



Universitat de Barcelona
Departament d'Electrònica

Diseño de Moduladores Delta-Sigma en Tecnología CMOS VLSI

**Aplicación al Desarrollo de Circuitos de
Interfaz para Sensores Capacitivos**

José M. Gómez Cama



Universitat de Barcelona
Departament d'Electrònica

Diseño de Moduladores Delta-Sigma en Tecnología CMOS VLSI

Aplicación al Desarrollo de Circuitos de Interfaz para Sensores Capacitivos

Memoria presentada por José M. Gómez Cama para optar al grado de Doctor en Ingeniería en Electrónica.

Directores de Tesis: Dr. Josep Samitier i Martí y Dr. Sebastián Bota Ferragut.

Programa de Doctorado: Ingeniería i Materials Electrònics i Optica

Tutor: Dr. Josep Samitier i Martí

Josep Samitier i Martí, Catedrático de Electrónica de la Facultad de Física de la Universitat de Barcelona, y Sebastián Bota Ferragut, Profesor Titular de la Facultad de Física de la Universitat de Barcelona:

CERTIFICAN que la memoria “Diseño de Moduladores Delta-Sigma en Tecnología CMOS VLSI. Aplicación al Desarrollo de Circuitos de Interfaz para Sensores Capacitivos” que presenta José M. Gómez para optar al grado de Doctor en Ingeniería en Electrónica, ha sido realizada bajo su dirección

Barcelona, 30 de mayo de 2000

Dr. Josep Samitier i Martí

Dr. Sebastián Bota Ferragut

A Inma

Este trabajo es fruto de la ayuda, colaboración y apoyo de muchas personas. Por este motivo, me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a todas ellas.

En primer lugar a Josep Samitier y Sebastià Bota. Ambos han hecho posible que esta tesis pasase de un título al trabajo que aquí se expone. Gracias por la paciencia, el apoyo y el empeño que han puesto para que esta tesis saliera adelante.

A todas las personas del Departamento de Electrónica y especialmente a José María, Atilá, Santi, Enric, Pepe, Oscar y un largo etc. Todos me han ayudado y apoyado en algún momento, y a todos les debo un gracias.

También quisiera agradecer a las personas del LEG, a Christian Enz, Alain Vachoux y Mihaela Grigorie. Mucho de lo que aquí se expone es fruto de las largas discusiones mantenidas.

Por supuesto a todos mis amigos (la gente de la comunidad, los amigos del San Miguel), y a los compañeros de PwC. Ellos me han dado ánimos y me han apoyado en mucho momentos de desazón.

A mis padres, hermana, suegros, cuñados, familia... todos ellos me han cuidado, y han estado presentes cuando les he necesitado.

Y por último a Inma, por estar presente en todos los momentos. Sin ella, esta tesis jamás hubiera llegado a su fin.

Índice

I Introducción	I-1
I.1 Motivación	I-1
I.2 Objetivos.....	I-4
I.3 Convertidores A-D.....	I-4
I.3.1 Convertidores de Nyquist.....	I-6
I.3.2 Convertidores sobremuestreados.....	I-8
I.3.2.1 El modulador de primer orden.....	I-10
I.3.2.2 El modulador de segundo orden.....	I-13
I.3.3 Caracterización de convertidores sobremuestreados.....	I-14
I.4 Organización de Capítulos	I-16
I.5 Referencias.....	I-18
II Sistemas de Medida Basados en Microsensores Capacitivos	II-1
II.1 El problema de la medida.....	II-1
II.1.1 Descripción de la medida	II-1
II.1.2 Proceso de medida	II-5
II.1.2.1 Acelerómetro x-y-z.....	II-8
II.1.3 Creación del modelo	II-15
II.1.3.1 Modelización con HDL-A.....	II-17
II.1.3.2 Caracterización del Acelerómetro x-y	II-20
II.1.3.2.1 Test en continua	II-21
II.1.3.2.2 Test en transitorio.....	II-25
II.1.3.3 Caracterización del Acelerómetro z.....	II-28
II.1.3.3.1 Modelo en continua	II-29
II.1.3.3.2 Modelo en pequeña señal.....	II-31
II.1.4 Acondicionamiento de señal	II-33
II.1.4.1 Bucle abierto.....	II-33
II.1.4.2 Bucle corregido.....	II-33
II.1.4.3 Bucle cerrado	II-34
II.1.5 Medida de Microsensores capacitivos	II-35
II.1.5.1 Amplificador de Cargas.....	II-35
II.1.5.2 Balance de Cargas	II-36
II.1.5.3 Balance de Fuerzas	II-37
II.2 Referencias.....	II-38
III Diseño Funcional	III-1
III.1 Definición de la interfaz	III-1
III.2 Integración del modulador $\Delta-\Sigma$	III-2
III.2.1 Modo Test.....	III-4
III.2.2 Modo Balance de Cargas.....	III-5
III.2.3 Modo Balance de Fuerzas.....	III-6
III.2.4 Integración de los tres modos mediante circuitos con capacidades conmutadas	III-8
III.3 Análisis de la etapa de entrada	III-9
III.3.1 Análisis de un modulador $\Delta-\Sigma$ de segundo orden	III-10
III.3.2 Función de transferencia del acelerómetro x-y-z	III-15
III.3.3 Determinación de la capacidad de referencia	III-19
III.3.4 Análisis del sistema modulador-sensor.....	III-20
III.3.4.1 Sensor sobreamortiguado.....	III-23
III.3.4.2 Estabilidad del sistema modulador-acelerómetro.....	III-30
III.4 Simulación del modo Balance de Fuerzas	III-31
III.5 Definición del modulador	III-33
III.6 Referencias.....	III-34

IV Diseño Estructural.....	IV-1
IV.1 Capacidades en tecnología digital.....	IV-3
IV.1.1 Capacidades lineales.....	IV-3
IV.1.2 Capacidades MOS	IV-5
IV.1.2.1 Medidas experimentales.....	IV-6
IV.1.2.2 Modelo de la capacidad MOS.....	IV-7
IV.2 Diseño con capacidades MOS.....	IV-8
IV.2.1 Arquitecturas SC con capacidades MOS	IV-8
IV.2.2 Propuesta de arquitectura.....	IV-12
IV.3 Diseño del modulador $\Delta-\Sigma$ MOS.....	IV-16
IV.3.1 Modela de comportamiento del modulador $\Delta-\Sigma$	IV-19
IV.3.1.1 Modelo del modulador en Matlab.....	IV-19
IV.3.1.2 Modelo del modulador en Spice.....	IV-21
IV.4 Diseño del OTA	IV-22
IV.4.1 Elección de la arquitectura.....	IV-22
IV.4.1.1 OTA Folded-Cascode	IV-22
IV.4.1.2 OTA Miller	IV-25
IV.4.2 Simulación.....	IV-27
IV.5 Diseño del comparador	IV-31
IV.6 Diseño de los circuitos de control.....	IV-32
IV.6.1 Reloj de cuatro fases	IV-33
IV.6.2 Maquina de control	IV-35
IV.7 Modulador complete	IV-36
IV.8 Referencias	IV-37
V Diseño Físico	V-1
V.1 Distribución de los componentes.....	V-2
V.2 División jerárquica del modulador	V-5
V.3 OTA.....	V-6
V.4 Capacidades.....	V-9
V.4.1 Capacidades lineales.....	V-10
V.4.2 Capacidades MOS	V-11
V.5 Integrador	V-12
V.6 Circuitos de control	V-13
V.7 Modulador $\Delta-\Sigma$	V-14
V.8 Circuito Integrado	V-15
V.8 Referencias	V-17
VI Test.....	VI-1
VI.1 Diseño de la Placa de Test	VI-1
VI.2 OTA.....	VI-4
VI.2.1 Test en continua.....	VI-4
VI.2.2 Test en alterna	VI-5
VI.2.3 Test en transitorio.....	VI-6
VI.2.4 Resultados	VI-7
VI.3 Comparador	VI-7
VI.4 Modulador $\Delta-\Sigma$	VI-8
VI.4.1 Estudio a diferentes frecuencias de muestreo	VI-9
VI.4.2 Estudio de las interferencias externas.....	VI-12
VI.4.3 Estudio del sobremuestreo	VI-13
VI.4.4 Estudio del SNDR.....	VI-14
VI.5 Sistema Sensor-Modulador.....	VI-15
VI.6 Referencias	VI-17
VII Conclusiones	VII-1
Anexo.....	A-1

A.1 Modelo de Acelerómetro Torsional.....	A-1
A.2 Modelo de Capacidad MOS	A-5
A.3 Programa de Cálculo del OTA	A-6

