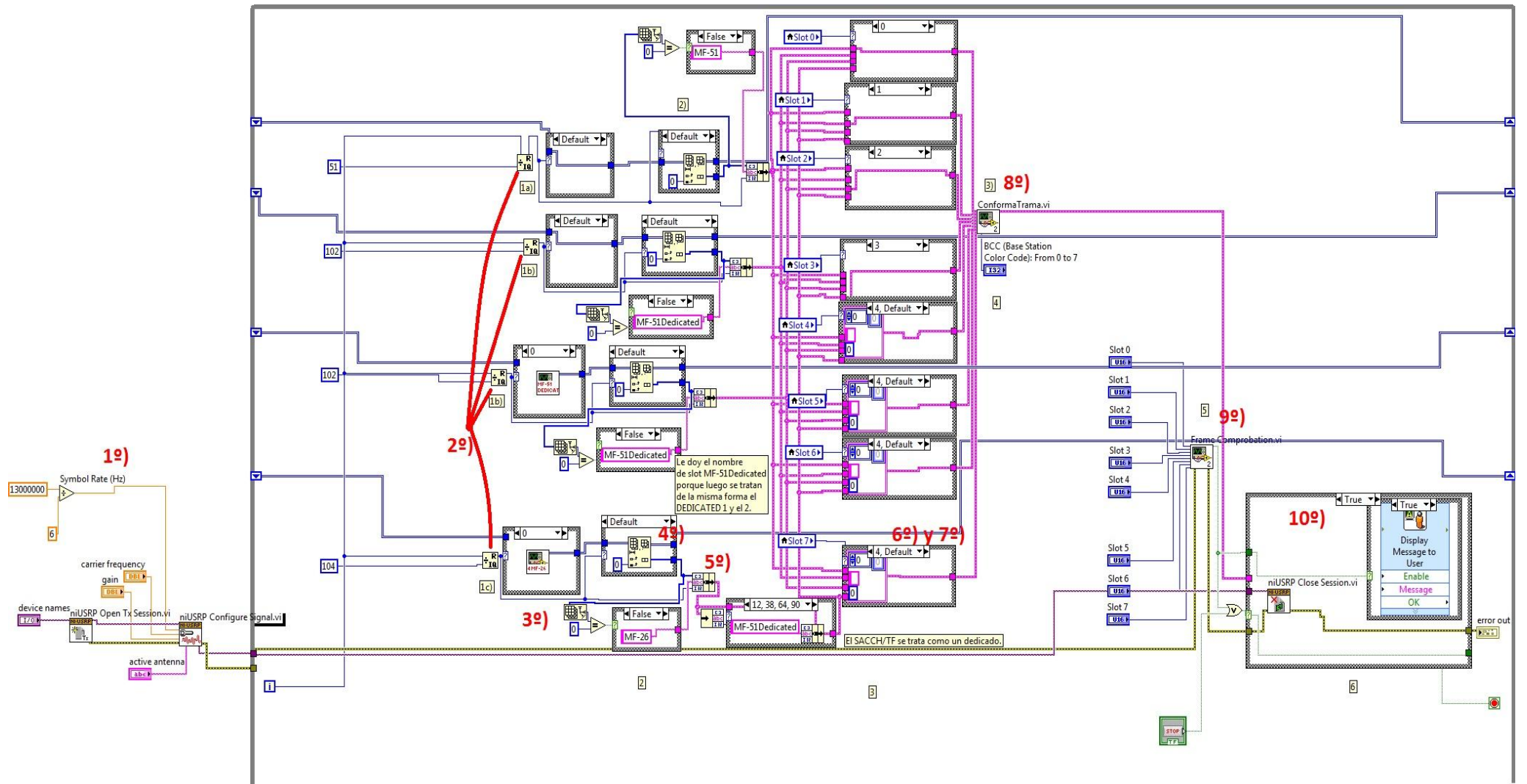


Figura 4.4: *BTS Estructurada.vi*

A su vez, en el mismo código de LabVIEW se encuentran comentados todos los pasos que se han ido siguiendo para su elaboración.

Digamos que lo anteriormente mostrado es el programa a más bajo nivel. Sin embargo, la interfaz con la que más interactúa el usuario es el panel frontal y es la que se muestra en la Figura 4.5.

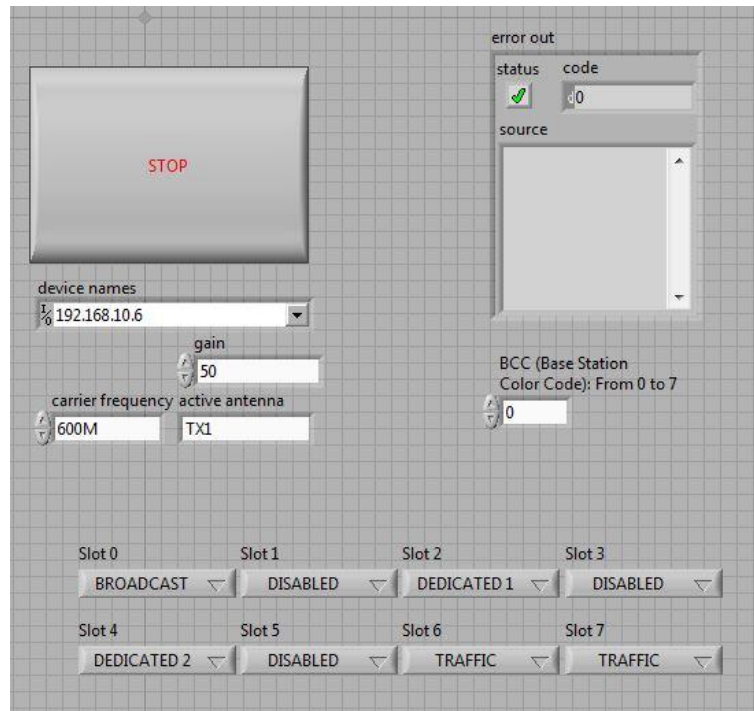


Figura 4.5: Interfaz usuario BTS Estructurada

Aquí se incluyen los botones de configuración y los indicadores. Casi todos los que aquí se muestran son del primer tipo, ya que está el botón de parada del programa (*STOP*), la configuración de transmisión, el BCC que es un parámetro específico de la BTS, y los 8 slots para poderse configurar como el usuario desee:

- *Broadcast High Capacity*: Multitrama 51 donde se envían los canales de difusión (FCCH, SCH, BCCH, AGCH y PCH).
- *Dedicated 1*: Multitrama 51 que contiene los canales de señalización dedicados al tráfico, junto con su señalización asociada. Es capaz de señalar 8 canales de tráfico.
- *Dedicated 2*: Similar a la anterior.
- *Traffic*: Multitrama 26 donde se envían los canales de tráfico y su señalización asociada.

El único indicador que aquí se encuentra es el *error out*, que reporta información en caso de haber ocurrido un error en el programa.

### 4.1.2. BTS-Control Básico

En este apartado se incluye el esquemático (Figura 4.6) del sistema diseñado con funcionalidades aún más básicas que el anteriormente explicado. Puede decirse que este está más orientado a la realización de la parte inicial de las prácticas de laboratorio que el anterior, ya que aquí podremos analizar con detalle tres de los canales del enlace de bajada más importantes de GSM.

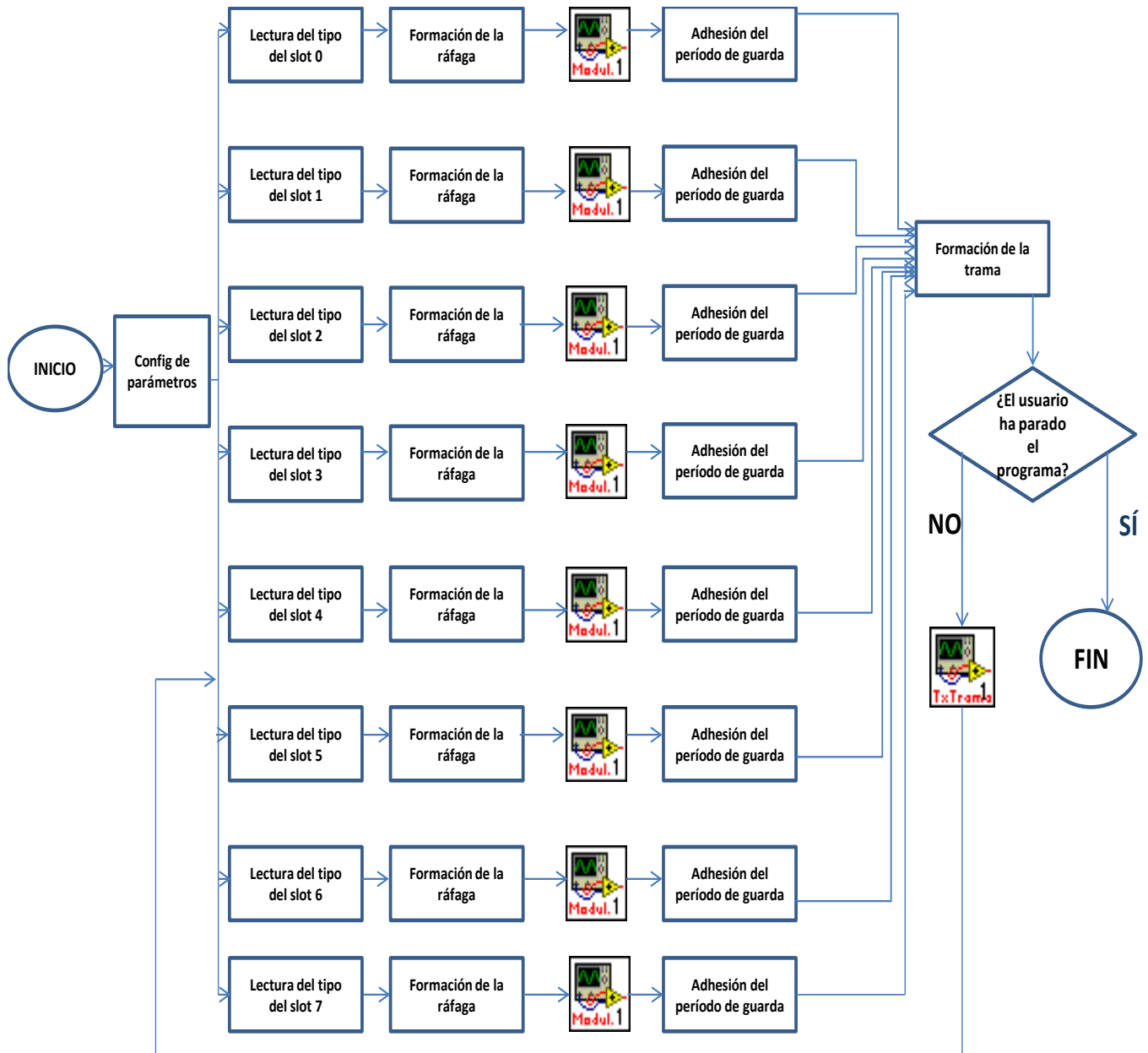




Figura 4.6: Diagrama de bloques BTS-Control Básico

Donde  corresponde al VI encargado de la modulación de una ráfaga, y  al VI que transmite una trama completa por el NI USRP.

La explicación de este *VI (BTS-Control Básico.vi)* es la siguiente:

1º) El programa comienza con una parametrización de lo necesario para transmitir a través del USRP.

2º) Se lee la configuración por parte del usuario, es decir, qué canales se quieren transmitir en cada slot.

3º) Se forma la ráfaga, incluyendo los bits de cabecera y de cola, la secuencia de entrenamiento, etc.

4º) A continuación se modula la ráfaga a través del *Modulador.vi*.

5º) Para finalizar el slot completo a transmitir se incluye el período de guarda (8.25 períodos de bit).

6º) Se unen los 8 slots para formar la trama completa. Esta trama puede estar formada por FCCHs, SCHs, TCHs, o slots vacíos.

7º) Una vez que se tiene la trama dispuesta para transmitir, se comprueba si el usuario ha parado el programa. Si es así, el programa finaliza y no se transmite nada, y si no es así, la trama se transmite a través del NI USRP y se vuelve al inicio del programa para volver a transmitir una nueva trama configurada por el usuario.

Nótese que a diferencia del diseño anterior, en este no se crea ninguna multitrama ya que directamente se transmiten los canales que el usuario desea, eso sí, haciéndolo corresponder en la ráfaga adecuada con sus características definidas. Además, y como esta BTS en principio es la destinada a docencia, a diferencia de la anterior no se realizado ningún tipo de restricciones de cara al usuario en cuanto a la configuración de los canales, ya que no tendría sentido si se quieren analizar canales de forma individual.

El aspecto que tiene el diagrama de bloques real de *BTS-Control Básico.vi* es el enseñado en la Figura 4.7. Se han incluido los pasos que antes se presentan para mejorar la comprensión del código:



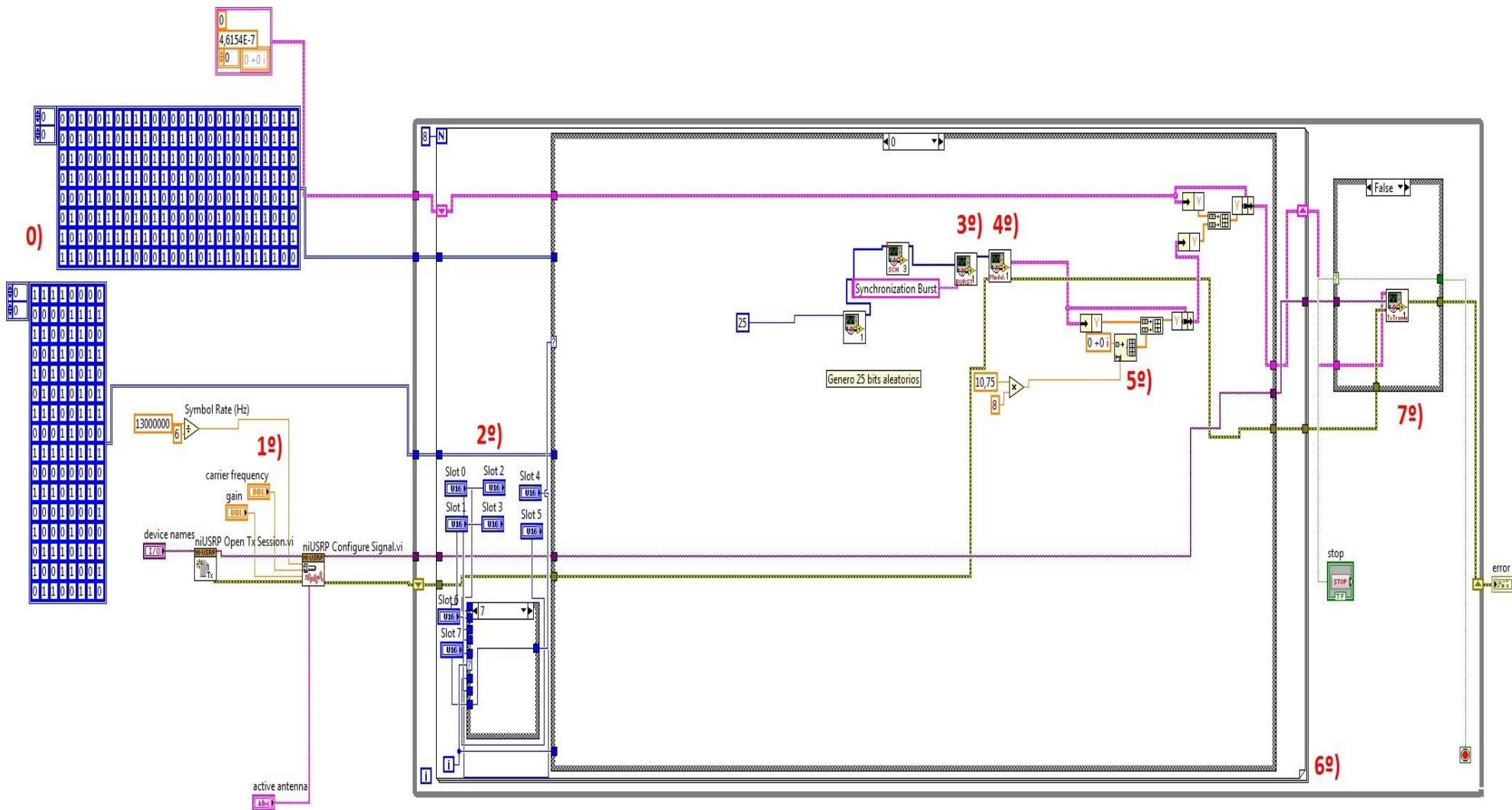


Figura 4.7: *BTS-Control Básico.vi*

Algunas de las consideraciones a tener en cuenta respecto al código presentado son las siguientes:

- Se incluye un apartado 0 para indicar que en ese lugar se crean las 8 secuencias de entrenamiento posibles que pueden llevar las ráfagas normales, en este caso, los canales de tráfico, cuya secuencia de entrenamiento depende del *slot* en el que se transmita la ráfaga. Además, el *array* de dos dimensiones que se encuentra en la parte más abajo corresponde a los 16 tipos de patrones que pueden contener los TCHs.
- El paso 6º se ha colocado en ese lugar indicando que una trama es formada conforme va transcurriendo el bucle que ahí se encuentra, ya que ese bucle tiene 8 iteraciones, una para cada slot y se van uniendo conforme se va desarrollando.
- En el 7º y último paso se incluye el caso de la estructura *Case* en el que el usuario no ha parado el programa y entonces la trama se transmite de forma normal.

Por último, indicar que la interfaz de usuario (Figura 4.8) es el panel frontal de LabVIEW y que en este caso tiene un aspecto parecido aunque diferente al diseño anterior.

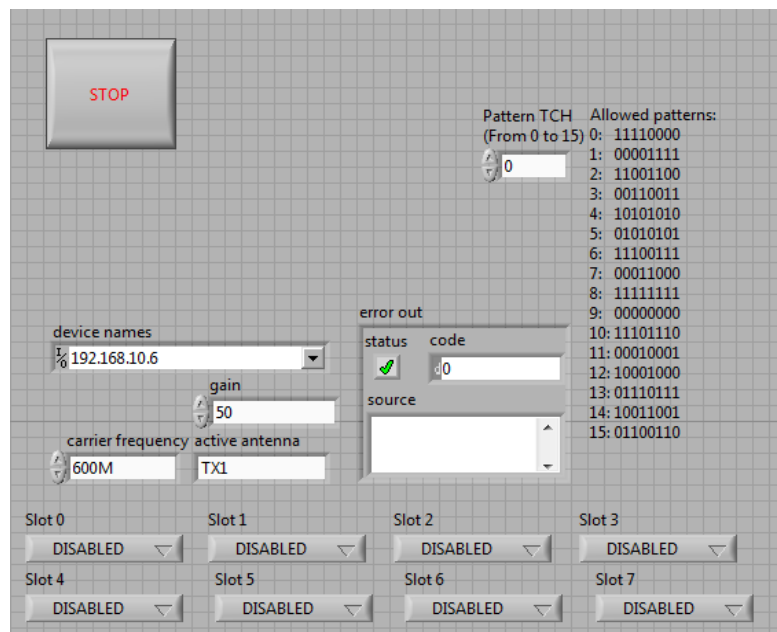


Figura 4.8: Interfaz usuario BTS-Control Básico

El usuario de nuevo tiene acceso al botón de parada de la ejecución del programa, a la configuración de los parámetros que identifican al hardware responsable de la transmisión (NI USRP) y a los 8 slots que son configurados como se desee (TCH, SCH o FCCH). Además, en este diseño se incluye la opción de introducir el patrón de 8 bits

deseado por parte del usuario para que se transmita en los canales de tráfico. Por último, y como en el caso anterior, el usuario puede ver si se produce un error en el transcurso del programa.

## **4.2. Fases de trabajo**

Una vez que ya se ha proporcionado una visión general del TFG, es hora de presentar cada una de las fases de trabajo que se siguieron para la consecución de los objetivos, así como la explicación de cada uno de los módulos que componen el TFG.

El trabajo realizado ha seguido el procedimiento estándar de cualquier proyecto. Es decir, existe un período de planificación, seguido del diseño y construcción del proyecto, y finalmente se concluye con un período de pruebas y conclusiones. En cada una de estas secciones, el trabajo se divide en distintas fases que son las indicadas en el Cronograma. Aquí se expone en qué consiste cada una de ellas.

### **4.2.1. Planificación**

#### **1. Documentación sobre el estándar GSM y su estudio en profundidad:**

Como en cualquier proyecto, antes de diseñar y construir el mismo hay que conocer y estudiar profundamente el entorno en el que se incluye. Quizás sea este el paso más tedioso y menos entretenido del proyecto, pero no por eso el menos importante. De hecho, cualquier cosa que se pase por alto en este período puede desembocar en grandes errores cometidos en fases posteriores, lo que supondría un gran retraso en el mismo y probablemente la pérdida de mucho tiempo y dinero si se tratase de un proyecto real en una empresa. En el caso que aquí concierne, esta fase ha sido dividida en dos:

##### **1.1. Búsqueda de documentación del estándar GSM:**

Ya se ha comentado en numerosas ocasiones de qué trata el proyecto. Para cumplir con los objetivos marcados hay que conocer perfectamente el estándar de GSM, o al menos los pasos que se siguen y se indican en el estándar para la realización de las funcionalidades básicas del enlace de bajada. Principalmente se han utilizado 6 documentos del estándar que como es de distribución libre se pudieron obtener de internet sin problemas:

- *GSM 03.03 Numbering* [44].
- *GSM 04.08 Mobile radio interface* [45].
- *GSM 05.01 General Description v8.4* [32].
- *GSM 05.02 Burst v8.8.0* [33].
- *GSM 05.03 Channel coding v 8.5.1* [46].

- *GSM 05.04 Modulation v7.1.1 [47]*.

## 1.2. Estudio en profundidad del mismo:

Está demostrado que si se estudia previamente y se conoce la disposición del temario de cada archivo se gana bastante tiempo posteriormente en el desarrollo. Por lo tanto, para tener más soltura manejando esta información encontrada se tuvo que pasar por un período de estudio y comprensión.

Objetivos alcanzados en el punto 1: En esta primera fase se ha aprendido a buscar y encontrar por sí mismo la documentación necesaria referente a un problema planteado, aquí, referente a este proyecto concreto.

## 2. Evaluación de los canales descendentes a implementar.

En esta fase se da un paso más con respecto a la fase anterior. Aquí se encuentran probablemente los módulos más importantes que se deben implementar: los canales de GSM. Los diferentes canales son los responsables de llevar la información determinada dependiendo del tipo que sea, y por ello cobra gran relevancia y debe estudiarse a parte. Existen dos divisiones:

### 2.1. Estudio de los canales existentes en GSM:

Se continúa con la formación en el asunto y se estudia en profundidad una gran parte de los canales de GSM [33] [46]. En los estándares encontrados también se incluyen canales que no pertenecen a la 2ª generación de móviles (GSM) y por ello no se centra la atención en esos.

### 2.2. Decisión de los canales a implementar:

Una vez estudiada y comprendida la funcionalidad de cada uno de los canales del sistema, se toman decisiones. Para ello se han tenido en cuenta los requisitos que se impusieron al principio del proyecto, es decir, que lo que se pedía era una BTS con funcionalidades básicas en el enlace de bajada. Por ello se decidieron implementar los canales más importantes del enlace de bajada: FCCH, SCH, BCCH, AGCH, PCH, SDCCH, SACCH, TCH.

Objetivos alcanzados en el punto 2: Además de afianzarse en el trabajo de forma autónoma, aquí se comenzó a tomar las primeras decisiones. Como es de suponer, todas ellas estaban bajo la supervisión del tutor del TFG, es decir, que antes de cerrarse la decisión siempre se consultaba y se debatía. Por ello, además se ha mejorado la comunicación y ya no sólo en este asunto, sino que en ocasiones se

trataban temas de las TIC en general, lo que supone un progreso tanto en la comunicación como en conocimientos.

#### **4.2.2. Diseño y construcción**

##### **3. Analizar las características del equipo (NI USRP-2920 [2]) para determinar qué bloques implementar y llevarlo a cabo:**

Comienza la parte práctica del proyecto. Todos los conocimientos aprendidos son puestos en marcha.

##### **3.1. Estudio del funcionamiento de los dispositivos a utilizar:**

Primero hay que conocer los dispositivos con los que se cuenta para irse haciendo una idea de lo que realmente se va a poder realizar y el modo en el que se va a hacer. Los dispositivos que se usan a lo largo de toda el TFG están documentados en el apartado Herramientas hardware y software utilizadas.

Los NI USRP-2920 son unos dispositivos contratados por la universidad hace relativamente poco tiempo, por lo que era algo muy novedoso y en lo que he invertido bastante tiempo. Además, se asistió a un seminario que hubo de 4 horas el día 12 de diciembre que impartía en la universidad un miembro de *National Instruments* sobre *Software Defined Radio*, por lo que se pudo aprovechar y conocer más sobre su funcionamiento.

##### **3.2. Implementar finalmente los bloques que permite el equipo:**

Principalmente, la dinámica de todo este período que duró el TFG ha sido la siguiente:

Se iba elaborando mediante LabVIEW [3] los módulos fundamentales del enlace de bajada de GSM, posteriormente se probaba transmitiendo mediante el URSP, y se recibía a través del Analizador vectorial de señales de Agilent VSA 89600 [5]. Mediante el software del analizador se observaban en el PC los resultados de lo que se transmitía, y comparándolo con lo que realmente debería de salir que era lo que el Generador vectorial de señales de Agilent ESG E4438C [4] transmite, se llegaba a la conclusión de si la nueva implementación estaba bien o mal, y en caso de que fuese erróneo, viendo los resultados se podía intuir cuál era la causa para luego corregirlo y volver a comprobarlo. Esta dinámica ha sido bastante complicada y larga. No ha sido sencillo conseguir los buenos resultados obtenidos, ya que trabajar con hardware tiene bastantes dificultades.

Los principales módulos (o *VI*s) que han sido implementados para cumplir con las especificaciones técnicas han sido:

- *BTS Estructurada.vi* o *BTS-Control Básico.vi*: *VI* encargado de llevar el peso de toda la ejecución del programa, es decir, de manejar el orden en que se ejecuta cada uno de los módulos.
- *Modulador.vi*: *VI* encargado de la modulación de cada *slot*.
- Distintos *VI*s cada uno correspondiente a la implementación de un canal diferente.
- *TxTramaUSRP.vi*: *VI* para la transmisión de la señal y que sirve de interfaz con el USRP.
- Diversos *subVI*s que realizan funciones específicas de los mencionados anteriormente.

Posteriormente en el apartado Módulos se desarrollará la implementación de cada uno de ellos.

#### 3.2.1. Implementar cada uno de los canales que han sido decididos:

Se hace hincapié en la implementación de los canales porque son los protagonistas del proyecto realizado en la beca. Son los responsables del transporte de la información y todo cuanto se hace en el proyecto ronda en torno a ellos, ya que el objetivo final es que se transmitan adecuadamente.

Objetivos alcanzados en el punto 3: Además de haber aprendido a programar en un lenguaje hasta ahora desconocido por el estudiante y con un hardware propio de un laboratorio de comunicaciones móviles, se han desarrollado capacidades como el aprendizaje a trabajar cumpliéndose objetivos temporalmente, que es como en la mayoría de los empleos de la industria desempeñan sus funciones.

### **4.2.3. Pruebas, validación y conclusiones**

Este apartado se trata de la fase final del TFG. Aquí se presentan de manera general estos tres puntos (pruebas, validación y conclusiones). Sin embargo, debido a la importancia de los mismos, se les ha dedicado más adelante un capítulo de la memoria para cada uno de ellos.

#### 4. Obtención de resultados:

Como punto final se han unificado todos los módulos anteriormente implementados y se presentan por escrito los resultados obtenidos para que queden

documentados. Por lo tanto, la obtención de resultados se puede dividir en tres subfases:

#### 4.1. Realización de pruebas de cada uno de los módulos del proyecto:

Este punto, en ocasiones se ha realizado a la vez que la implementación de los bloques, ya que según se implementaba cualquier nuevo módulo se comprobaba su funcionamiento. Sin embargo, no es lo mismo el funcionamiento de los módulos de forma individual que como un conjunto. Por ello, se hizo una serie de pruebas con todo el sistema como un conjunto para comprobar que los módulos que funcionaban correctamente por separado lo hacían también cuando se ejecutaba el programa completo.

#### 4.2. Documentar los resultados obtenidos:

Para que cualquier persona que quiera utilizar el sistema diseñado no tenga mayores problemas en hacerlo, los resultados obtenidos y el modo en el que se consiguen han sido documentados.

#### 4.3. Validación:

Una vez que se tenían las pruebas de que lo que se transmitía tenía buena presencia y se había documentado, se pasaba a un proceso de validación. Este consistía en comparar la señal transmitida por el USRP con la verdadera del estándar, la cual se generaba con el Agilent ESG E4438C. Los resultados obtenidos en ambas transmisiones se comparaban en el Agilent VSA 89600 que hacía de receptor para obtener los resultados.

Cuando se conseguía el resultado deseado, se finalizaba el proceso, mientras tanto se volvía a realizar pruebas con nuevos cambios y se documentar de nuevo los resultados obtenidos.

Un diagrama explicativo del proceso se adjunta en la Figura 4.9.

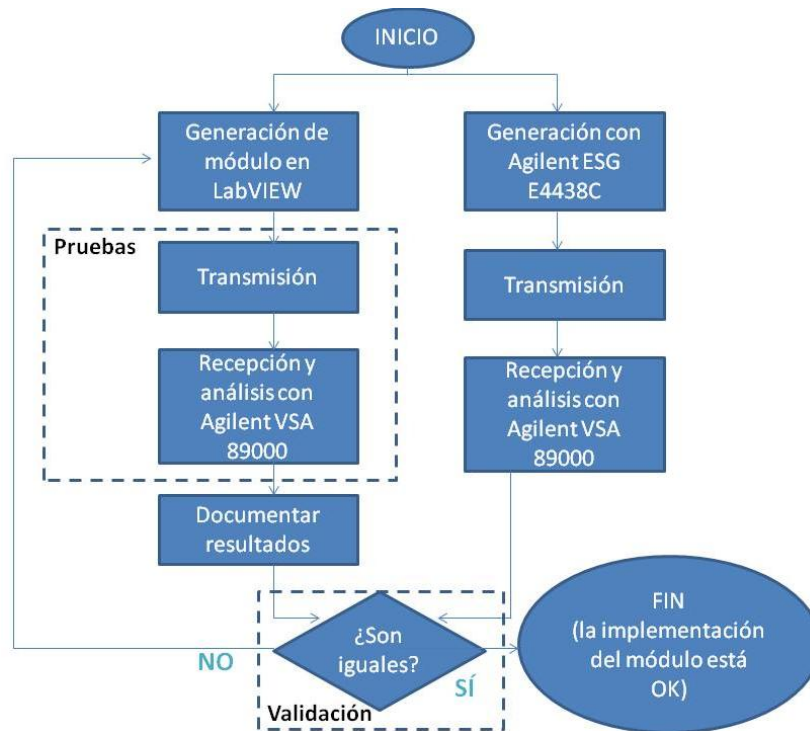


Figura 4.9: Diagrama Dinámica de Trabajo durante TFG

#### 5. Sacar conclusiones:

Por último, una vez que el proyecto fue acabado, se han sacado una serie de conclusiones que se incluyen en el capítulo Conclusiones.

Objetivos alcanzados en los puntos 4 y 5: Se ha aprendido a analizar objetivamente los resultados obtenidos y a poder realizar una crítica ante un nuevo resultado, aportando nuevas ideas y soluciones para enmendar un error. También durante esta fase se han afianzado las capacidades desarrolladas a través de los períodos anteriores.

### 4.3. Módulos

A continuación se presentan los módulos más importantes del sistema diseñado en el entorno de programación gráfica de LabVIEW [3], gracias a los cuales se diseña un sistema que realiza funcionalidades de una BTS de GSM [1]. No se va a hacer ninguna distinción entre los dos sistemas diseñados, BTS Estructurada y BTS-Control Básico, pues ambos aunque estén compuestos de distinta manera, los módulos más importantes de los que están formados son casi los mismos.

Anteriormente se ha expuesto los dos módulos más importantes de cada diseño que son los *VI* responsables de llevar la ejecución de los mismos. A continuación se presentan otros módulos que son de gran importancia para el TFG. Por orden de actuación en el proceso de la ejecución, se hablará de:



- 1) *Random Bits.vi*: Es el responsable de la creación de los bits de información (se envían bits aleatorios), ya que todos los canales están formados con ese tipo de bits en este diseño, a excepción del FCCH cuyos bits fijos es un *array* de 142 bits a 0 y el TCH en el diseño de BTS-Control Básico, ya que se transmite el patrón de bits que el usuario desee.
- 2) Implementación de los canales: Estos bits de información tienen que pasar por un proceso de codificación correspondiente a cada canal. Esta función es la que se lleva a cabo en los respectivos *VIs* de cada canal. Aunque el TFG especifique a priori que se diseñan funcionalidades de control de una BTS, también se han diseñado e incorporado canales de tráfico de voz (TCH/FS).
- 3) *Bursts.vi*: Los bits resultantes anteriores pasan por este módulo, donde se realiza la composición de una ráfaga y del que salen los 148 bits que conforman la misma (excepto los 8.25 períodos de bits de guarda que se incluirán después de la modulación).
- 4) Creación de la multitrama correspondiente: Se trata de un módulo únicamente utilizado en el diseño de la BTS Estructurada. Su función es crear una multitrama con las ráfagas que salen del *VI* anterior. Se centrará la atención en explicar cómo se forma la MF-51 de alta capacidad (*CreateMF-51.vi*), ya que con ella se comprenderán las demás que son *CreateMF-51Dedicated.vi* y *Create 4 MF-26.vi*.
- 5) *Modulador.vi*: Se trata del *VI* responsable de la modulación de 148 bits correspondientes a una ráfaga.
- 6) *ConformaTrama.vi*: Módulo responsable de la unión de 8 ráfagas salientes de *Modulador.vi*, para añadir los períodos de guarda y formar la trama completa preparada para su transmisión.
- 7) *FrameComprobation.vi*: Responsable de comprobar la configuración de la trama por parte del usuario (usado sólo en BTS Estructurada).
- 8) *TxTrama.vi*: Es el módulo que se encarga de la transmisión de una trama a través del NI-USRP.

Además de estos, también se encuentran unos archivos como por ejemplo *InsertTSC.vi* o *interleaver.vi*, el primero de ellos encargado de incluir la secuencia de entrenamiento de las ráfagas normales, bien se trate de canales de tráfico o de control, mientras que el segundo se encarga de realizar el entrelazado de bits correspondiente a los canales de tráfico o control [46].

Seguidamente se encuentran los *VI* que componen el TFG y cuyas funciones ya han sido definidas. Ahora, se va a explicar la disposición de las tareas en el diagrama de bloques de LabVIEW y el por qué de las mismas.

### 4.3.1. *Random bits.vi*

El módulo que aquí se presenta (Figura 4.10) es el más prematuro, es decir, del que nace cualquier almacenamiento de bits y formación de ráfagas. Se trata de cómo se forman los bits de información.

Puesto que se trata de una BTS con funcionalidades de control, la información transmitida no es de gran importancia en la mayoría de los canales, excepto en el FCCH y TCH en la BTS-Control Básico, donde se envían todo 0s y unos patrones de bits, respectivamente.

A esta función se le pasa un valor numérico indicador del número de bits que se desea, por el cual se crea un bucle `for` con ese número de iteraciones en la que en cada una de ellas se crea un bit nuevo y se concatena al *array* anterior incrementándose de esta manera el tamaño del *array* de bits.

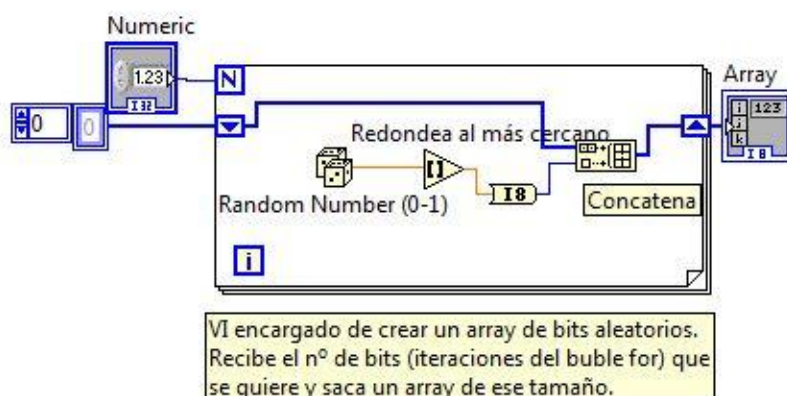


Figura 4.10: *Random bits.vi*

### 4.3.2. Implementación de los canales

En este apartado se presenta la creación de posiblemente una de las partes más importantes del proyecto. Como todos sabemos los canales son los responsables de transmitir la información y por ello se tienen que proteger contra errores en la transmisión. Aquí se muestra la manera en la que ellos son formados con su codificación incluida.

Se presentan 3 de ellos (BCCH, SCH y TCH/FS), ya que los restantes (AGCH, PCH, SACCH, SDCCH) se hallan de la misma manera que el BCCH.

#### **BCCH:**

La formación de este canal es la que indica el estándar de *GSM 05.03 Channel coding v8.5.1* en el apartado 4.1. En la Figura 4.11 se pueden observar unos números

que indican un proceso importante en la construcción del estándar. Su significado es el siguiente:

- 1) Recibe 184 bits de información.
- 2) Se ponen inicialmente los bits de paridad a 1 todos.
- 3) Se añaden los bits de paridad provisionales.
- 4) Generación del polinomio generador del código *FIRE*.
- 5) División por el polinomio generador: El resto serán ya los bits de paridad.
- 6) Se transforman en bits.
- 7) Adhesión de bits, incluso 4 bits 0 de cola.
- 8) Codificador convolucional.
- 9) Entrelazado de bits.
- 10) El resultado final son 4 bloques de 114 bits cada uno (456 bits).

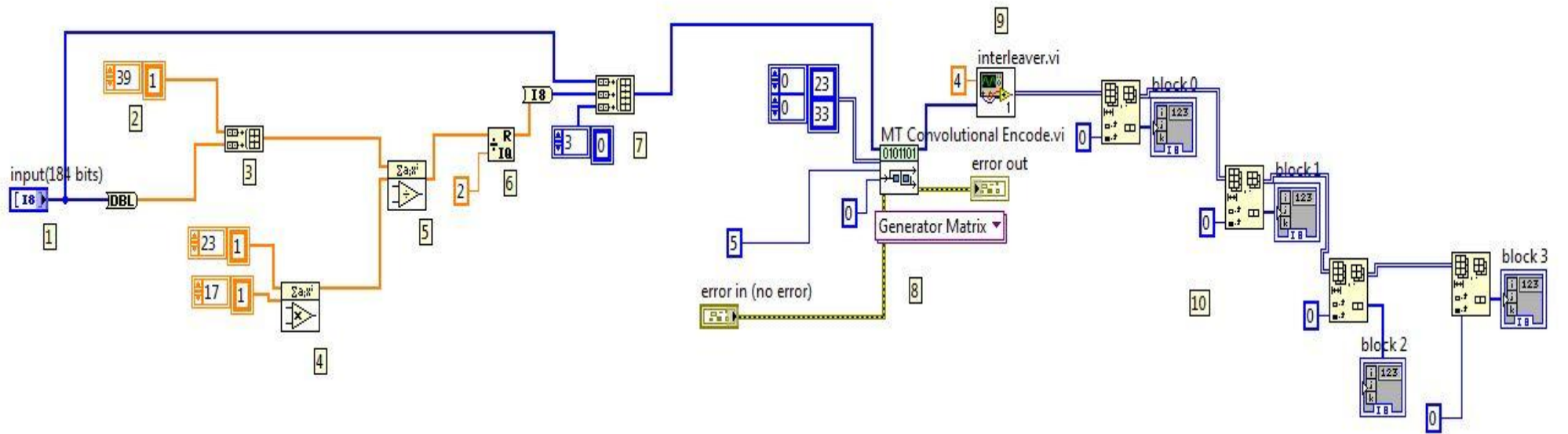


Figura 4.11: *BCCH.vi*

### SCH:

De la misma manera que el BCCH, se explica el proceso de su creación (Figura 4.12), el cual corresponde con el apartado 4.7 de *GSM 05.03 Channel coding v8.5.1*:

- 1) Recibe los 25 bits de información.
- 2) Calcula los bits de paridad que como inicialmente se han puesto a 1, el resto de la división con el polinomio convolucional son directamente los de paridad.
- 3) Se añaden los bits de cola.
- 4) Se pasa por el codificador convolucional para que resulten los 78 bits preparados para hacerlos corresponder con la ráfaga.

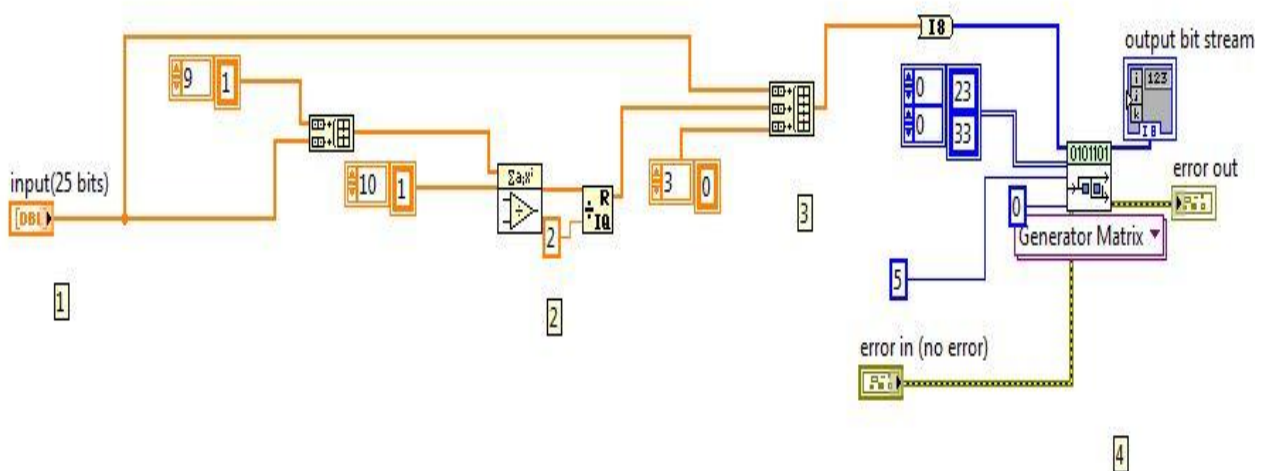


Figura 4.12: *SCH.vi*

### TCH/FS:

El proceso para calcular este canal es el del apartado 3.1 del estándar *GSM 05.03 Channel coding v8.5.1*. Es un poco más complejo que los anteriores, ya que aquí tenemos que hacer distinción entre 3 tipos de información: los bits de la clase 1A, los bits de la clase 1B, y los bits de la clase 2 (no protegidos). Aún así, se cree conveniente citar de forma breve los pasos seguidos y representados en la Figura 4.13:

- 1) Recibe 260 bits de información ordenados de mayor a menor relevancia.
- 2) Coge los 50 primeros bits (los más relevantes).
- 3) Crea los bits de paridad (inicialmente puestos a 1 y posteriormente hallados con el polinomio generador).
- 4) Reordena los bits de información de la clase 1.
- 5) Añade los bits de paridad y 4 bits de cola a 0.
- 6) Saca de los 260 bits de información iniciales los 78 últimos que son los de la clase 2.
- 7) Codificador convolucional con los bits de la clase 1A y 1B. Resultan 189 bits.

- 8) Entrelazado de los 456 bits finales.
- 9) Se sacan 8 bloques de 57 bits cada uno.

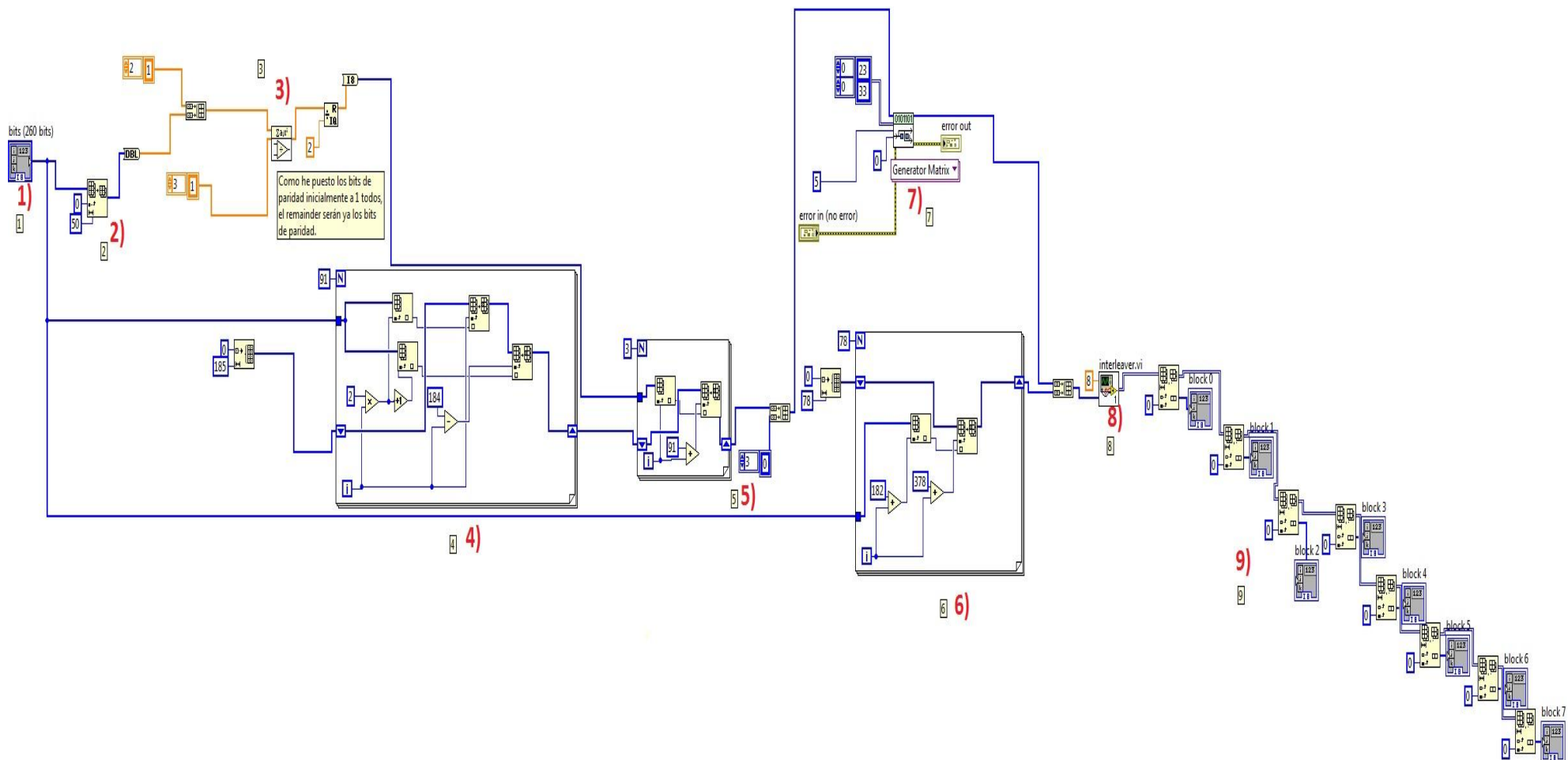


Figura 4.13: *TCH.vi*

### 4.3.3. Bursts.vi

Se presenta en la Figura 4.14, Figura 4.15 y Figura 4.16 el módulo responsable de la creación de las ráfagas. Esta función recibe una ristra de bits y el tipo de ráfaga que se desea crear con esos bits de entrada.

El cuerpo de este VI está formado un una estructura *case*, cuyos casos son los 3 que se incluyen a continuación. La formación de las ráfagas se hace tal y como indica el estándar *GSM 05.02 Burst v8.5.1* en el apartado 5.2, pero básicamente es la adhesión de unos bits de cola al inicio y al final de la ráfaga, la secuencia de entrenamiento en la ráfaga normal y extendida en la ráfaga de sincronización, resultando 148 bits en cualquier caso.

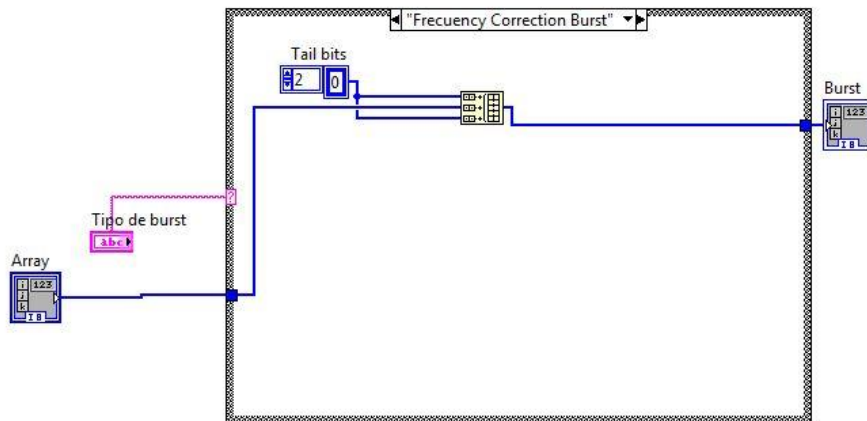


Figura 4.14: *Bursts.vi* (Caso FB)

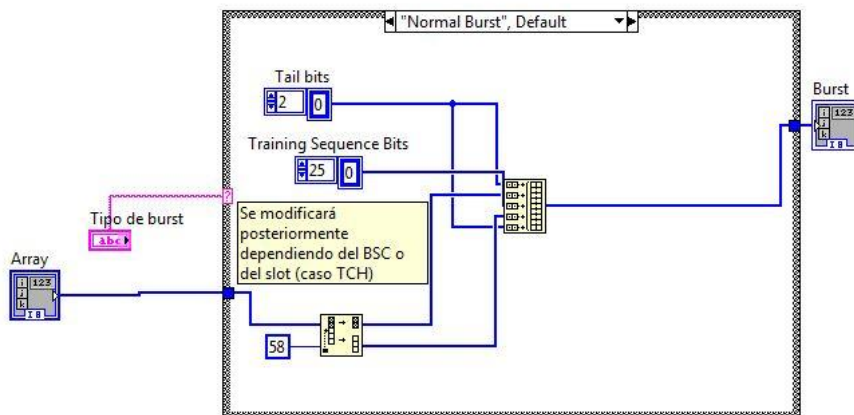


Figura 4.15: *Bursts.vi* (Caso NB)



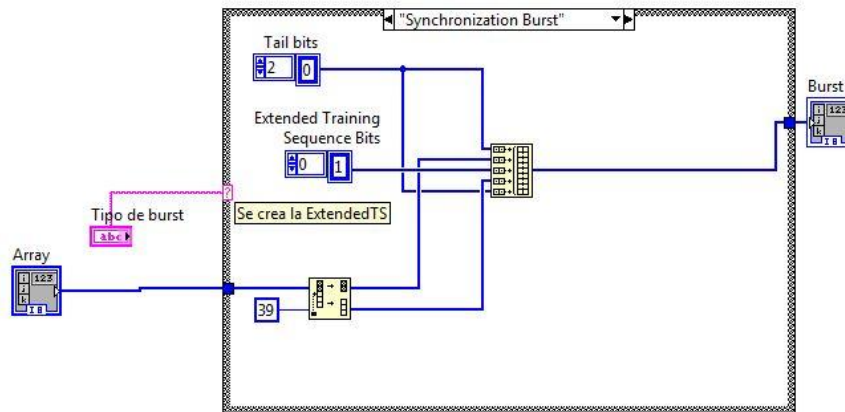


Figura 4.16: *Bursts.vi* (Caso SB)

#### 4.3.4. CreateMF-51.vi

Como se ha comentado, se explica el diseño de este módulo con el fin de comprender no sólo la creación de la multitrama 51 de alta capacidad, sino además el de la multitrama 51 con los canales dedicados y la multitrama 26 con los de tráfico, ya que la forma en la que se componen estas es análoga a la primera.

Este VI forma parte del sistema BTS Estructurada, ya que como se ha presentado, la otra opción de sistema sólo es capaz de enviar canales aislados.

Para refrescar la memoria, la composición de la MF51 de alta capacidad es la siguiente:

F	S	B	B	B	B	C	C	C	C	F	S	C	C					F	S	C	C	C	C	C	C	C	C	-
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Así, se ve cómo:

- En el slot 2 comienza una sucesión de 4 ráfagas de BCCHs.
- En los slots 0, 10, 20, 30 y 40 hay una ráfaga de corrección de frecuencia.
- En los slots 1, 11, 21, 31 y 41 hay una ráfaga de sincronización.
- En los slots 6, 12, 16, 22, 26, 32, 36, 42, 46 comienzan unas sucesiones de 4 ráfagas de canales de acceso o de *paging* (AGCH o PCH), aunque en este caso por defecto está configurado que todos sean AGCH.

Precisamente esto es lo que se observa en la estructura que compone este VI mostrado en la Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19 y Figura 4.20, la cual es un case cuyos casos son los números de trama del 0 al 50.

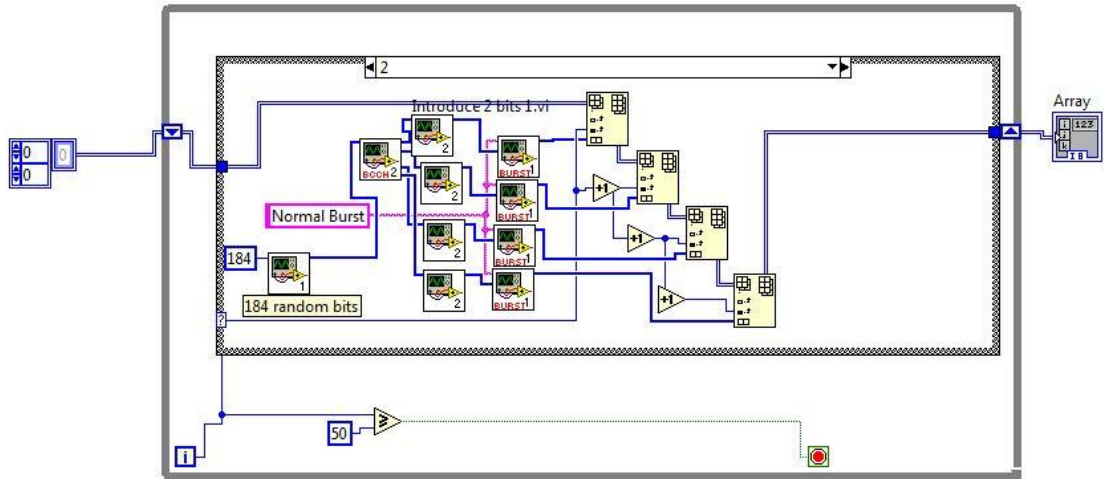


Figura 4.17: *CreateMF-51.vi* (case A)

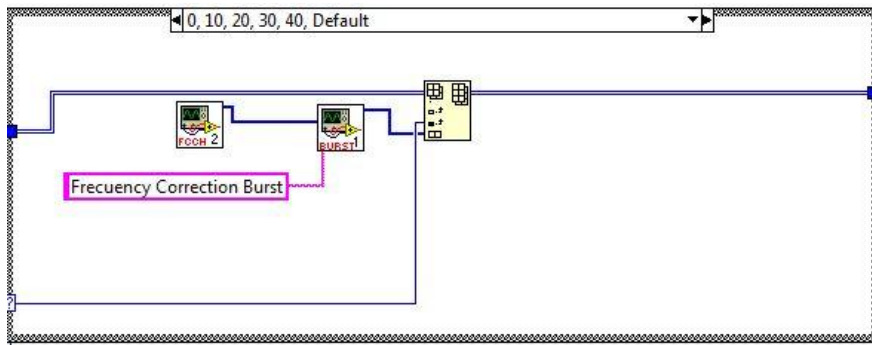


Figura 4.18: *CreateMF-51.vi* (case B)

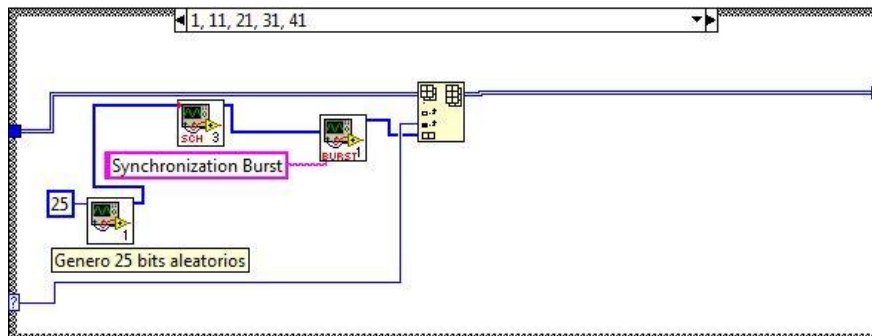


Figura 4.19: *CreateMF-51.vi* (case C)

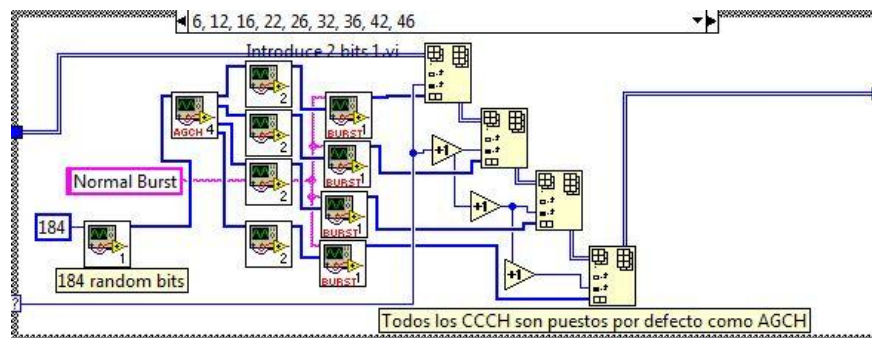


Figura 4.20: *CreateMF-51.vi* (case D)

#### **4.3.5. Modulador.vi**

Se trata de la función responsable de modular cada *slot*. En este diagrama de bloques se utilizan funciones que proporciona LabVIEW en su *Modulation Toolkit* como son: *MT Generate Filter Coefficients.vi*, *MT Generate Filter Parameters.vi* o *MT Modulate MSK.vi*.

Sin embargo, y como se observa en el diagrama de bloques adjunto en la Figura 4.21, el codificador diferencial que contiene la función *MT Modulate MSK.vi* no es el mismo que el requerido por el modulador de GSM. Por ello, se ha desactivado este y se ha realizado uno propio como se observa en el paso 3).

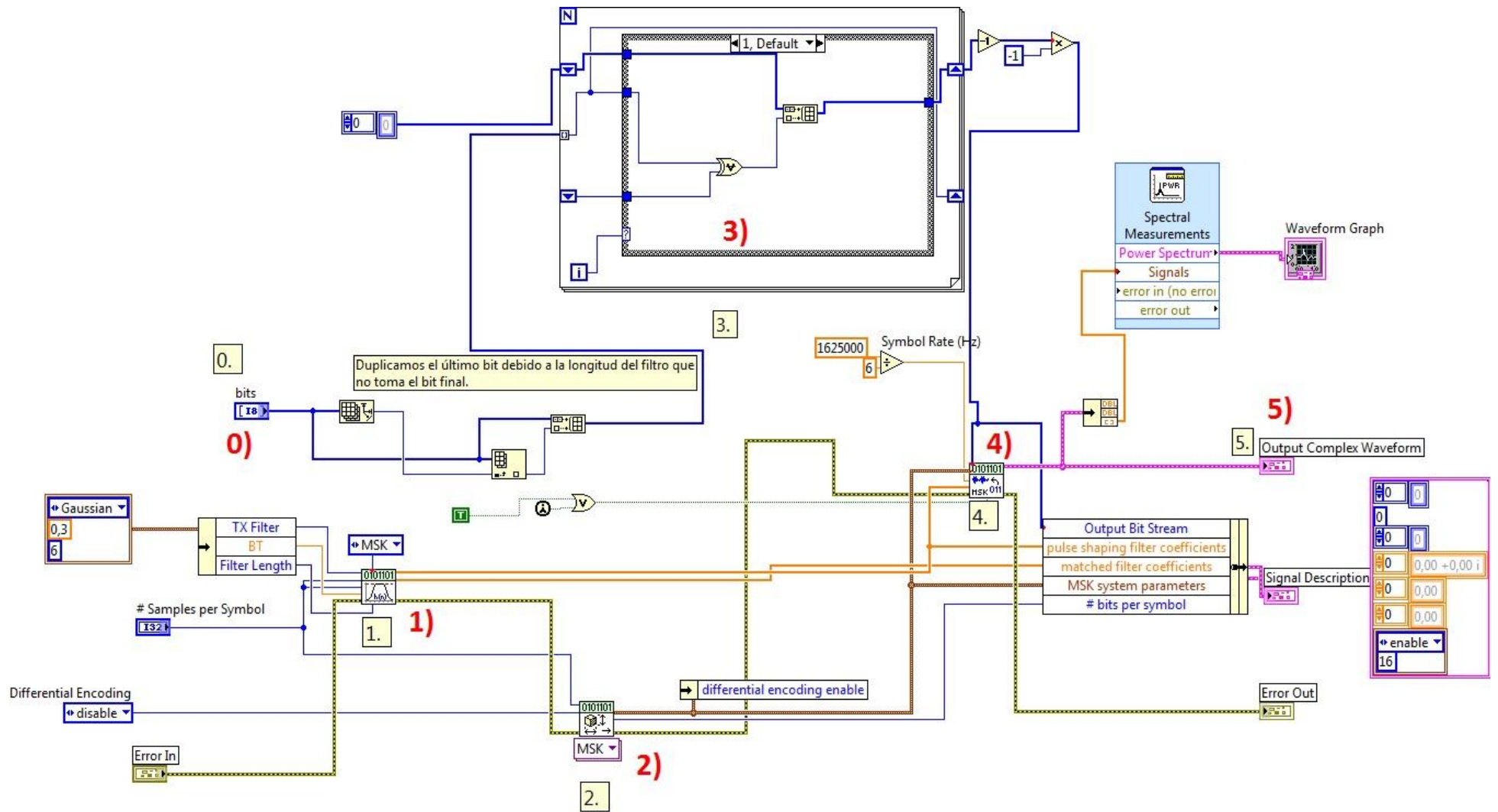


Figura 4.21: *Modulador.vi*

Se citan los pasos seguidos:

- 0) Recibe 148 bits.
- 1) Se crea el pulso conformador gaussiano.
- 2) Se crean los parámetros de la modulación MSK.
- 3) Codificador diferencial.
- 4) Modulación MSK con los parámetros antes calculados y con la ráfaga de bits.
- 5) Salida de la forma de onda resultante.

#### ***4.3.6. ConformaTrama.vi***

Como su propio nombre indica, esta función se encarga de la formación de una trama completa. En primera instancia se muestra su diagrama de bloques (Figura 4.22) del sistema BTS Estructurada (el propio del sistema BTS-Control Básico es muy similar) y posteriormente se explica cada paso:

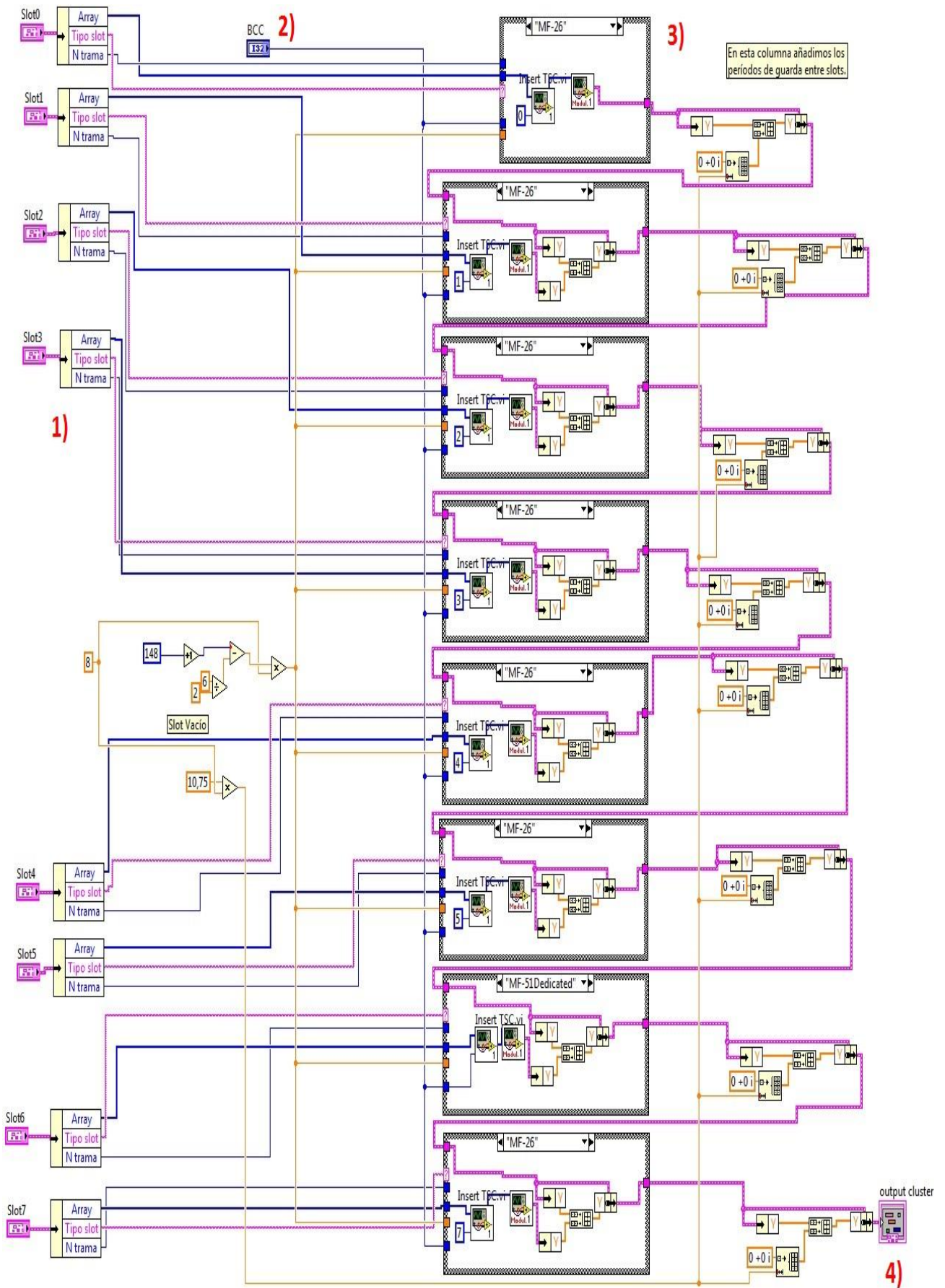


Figura 4.22: **ConformaTrama.vi**

- 1) Se reciben los 8 slots, cada uno de ellos con la información (148 bits), el tipo de slot, mejor dicho, el tipo de MF al que pertenece (“MF-51”, “MF-51Dedicated”, “MF-26”, o vacío “”) y el número (N) de trama que le corresponde.
- 2) También se recibe el parámetro BCC (*Base Station Colour Code*) para determinar la TS correspondiente de las ráfagas normales (excepto TCH).
- 3) Se unifican todos los slots siguiendo estos pasos:
  - a) Se comprueba el tipo de MF al que pertenece:
    - i) Si está vacío “” se crea un slot vacío.
    - ii) Si es “MF-51” se comprueba si es un SCH (tiene ya su secuencia extendida), si no lo es se añade la TS que indica el BCC.
    - iii) Si es un “MF-51Dedicated” se añade la TS que indica el BCC.
    - iv) Si es un “MF-26” se añade la TS correspondiente al slot al que pertenezca.
  - b) Se modula cada slot de forma independiente.
  - c) Se une a los slots anteriores para ir formando la trama. Después de unir el slot, se añade el período de guarda correspondiente.
- 4) Se saca la trama completa.

#### **4.3.7. FrameComprobaton.vi**

Una vez que se tiene la trama lista para enviar, antes de hacerlo se comprueba que la configuración hecha por el usuario es correcta. Las restricciones que se deben cumplir son:

- 1) No se ha configurado más de un *slot* para difusión.
- 2) No se ha configurado más de un *slot* para canales dedicados de tipo 1.
- 3) No se ha configurado más de un *slot* para a canales dedicados de tipo 2.

La marca en amarillo de la Figura 4.23 indica el parámetro de salida, cuyos valores son TRUE si se no se cumplen las restricciones, y FALSE en caso de que la configuración sea correcta.



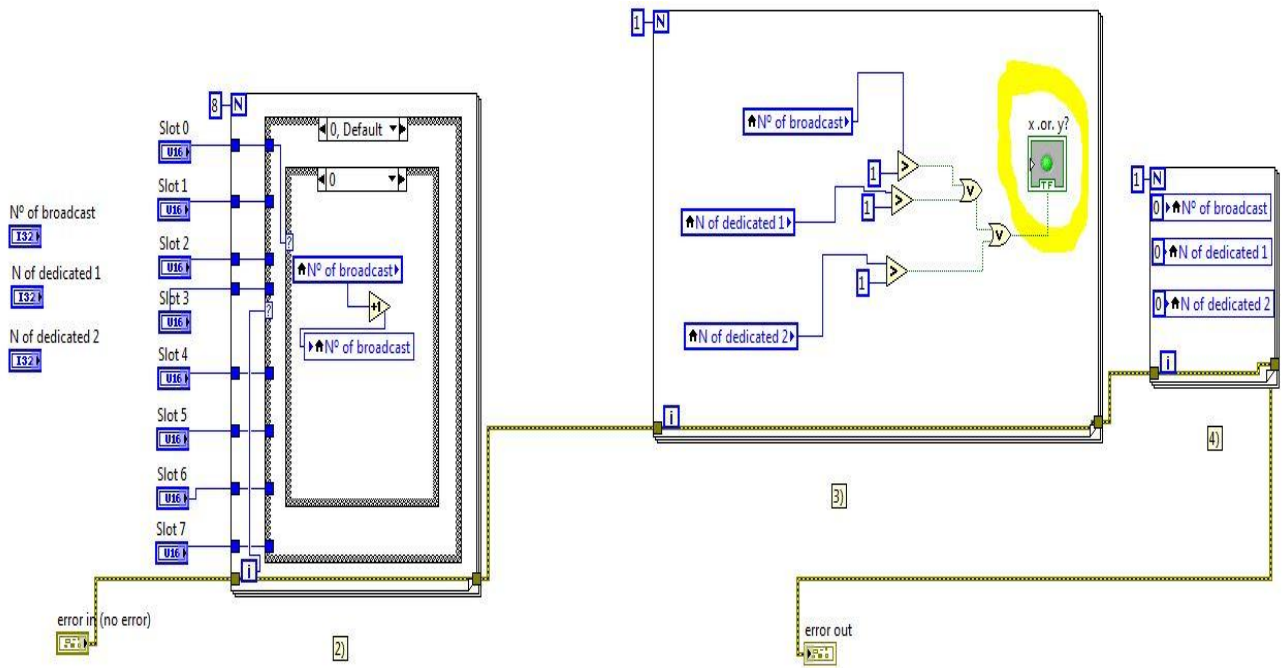


Figura 4.23: *FrameComprobaton.vi*

Evidentemente, este módulo no tiene sentido en el segundo diseño de BTS presentado (BTS-Control Básico), ya que su objetivo es poder analizar lo mejor posible los canales de GSM y se da mayor flexibilidad en su configuración, por lo que no saltan mensajes de error como en este caso cuando la configuración de la trama es incorrecta.

#### 4.3.8. *TxTramaUSRP.vi*

Por último se presenta el módulo responsable de la transmisión de la trama (Figura 4.24). Este lo único que hace es transmitir a través del USRP, y para ello se le da como parámetros de entrada la sesión abierta con el hardware USRP, los datos que se desean transmitir, y el error de entrada como control del programa para proteger al equipo.



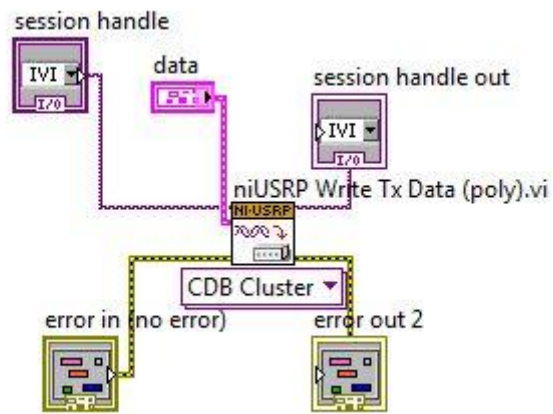


Figura 4.24: *TxTramaUSRP.vi*

## 5. Pruebas y Validación

En este capítulo se pretende demostrar con una serie de pruebas y ejemplos que el sistema diseñado funciona como se desea. Para ello, en primer lugar se muestra unas pruebas conjuntas de los dos diseños, tanto de la BTS Estructurada como de la BTS-Control Básico, y posteriormente se incluirán unas pruebas específicas para cada sistema.

Para la realización de todas las pruebas se ha seguido la misma dinámica que a lo largo de todo el TFG, es decir, se ha configurado el Agilent VSA 89600 [5] para que la señal que reciba sepa que es de la segunda generación de comunicaciones móviles, para que así configure el demodulador digital correspondiente o un *trigger* para cuando reciba un *slot*, entre otras cosas. Con este receptor, y transmitiendo la señal desde el NI USRP 2920 [2], podremos evaluar la validez de la misma analizando los resultados que aparecen en el software del Agilent VSA 89600.

### 5.1. Cumplimiento de tiempos

A continuación se muestra en la Figura 5.1, Figura 5.2 y Figura 5.3 que los tiempos de *slot* y trama son los que el estándar de GSM especifica.

Las capturas que aquí se incluyen son del software Agilent VSA 89600 y corresponden a imágenes de la señal recibida en tiempo. La configuración realizada en el sistema diseñado en este TFG son 8 *slots* activados, sin tener en cuenta la clasificación de los mismos ya que aquí sólo interesa la duración temporal de la señal.

Cada una de las imágenes muestran el tiempo real en el que se encuentra la marca blanca incluida sobre la propia señal, es decir, que el tiempo mostrado corresponde con la marca incluida.

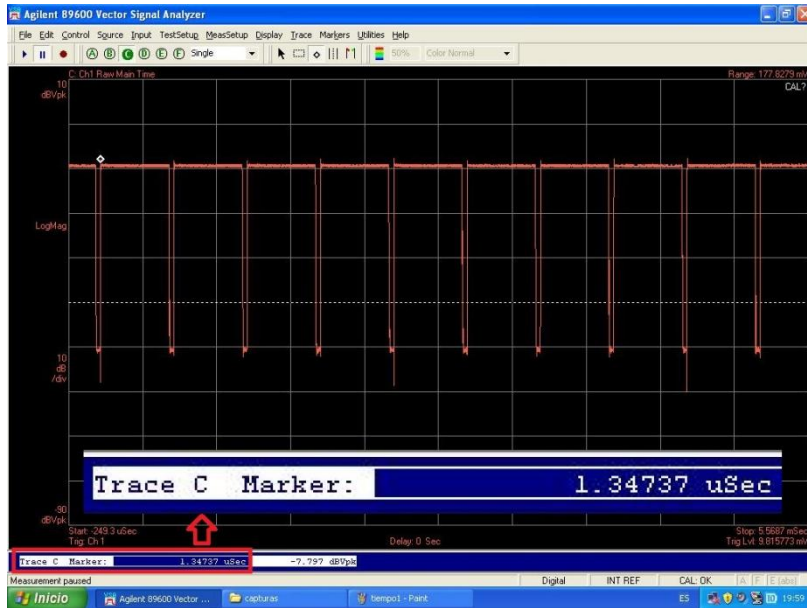


Figura 5.1: Marca temporal de referencia VSA

El tiempo que muestra la Figura 5.1 se tomará como referencia, y con la Figura 5.2 y Figura 5.3 se demostrará que los tiempos de *slot* y de trama son los correctos.

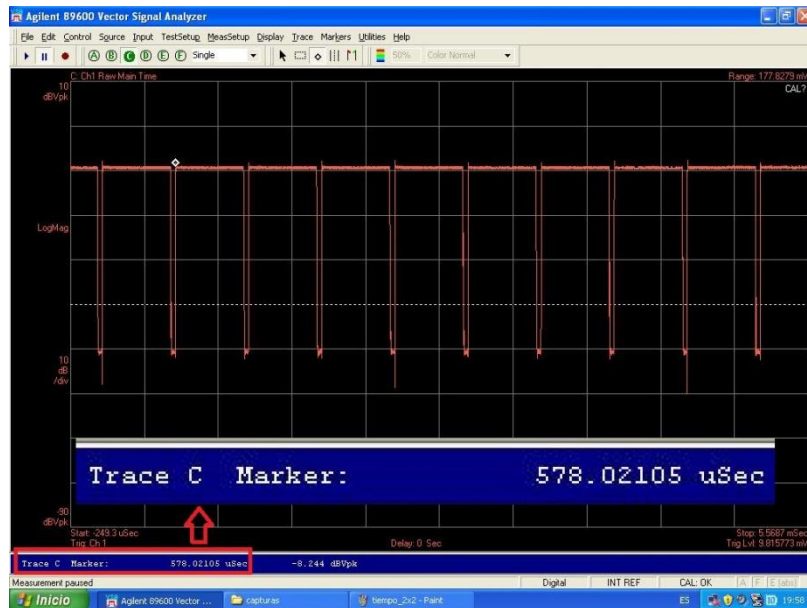


Figura 5.2: Marca temporal *slot*

Como se ha comentado en el apartado El recurso físico el tiempo de *slot* es de aproximadamente 577  $\mu$ s. La duración de este en el sistema diseñado es:

$$578.02105 - 1.34737 \approx 576.67 \mu\text{s}$$

Por lo tanto, se efectivamente el sistema diseñado está cumpliendo con el estándar GSM y la duración de un *slot* es de 577  $\mu$ s aproximadamente.

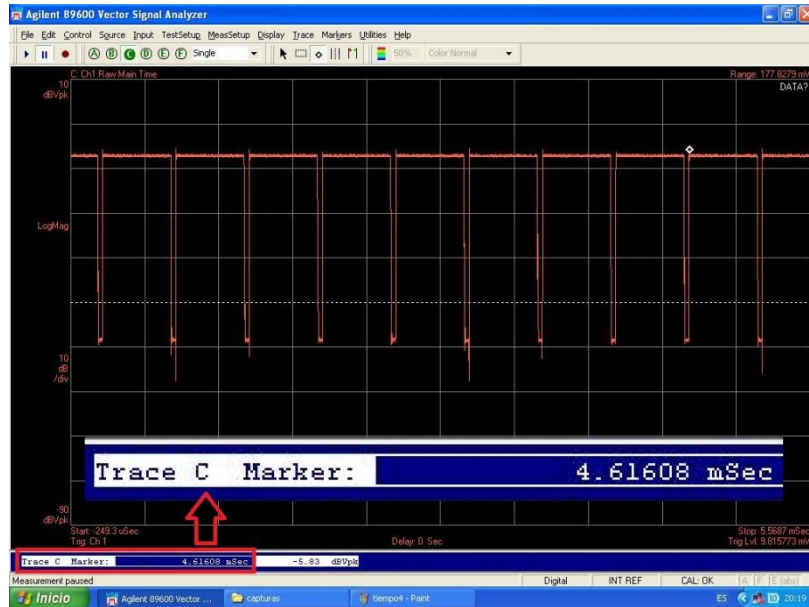


Figura 5.3: Marca temporal trama

Con la Figura 5.3 se calcula el tiempo de trama, que como ya se ha citado en el apartado El recurso físico, es de 4.62 ms. Hay que fijarse cómo la marca de esta figura se encuentra a 8 *slots* con respecto a la marca de la primera, es decir, que comprende una trama completa. Se calcula la duración de la trama que se está transmitiendo realmente en el sistema:

$$4.61608 - 0.00134737 \approx 4.615 \text{ ms}$$

Se puede concluir por lo tanto que el sistema diseñado cumple con las especificaciones en cuanto a duración de *slot* y de trama.

## 5.2. Forma de onda

En este apartado se pretende demostrar que la señal enviada por el NI USRP-2920 y por lo tanto la que se ha diseñado, y la transmitida a través del Agilent ESG E4438C es la misma. Para ello, se ha elegido el FCCH como el *slot* a comparar. Se ha capturado ese *slot* recibido en el Agilent VSA 89600 transmitiéndose en los dos distintos transmisores y se ha pintado en MATLAB. El resultado se muestra en la Figura 5.4:

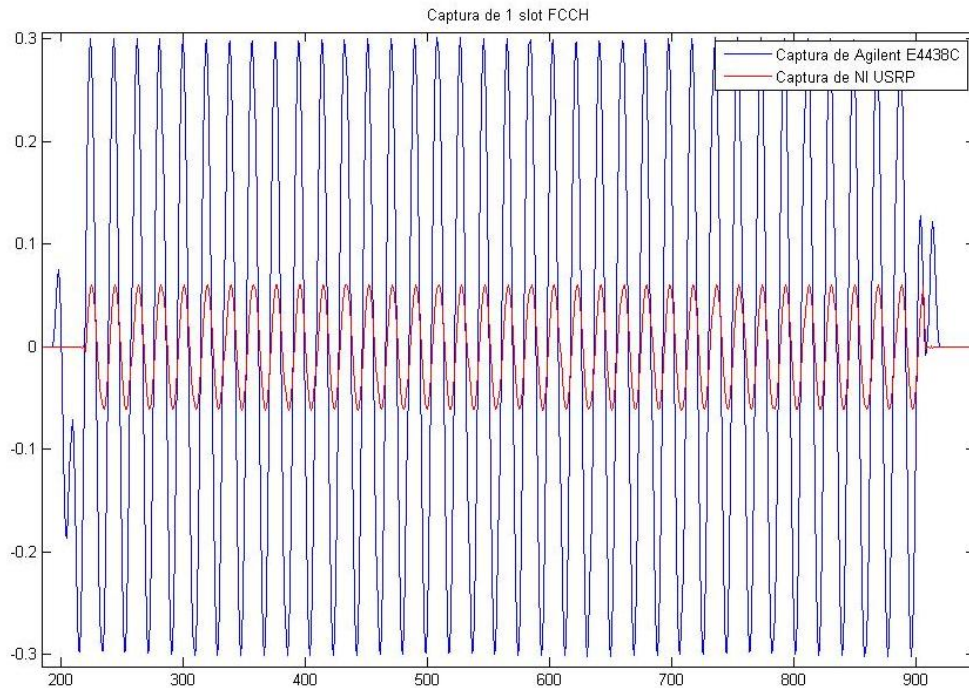


Figura 5.4: Comparación FCCH MATLAB

La conclusión es que la forma de onda es la misma, coincidiendo en tiempo los máximos y mínimos así como los ceros de la señal. Por lo tanto, **el modulador diseñado está correctamente**. La diferencia entre ambas señales es la amplitud de las mismas, pero eso es una cuestión de la potencia en transmisión y recepción.

Además, para demostrar que en el tiempo ambas señales no se desincronizan y se mantiene la temporización, se ha hecho una captura de 23 tramas activando un solo *slot* en cada una. Se ha pintado en el mismo gráfico sobre MATLAB y se ha comprobado cómo a lo largo del tiempo las duraciones se mantienen constantes. El resultado se muestra en la Figura 5.5.

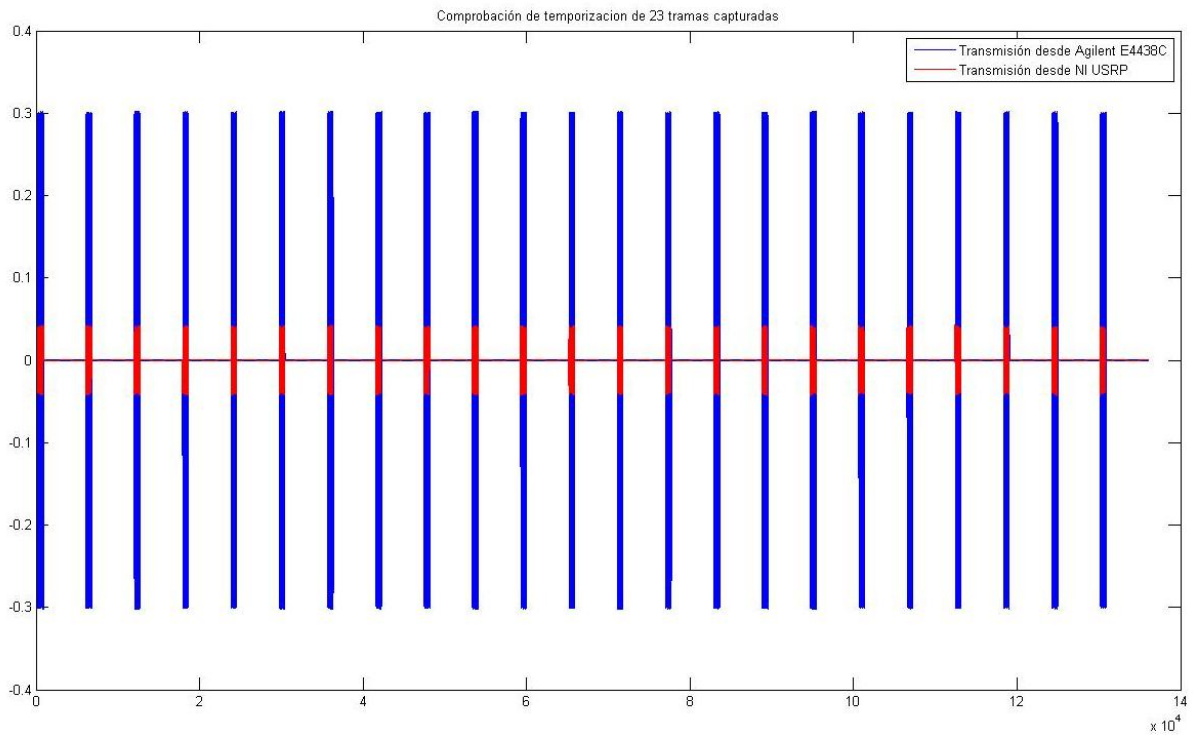


Figura 5.5: Comprobación sincronización FCCH

### 5.3. Pruebas de la BTS Estructurada

Aquí se incluyen las pruebas específicas del funcionamiento de la BTS Estructurada.

En la Figura 5.6 se muestra la configuración realizada en la interfaz de usuario. Se ha configurado para el primer *slot* los canales *Broadcast High Capacity*, es decir, que en ese primer slot irán los canales propios de la MF-51: FCCH, SCH, BCCH y AGCH o PCH.

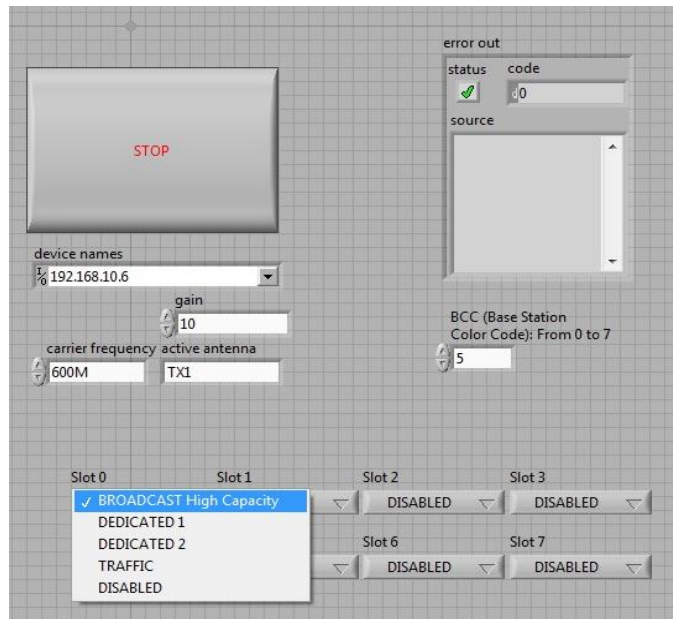


Figura 5.6: Configuración *Broadcast High Capacity*

La secuencia de entrenamiento de los canales BCCH, AGCH y PCH corresponde con la indicada en el BCC propio de la BTS. Este parámetro se deja a elección del usuario, y para demostrar que funciona correctamente se adjunta una captura del Agilent VSA 89600 en la Figura 5.7, donde se observa cómo recibe la secuencia de entrenamiento correspondiente al BCC=5 configurado en la interfaz del usuario de la Figura 5.6.

Las secuencias de entrenamiento posibles de un *Normal Burst* son las siguientes, mostradas en la Tabla 5.1:

Código de la secuencia de entrenamiento (TSC)	Secuencia de entrenamiento (TS)
0	(0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1)
1	(0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1)
2	(0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0)
3	(0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0)
4	(0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1)
5	(0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0)
6	(1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1)
7	(1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0)

Tabla 5.1: Secuencias de entrenamiento *Normal Burst*

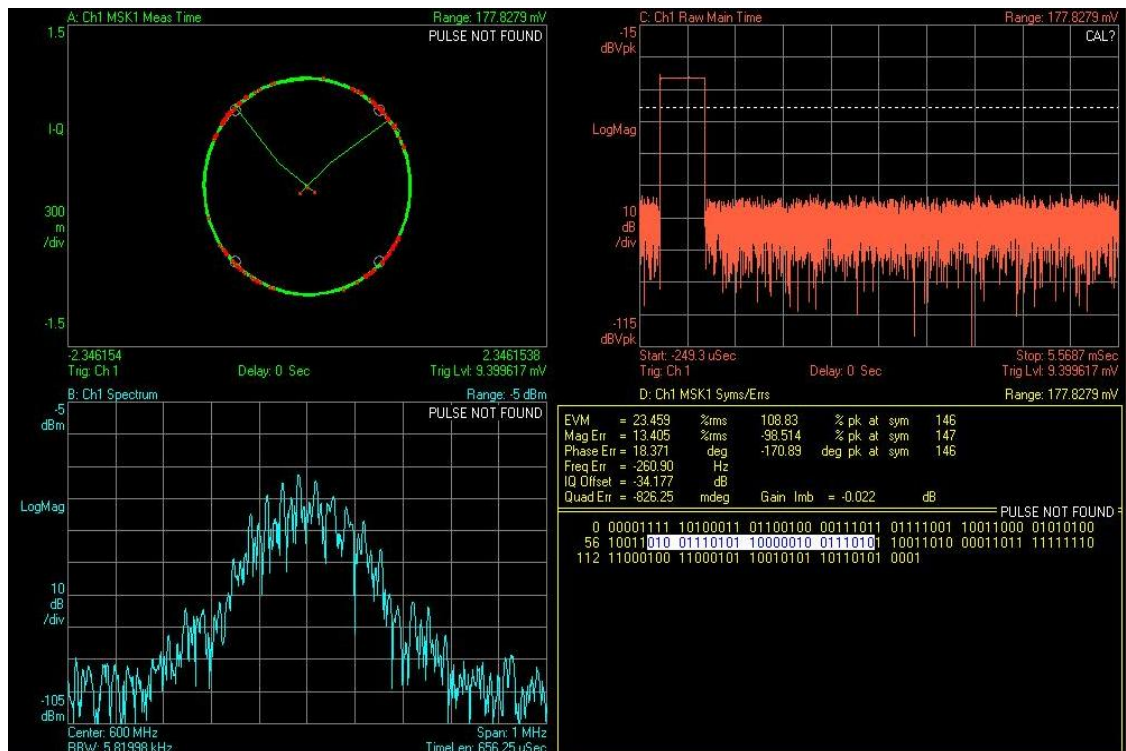


Figura 5.7: Resultado *Broadcast High Capacity*

Se cumple lo esperado, ya que **se envía correctamente la secuencia de entrenamiento correspondiente al parámetro BCC que se ha configurado**. Además se debe tener en cuenta que la secuencia de entrenamiento se recibe en la posición correcta del slot, es decir, entre los bits 61 y 86 (marcado por el Agilent VSA 89600 con un fondo blanco).

Por último, de esta prueba cabe resaltar que la constelación (gráfica de la parte superior izquierda de la Figura 5.7) es una circunferencia tal y como se esperaba, ya que GMSK es una modulación en fase y los puntos se mueven con la misma distancia al origen nada más que variando la fase.

En los canales de tráfico (TCH), que también tienen una secuencia de entrenamiento de las aquí presentes ya que es un tipo de ráfaga normal, se demuestra a continuación que también lo cumple. Sin embargo, en estos canales el TSC no es el BCC de la BTS, sino el *slot* en el que se encuentra ese TCH.

En la Figura 5.8 se muestra la nueva configuración de la BTS Estructurada.



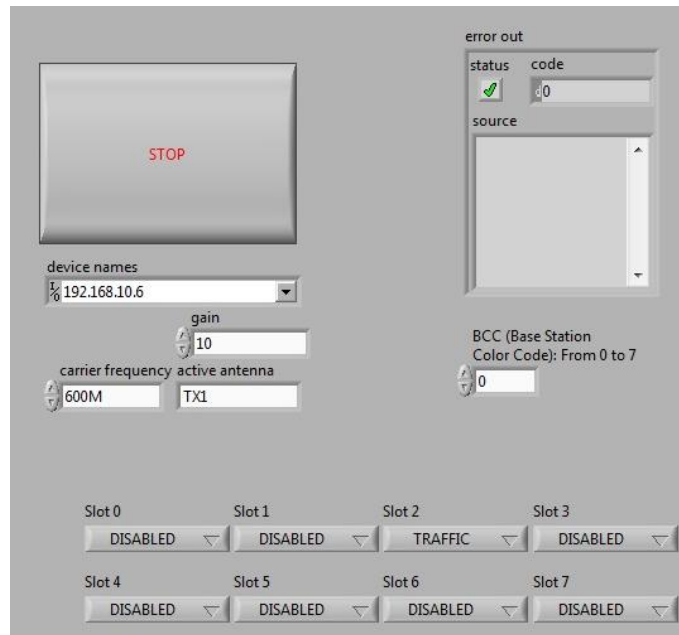


Figura 5.8: Configuración TCH en BTS Estructurada

Los resultados obtenidos con esta configuración son los mostrados en la Figura 5.9:

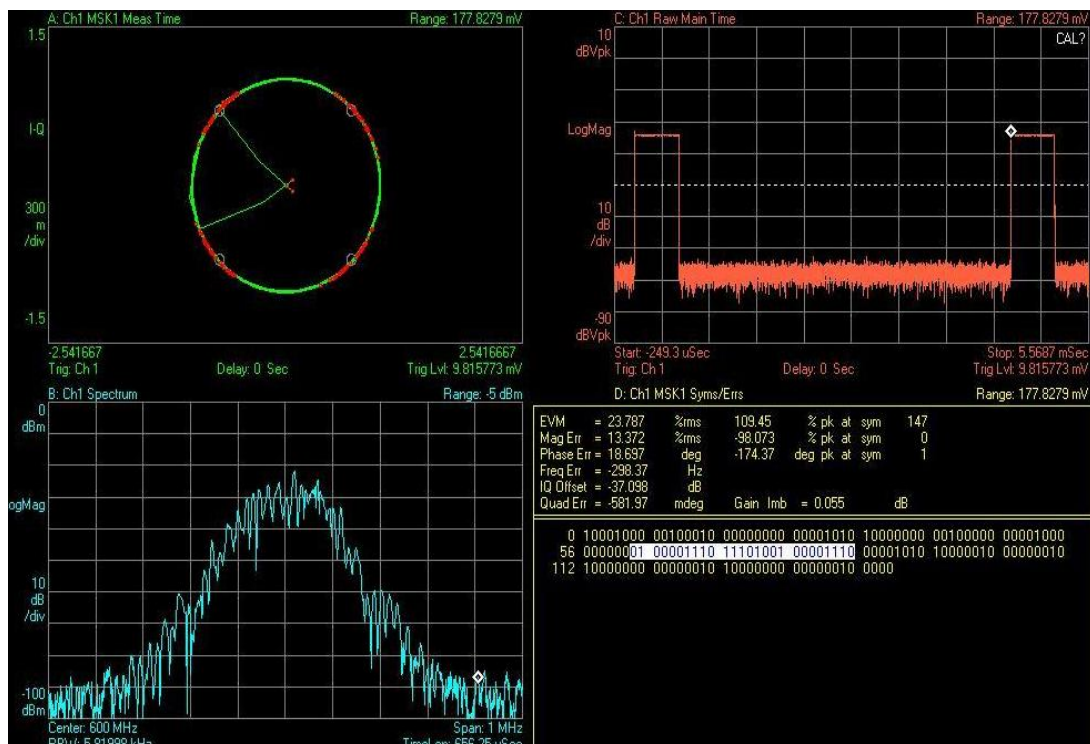


Figura 5.9: Resultado Configuración TCH en BTS Estructurada

Observando la configuración y los bits recibidos, se ve cómo efectivamente la secuencia de entrenamiento transmitida es la correspondiente al *slot 2* que es donde se transmite el canal de tráfico: (0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0).

En esta BTS, en el apartado *FrameComprobation.vi* se han enumerado las 3 configuraciones incorrectas que se pueden dar. En la Figura 5.10 se muestra uno de los ejemplos, en concreto cuando se configuran dos slots para canales de tipo *Broadcast*. El mensaje que aparece para los otros dos tipos de error es el mismo.

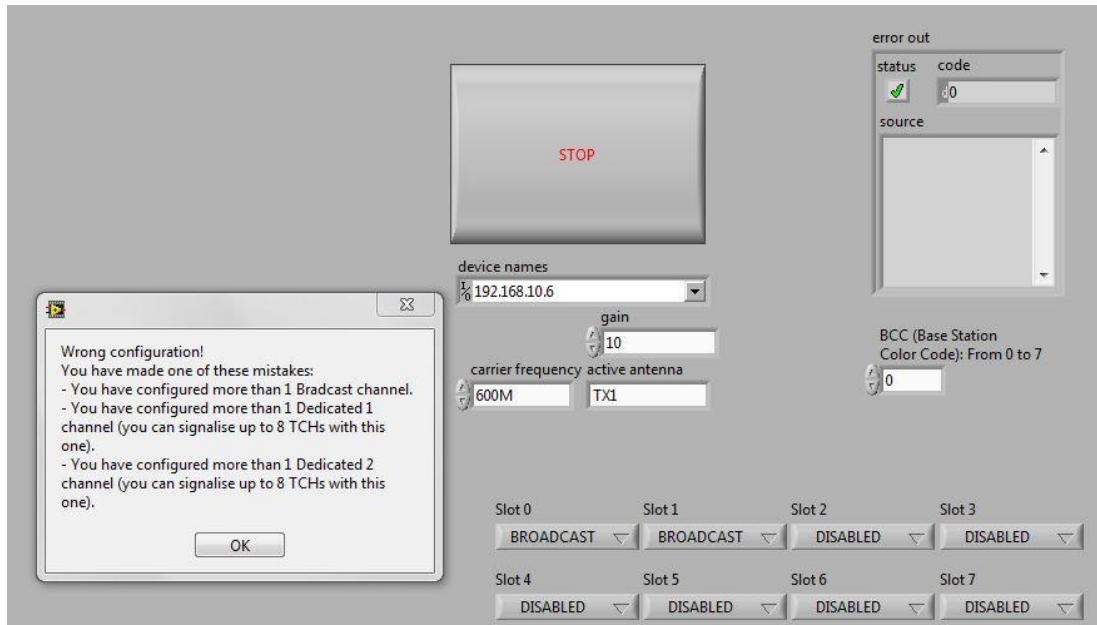


Figura 5.10: Ejemplo configuración incorrecta BTS Estructurada

## 5.4. Pruebas de la BTS-Control Básico

Ya se ha demostrado que la secuencia de entrenamiento de un TCH se envía correctamente, y que esta depende del *slot* en el que se configure. Sin embargo, con esta BTS podemos transmitir en el canal de tráfico un patrón de 8 bits a elegir entre 16 posibles. Hasta ahora se han hecho pruebas activando un solo *slot*. Para mostrar que el sistema es completamente válido, en la Figura 5.11 se muestra una configuración de BTS en la que se activan dos *slots*. En los resultados de las Figuras 5.12 y 5.13 veremos la validez de la señal.

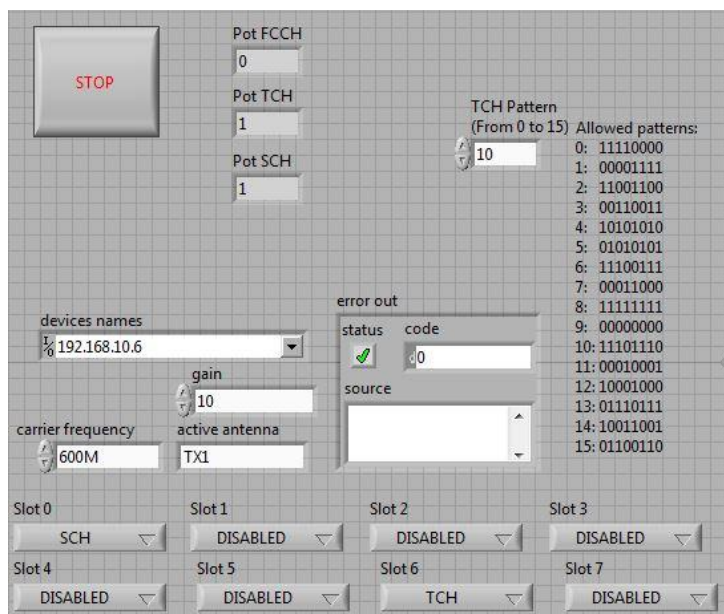


Figura 5.11: Configuración SCH+TCH en BTS-Control Básico

Como se observa en la Figura 5.11, la configuración realizada es:

- 1 canal SCH en el *slot* 0.
- 1 canal TCH en el slot 6 con el patrón número 10 (11101110).

En la Figura 5.12 en la que se muestra el slot correspondiente al SCH enviado se pueden analizar varias cosas:

La constelación, como en casos anteriores, es completamente válida y típica de una modulación GMSK. La imagen en rojo correspondiente a la señal en tiempo, es de destacar que justo en esta captura aparecen el *slot* 6 de una trama y los *slots* 0 y 6 de la siguiente. De ahí que aparezcan 3 *slots*.

En cuanto a los bits demodulados, en la Figura 5.12, en blanco se muestra parte de la secuencia de entrenamiento extendida capturada del slot recibido<sup>6</sup>. Como se ha explicado en el apartado El recurso físico del capítulo 2, la ráfaga de sincronización tiene una secuencia de entrenamiento extendida de 64 bits cuyos valores son: (1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1). Se puede comprobar cómo **efectivamente la secuencia de entrenamiento extendida es la correcta**, tanto en bits como en posición, ya que comienza y acaba en las posiciones que indica el estándar y que se ha mencionado en el apartado El recurso físico con la formación de las ráfagas.

<sup>6</sup> En el Agilent VSA 89600 tiene un máximo de 32 bits para remarcar.

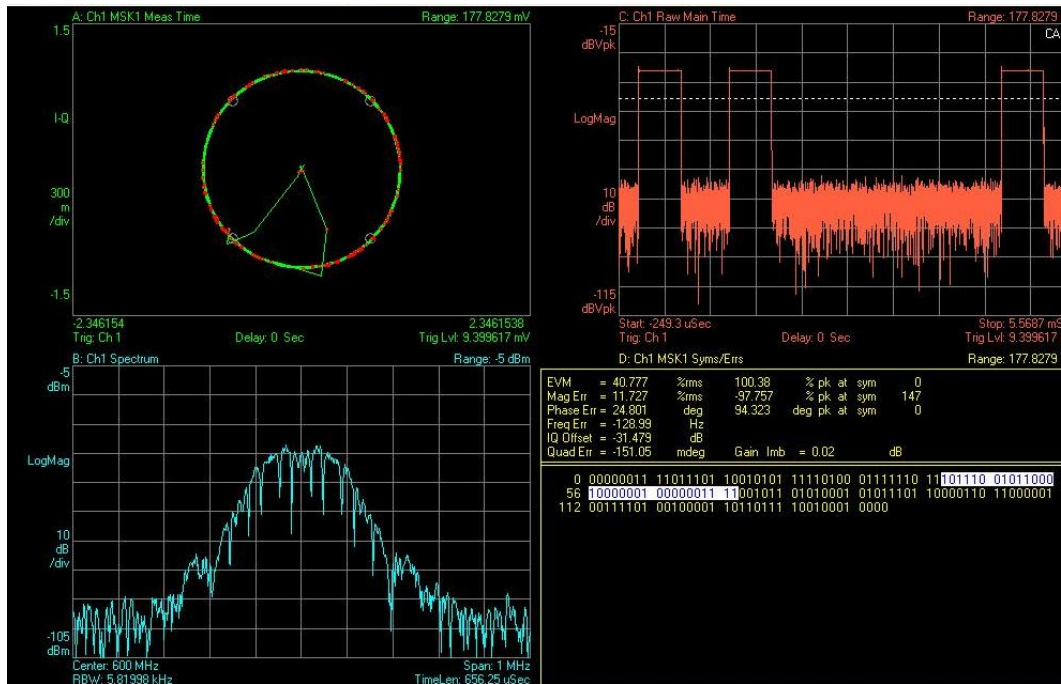


Figura 5.12: Resultado en SCH capturado con BTS-Control Básico

En la Figura 5.13 se muestra la captura del *slot* correspondiente al TCH, es decir, al número 6 de la trama. Tanto la constelación como la señal en tiempo siguen siendo iguales, y nos centraremos en los bits recibidos.

Se confirma que se envía y recibe el patrón 11101110 tal y como se indicó en la interfaz del usuario, y además la secuencia de entrenamiento es la propia del *slot* 6 de un TCH: (1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1).

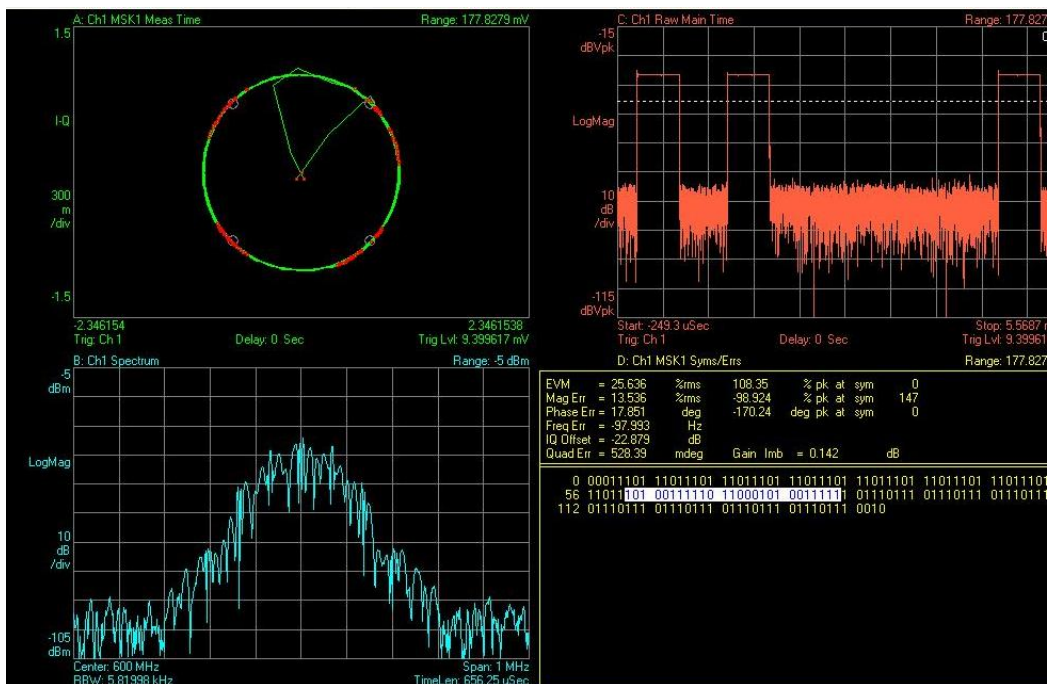


Figura 5.13: Resultado en TCH capturado con BTS-Control Básico

Como se ha mencionado, los bits del FCCH son todo 0s y a continuación en la Figura 5.14 se muestra la configuración realizada en el transmisor y lo que se recibe en el receptor (Figura 5.15) para comprobar su validez.

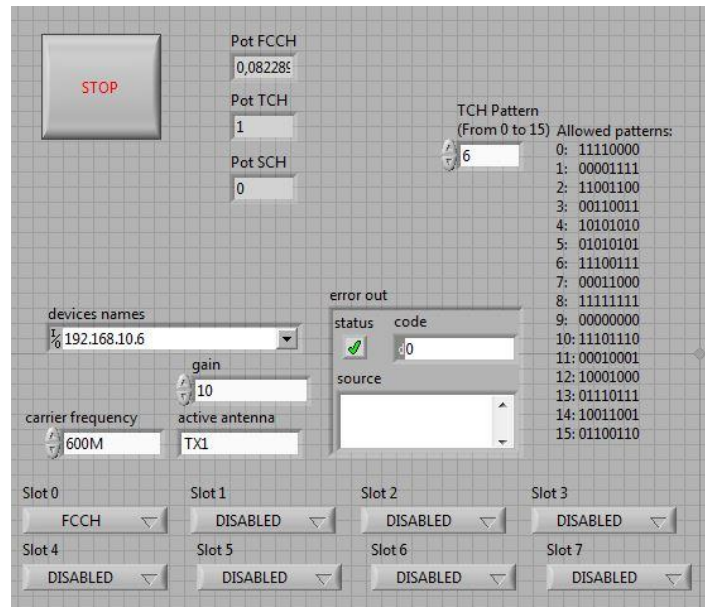


Figura 5.14: Configuración FCCH

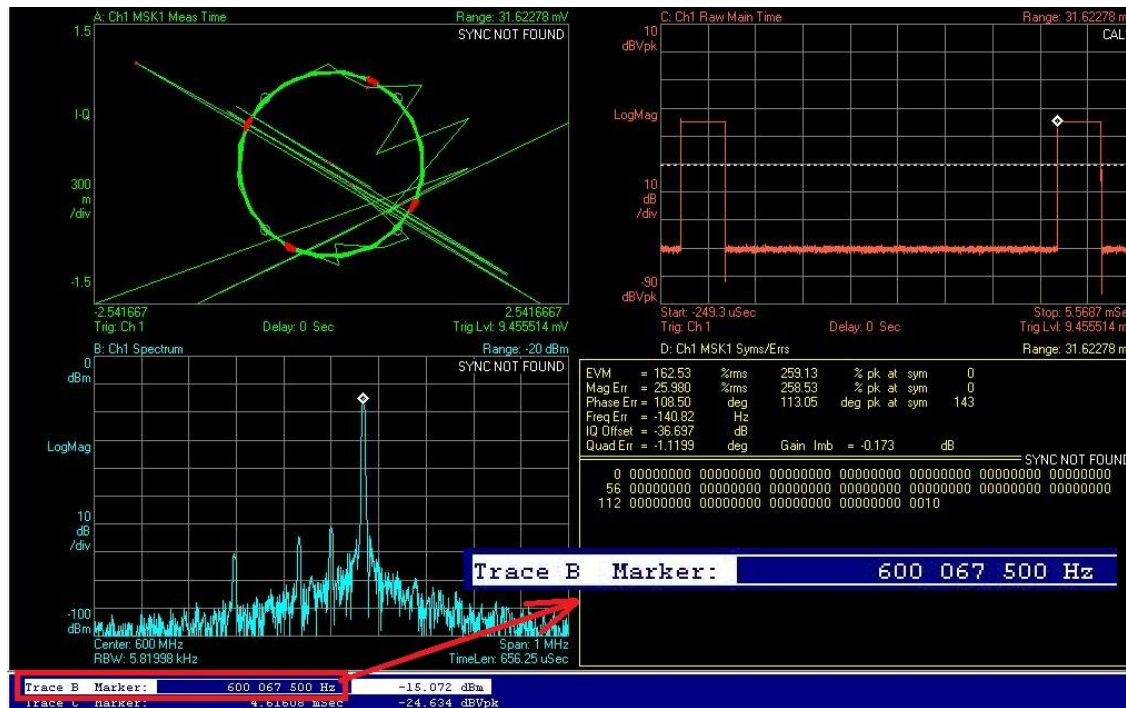


Figura 5.15: Resultado FCCH

Se puede comprobar cómo **todos los bits de la ráfaga de corrección de frecuencia son 0**. En esta figura se puede observar un pequeño error de bit en el penúltimo, pero entra dentro de la lógica que en alguna ocasión ocurra un pequeño error en transmisión.

Lo más importante del FCCH es su espectro en frecuencia, ya que es un tono con un offset de 67.5 kHz con respecto a la frecuencia central. En nuestro caso estamos transmitiendo a 600 MHz por lo que **efectivamente el offset es el correcto y por lo tanto el espectro del FCCH también.**

## 6. Presupuesto

A continuación se va a elaborar un desglose de los costes del sistema diseñado.

En primer lugar se calcula el número total de horas empleadas en la Tabla 6.1 para después hallar el coste de personal, y finalizar con el coste de los equipos. La planificación del trabajo que se indica es la misma que la presentada y desarrollada en el apartado Planificación.

FASE	SUBFASE	TIEMPO EMPLEADO (días)
1. Documentación sobre el estándar GSM y su estudio en profundidad	I. Búsqueda de documentación del estándar GSM	3
	II. Estudio en profundidad del mismo	15
2. Evaluación de los canales descendentes a implementar	I. Estudio de los canales existentes en GSM	13
	II. Decisión de los canales a implementar	13
3. Analizar las características del equipo (NI USRP-2920) para determinar qué bloques implementar y llevarlo a cabo	I. Estudio del funcionamiento de los dispositivos a utilizar	15
	II. Implementar finalmente los bloques que nos permite el equipo	78
4. Obtención de resultados	I. Realización de pruebas de cada uno de los módulos del proyecto	61
	II. Documentar los resultados obtenidos	61
	III. Validación de resultados	61
5. Sacar conclusiones		4
6. Realización de la memoria		30
<b>TOTAL</b>		<b>354</b>

Tabla 6.1: Desglose de tareas y horas

Eliminando los solapes que existen entre las fases se muestra la Tabla 6.2:



MES	TIEMPO SIN SOLAPES (días)	Nº HORAS POR DÍA	TIEMPO SIN SOLAPES (horas)
Octubre	21	3	63
Noviembre	21		63
Diciembre	16		48
Enero	21		63
Febrero	20		60
Marzo	18		54
Abril	22		66
Mayo	20		60
Junio	14		42
<b>TOTAL</b>			<b>519</b>

Tabla 6.2: Tiempo real empleado cada mes

### COSTES DE PERSONAL

Para la realización de este trabajo, se ha precisado la ayuda de un Doctor Ingeniero y de un Graduado. Las horas imputables al proyecto del Doctor han sido aproximadamente un 10 % de las del Graduado. En la Tabla 6.3 se muestran los detalles.

CATEGORÍA	TIEMPO (h)	PRECIO/HORA (€/h)	IMPORTE (€)
Doctor Ingeniero (Jefe de proyecto)	52	120	6360
Graduado	519	60	31140
<b>TOTAL</b>			<b>37500</b>

Tabla 6.3: Costes de personal

### COSTES DE MATERIALES

Las herramientas utilizadas han sido descritas en el capítulo Herramientas hardware y software utilizadas. Sus costes se desglosan en la Tabla 6.4:

El cálculo de la amortización de cada uno de los componentes utilizados ha sido realizado de la siguiente manera:

$$\frac{A}{B} \times C$$

Donde:

A = tiempo de uso del equipo

B = periodo de depreciación

C = coste del equipo (sin IVA)



COMPONENTE	Tiempo usado (meses)	Período de depreciación (meses)	IMPORTE COMPONENTE(€)	COSTE(€)
PC más accesorios	8.5	48	1320	233.75
NI USRP 2920, cableado, antena, Herramienta LabVIEW	8.5	96	4832	427.83
Agilent ESG E4438C	8.5	180	86300	4075.28
Agilent VSA 89600	8.5	180	165800	7829.44
Antena receptora (2.4 GHz)	8.5	120	80	5.67
<b>TOTAL</b>			<b>258332</b>	<b>12571.97</b>

Tabla 6.4: Costes de materiales

El coste de las licencias de cada uno de los componentes anteriores está incluido en el mismo importe.

### **COSTES TOTALES**

La Tabla 6.5 engloba el resultado final del presupuesto.

CONCEPTO	COSTE (€)
Coste de Personal	37500
Coste de Materiales	12571.97
Costes indirectos (20%)	10014.39
Subtotal	60086.36
IVA (21%)	12618.14
<b>TOTAL</b>	<b>72704.50</b>

Tabla 6.5: Costes Totales

El coste total de este proyecto asciende a la cantidad de *setenta y dos mil setecientos cuatro euros con cincuenta céntimos*.

Leganés, a 20 de junio de 2013.

Fdo.: El ingeniero proyectista.

Borja Genovés Guzmán

## 7. Conclusiones

En este punto de la memoria se pretende exponer las conclusiones generales del TFG, así como de las futuras líneas de trabajo en las que se puede continuar tras él.

### 7.1. Conclusiones generales

Como se ha podido comprobar, en este TFG se ha realizado la implementación de una parte reducida de la funcionalidad de una estación base, en concreto la señalización y los canales de tráfico de la misma.

El objetivo final estaba más que fundamentado desde el principio y se tenía claro en qué dirección se tenía que “remar”. Como se ha repetido en numerosas ocasiones, este TFG iba orientado a la docencia. Se debía realizar un trabajo que posteriormente pudiera pasar en manos de los alumnos para que pudieran comprender de una forma más cercana el funcionamiento de GSM.

Pues bien, partiendo de esa premisa se ha obtenido la solución que aquí se ha presentado.

Se decidió realizar los dos diseños expuestos. El primero de ellos simulando de una forma más real la transmisión de los canales en una BTS, y el segundo más orientado a que cualquier usuario pueda manipular y configurar su BTS tal y como desee. El núcleo de ambos diseños es el mismo, pero cambian los módulos más cercanos al usuario ya que uno de ellos tiene que ser mucho más flexible que el otro, además de que hay que protegerlo para minimizar el riesgo de que el usuario pueda configurar algún parámetro que desemboque en la aparición de cualquier problema que sea difícil de solventar.

Todo ello se ha implementado en una plataforma SDR, que aunque a priori parezca que reduce costes y esfuerzos en cualquier diseño, tiene una dificultad añadida y es que hay veces en las que el software es difícil de controlar. Para el alumno ha sido la primera vez que hace un diseño de este tipo con estas herramientas, además de los dispositivos utilizados y el lenguaje de programación (LabVIEW [3]).

Sin embargo, el alumno no poseía grandes conocimientos sobre las comunicaciones móviles y el diseño de un trabajo de este ámbito, pero tras la finalización del TFG se puede decir que se ha familiarizado con estos dispositivos y entornos de trabajo, siendo capaz de poner en práctica cualquier planteamiento que surja con estas herramientas.

Uno de los puntos más débiles que se pronosticaban era el hardware. Al tratarse de dispositivos nuevos adquiridos por la universidad no se conocía muy bien su funcionamiento, ni tampoco sus prestaciones. Lo que sí se conocía eran sus prestaciones teóricas, pero ya se sabe que luego en la práctica varían un poco. Pues bien, se debe decir que el hardware ha superado con creces las expectativas. Dentro de la tasa de transmisión que se utiliza en este TFG ( $\approx 2.17$  Mmuestras/s) el NI USRP 2920 no da ningún problema. Sin embargo tiene varias limitaciones ya que no se puede transmitir dos señales diferentes a la vez, ni tampoco es del todo eficiente transmitiendo y recibiendo al unísono, aunque esto último estaba asegurado por el fabricante. De un modo general, obviando estos dos puntos, el hardware es completamente válido para funcionar con los sistemas diseñados.

Se ha cumplido con las expectativas en cuanto a la duración del proyecto, habiendo algunos retrasos en determinados puntos del mismo pero posteriormente fueron recuperados con éxito.

Por último, el pronóstico que se hacía en cuanto a la implementación técnica del TFG ha sido alcanzado. Los futuros estudiantes podrán utilizar este sistema como una herramienta útil para la comprensión de GSM, así como para analizar el mismo y comprobar las limitaciones y mejoras que se pueden hacer, y que por supuesto se hicieron posteriormente en las generaciones de comunicaciones móviles 3G y 4G. Así pues, este TFG podrá ser utilizado como herramienta docente en asignaturas como Comunicaciones Móviles y Planificación de Redes Móviles [10].

## **7.2. Futuras líneas de trabajo**

Este TFG deja las puertas abiertas a múltiples futuras líneas de trabajo y además muy variadas. El trabajo aquí presente es una primera versión de una BTS con funcionalidades reducidas con respecto a una real. Por ello, partiendo de aquí, se pueden elaborar versiones muy variopintas:

- Se puede realizar una BTS con mayores funcionalidades capaz de soportar mayores canales, como por ejemplo el canal de tráfico a velocidad mitad (TCH/HS) y su respectiva señalización (SACCH/TH).
- Aprovechando que aquí se presenta una solución del sistema 2G en el que hay conmutación de circuitos, se puede dar un paso más y adentrarse en el sistema 2.5G y elaborar su modulación propia 8PSK, así como los canales específicos de este sistema. De esta forma se da una mayor flexibilidad al usuario para que pueda utilizar el sistema de comunicaciones móviles que desee y pueda realizar una comparación entre ambos. Así se puede continuar

innovando hacia la actualidad y por qué no intentar nuevos estándares como el 3G o incluso el 4G, aunque deberían estudiarse si las limitaciones del equipo lo permiten.

- Se puede continuar con la misma línea y crear un receptor de estación móvil que sea capaz de interactuar con este transmisor, simulando una llamada por ejemplo o recibiendo algún mensaje de texto. De esta manera el sistema sería más completo aunque con mayor dificultad, ya que se deberían crear algoritmos de sincronización y decodificación de la información recibida. Para ello se deberían utilizar simultáneamente dos NI USRPs para que uno haga de transmisor y otro de receptor.
- Hasta ahora se ha estado trabajando con el enlace de bajada, pero también se podría intentar crear funcionalidades del enlace de subida, así como nuevos canales propios de este. De la misma manera que en el canal de bajada, se podrían crear un transmisor y un receptor para ser el sistema más cercano a la realidad, y como en el caso anterior, se deberían utilizar dos NI USRP para que ejerzan como tal.

En definitiva, se puede seguir creando tantas versiones del sistema como se quiera, y se puede llegar también hasta dónde se desee o el hardware lo permita.

## Referencias bibliográficas

- [1] ETSI, «Mobile technologies GSM» [En línea]. Disponible en: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/gsm>. [Último acceso: 10 enero 2013].
- [2] National Instruments, «NI USRP-2920» [En línea]. Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209948>. [Último acceso: 10 Abril 2013].
- [3] National Instruments, «Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW» [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/labview/esa/>. [Último acceso: 29 abril 2013].
- [4] Agilent Technologies, «Agilent E4438C ESG Vector Signal Generator. Data Sheet» [En línea]. Disponible en: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-4039EN.pdf>. [Último acceso: 22 Marzo 2013].
- [5] Agilent Technologies, «89600 VSA Software» [En línea]. Disponible en: <http://www.home.agilent.com/en/pc-1905089/89600-vsa-software?&cc=ES&lc=eng>. [Último acceso: 23 Marzo 2013].
- [6] 3GPP, «UMTS» [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/Technologies/Keywords-Acronyms/article/umts>. [Último acceso: 24 Abril 2013].
- [7] 3GPP, «LTE» [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/LTE>. [Último acceso: 24 Abril 2013].
- [8] Rohde&Schwarz, «R&S SMW200A Vector Signal Generator» [En línea]. Disponible en: [http://www.rohde-schwarz.es/es/producto/Test\\_y\\_medida/signal\\_generators/SMW200A.html](http://www.rohde-schwarz.es/es/producto/Test_y_medida/signal_generators/SMW200A.html). [Último acceso: 19 junio 2013].
- [9] Rohde&Schwarz, «R&S FSQ Signal Analyzer» [En línea]. Disponible en: [http://www.rohde-schwarz.es/es/producto/Test\\_y\\_medida/Analizadores\\_de\\_Se%C3%B1al\\_y\\_Espectro/FSQ-%7C--%7C-100-%7C-6368.html](http://www.rohde-schwarz.es/es/producto/Test_y_medida/Analizadores_de_Se%C3%B1al_y_Espectro/FSQ-%7C--%7C-100-%7C-6368.html). [Último acceso: 19 junio 2013].

- [10] V. P. GIL JIMÉNEZ, B. GENOVÉS GUZMÁN, A. LANCHO SERRANO y A. GARCÍA ARMADA, «Learning Mobile Communications through Flexible Software Defined Radio Base Stations» sometido a revisión en *IEEE Communications Magazine*, 2013.
- [11] Rohde&Schwarz, «Rohde&Schwarz» [En línea]. Disponible en: [http://www.rohde-schwarz.com/en/home\\_48230.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/home_48230.html). [Último acceso: 19 junio 2013].
- [12] B.O.E., «Ley 11/1998, de 24 de abril, General de Telecomunicaciones» [En línea]. Disponible en: <http://www.boe.es/boe/dias/1998/04/25/pdfs/A13909-13940.pdf>. [Último acceso: 10 mayo 2013].
- [13] B.O.E., «Ley 32/2003, de 3 de noviembre, General de Telecomunicaciones» [En línea]. Disponible en: <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2003-20253>. [Último acceso: 10 mayo 2013].
- [14] B.O.E., «Real Decreto 1066/2001» [En línea]. Disponible en: <http://www.boe.es/boe/dias/2001/09/29/pdfs/A36217-36227.pdf>. [Último acceso: 10 mayo 2013].
- [15] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, «Servicio de información sobre Instalaciones Radioeléctricas y Niveles de Exposición» [En línea]. Disponible en: <http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/NivelesExposicion/Paginas/niveles.aspx>. [Último acceso: 16 junio 2013].
- [16] M. MOULY y M.-B. PAUTET, *The GSM System for Mobile Communications*, Palaiseau (Francia): Cell & Sys, 1992.
- [17] Netprolive, «The first cell phone» [En línea]. Disponible en: <http://www.netprolive.com/cellphones.php>. [Último acceso: 30 abril 2013].
- [18] Muy Móvil, «La evolución de los teléfonos móviles» [En línea]. Disponible en: <http://www.muymovil.com/2009/10/10/la-evolucion-de-los-telefonos-moviles>. [Último acceso: 30 abril 2013].
- [19] CEPT, «European Conference of Postal and Telecommunications Administrations» [En línea]. Disponible en: <http://www.cept.org/>. [Último acceso: 16 junio 2013].
- [20] ETSI, «European telecommunications Standard Institute» [En línea]. Disponible en: <http://www.etsi.org/>. [Último acceso: 16 junio 2013].

- [21] Wikipedia, «Memorandum of understanding» [En línea]. Disponible en: [http://en.wikipedia.org/wiki/Memorandum\\_of\\_understanding](http://en.wikipedia.org/wiki/Memorandum_of_understanding). [Último acceso: 16 junio 2013].
- [22] J. M. HERNANDO RÁBANOS, Comunicaciones Móviles GSM, Madrid: Fundación Airtel, 1999.
- [23] AT&T, «1946: First Mobile Telephone Call» [En línea]. Disponible en: <http://www.corp.att.com/attlabs/reputation/timeline/46mobile.html>. [Último acceso: 1 mayo 2013].
- [24] Ingeniería de Sistemas, «Tecnología GSM» [En línea]. Disponible en: <http://eveningsistemas-u.blogspot.com.es/2012/04/el-sistema-global-para.html>. [Último acceso: 2 mayo 2013].
- [25] J. M. HERNANDO RÁBANOS, Comunicaciones Móviles, Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, S.A., 2004.
- [26] Netstating, «GSM Architecture» [En línea]. Disponible en: <http://netstating.com/gsm-architecture/>. [Último acceso: 6 junio 2013].
- [27] «GSM Network Architecture» [En línea]. Disponible en: <http://web.ee.sun.ac.za/~gshmaritz/gsmfordummies/arch.shtml>. [Último acceso: 16 junio 2013].
- [28] eHow, «GSM Uplink and Downlink Frequency» [En línea]. Disponible en: [http://www.ehow.com/facts\\_7673110\\_gsm-uplink-downlink-frequency.html](http://www.ehow.com/facts_7673110_gsm-uplink-downlink-frequency.html). [Último acceso: 6 junio 2013].
- [29] Provateline.com, «Architecture of the GSM network» [En línea]. Disponible en: <http://www.privateline.com/PCS/GSM03.html>. [Último acceso: 16 junio 2013].
- [30] Ericsson, «Ericsson Mobile Switching Center MSC» [En línea]. Disponible en: [http://www.ericsson.com/ourportfolio/products/mobile-switching-center-msc?nav=fgb\\_101\\_189](http://www.ericsson.com/ourportfolio/products/mobile-switching-center-msc?nav=fgb_101_189). [Último acceso: 16 junio 2013].
- [31] Huawei, «HLR9820» [En línea]. Disponible en: <http://enterprise.huawei.com/en/products/network/gsm-r/gsm-r/hlr9820.htm>. [Último acceso: 16 junio 2013].

- [32] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Physical layer on the radio path; General description (GSM 05.01 version 8.4.0 Release 1999)» [En línea]. Disponible en:  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/100500\\_100599/100573/08.04.00\\_60/ts\\_100573v080400p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100500_100599/100573/08.04.00_60/ts_100573v080400p.pdf). [Último acceso: 19 Abril 2013].
- [33] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Multiplexing and multiple access on the radio path (3GPP TS 05.02 version 8.8.0 Release 1999)» [En línea]. Disponible en:  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/100900\\_100999/100908/08.08.00\\_60/ts\\_100908v080800p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100900_100999/100908/08.08.00_60/ts_100908v080800p.pdf). [Último acceso: 19 Abril 2013].
- [34] Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid., «Comunicaciones Móviles. Tema 2. Sistema GSM: Interfaz Radio (Parte 2)» Madrid, 2012.
- [35] University of Leeds, «Viterbi Algorithm» [En línea]. Disponible en:  
[http://www.comp.leeds.ac.uk/roger/HiddenMarkovModels/html\\_dev/viterbi\\_algorithm/s1\\_pg1.html](http://www.comp.leeds.ac.uk/roger/HiddenMarkovModels/html_dev/viterbi_algorithm/s1_pg1.html). [Último acceso: 17 junio 2013].
- [36] National Instruments, «Detailed Specifications NI USRP» [En línea]. Disponible en:  
<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-355/lang/es#detailedspecs-section>. [Último acceso: 10 Abril 2013].
- [37] Ministro de Industria, Energía y Turismo, «Espectro radioeléctrico. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias» [En línea]. Disponible en:  
<http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/espectro/paginas/cnaf.aspx>. [Último acceso: 19 junio 2013].
- [38] National Instruments, «NI USRP-2920, NI USRP-2921» [En línea]. Disponible en:  
<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-355/lang/es>. [Último acceso: 17 junio 2013].
- [39] Wikipedia, «LabVIEW» [En línea]. Disponible en:  
<http://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW#Historial>. [Último acceso: 3 junio 2013].
- [40] National Instruments, «Integración de Hardware con NI LabVIEW» [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/labview/whatis/hardware-integration/esa/>. [Último acceso: 2 Febrero 2013].



- [41] National Instruments, «Análisis y Procesamiento de Señales Avanzados e Integrados en NI LabVIEW» [En línea]. Disponible en:  
<http://www.ni.com/labview/whatis/analysis/esa/>. [Último acceso: 5 Febrero 2013].
- [42] MATLAB, «MathWorks» [En línea]. Disponible en:  
<http://www.mathworks.es/products/matlab/>. [Último acceso: 15 Marzo 2013].
- [43] Departamento de Teoría de la Señal Comunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid, «Comunicaciones Móviles. Tema 2. Sistema GSM: Interfaz Radio (Parte 2)» Madrid, 2012.
- [44] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Numbering, addressing and identification (GSM 03.03)» [En línea]. Disponible en:  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gts/03/0303/05.00.00\\_60/gsmts\\_0303v050000p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/03/0303/05.00.00_60/gsmts_0303v050000p.pdf) [Último acceso: 19 Abril 2013].
- [45] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile radio interface layer 3 specification (GSM 04.08)» [En línea]. Disponible en:  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gts/04/0408/05.03.00\\_60/gsmts\\_0408v050300p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/04/0408/05.03.00_60/gsmts_0408v050300p.pdf). [Último acceso: 19 Abril 2013].
- [46] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Channel coding (GSM 05.03 version 8.5.1 Release 1999)» [En línea]. Disponible en:  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300900\\_300999/300909/08.05.01\\_60/en\\_300909v080501p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300900_300999/300909/08.05.01_60/en_300909v080501p.pdf). [Último acceso: 19 Abril 2013].
- [47] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Modulation (GSM 05.04 version 7.1.1 Release 1998)» [En línea]. Disponible en:  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300900\\_300999/300959/07.01.01\\_60/en\\_300959v070101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300900_300999/300959/07.01.01_60/en_300959v070101p.pdf). [Último acceso: 19 Abril 2013].

## ANEXO A. Bandas de frecuencias GSM

Actualmente se utilizan diferentes bandas de frecuencia para el sistema GSM:

- I) Banda GSM 450:
  - a. 450.4-457.6 MHz: enlace de subida, es decir, transmisión del móvil y recepción de la BTS.
  - b. 460.4-467.6 MHz: enlace de bajada, es decir, transmisión de la BTS y recepción del móvil.
- II) Banda GSM 480:
  - a. 478.8-486 MHz: enlace de subida.
  - b. 488.8-496 MHz: enlace de bajada.
- III) Banda GSM 850:
  - a. 824-849 MHz: enlace de subida.
  - b. 869-894 MHz: enlace de bajada.
- IV) Banda primaria GSM 900: P-GSM.
  - a. 890-915 MHz: enlace de subida.
  - b. 935-960 MHz: enlace de bajada.
- V) Banda GSM-900 extendida: E-GSM (incluye la banda del estándar GSM 900).
  - a. 880-915 MHz: enlace de subida.
  - b. 925-960 MHz: enlace de bajada.
- VI) *Railways GSM-900 Band*: R-GSM (incluye la banda del estándar y extendida GSM-900).
  - a. 876-915 MHz: enlace de subida.
  - b. 921-960 MHz: enlace de bajada.
- VII) Banda DCS 1800:
  - a. 1710-1785 MHz: enlace de subida.
  - b. 1805-1880 MHz: enlace de bajada.
- VIII) Banda PCS 1900 (*Personal Communications Service 1900*):
  - a. 1850-1910 MHz: enlace de subida.
  - b. 1930-1990 MHz: enlace de bajada.

El número de portadoras (canales de radiofrecuencia) que existe en cada una de las bandas de frecuencia con un espaciado de 200 kHz entre ellas es el siguiente:

- 35 para GSM 450.
- 35 para GSM 480.
- 124 para GSM 850.
- 194 para GSM 900.

- 374 para DCS 1800.
- 299 para PCS 1900.

Las bandas más utilizadas aquí en España son la de GSM 900 y DCS 1800, esta última apareciendo más tarde para dar mayor capacidad en zonas urbanas.

## ANEXO B. Características de NI USRP-2920

<b>Transmisor [36]</b>	
Rango de frecuencia en transmisión	De 50 MHz a 2.2 GHz
Salto de frecuencia ajustable por software	< 1 kHz
Potencia en transmisión de 50 MHz a 1.2 GHz 1.2 GHz a 2.2 GHz	50-100 mW (17-20 dBm) 30-70 mW (15-18 dBm)
Rango de ganancia de potencia a la salida	Hasta 25 dB
Tamaño de salto de potencia ajustable por software a la salida	0.5 dB
Precisión de frecuencia en transmisión	50 PPM (Pulsaciones por minuto)
Ancho de banda en tiempo real instantáneo	20 MHz
Convertor digital analógico (DAC)	2 canales, 400 MS/s, 16 bit
DAC SFDR ( <i>Spurious Free Dynamic Range</i> , Rango dinámico sin espurio)	80 dB
<b>Receptor [36]</b>	
Rango de frecuencia en transmisión	De 50 MHz a 2.2 GHz
Salto de frecuencia ajustable por software	<1 kHz
Potencia de entrada máximo	0 dBm
Figura de ruido	5-7 dB
Precisión de frecuencia en recepción	50 PPM
Ancho de banda en tiempo real instantáneo	20 MHz
Convertor analógico digital (ADC)	2 canales, 100 MS/s, 14 bit
ADC SFDR ( <i>Spurious Free Dynamic Range</i> , Rango dinámico sin espurio)	88 dB
<b>Conexiones [36]</b>	
TX1, RX1 y RX2 Puertos	SMA ( <i>SubMiniature version A</i> )
Conexión Ethernet	1 Gigabit Ethernet
Adaptador de potencia	6VDC, 3A
Reloj de referencia (Entrada de referencia externa 10 MHz)	SMA, 10 MHz
Entrada PPS ( <i>Pulse per Second</i> )	SMA, 3-5V compatible con TTL
Puerto de expansion MIMO	Protocolo SerDes ( <i>Serializer/Deserializer</i> ) de alta velocidad
<b>Características Físicas [36]</b>	

Dimensiones	15.9 cm ancho x 4.8 cm alto x 21.2 cm largo
Peso	2.63 libras $\approx$ 1.193 kg
Temperatura de operación	23 °C $\pm$ 5 °C, Temperatura de habitación

Tabla ANEXO B: Especificaciones NI USRP-2920