# Índice de contenidos

**Índice de contenidos** v

**Resumen** xi

**Abstract** xv

**1. Introducción** 1

1.1. Introducción . . . 1
1.2. El fondo de microondas . . . 3
1.3. QUBIC . . . 5
1.4. Detector de inductancia cinética de microondas . . . 7
1.4.1. Modelo eléctrico de los detectores de inductancia cinética . . . 11
1.5. Sumario . . . 17

**2. Especificaciones del hardware para el sistema de excitación y lectura** 19

2.1. Introducción . . . 19
2.2. Especificaciones generales del sistema . . . 20
2.2.1. Resumen de la electrónica . . . 21
2.2.2. Firmware de la FPGA . . . 23
2.2.3. Requerimientos de la FPGA . . . 26
2.2.4. Ruido del amplificador criogénico . . . 27
2.2.5. Ruido del convertidor A/D . . . 28
2.2.6. Ruido del convertidor D/A . . . 29
2.2.7. Ruido del sintetizador de microondas . . . 29
2.2.8. Niveles de señal . . . 29
2.3. Generación y optimización de los tonos . . . 31
2.3.1. Optimización de las fases para minimizar el factor de cresta . . . 31
2.3.2. Generación de portadoras con fases de Newman . . . 36
2.4. Placas electrónicas de desarrollo . . . 38
2.4.1. Placa electrónica *fMESSI* . . . 39
2.4.2. Placa electrónica RFSoC ZCU111 . . . 40

2.4.3. Red Pitaya . . . . . 41
2.4.4. Caracterización de las interfaces de entrada/salida . . . . . 43
2.5. Comparación de características . . . . . 44
2.6. Sumario . . . . . 44

**3. Desarrollo del firmware para la FPGA 47**
3.1. Introducción . . . . . 47
3.2. Procedimiento general de diseño del sistema multitasa . . . . . 48
3.3. El filtro prototipo . . . . . 49
3.3.1. Consideraciones de diseño para el filtro prototipo . . . . . 50
3.3.2. Diseño del prototipo en Python . . . . . 52
3.3.3. El prototipo para el caso sobremuestreado ($K = MI$) . . . . . 55
3.3.4. Comparación de características: muestreo crítico y sobremuestreo 58
3.4. Implementación en FPGA del banco BF-DFT . . . . . 60
3.4.1. Asignación de coeficientes . . . . . 60
3.4.2. Procesamiento de señales complejas en la FPGA . . . . . 61
3.5. Implementación en FPGA del banco BF-DFTG . . . . . 62
3.5.1. Modulación compleja de los coeficientes del prototipo . . . . . 62
3.5.2. Máquina de estados de cambio de frecuencia . . . . . 65
3.6. Implementación en FPGA del banco BF-DFTG-SM . . . . . 66
3.6.1. Descomposición polifásica sobremuestreada ($K = MI$) . . . . . 67
3.6.2. Filtros para el sistema BF-DFTG-SM . . . . . 67
3.6.3. Máquina de estados y reorganización de las muestras para el sistema sobremuestreado . . . . . 69
3.7. Evaluación de las implementaciones en FPGA . . . . . 71
3.7.1. Especificación de la implementación . . . . . 71
3.7.2. Verificación del sistema BF-DFTG . . . . . 72
3.7.3. Prueba de ruido en configuración realimentada . . . . . 75
3.7.4. Evaluación y resultados . . . . . 76
3.7.5. Evaluación del filtro con coeficientes complejos . . . . . 78
3.7.6. Utilización de recursos hardware . . . . . 78
3.8. Sumario . . . . . 82

**4. Optimización de los bancos de filtros 83**
4.1. Introducción . . . . . 83
4.2. Cambio de la tasa de muestreo en etapas . . . . . 84
4.2.1. Diezmado en etapas . . . . . 84
4.2.2. Requerimientos de los filtros para las etapas individuales . . . . 85
4.3. Determinación del número óptimo de etapas requeridas . . . . . 89

4.3.1. Algoritmo de búsqueda del número de etapas . . . . . 90
4.4. Evaluación de implementaciones utilizando el algoritmo de búsqueda . 90
4.4.1. Banco de filtros críticamente muestreado $K = M = 16$ . . . . . 91
4.4.2. Banco de filtros sobremuestreado $K = MI = 16$ . . . . . 94
4.5. Análisis para $K \geq 10.000$ canales . . . . . 96
4.5.1. Banco de filtros críticamente muestreado $M = 256$ . . . . . 97
4.5.2. Banco de filtros sobremuestreado $K = MI = 256$ . . . . . 98
4.6. Bancos de filtros basados en realizaciones en cascada y estructuras de árbol . . . . . 99
4.6.1. Estructuras de árbol y filtros QMF . . . . . 100
4.6.2. Descomposición del filtro en subbandas . . . . . 103
4.7. Bancos de filtros con estructura de árbol y su realización paralela equivalente . . . . . 105
4.8. Bancos de filtros con estructura de árbol y su representación polifásica equivalente . . . . . 106
4.8.1. Conversión paralela . . . . . 106
4.8.2. Generalización . . . . . 110
4.9. Sumario . . . . . 111

**5. Caracterización de MKIDs 113**
5.1. Introducción . . . . . 113
5.1.1. Diseño de la Universidad de California en Santa Bárbara . . . . 114
5.2. Arreglo experimental . . . . . 116
5.2.1. Electrónica fría y de control . . . . . 117
5.2.2. Amplificador de bajo ruido . . . . . 117
5.3. Estudio de la fracción de inductancia cinética $\alpha$ . . . . . 119
5.3.1. Medición de la temperatura crítica y la fracción de inductancia cinética . . . . . 120
5.4. Dependencia de la frecuencia de resonancia con la temperatura . . . . . 122
5.5. Estudio del factor de calidad como función de la potencia de lectura . . 124
5.6. Sumario . . . . . 126

**6. Conclusiones y trabajo futuro 127**
6.1. Conclusiones . . . . . 127
6.2. Trabajo futuro . . . . . 130
6.2.1. Optimización en la longitud de los filtros . . . . . 130
6.2.2. Algoritmo de búsqueda de componentes espectrales . . . . . 130
6.2.3. Utilización de filtros IIR . . . . . 131

**A. Teoría de sistemas multitasa** **133**
A.1. Introducción . . . . . 133
A.2. Representación de señales discretas . . . . . 134
A.2.1. Muestreo discreto . . . . . 135
A.2.2. Representación polifásica . . . . . 136
A.2.3. Descripción en forma de modulación . . . . . 139
A.3. Preliminares sobre sistemas multitasa . . . . . 140
A.3.1. Operaciones básicas multitasa . . . . . 140
A.4. Bancos de filtros digitales . . . . . 143
A.4.1. Definiciones y consideraciones generales . . . . . 145
A.5. Bancos de filtros DFT uniformes . . . . . 148
A.5.1. Modelo basado en el modulador complejo . . . . . 148
A.5.2. Interpretación basada en el filtro pasabanda complejo . . . . . 150
A.5.3. Modelo de conmutador para bancos de filtros . . . . . 152
A.6. Estructura polifásica para el banco de filtros DFT uniforme . . . . . 153
A.6.1. Estructuras de bancos polifásicos para $K = MI$ . . . . . 155
A.7. Banco de filtros DFT generalizado (BF-DFTG) . . . . . 158
A.7.1. Implementación eficiente de bancos de filtros DFTG sobremuestreados . . . . . 161
A.8. Criterios de diseño de filtros para bancos de filtros . . . . . 164
A.8.1. Caso no solapado . . . . . 165
A.8.2. Caso solapado . . . . . 166

**B. Definiciones generales** **169**
B.1. Factor de cresta . . . . . 169
B.2. Eficiencia computacional de un sistema multitasa . . . . . 170
B.2.1. Tasa de multiplicación . . . . . 170
B.3. Ruido de frecuencia . . . . . 172
B.4. Relación señal a ruido . . . . . 172

**C. Las identidades nobles** **175**
C.1. Primera identidad . . . . . 175
C.2. Segunda identidad . . . . . 176
C.3. Tercera identidad . . . . . 176
C.4. Cuarta identidad . . . . . 177
C.5. Quinta identidad . . . . . 177
C.6. Sexta identidad . . . . . 177

**Bibliografía** **179**

**Publicaciones asociadas** **193**

**Agradecimientos** **195**