

**Implementación de un nuevo método de
caracterización de biosensores basados en
balanza de cristal de cuarzo (QCM)
mediante instrumentos virtuales
multipropósito.**

Autor: Andrés José Piñón Pazos

Tesis doctoral UDC/2014

Directores:

Dr. José Luís Calvo Rolle

Dra. María del Carmen Meizoso López

Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Dr. D. José Luis Calvo Rolle y Dra. D^a. María del Carmen Meizoso López,
profesores del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidade da Coruña

AUTORIZAN

A la defensa de la Tesis Doctoral titulada *“Implementación de un nuevo método de caracterización de biosensores basados en balanza de cristal de cuarzo (QCM) mediante instrumentos virtuales multipropósito”*, realizada por *D. Andrés José Piñón Pazos*, bajo nuestra dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidade da Coruña.

En Ferrol, a 26 de mayo de 2014.



Dr. D. José Luis Calvo Rolle



Dra. D^a. María del Carmen Meizoso López

*A mi mujer, Begoña
y a mis hijos, Alejandro y Laura.
A mis padres.*

Gracias por vuestro apoyo y comprensión.

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido a la realización de esta tesis.

En primer lugar a mis compañeros y directores de tesis José Luis Calvo Rolle y María del Carmen Meizoso López con los cuales estoy en deuda por su apoyo, consejos y contribución desinteresada a la culminación de esta tesis.

Agradecer también su inestimable colaboración a José Luís Casteleiro Roca, con sus aportaciones y acertadas valoraciones.

A Victoria González Rodríguez y a José M. López Vilariño del Laboratorio de Química del Centro de Investigaciones Tecnológicas (CIT) de la UDC por su colaboración desinteresada.

A Ramón Ferreiro García y Francisco Javier Pérez Castelo por acogerme bajo su dirección en los inicios de esta andadura.

Al Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica por permitir la realización de esta tesis doctoral.

En definitiva, a todas aquellas personas que me han apoyado en la consecución de este objetivo.

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra un nuevo enfoque para la caracterización de dispositivos QCM (Quartz Crystal Microbalance – Microbalanzas de cristal de cuarzo). El método se basa en los principios fundamentales de componentes pasivos y el propio comportamiento del componente QCM. Con la propuesta, se obtienen los parámetros del circuito equivalente QCM basado en el modelo BVD (Butterworth-Van Dyke). Los resultados obtenidos con esta nueva técnica son validados con equipos comerciales específicos empleados habitualmente para este fin; los resultados alcanzados son muy satisfactorios. Las ventajas más importantes que ofrece el método propuesto son su intuitividad y la posibilidad de obtener el modelo del QCM con equipamiento electrónico básico, por lo general, presente en cualquier laboratorio de electrónica. Esto es posible, en gran medida, gracias a la implementación de la propuesta mediante instrumentos virtuales.

Resumo

O presente traballo de investigación mostra un novo enfoque para a caracterización de dispositivos QCM (Quartz Crystal Microbalance - Microbalanzas de cristal de cuarzo). O método baséase nos principios fundamentais de compoñentes pasivos e o propio comportamento do compoñente QCM. Coa proposta, obtéñense os parámetros do circuíto equivalente QCM baseado no modelo BVD (Butterworth-Van Dyke). Os resultados obtidos con esta nova técnica son validados con equipos comerciais específicos empregados habitualmente para este fin; os resultados alcanzados son moi satisfactorios. As vantaxes máis importantes que ofrece o método proposto son a súa intuitividade e a posibilidade de obter o modelo do QCM con equipamiento electrónico básico, polo xeral, presente en calquera laboratorio de electrónica. Isto é posible, en grande medida, gracias á implementación da proposta mediante instrumentos virtuais.

Abstract

The present research work shows a novel approach for the QCM (Quartz Crystal Microbalance) characterization. The method is based on fundamental principles of passive components and the own behavior of the QCM component. With the proposal, the QCM equivalent circuit parameters based on BVD (Butterworth-Van Dyke) model is obtained. The results achieved with this new technique are compared with specific commercial equipment usually employed for this purpose with very satisfactory results. The best advantages of the proposed method are its intuitivity and the possibility to obtain it with basic electronic equipment, usually, present in any electronic laboratory. This fact is possible, due to, its implementation through virtual instruments.

Índice General

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1	ANTECEDENTES	3
2	MOTIVACIÓN	4
3	OBJETIVOS	5
4	METODOLOGÍA	6

CAPÍTULO 2 BIOSENSORES

1	INTRODUCCIÓN	11
2	TRANSDUCTORES ELECTROQUÍMICOS	12
3	TRANSDUCTORES ÓPTICOS	12
4	TRANSDUCTORES TERMOMÉTRICOS	13
5	TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS	13

CAPÍTULO 3 CRISTAL DE CUARZO - QCM

1	INTRODUCCIÓN	19
2	CARGA ACUMULADA	19
3	MODELO MECÁNICO	19
3.1	FUERZA DE INERCIA	20
3.2	REACCIÓN ELÁSTICA	20
3.3	REACCIÓN VISCOSA	20
3.4	MODELO MATEMÁTICO PARA EL EQUILIBRIO MATEMÁTICO	20
4	MODELO ELÉCTRICO	21
5	CONSIDERACIONES ACERCA DEL CRISTAL - QCM	23
5.1	CORTE	23
5.2	FRECUENCIA DE OSCILACIÓN	23
5.3	GEOMETRÍA	24
5.4	TEXTURA DE LA SUPERFICIE	25
5.5	METAL DE LOS ELECTRODOS	25
5.6	SOPORTE DEL CRISTAL	25
6	EL QCM COMO ELEMENTO SENSOR	25

CAPÍTULO 4 INTERFACES ELECTRÓNICAS PARA QCM

1	INTRODUCCIÓN	31
2	SISTEMAS BASADOS EN UN ANALIZADOR DE IMPEDANCIAS O DE REDES	32
3	SISTEMAS BASADOS EN EL MÉTODO DEL DECAIMIENTO	33
4	OSCILADORES	34
5	CIRCUITOS DE ENGANCHE EN FASE (PLL)	36

CAPÍTULO 5 MÉTODO PROPUESTO

1	INTRODUCCIÓN	41
2	MÉTODO DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS EN EL QUE SE FUNDAMENTA LA INVESTIGACIÓN	41
3	PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DEL QCM EN AIRE	43
4	MÉTODO ESPECÍFICO DE CÁLCULO DEL VALOR DE LA RESISTENCIA DEL MODELO DE QCM EN AIRE	45
5	PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DEL QCM EN AGUA	46
6	NECESIDAD DE CALIBRACIÓN DE LA BOBINA EMPLEADA EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS	47

CAPÍTULO 6 IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA

1	OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL QCM CON LA PROPUESTA	51
1.1	EQUIPOS DE MEDIDA	51
1.2	CIRCUITOS DESARROLLADOS	53
1.3	FUNCIONAMIENTO CONJUNTO DE LA PROPUESTA	57
2	OBTENCIÓN DE LOS VALORES REALES DE LOS COMPONENTES USADOS EN LA PROPUESTA	58
2.1	CIRCUITOS PARA EL CÁLCULO DE LAS BOBINAS	58
2.2	CIRCUITOS PARA EL CÁLCULO DE C0	59
2.3	CIRCUITOS PARA EL CÁLCULO DE R1	60
2.4	CIRCUITOS PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL QCM EN AGUA	61
3	DESARROLLO DEL SOFTWARE USADO PARA LAS PRUEBAS	62
3.1	ESPECIFICACIONES DE LA APLICACIÓN.	63
3.2	LIBRERÍAS UTILIZADAS Y SUB-VÍ'S DISEÑADOS.	63
3.3	PANEL FRONTAL	71
3.4	ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN.	74
3.5	DIAGRAMA DE BLOQUES	74

ii

CAPÍTULO 7 RESULTADOS

1	CALIBRACIÓN DE LAS BOBINAS	85
1.1	BOBINA DE 20 MICRO HENRIOS (μH)	85
1.2	BOBINA DE 40 MICRO HENRIOS (μH)	90
1.3	BOBINA DE 56 MICRO HENRIOS (μH)	96
1.4	BOBINA DE 100 MICRO HENRIOS (μH) SIN NÚCLEO	101
1.5	BOBINA DE 100 MICRO HENRIOS (μH) CON NÚCLEO	106
1.6	BOBINA DE 220 MICRO HENRIOS (μH)	112
1.7	BOBINA DE 330 MICRO HENRIOS (μH)	117
2	RESUMEN CALIBRACIÓN DE BOBINAS	123
3	OBTENCIÓN DE LA CAPACIDAD PARALELO C0 DEL MODELO EQUIVALENTE DEL QCM EN AIRE	123
3.1	BOBINA L1 20 μH NOMINALES – 20,2 μH REALES	123
3.2	BOBINA L2 40 μH NOMINALES – 40,7 μH REALES	124
3.3	BOBINA L3 56 μH NOMINALES – 57,7 μH REALES	126
3.4	BOBINA L4 SIN NÚCLEO 100 μH NOMINALES – 104,0 μH REALES	127
3.5	BOBINA L5 CON NÚCLEO 100 μH NOMINALES – 101,0 μH REALES	129
3.6	BOBINA L6 220 μH NOMINALES – 211,0 μH REALES	130

3.7	BOBINA L7 330 μ H NOMINALES - 317 μ H REALES	131
4	OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA RAMA SERIE, R1, DEL MODELO EQUIVALENTE DEL QCM EN AIRE	133
4.1	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 100 OHMIOS	133
4.2	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 7,5 OHMIOS	134
4.3	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 8,25 OHMIOS	136
4.4	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 9,31 OHMIOS	137
4.5	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 10 OHMIOS	138
4.6	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 12 OHMIOS	140
5	VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL QCM EN AIRE SEGÚN EL MODELO BVD	141
6	OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA RAMA SERIE R2 DEL MODELO EQUIVALENTE DEL QCM EN AGUA	141
6.1	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 100 OHMIOS	142
6.2	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 158 OHMIOS	143
6.3	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 174 OHMIOS	144
6.4	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 191 OHMIOS	146
6.5	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 210 OHMIOS	147
6.6	RESISTENCIA DE PRECISIÓN DE 249 OHMIOS	149
7	VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL QCM EN AGUA SEGÚN EL MODELO BVD	150

CAPÍTULO 8 VALIDACIÓN

1	INTRODUCCIÓN	153
2	PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA LA CARACTERIZACIÓN CON EQUIPOS COMERCIALES.	153
2.1	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD PARALELO.	153
2.2	DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA.	153
2.3	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA SERIE.	154
2.4	CIRCUITO EMPLEADO.	154
3	RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS EQUIPOS REFERENCIA.	154

CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES

1	CONCLUSIONES	163
----------	---------------------	------------

CAPÍTULO 10 PRODUCCIÓN CIENTÍFICA Y TRABAJOS FUTUROS

1	PRODUCCIÓN CIENTÍFICA Y TRABAJOS FUTUROS	167
----------	---	------------

CAPÍTULO 11 REFERENCIAS

1	REFERENCIAS	171
----------	--------------------	------------

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Esquema general de un biosensor.....	11
Ilustración 2 Efecto de la vibración	15
Ilustración 3 Efecto piezoeléctrico	19
Ilustración 4 Fuerzas en un cristal de cuarzo en equilibrio	20
Ilustración 5 Modelo eléctrico equivalente de un cristal de cuarzo.....	22
Ilustración 6 Modelo eléctrico equivalente completo de un cristal de cuarzo	22
Ilustración 7 Corte AT de un cristal de cuarzo.....	23
Ilustración 8 Coeficiente de temperaturas para el corte AT	24
Ilustración 9 Cristal de cuarzo cara frontal y reverso	24
Ilustración 10 Curvas de respuesta del desplazamiento de la frecuencia de resonancia en un QCM sumergido en agua con diferentes concentraciones de glicerol.	27
Ilustración 11 Divisor de impedancias sobre el que se obtiene la función de transferencia. Adaptada de [35].	32
Ilustración 12 (a) Variación de la frecuencia de oscilación del sensor al incrementar la masa en su superficie. Se representa en rojo la frecuencia correspondiente al sensor con una capa de proteínas en su superficie, y en verde la nueva frecuencia al añadir anticuerpos que se adhieren a la capa de proteínas. (b) Muestra las diferencias en el amortiguamiento que sufren las señales correspondientes a una capa rígida (en rojo) o una capa viscoelástica (en verde) en la superficie del cristal. Figuras adaptadas de www.q-sense.com	34
Ilustración 13 Esquema del circuito oscilador para el sensor QCM. Adaptado de [46]	35
Ilustración 14 Diagrama de bloques con el módulo multiplicador de sensibilidad. Adaptada de [29].....	36
Ilustración 15 Diagrama de bloques de un circuito PLL para la lectura de la frecuencia de resonancia del QCM [89].	37
Ilustración 16 Circuito equivalente del QCM Butterworth-Van Dyke (BVD)	41
Ilustración 17 Circuito en el que se basa la propuesta	43
Ilustración 18 Circuito desde un punto de vista práctico.....	44
Ilustración 19 Circuito para obtención de R1 del modelo BVD	45
Ilustración 20 Modelo equivalente del QCM en medio líquido.....	46
Ilustración 21 Circuito para obtener L y R del QCM en medio líquido	47
Ilustración 22 Circuito para calibración de la bobina	48
Ilustración 23 Osciloscopio Agilent DSO3063A	51
Ilustración 24 Generador de funciones Agilent 33220A.....	52
Ilustración 25 Analizador de redes vectorial ZVR Rohde & Schwarz	52
Ilustración 26 Analizador de redes vectorial Bode 100	53
Ilustración 27 Equipo conversor de GPIB a Ethernet.....	53
Ilustración 28 Cristal de cuarzo utilizado sin soporte.....	54
Ilustración 29 Cristal de cuarzo utilizado con soporte	54
Ilustración 30 Circuito impreso para las pruebas con soporte	55

Ilustración 31 Circuito impreso para las pruebas sin soporte	55
Ilustración 32 Esquema y diseño del circuito de pruebas con soporte	56
Ilustración 33 Diseño del circuito de pruebas sin soporte	56
Ilustración 34 Diseño del circuito de pruebas con soporte	56
Ilustración 35 Esquema de los experimentos para la propuesta	57
Ilustración 36 Circuito utilizado para el cálculo de la inductancia real de las bobinas.....	58
Ilustración 37 Circuito utilizado para el cálculo del valor de C0	59
Ilustración 38 Circuito utilizado para el cálculo del valor de C0	59
Ilustración 39 Montaje para obtención de los parámetros del cristal en ambiente controlado.....	60
Ilustración 40 Circuito utilizado para el cálculo del valor de R1	60
Ilustración 41 Montaje utilizado para las pruebas en medio líquido	61
Ilustración 42 Vi's de comunicación utilizados.....	63
Ilustración 43 Diagrama jerárquico del programa.....	64
Ilustración 44 Panel frontal sub-vi Calculo Ganancia Vertical	64
Ilustración 45 Diagrama de bloques del sub-vi Calculo Ganancia Vertical.....	65
Ilustración 46 Panel frontal del sub-vi Control Ganancia Vertical.....	65
Ilustración 47 Diagrama de bloques del sub-vi Control de Ganancia Vertical.....	66
Ilustración 48 Panel frontal sub-vi Medida	66
Ilustración 49 Diagrama de bloques del sub-vi Medida	67
Ilustración 50 Panel frontal sub-vi Fichero.....	68
Ilustración 51 Diagrama de bloques del sub-vi Fichero.....	68
Ilustración 52 Panel frontal del sub-vi Read File	69
Ilustración 53 Diagrama de bloques del sub-vi Read File	69
Ilustración 54 Panel frontal sub-vi Central Freq	70
Ilustración 55 Diagrama de bloques sub-vi Central Freq.....	70
Ilustración 56 Panel Frontal y Diagrama de bloques del sub-vi Puntos	71
Ilustración 57 Pantalla de Configuración.....	71
Ilustración 58 Pantalla de Test	72
Ilustración 59 Pantalla Graphics	73
Ilustración 60 Diagrama de estados de la aplicación	74
Ilustración 61 Etapa Wait for Event.....	76
Ilustración 62 Etapa Configuración.....	76
Ilustración 63 Etapa Principal	77
Ilustración 64 Etapa Init.....	78
Ilustración 65 Etapa Sweep	79
Ilustración 66 Etapa Sec Sweep Conf.....	80
Ilustración 67 Etapa Graphic	81
Ilustración 68 Placa diseñada para realizar la validación	154

Índice de tablas

Tabla 1. Calibración de bobina de 20 μ H con condensador de 10pF	86
Tabla 2. Calibración de bobina de 20 μ H con condensador de 15pF	87
Tabla 3. Calibración de bobina de 20 μ H con condensador de 20pF	89
Tabla 4. Calibración de bobina de 20 μ H con condensador de 22pF	90
Tabla 5. Calibración de bobina de 20 μ H con condensador de 10pF	91
Tabla 6. Calibración de bobina de 20 μ H con condensador de 15pF	93
Tabla 7. Calibración de bobina de 20 μ H con condensador de 20pF	94
Tabla 8. Calibración de bobina de 20 μ H con condensador de 22pF	95
Tabla 9. Calibración de bobina de 56 μ H con condensador de 10pF	97
Tabla 10. Calibración de bobina de 56 μ H con condensador de 15pF	98
Tabla 11. Calibración de bobina de 56 μ H con condensador de 20pF	100
Tabla 12. Calibración de bobina de 56 μ H con condensador de 22pF	101
Tabla 13. Calibración de bobina de 100 μ H sin núcleo para condensador de 10pF.....	102
Tabla 14. Calibración de bobina de 100 μ H sin núcleo para condensador de 15pF.....	104
Tabla 15. Calibración de bobina de 100 μ H sin núcleo para condensador de 20pF.....	105
Tabla 16. Calibración de bobina de 100 μ H con condensador de 22pF	106
Tabla 17. Calibración de bobina de 100 μ H con núcleo para condensador de 10pF	108
Tabla 18. Calibración de bobina de 100 μ H con núcleo para condensador de 15pF	109
Tabla 19. Calibración de bobina de 100 μ H con núcleo para condensador de 20pF	110
Tabla 20. Calibración de bobina de 100 μ H con núcleo para condensador de 22pF	112
Tabla 21. Calibración de bobina de 220 μ H para condensador de 10pF.....	113
Tabla 22. Calibración de bobina de 220 μ H para condensador de 15pF.....	114
Tabla 23. Calibración de bobina de 220 μ H para condensador de 20pF.....	116
Tabla 24. Calibración de bobina de 220 μ H para condensador de 22pF.....	117
Tabla 25. Calibración de bobina de 330 μ H para condensador de 10pF.....	118
Tabla 26. Calibración de bobina de 330 μ H para condensador de 15pF.....	120
Tabla 27. Calibración de bobina de 330 μ H para condensador de 20pF.....	121
Tabla 28. Calibración de bobina de 330 μ H para condensador de 22pF.....	122
Tabla 29. Resumen de valores reales de bobinas.....	123
Tabla 30. Valores de C0 para la bobina de 20 μ H nominales - 20,2 μ H reales	124
Tabla 31. Valores de C0 para la bobina de 40 μ H nominales - 40,7 μ H reales	126
Tabla 32. Valores de C0 para la bobina de 56 μ H nominales - 57,7 μ H reales	127
Tabla 33. Valores de C0 para la bobina de 100 μ H nominales - 104,0 μ H reales	128
Tabla 34. Valores de C0 para la bobina de 100 μ H nominales - 101,0 μ H reales	130
Tabla 35. Valores de C0 para la bobina de 220 μ H nominales - 211,0 μ H reales	131
Tabla 36. Valores de C0 para la bobina de 330 μ H nominales - 317,0 μ H reales	133
Tabla 37. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 100 ohmios.....	134
Tabla 38. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 7,5 ohmios.....	136

Tabla 39. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 8,25 ohmios.....	137
Tabla 40. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 9,31 ohmios.....	138
Tabla 41. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 10 ohmios.....	140
Tabla 42. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 12 ohmios.....	141
Tabla 43. Valores de los parámetros del QCM en aire para el modelo de BVD.....	141
Tabla 44. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 100 ohmios.....	143
Tabla 45. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 158 ohmios.....	144
Tabla 46. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 174 ohmios.....	146
Tabla 47. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 191 ohmios.....	147
Tabla 48. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 210 ohmios.....	148
Tabla 49. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 249 ohmios.....	150
Tabla 50. Valores de los parámetros del QCM en agua para el modelo de BVD.....	150
Tabla 51. Valores de los parámetros del QCM en aire con ZVR R&S.....	156
Tabla 52. Valores de los parámetros del QCM en agua con ZVR R&S.....	157
Tabla 53. Valores de los parámetros del QCM en aire con BODE100.....	158
Tabla 54. Valores de los parámetros del QCM en agua con BODE100.....	159
Tabla 55. Comparativa medidas en aire.....	160
Tabla 56. Comparativa medidas en agua.....	160
Tabla 57. Métrica de Sensors and Actuators A. Fuente WoS.....	167

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Carga acumulada en un cristal de cuarzo.....	19
Ecuación 2 Fuerza de inercia	20
Ecuación 3 Reacción elástica	20
Ecuación 4 Reacción viscosa.....	20
Ecuación 5 Modelo matemático del equilibrio dinámico establecido	21
Ecuación 6 Carga acumulada en los extremos de un cristal de cuarzo	21
Ecuación 7 Corriente de desplazamiento en el cristal.....	21
Ecuación 8 Ecuación de equilibrio dinámico establecido en función de la corriente	21
Ecuación 9 Ecuación de un circuito RLC	21
Ecuación 10 Equivalencias entre parámetros mecánicos y eléctricos.....	21
Ecuación 11 Frecuencias de resonancia de los QCM.....	26
Ecuación 12 Frecuencia de resonancia fundamental de los QCM.....	26
Ecuación 13 Ecuación de Sauerbrey	26
Ecuación 14 Desplazamiento de frecuencia si el sensor está sumergido en medio líquido.....	27
Ecuación 15 Variación de la resistencia dinámica del sensor en medio líquido.....	28
Ecuación 16 Capacidad paralelo C0.....	42
Ecuación 17 Capacidad serie C1	42
Ecuación 18 Inductancia serie L1.....	42
Ecuación 19 Resistencia serie R1.....	42
Ecuación 20 Obtención de C0 por el método propuesto	44
Ecuación 21 Conversión de la frecuencia a hertzios	44
Ecuación 22 Obtención de C0 a partir de frecuencia en hertzios.....	44
Ecuación 23 Expresión para obtención de R1	45
Ecuación 24 Frecuencia de resonancia del QCM en medio líquido.....	46
Ecuación 25 Expresión para obtención de R1+R2	47
Ecuación 26 Expresión para obtención de los valores reales de las bobinas	48
Ecuación 27 Expresión para obtención de la capacidad serie C1.....	153
Ecuación 28 Expresión para obtención de la inductancia serie L1.....	153
Ecuación 29 Expresión para obtención de la resistencia serie R1.....	154

Capítulo 1
Introducción

1 Antecedentes

Existe mucha información en torno a diferentes propuestas de biosensores. En casi todos los casos, se pretende realizar una medición muy selectiva del parámetro que se pretende detectar y/o medir. Además se trata de que la medida alcance, en algún caso, los niveles de molécula, dependiendo lógicamente de la aplicación a la cual vaya destinada. Este hecho conlleva que dos disciplinas, en principio relativamente alejadas, hayan tenido que ir de la mano para dar lugar a biosensores tal y como se conocen en la actualidad. Por un lado, la electrónica se ha de centrar en alcanzar un alto grado de sensibilidad y precisión en la medida de la magnitud desde un punto de vista eléctrico. Por otro lado, cada vez es más necesario complementar la detección y medición con nuevas técnicas de carácter físico y químico que sean transformables en magnitudes eléctricas.

En este sentido los polímeros de huella impresa (MIP- Molecularly Imprinted Polymer) han jugado y juegan un papel importantísimo en la capacidad de selección del componente que se pretende medir. En cuanto a la parte mecánico-electrónica que permite medir la cantidad de moléculas que se han adherido al MIP, existen diversas alternativas.

Por varias razones, entre las que destaca el hecho de que generalmente los equipos de investigación no están formados por investigadores de las dos disciplinas, la tendencia de los equipos de investigación formados principalmente por físicos y químicos sido emplear equipos electrónicos de propósito general en el que se puedan ensayar los MIP's desarrollados, y por otro lado, los investigadores en el campo de la electrónica se han centrado principalmente en conseguir que los equipos no planteen dificultades a la hora de realizar la medida.

Una de las técnicas más populares en la que se emplean y desarrollan polímeros de huella impresa para detectar múltiples tipos de sustancias son las balanzas de cristal de cuarzo (Quartz Crystal Microbalance – QCM). Uno de los motivos de su empleo cuando se trabaja con MIPs, entre otros, es la gran superficie de la que se dispone en este tipo de técnica para depositar los polímeros diseñados para detección de un componente concreto. El principio en el que se basa este tipo de técnica mecánico-electrónica es el efecto piezoeléctrico.

El efecto piezoeléctrico permite detectar cambios de masa muy pequeños sobre una superficie determinada. Esta detección se va a traducir en un cambio en la frecuencia de oscilación que se manifiesta de forma eléctrica, y que debidamente acondicionada va a ser posible cuantificar y correlacionar en base a la cantidad de material que se haya depositado sobre la superficie anteriormente mencionada.

El principio de funcionamiento básico ha sido ampliamente descrito y es relativamente sencillo. Sin embargo, la técnica de medida posee muchos inconvenientes, y para obtener una medida correcta se ha de tener un conocimiento exhaustivo de los componentes que conforman el sensor. Es muy importante determinar las condiciones en las que está operando, siendo muy sensible a las diferentes condiciones de trabajo. Además, a pesar de que su fabricación se lleva a cabo mediante procesos muy sofisticados, el comportamiento de los QCM tiene variaciones sensibles incluso para elementos fabricados en una misma serie.

Cuando se desarrollan biosensores basados en la técnica del QCM, se ha de determinar en detalle su comportamiento, dado que es el soporte del elemento sensor de la muestra, que es el MIP. Como se ha mencionado previamente, no es tarea sencilla, y por tanto, cobra mucha importancia el disponer de un modelo que se aproxime en lo posible al funcionamiento real.

Puesto que el comportamiento varía en función del entorno en el que se encuentre el QCM, además de tener que modelar este, será necesario modelar en qué medida afecta el ambiente en el que esté. Incluso, es necesario modelar el propio MIP adherido a la cara del QCM. Por tanto, en el empleo de biosensores basados en QCM es de suma importancia la tarea de caracterización en todas sus fases.

Ante la ausencia en muchas ocasiones de sinergias entre los mencionados equipos multidisciplinares, lógicas por la especificidad de la materia en la que se trabaja, los equipos de medida que se desarrollan son aptos para casos muy específicos. Por otro lado, cuando se emplean equipos comerciales, perfeccionados sobre todo para investigadores dedicados a las tareas de desarrollo e investigación de los MIPs, las labores de caracterización suelen ser automáticas y muy poco transparentes incluso cuando se es conocedor de la materia. Esto provoca en consecuencia poco margen en este sentido y en ocasiones un desconocimiento del soporte del polímero.

Los equipos comerciales, por diversas razones como pueden ser el reducido mercado que poseen, la especificidad de la materia, etc., suelen ser equipos muy caros y al alcance de pocos investigadores que traten de iniciarse en este tipo de trabajos. Y, como es lógico, a medida que se incrementan prestaciones como: precisión, simplicidad, repetitividad, automatización de tareas, posibilidad de trabajo con diferentes medios sin intervención de usuarios, etc. el precio crece de forma exponencial.

Por todo lo expuesto, surgen una serie de motivaciones de cara a afrontar los diferentes problemas que se han expuesto y dar soluciones, que en cierta medida mitiguen los problemas mencionados.

2 Motivación

En todo lo relacionado con biosensores, al igual que en cualquier otra disciplina emergente, son muchos los avances necesarios de cara a transformar en técnica esa nueva línea. Por todo lo expuesto en la anterior sección, queda patente, la necesidad de realizar avances en la utilización de los biosensores.

Tal y como se ha comentado, los biosensores basados en la técnica del QCM resultan muy atractivos para los investigadores que trabajan con polímeros de huella impresa (MIPs), entre otras razones por la amplia superficie de la que se dispone para adherir el material sensible diseñado, aunque en ocasiones el depositarlo de forma adecuada es todo un reto. Este es uno de los motivos que provocan la elección del QCM dentro de las líneas que sigue el grupo de investigación.

Disponer del modelo del QCM en sus diferentes aproximaciones es muy importante de cara a su empleo como sensor y, así poder realizar medidas lo más exactas posibles de la variable que se pretenda cuantificar. En este sentido destacar que existen varias alternativas para la consecución de dicho objetivo, pero en determinados casos los procedimientos desarrollados hasta la fecha presentan ciertas dificultades o limitaciones. Este sería el caso, por ejemplo, de algún método que plantea la necesidad de obtener las medidas exactas del cristal, lo cual no es posible en todos los casos. Otra limitación importante es tener que disponer de un equipo de alto coste como puede ser un analizador de redes vectorial para obtener el modelo. Los procedimientos han de evitar en lo posible estas limitaciones en cuanto a su ejecución se refiere.

Ahondando en los procedimientos existentes de obtención del modelo, hay que destacar la necesidad de hacerlo cada vez que se emplea un nuevo ejemplar por la variabilidad que puede tener, no sólo debido al propio dispositivo, si no, al ambiente en el que se encuentra. Por tanto, es muy importante obtener el modelo para cada unidad, por lo cual, determinados métodos de caracterización, como puede ser el dimensional, quedarían descartados.

Es muy importante destacar además, que para una correcta manipulación del elemento sensor, es necesario, casi siempre, disponer de un soporte adecuado y tendrá que ser tenido en cuenta a la hora de realizar el modelado. Se necesitan, por lo tanto, métodos de aplicación directa en el modo y medio que vayan a ser utilizados.

Los equipos basados en QCM, especialmente los destinados al desarrollo y testeo de los MIPs con fines de sensado, llevan a cabo la caracterización necesaria para un correcto funcionamiento. Tal y como se ha mencionado, esta caracterización se realiza de forma automática y en un segundo plano. Este hecho puede limitar en cierta medida la consecución de nuevos retos en los que se requiere un caracterizado diferente, y en consecuencia dicho equipo estaría limitado también. La tarea de caracterización debiera ser flexible a nuevas aproximaciones ante nuevos métodos, procedimientos, etc.

En cuanto a estos mismos equipos, indicar que suelen ser equipos muy caros, y tal como se ha indicado en los antecedentes, y a medida que se incorporan prestaciones, va a ser necesario realizar un desembolso económico mucho más importante. Esto es una gran limitación, sobre todo en grupos noveles que se inician en la materia. Se pone de manifiesto en consecuencia, una gran necesidad de desarrollo de nuevos procedimientos, equipos, etc. de bajo coste, que ofrezcan resultados correctos. Incluso en la medida de lo posible sería muy interesante poder emplear instrumentación “estándar” presente en cualquier laboratorio electrónico aunque requiriese de una pequeña adaptación o acondicionamiento.

Existen gran cantidad de contribuciones relativamente recientes, centradas en la tarea de caracterización del QCM. Estas investigaciones son llevadas a cabo por grupos con un carácter eminentemente electrónico y con una enorme especialización. Esto requiere, en consecuencia, un enorme esfuerzo de cara a la comprensión de los resultados y si se desea llevar a cabo su implementación va a ser necesario mucho tiempo para poder aprovechar el conocimiento desarrollado hasta el momento. En este sentido, sería deseable el desarrollo de métodos que empleen en lo posible técnicas más sencillas, tanto en cuanto a comprensión se refiere como a facilidad de implementación si se fuese a llevar a cabo.

3 Objetivos

Este trabajo surge como consecuencia del inicio de la línea de investigación en el grupo, en colaboración con el Grupo de Polímeros de la Universidad de A Coruña. Este grupo tiene experiencia previa en el desarrollo de polímeros de huella impresa (Molecularly Imprinted Polymer - MIP) desde un punto de vista analítico. Tratando de aprovechar el Know-how que el grupo de polímeros poseía, y los conocimientos del grupo de electrónica, se plantean sinergias y en consecuencia, la posibilidad de trabajar en la investigación de biosensores.

Tras una primera etapa de búsqueda de información en biosensores, y habiéndose decantado por su implementación sobre soporte QCM, surge una primera posibilidad de investigación y transferencia con el proyecto “Medición OnLine de Parámetros de Aceites lubricantes en máquinas rotativas de aerogeneradores” (MOLPA). En este proyecto, aprovechando la técnica

del QCM, se trataba de diagnosticar el estado de los lubricantes empleados en los aerogeneradores. Fue en este momento cuando en el estudio de trabajos previos en la línea de diagnóstico de aceites, se pone de manifiesto la necesidad de caracterización. Destacar que, sin la incorporación del MIP al QCM, ya era posible, sólo en contacto con el aceite determinar determinados parámetros muy significativos en su diagnóstico, que permitían predecir posibles actuaciones o la necesidad de ser sustituido.

A pesar de que se disponía de un equipo para trabajar con el QCM en sensores, en el momento del inicio del proyecto, concretamente el QCM200 desarrollado por Stanford Research Systems, se detectó que presentaba ciertas carencias en cuanto a la caracterización del sensor tanto en medio aéreo como en medio líquido, pues sólo permite obtener dos parámetros, la frecuencia de oscilación y la resistencia del modelo. Es en ese preciso momento, cuando se acentúa la necesidad de desarrollar nuevos métodos bajo los objetivos indicados, siendo las causas entre otras, la imposibilidad de adquisición de equipamiento.

Como consecuencia, el presente trabajo de investigación descrito en este documento, ha tenido como objetivo principal de partida, el desarrollarlo de un método de caracterización de sensores basados en balanzas de cristal de cuarzo (Quartz Crystal Microbalance – QCM) que palíe en cierta medida las deficiencias, carencias, limitaciones, etc. que poseen los métodos existentes en la actualidad. Su consecución, es una tarea difícil por la gran cantidad de condicionantes que posee la técnica. Pero, en aras de alcanzar el objetivo principal, se decide subdividirlo en los siguientes objetivos parciales:

- Estudio y observación de la tecnología en cuanto a biosensores se refiere.
- Desarrollo de un método de modelado del QCM, en los posibles modos de operación que posee, evitando, en lo posible, limitaciones en cuanto a posibilidad de ejecución se refiere.
- El proceso de caracterización ha de perseguir la facilidad de ejecución, dada la necesidad de llevarlo a cabo asiduamente.
- Además, en lo posible, el proceso de caracterización se tendrá que llevar a cabo en el medio final en el que se vaya a emplear el sensor, sin la necesidad de su aislamiento y acondicionamiento excesivo.
- El método buscará la máxima transparencia, quedando abierto a futuras aproximaciones, consecuencia de nuevos estudios o investigaciones.
- Dado que la instrumentación actual que permite la caracterización del QCM es específica o bastante avanzada, se tratará en lo posible que pueda ser llevada a cabo con instrumentación básica presente en cualquier laboratorio electrónico.
- El método perseguirá en todo momento la sencillez y el empleo de las técnicas más simples, claras y sencillas, con el ánimo permanente de que el procedimiento no presente dificultades de comprensión y su implementación pueda ser llevada a cabo fácilmente.

4 Metodología

La estrategia metodológica empleada para la consecución de los objetivos planteados ha sido estructurada en las siguientes etapas fundamentales:

- Documentación: Se lleva a cabo una búsqueda y análisis de documentación que permite tener una visión detallada de los antecedentes y estado actual de la materia.
 - o Estudio de tipos y principios de funcionamiento de biosensores.

- Estudio de biosensores basados en QCM.
- Estudio del principio de funcionamiento del QCM.
- Análisis de los métodos de caracterización y modelado
- Estudio de diferentes alternativas posibles a las existentes.
- Plan de trabajo: Se realiza un plan para realizar el trabajo de investigación en el que se tratan de alcanzar los objetivos de partida. Este plan coincide estructuralmente con los diferentes capítulos que conforman el presente trabajo de investigación. La planificación se puede desglosar en los siguientes puntos principales.
 - Elaboración de un estado del arte de biosensores, con especial hincapié en los basados en tecnología que emplee QCM.
 - Análisis detallado del principio de funcionamiento de los cristales de cuarzo y consecuentemente del QCM en sus diferentes posibilidades conocidas.
 - Propuesta del método de caracterización alternativo bajo las premisas impuestas en los objetivos.
 - Implementación práctica del método, tratando de automatizar tareas que permitan obtener un gran número de medidas y que desde un punto de vista estadístico sea óptimo.
 - Exposición de los resultados y análisis con el método propuesto.
 - Realización de la validación del método, contrastando los resultados con equipos usualmente empleados en la misma tarea de caracterización.
 - Exposición de las conclusiones finales.
 - Descripción de los posibles trabajos futuros.

Es importante resaltar que determinados capítulos, por criterios fundamentalmente de claridad, han sido completados con un punto de conclusiones parciales específicas de la sección en que se esté.

Capítulo 2

Biosensores

1 Introducción

La investigación en biosensores ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, la expansión de esa actividad ha sido facilitada en gran medida por los avances tecnológicos en microelectrónica, microfabricación, fotónica y ciencias de la información. La convergencia de la biotecnología, nanotecnología y las tecnologías de la información ha dado lugar al desarrollo de ininidad de proyectos multidisciplinarios de sistemas de biosensado. Solamente a nivel europeo, una búsqueda de proyectos de investigación financiados por la UE, que incluya el término “biosensor” arroja más de 400 resultados e incluye proyectos desde finales de los años 90, de los cuales actualmente están operativos más de la mitad [1].

Después de los atentados del 11 de septiembre en Nueva York, seguidos de los ataques con ántrax, el gobierno americano encargó a su Centro de Evaluación de Tecnología (World Technology Evaluation Center - WTEC) un informe sobre la investigación y desarrollo de los sistemas de biosensado, el informe se publicó en agosto de 2004 [2], y recoge las principales aportaciones de universidades y empresas, la investigación de aplicaciones emergentes, y las infraestructuras de investigación y fabricación en EEUU, Europa y Japón, en este campo. En España, la Confederación Empresarial de Madrid y la Dirección General de Universidades e Investigación patrocinan la publicación de la colección <<vt>>, una serie de informes de vigilancia tecnológica, de los cuales, el de enero de 2005 está dedicado a las aplicaciones de los biosensores a la industria agroalimentaria [3]. Parte de la información recogida en este apartado es un extracto de estos dos documentos.

Un biosensor es un dispositivo compacto de análisis, que combinan un elemento de reconocimiento biológico (receptor, anticuerpo, enzima, tejido, célula) con un sistema de transducción (Ilustración 1). El primero se encarga del reconocimiento selectivo de un analito o compuesto determinado, provocando la variación de una o varias propiedades físico-químicas (pH, cambio de masa, cambio de potencial, variación de las propiedades ópticas etc.) que es capaz de detectar el transductor, proporcionando a su vez, una señal eléctrica medible relacionada con la concentración del analito examinado [3].

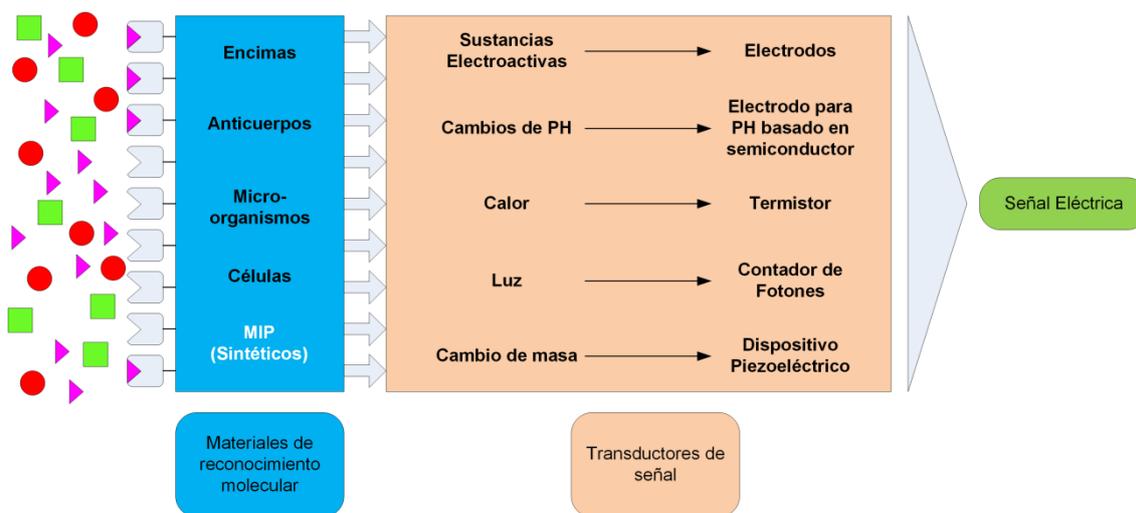


Ilustración 1 Esquema general de un biosensor

En un sentido más amplio los sistemas de biosensado incorporan una gran variedad de medios, incluyendo dispositivos eléctricos, electrónicos, ópticos; materiales biológicos como tejidos, enzimas, ácidos nucleicos; y análisis químicos, para producir señales detectables para monitorizar o identificar un fenómeno biológico. Entre sus principales ventajas se encuentran su selectividad, la rapidez y sencillez de la metodología de detección [4]. Tienen aplicación en biomedicina, análisis clínicos [5], monitorización y control medioambiental [6], producción y procesado de alimentos, seguridad alimentaria [7] y monitorización en tiempo real de procesos industriales [8], [9].

Los diferentes sistemas de transducción que se utilizan en función de la naturaleza de la interacción entre el elemento de reconocimiento y la especie de interés son: electroquímico, piezoeléctrico (máscicos, gravimétricos, acústicos), óptico, termométrico y nanomecánico.

2 Transductores electroquímicos

Los transductores electroquímicos transforman la señal que se produce por la interacción entre el sistema de reconocimiento y el analito a detectar en una señal eléctrica. El elemento de reconocimiento biológico y el elemento de transducción deben estar en contacto. Pueden ser conductimétricos, potenciométricos, amperimétricos o impedimétricos, en función de si detectan cambios en la conductividad, en el potencial, en una corriente o en la impedancia [10].

Los biosensores que utilizan medidas amperimétricas son los más utilizados. En ellos se trabaja a un potencial fijo respecto al electrodo de referencia y se mide el flujo de corriente que se genera en la superficie del electrodo de trabajo cuando tiene lugar la oxidación o reducción de alguna de las especies implicadas en la reacción enzimática, y la señal dada se puede correlacionar con la concentración de sustrato. Entre sus ventajas se encuentran que son económicos, de respuesta rápida, alta sensibilidad y fáciles de miniaturizar, siendo su principal inconveniente que requiere la utilización de electrodos de referencia [3].

3 Transductores ópticos

Los transductores ópticos miden las variaciones que se producen en las propiedades de la luz o de radiación electromagnética como consecuencia de la interacción física o química entre el analito a detectar y el elemento biológico de reconocimiento del biosensor. Los mecanismos empleados pueden ser: luminiscencia, absorción, dispersión o métodos de superficie.

En la categoría de luminiscencia se incluyen métodos de fluorescencia, quimioluminiscencia y bioluminiscencia. Todos ellos son altamente sensibles y su fundamento es la excitación de una molécula fluorescente a una determinada longitud de onda que responde con la emisión de luz en otra longitud de onda diferente. Se puede medir la intensidad de la emisión, la duración del estado excitado o la polarización.

En el fenómeno de la absorción se evalúa la cantidad de sustancia presente en función de la luz de determinadas longitudes de onda que son absorbidas. La dispersión es similar a la anterior pero se mide la cantidad de luz reflejada.

Los métodos de superficie incluyen la resonancia de plasmones superficiales (SPR) y métodos de interferencias. La resonancia de plasmones superficiales es uno de los métodos más utilizados en la detección de proteínas sin marcaje [11], el método se basa en las interacciones

que ocurren en la interfase entre una superficie en la que se encuentra el elemento de reconocimiento y la disolución en la que se encuentra el analito. La superficie suele ser un prisma de cristal recubierto con una capa de oro o plata. Cuando esta interface se ilumina con un rayo de luz, se producen cambios en el ángulo de incidencia, por la modificación del índice de refracción del medio próximo a la capa metálica, en proporción a la concentración de analito.

Entre las ventajas de los sistemas ópticos se encuentran la sensibilidad; por ejemplo, la fluorescencia es un método intrínsecamente amplificado en el que una molécula fluorescente puede generar hasta un millón de fotones, además, la luz emitida es de longitud de onda distinta a la de la señal de excitación lo que mejora la detección; se puede interrogar con muchas longitudes de onda simultáneamente sin que las señales se interfieran; y por último, no es preciso que exista una conexión física para interrogar al sensor [3].

En muchos sistemas de sensado se tiende a diseñar matrices de sensores que permitan detectar varios componentes simultáneamente. En el caso de los biosensores ópticos se aprovecha la tecnología CMOS para desarrollar matrices de guía de ondas [12], matrices de dispositivos SPR, o matrices con sensores de fibra óptica [13].

4 Transductores termométricos

Los sistemas de transducción termométricos se basan en la detección del calor generado en las reacciones enzimáticas exotérmicas, que se puede relacionar con la concentración de analito. Los cambios de temperatura se miden por medio de termistores a la entrada y salida del dispositivo en el que se encuentran inmovilizadas las enzimas.

5 Transductores piezoeléctricos

Los sistemas de transducción piezoeléctricos, basan su funcionamiento en la propiedad que presentan determinados materiales de polarizarse eléctricamente cuando son deformados por la acción de una fuerza. Esta polarización genera un campo eléctrico en la superficie que puede usarse para transformar la energía mecánica en energía eléctrica. A su vez, el efecto puede revertirse, de tal forma que aplicando un campo eléctrico a un material piezoeléctrico este se deforma.

Este último efecto permite que estos materiales vibren por la aplicación de un campo eléctrico externo, generando ondas acústicas que se propagan e interactúan con el medio que les rodea, de tal forma que, el grado de interacción o las propiedades del medio pueden ser medidas a partir de las características del campo eléctrico del propio sensor. Estos sensores se comportan como guía de ondas acústicas y pueden responder a la variación de un amplio abanico de cantidades físicas como presión, temperatura, masa añadida en la superficie, densidad o viscosidad de los fluidos en los que se encuentren sumergidos [14]. Además la funcionalización de su superficie con un recubrimiento, que actúa como receptor selectivo de determinadas sustancias, permite su amplia utilización como biosensores, en los que suele aprovecharse su sensibilidad a los cambios de masa o de densidad-viscosidad en líquidos [15].

En el caso de los resonadores de cristal piezoeléctrico, se diferencian dos tipos principales, en función del tipo de ondas acústicas dominantes en el dispositivo: Bulk acoustic Wave (BAW), también denominados microbalanzas de cristal de cuarzo (QCM) o resonadores de cristal de cuarzo (QCRS), en los que la propagación de las ondas ocurre en toda la masa del cristal, y los

Surface Acoustic Wave (SAW), en los que la propagación se produce únicamente en la superficie.

El uso de los QCM como microbalanzas fue posible, cuando Saurbrey en 1959, demostró que existe una relación lineal entre la masa adsorbida, su superficie y la frecuencia de resonancia del cristal, en el aire o en el vacío. Se utilizan desde entonces como sensores de masa de alta resolución, simples y de bajo coste [4], pero a diferencia de otros biosensores que únicamente informan de la presencia o ausencia de una determinada molécula, los QCM también proporcionan información acerca de las propiedades específicas de una película de material adherido a su superficie tales como el espesor, la viscoelasticidad, la densidad, la rugosidad superficial o la hidrofiliidad de la interfaz [8], [16]–[19].

Esta posibilidad ha supuesto el desarrollo de un amplio campo de aplicaciones debido a su habilidad inherente para monitorizar sustancias en tiempo real (inmunosensores, análisis de ADN etc.) [8], [19], [20]. También se han usado en entornos muy adversos: monitorizando diferentes procesos de degradación (aceites de coches, compostaje)[21]–[23] o el estado de carga en las baterías de ácido [24].

El sensor QCM es inherentemente no específico. La inmovilización de la molécula objetivo en la superficie es lo que permite su utilización como sensor de reconocimiento molecular. Para ello la superficie del sensor se recubre con diferentes elementos de reconocimiento que pueden ser de bioafinidad naturales como anticuerpos o lectinas, pero también con elementos sintéticos como los polímeros de impronta molecular (MIP), estos últimos son matrices sintetizadas artificialmente que presentan la capacidad de reconocer determinados compuestos [25].

14

Las principales ventajas de estos elementos es que aportan una selectividad elevada al sensor, con la posibilidad de desarrollar MIPs destinados a muy diversos analitos incluyendo especies para las que aún no se ha encontrado un elemento de reconocimiento biológico, además de resultar sensores con un bajo coste para la producción a gran escala [3]. Este tipo de sensores se han empleado en la detección de diferentes sustancias de interés, bien sea por su peligrosidad para el organismo como el bisphenol A [26],[27] , cafeína [28] ó en detección de drogas como la metanfetamina [29]. En los últimos años, los esfuerzos se han centrado en disminuir el límite de detección y mejorar la selectividad con sustratos difíciles [16].

En la literatura reciente, se encuentra un nuevo tipo de recubrimiento para los sensores QCM en el que se utiliza grafeno en forma de fina película sobre el cristal, bien sea para detectar formaldehído en forma gaseosa [30], o como sensor de humedad [31].

Un campo de aplicación específico de los resonadores QCM en biosensado son los inmunosensores basados en métodos de ruptura de la unión (bond-rupture) entre un anticuerpo y un antígeno [32], [33]. El transductor utilizado con este método es un sensor QCM, cuya superficie se ha recubierto con receptores a los cuales se unirán las moléculas objetivo del análisis. Pero en cualquier análisis siempre se producen algunos enlaces no específicos de otras moléculas distintas a las objetivo.

La vibración del resonador QCM agita las uniones entre las partículas fijadas a su superficie, de tal forma que se produzca la ruptura de esas uniones. Las uniones no específicas se rompen con vibraciones de menor amplitud que las uniones específicas, y eso permite discriminar los falsos positivos, pues la masa adicional causada por esos enlaces erróneos se separa de la masa de interés, cuyos enlaces no se romperán hasta que no se apliquen mayores amplitudes.

La lectura de evolución de la frecuencia del cristal así como del ruido proporciona indicadores cuantitativos del número de enlaces de la molécula objetivo (Ilustración 2).

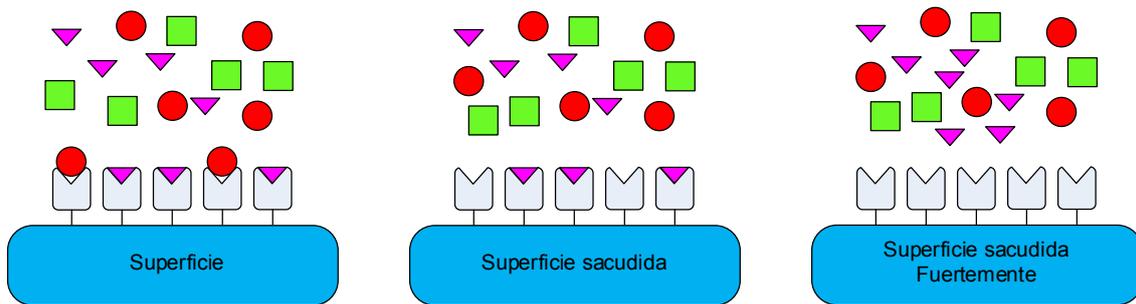


Ilustración 2 Efecto de la vibración

En uno de los últimos artículos de revisión [34] sobre las aplicaciones de los sensores QCM se apunta como tendencia la combinación de estos sensores con el método de resonancia de plasmones superficiales (SPR) en la misma plataforma, lo que proporciona una gran cantidad de información adicional en comparación con el uso de una única técnica de análisis.

Otra de las líneas de investigación seguidas en la actualidad es el desarrollo de los QCM monolíticos multicanal (MQCM), que consisten en múltiples microbalanzas sobre un único sustrato de cuarzo [35]. Este esquema se desarrolla inicialmente para superar una de las principales limitaciones del QCM, que es su dependencia con la temperatura. En aplicaciones donde las condiciones medioambientales sufrían grandes variaciones era preciso utilizar al menos dos QCM, uno de ellos como referencia. Sin embargo, el problema era que ambos debían tener idénticas características, algo difícil de conseguir si estaban hechos a partir de cristales diferentes, debido a las tolerancias en el proceso de fabricación. Para conseguir que los cristales tengan las mismas características es preciso que se fabriquen sobre el mismo cristal. Así se diseñan los sensores monolíticos multicanal, en los que uno se utiliza como referencia y los demás pueden ser recubiertos con diferentes capas sensoras. Estas plataformas tienen como principal reto resolver el problema de las interferencias entre las ondas generadas por un QCM con las generadas por los que están más próximos [36].

Capítulo 3

Cristal de cuarzo - QCM

1 Introducción

Cuando una porción de cristal de cuarzo es tallado de forma adecuada, se transforma en un elemento electromecánico que posee unas frecuencias de vibración propias y dependientes de la talla que se haya efectuado [37]. En la talla se persigue una forma prismática en la que las superficies exteriores formen determinados ángulos con los ejes del cristal [38]. El cristal presenta valores de frecuencia de oscilación eléctrica coincidentes con las frecuencias de vibración mecánica [39].

El funcionamiento de un cristal de cuarzo adecuadamente tallado como dispositivo electromecánico se basa en el fenómeno de piezoelectricidad que presentan los cristales de cuarzo [40]. El fenómeno de piezoelectricidad se da como consecuencia de la deformación por compresión o tracción del cristal. Cuando se produce uno de los dos esfuerzos, como consecuencia, aparece una carga eléctrica en las superficies del cristal [41]. Una de las características principales de este fenómeno es que es reversible, entonces, cuando se aplica una diferencia de potencial entre las caras del cristal de cuarzo, se deformará [42]. En la Ilustración 3 se observa el efecto piezoeléctrico, en donde x es la deformación, x_0 es la dimensión inicial previa a la deformación y $+q$ y $-q$ es la diferencia de potencial entre las caras.

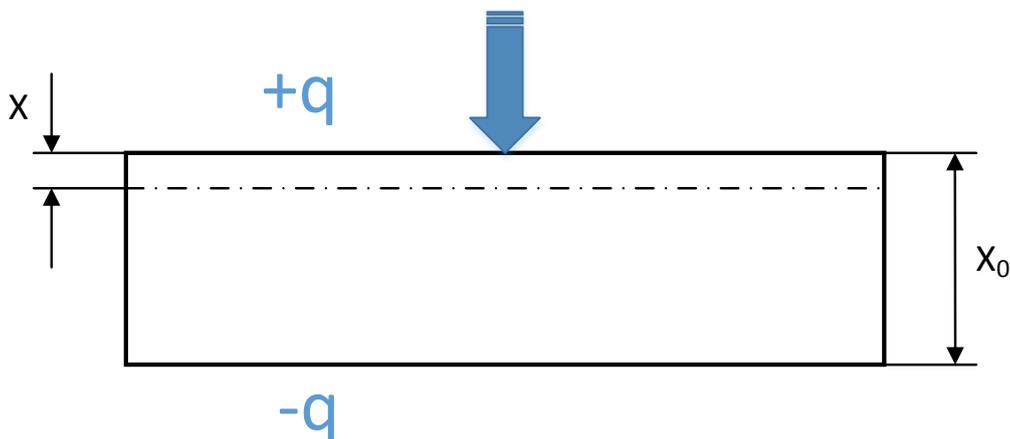


Ilustración 3 Efecto piezoeléctrico

2 Carga acumulada

El efecto piezoeléctrico provoca la acumulación de carga en las superficies de los cristales de cuarzo, cuando son sometidos a una deformación. Bien sea ésta de compresión o de tracción, la carga es proporcional a la deformación unitaria del cristal según la Ecuación 1 [43].

$$Q = K \frac{x}{x_0}$$

Ecuación 1 Carga acumulada en un cristal de cuarzo

Esta propiedad permite obtener el modelo eléctrico de un cristal de cuarzo.

3 Modelo mecánico

Se parte del supuesto de que se ejerce una fuerza $F(t)$ sobre una de las caras del cristal de cuarzo, sometiéndolo de este modo a compresión. Debido a ello, el espesor del cristal, cuyo

valor en reposo es X_0 , se decrementa en una cantidad $x(t)$. Frente a esa fuerza ejercida, aparecen tres fuerzas de reacción de sentido contrario (Ilustración 4) que se desglosan en los siguientes subapartados.

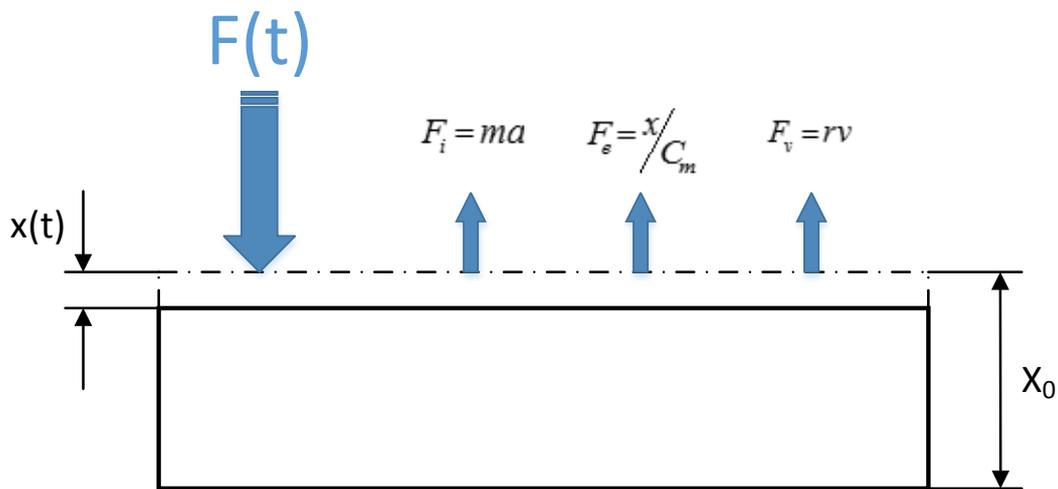


Ilustración 4 Fuerzas en un cristal de cuarzo en equilibrio

3.1 Fuerza de inercia

La fuerza de inercia es igual a la masa del cristal por la aceleración (Ecuación 2) [44].

$$F_i = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Ecuación 2 Fuerza de inercia

3.2 Reacción elástica

Esta fuerza es proporcional a la deformación que se produce en el cristal $x(t)$, y viene definida por la Ecuación 3. El parámetro C_m es la capacidad mecánica del cristal, y es la inversa de la constante de Hooke [45].

$$F_e = \frac{1}{C_m} x(t)$$

Ecuación 3 Reacción elástica

3.3 Reacción viscosa

Esta fuerza es directamente proporcional a la velocidad y viene definida por la Ecuación 4. El parámetro r es el coeficiente de rozamiento viscoso del cristal [45].

$$F_v = r \frac{dx}{dt}$$

Ecuación 4 Reacción viscosa

3.4 Modelo matemático para el equilibrio matemático

El equilibrio mecánico representado en la Ilustración 4, atendiendo a las fuerzas definidas en los apartados previos se puede representar como se indica en la Ecuación 5.

$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C_m} x(t)$$

Ecuación 5 Modelo matemático del equilibrio dinámico establecido

4 Modelo eléctrico

Dado que se produce el efecto piezoeléctrico cuando existe una fuerza sobre el cristal, independientemente del sentido de ésta, en los extremos del cristal se acumula una carga como la definida en la Ecuación 6.

$$Q(t) = \frac{K}{x_0} x(t)$$

Ecuación 6 Carga acumulada en los extremos de un cristal de cuarzo

Esta carga da lugar a una corriente como la que se define en la Ecuación 7.

$$i(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = \frac{K}{x_0} \frac{dx}{dt}$$

Ecuación 7 Corriente de desplazamiento en el cristal

Teniendo en cuenta esto, la ecuación del modelo matemático del equilibrio dinámico se puede reescribir y quedaría de la forma mostrada en la Ecuación 8.

$$\frac{K}{x_0} F(t) = m \frac{di}{dt} + ri(t) + \frac{1}{C_m} \int i(t) dt$$

Ecuación 8 Ecuación de equilibrio dinámico establecido en función de la corriente

21

Dado que la ecuación de un circuito RLC serie es la de la Ecuación 9,

$$u(t) = L \frac{di}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

Ecuación 9 Ecuación de un circuito RLC

Por analogía entre la Ecuación 8 y la Ecuación 9, se deduce que la Inductancia, Resistencia y Capacidad son proporcionales a la masa, coeficiente viscoso y capacidad mecánica del cristal respectivamente Ecuación 10.

$$\begin{aligned} L &= \lambda m \\ R &= \lambda r \\ C &= \frac{C_m}{\lambda} \end{aligned}$$

Ecuación 10 Equivalencias entre parámetros mecánicos y eléctricos

Por todo lo expuesto en este capítulo hasta el momento, se deduce que la frecuencia de vibración mecánica del cristal se corresponde con la de resonancia eléctrica.

Para conectar el dispositivo a un circuito eléctrico es necesario disponer dos placas conductoras a ambos lados del cristal. Debido a ello se forma un condensador constituido por ambas placas y el aislante que las separa, que es el propio cristal. De este modo, en paralelo al modelo eléctrico RLC es necesario disponer un condensador adicional cuya capacidad es C_0 ,

definida como capacidad estática. El valor de este condensador va a depender de la geometría del cristal y de las placas, y no de las propiedades mecánicas del cristal de cuarzo. Este hecho contrasta con el condensador C del modelo RLC, cuyo valor es proporcional a la capacidad mecánica del cristal. Los orígenes intrínsecos de ambos condensadores tienen naturalezas totalmente diferentes.

Por todo lo expuesto, el modelo equivalente del cristal de cuarzo quedaría como se indica en la Ilustración 5 Modelo eléctrico equivalente de un cristal de cuarzo, donde R_1 , L_1 y C_1 se corresponden con R , L y C de la Ecuación 10. Este modelo, es comúnmente conocido como modelo de Butterworth-Van Dyke (BVD) [4], [46]. Es importante destacar que para la propuesta se tendrán en cuenta unas ecuaciones específicas, basadas en las genéricas que se han presentado en esta sección.

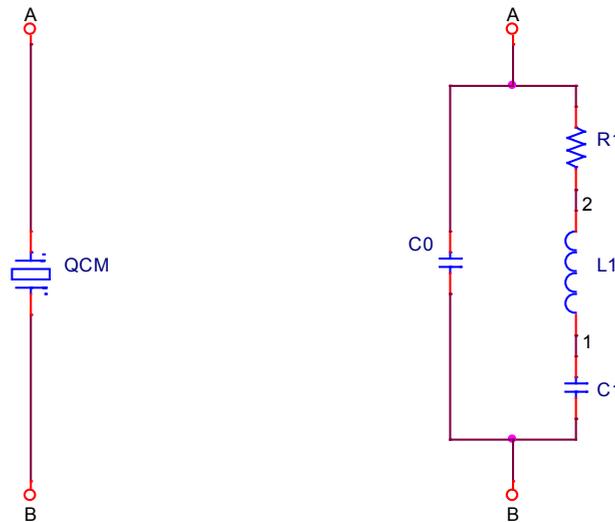


Ilustración 5 Modelo eléctrico equivalente de un cristal de cuarzo

Hay que destacar que un cristal de cuarzo no posee un único modo de vibración, sino que presenta infinitas frecuencias, y en consecuencia, a cada una de ellas se asocia una red RLC. El modelo sería el que se muestra en la Ilustración 6.

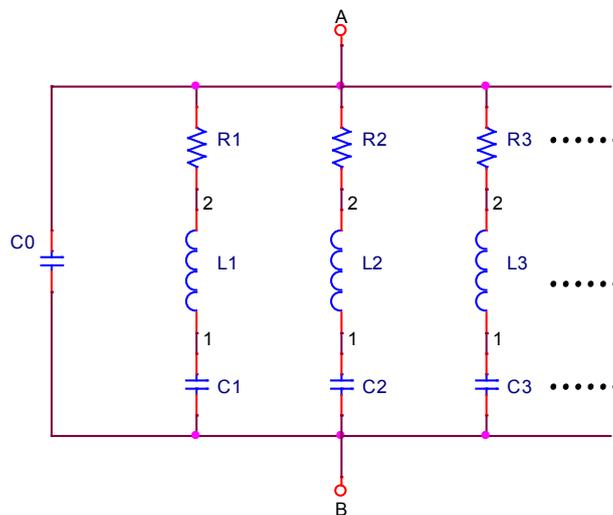


Ilustración 6 Modelo eléctrico equivalente completo de un cristal de cuarzo

Es importante destacar que, en las proximidades de una frecuencia determinada de resonancia, el resto de ramas se comportan como un circuito abierto. Además los cristales son tallados con el objetivo de conseguir la suficiente separación entre frecuencias. Se puede considerar por tanto que la frecuencia de un cristal es la correspondiente a la del modelo de la Ilustración 5.

5 Consideraciones acerca del cristal - QCM

A la hora de comprar un cristal, y en función de su aplicación, se han de tener en cuenta los siguientes factores: el corte, la frecuencia de oscilación, el tamaño y la forma, la textura de la superficie, el metal de los electrodos, la capacidad del recipiente para la muestra líquida, y el posible uso de un cristal de referencia adicional.

5.1 Corte

A partir de un cristal de cuarzo se pueden obtener distintos resonadores en función del ángulo con el que se corte un cristal madre, que en la naturaleza se encuentra en forma de prisma hexagonal.

Para sensores QCM, es recomendado el corte AT (ver Ilustración 7) con un ángulo aproximado de $35^{\circ} 25'$ medido a partir del eje óptico o eje z. Esto se debe a que estos cristales de cuarzo son muy estables en frecuencia y presentan un coeficiente de temperatura que es prácticamente nulo a temperatura ambiente como se puede observar en la Ilustración 8 [47][48].

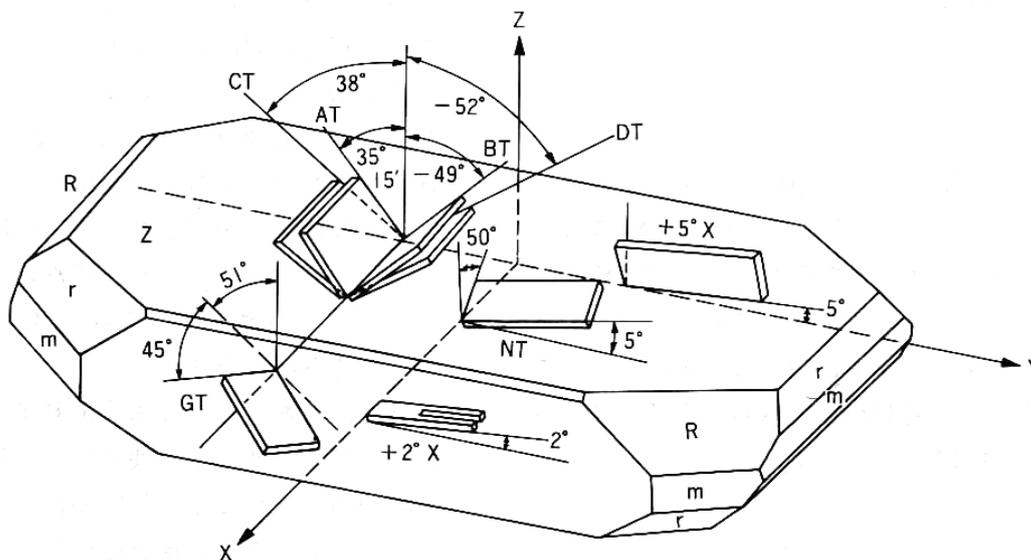


Ilustración 7 Corte AT de un cristal de cuarzo

5.2 Frecuencia de oscilación

El rango de frecuencias para el modo fundamental del corte AT está entre 800KHz y 30 MHz, pero en las aplicaciones de este tipo el rango utilizado va de 5 a 10 MHz.

Por otra parte, aunque el incremento de la frecuencia de resonancia implica una mayor sensibilidad, también supone un decremento del espesor, por ejemplo, un cristal de 5 MHz

tiene un espesor de 0.33 mm, mientras que el de uno de 30 MHz es de solo 55 μm , esto complica el trabajar con frecuencias elevadas debido a la fragilidad del cristal.

Es preciso medir la frecuencia de resonancia antes y después de recubrir el cristal con el MIP, de ese modo se sabe la cantidad media de MIP depositado [26].

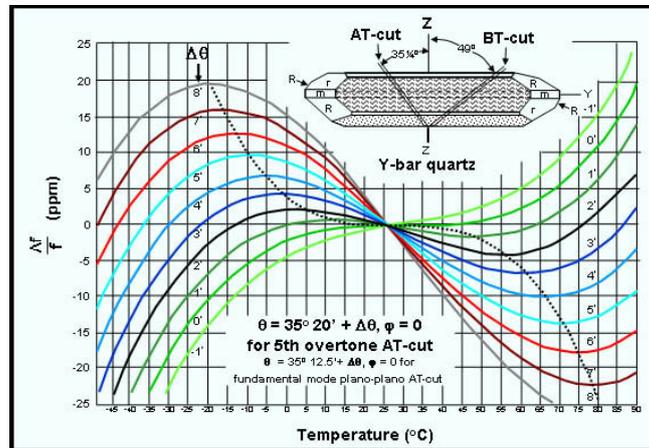


Ilustración 8 Coeficiente de temperaturas para el corte AT

5.3 Geometría

El diámetro de los cristales utilizados como sensores oscila entre los 13-14mm y los 2,54 cm, el uso de los de mayor tamaño se justifica porque una mayor distancia entre el área activa del cristal y los bordes, mejora la estabilidad del mismo, reduciendo los saltos de frecuencia que puede provocar la presión mecánica ejercida por el soporte sobre los bordes [49]. Se suele considerar que el área activa se limita a la superficie de solapamiento de los dos electrodos [46], [50], [51], sin embargo algunos estudios ponen de manifiesto que puede ser menor (si no hay un solapamiento perfecto entre electrodos) o incluso mayor (para el cristal en contacto con líquidos) [52].

En la Ilustración 9 se muestra el anverso (electrodo sensor) y el reverso de un cristal de cuarzo con electrodos de oro.



Ilustración 9 Cristal de cuarzo cara frontal y reverso

5.4 Textura de la superficie

La superficie del cristal puede ser áspera o lisa, pero para medidas en fase líquida se recomienda utilizar cristales ópticamente pulidos, pues la rugosidad de la superficie puede provocar un aumento artificial de la masa debido al líquido atrapado en las porosidades de la superficie [46], [53].

5.5 Metal de los electrodos

El oro (100-1000 nm) es el más utilizado en las aplicaciones QCM, por la facilidad con la que se deposita por evaporación, aunque se pueden utilizar otros metales como Platino, Aluminio, Plata, Titanio etc. En muchos casos se aplica una fina capa de adhesión de Cromo, o Silicio entre el cristal y el electrodo para facilitar su fijación[54].

5.6 Soporte del cristal

Distintos fabricantes proporcionan un soporte para el cristal que permite hacer medidas en fase gas y/o líquida. El propio soporte proporciona al usuario las conexiones eléctricas con los dos electrodos. El cristal se sujeta al soporte, en muchos casos, mediante un anillo circular que permite fijarlo por sus bordes manteniendo libre el espacio del electrodo sensor. Es importante que la sujeción se haga lo más cerca posible de los bordes del cristal para evitar el posible amortiguamiento de la oscilación.

Para hacer medidas en líquidos es preciso que solamente se exponga al líquido una cara del cristal (electrodo sensor), mientras que la otra permanece al aire, aislada del medio líquido. El diseño de los electrodos debe permitir aislar sus conexiones eléctricas, que se pueden hacer, por ejemplo, en la cara no expuesta, permitiendo así su utilización en líquidos conductores.

El modo de sujeción es uno de los factores críticos para garantizar la estabilidad de la medida, así como, para maximizar la relación señal a ruido; debe ser lo suficientemente suave para evitar tensiones mecánicas que provoquen saltos extraños en la frecuencia de oscilación, lo que es especialmente importante en medio líquido. Al mismo tiempo, hay estudios que demuestran la importancia de la geometría de la celda para reducir posibles fenómenos de dispersión en la superficie del sensor, obteniendo mejores resultados las rectangulares sobre las circulares [55].

6 El QCM como elemento sensor

Debido a las propiedades piezoeléctricas del cristal de cuarzo, la aplicación de un campo eléctrico alterno de alta frecuencia entre los electrodos, provoca una vibración en el cristal, que da lugar a ondas acústicas que se propagan a través del mismo en dirección perpendicular a la superficie. Si la longitud de onda de estas ondas es un múltiplo impar del doble del espesor del disco de cuarzo, la condición de oscilación se mantiene, entrando el cristal en resonancia [14].

La frecuencia de resonancia de los cristales utilizados como QCM, se encuentra entre 5 y 30 MHz, dicha frecuencia puede expresarse tal como se muestra en la Ecuación 11.

$$f = n \frac{v_0}{2h_q}$$

Ecuación 11 Frecuencias de resonancia de los QCM

Donde v_0 es la velocidad de propagación de la onda acústica a través del cuarzo, h_q es el espesor del cristal, y n es el número de armónico. La frecuencia fundamental de resonancia (f_0) se obtiene para $n=1$ y la ecuación de propagación de onda predice que solo son posibles los armónicos impares ($n=1, 3, 5, \dots$)[4].

Puesto que la frecuencia depende exclusivamente de propiedades físicas intrínsecas del cristal y de su espesor, si consideramos que las propiedades físicas del material son constantes, entonces, la frecuencia vendrá determinada por su espesor [56], y se expresa según la Ecuación 12:

$$f_0 = \frac{k}{h_q}$$

Ecuación 12 Frecuencia de resonancia fundamental de los QCM

Donde K es la constante de frecuencia y depende de las propiedades del cuarzo y de la geometría del corte.

Por tanto, un cambio en el espesor del cristal, supone una variación en la frecuencia de resonancia del sistema, o lo que es lo mismo, si depositamos una película fina de cualquier material sobre la superficie del cristal, lo suficientemente uniforme y rígida como para que pueda considerarse como una extensión de su espesor, se puede estimar el efecto de carga que produce a partir del desplazamiento que sufre la frecuencia de resonancia. Este es el principio en el que se basan las microbalanzas de cristal de cuarzo.

La ecuación desarrollada por Sauerbrey refleja matemáticamente este principio, y establece una relación lineal entre la masa depositada sobre el cristal y la variación en la frecuencia de resonancia (Ecuación 13):

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2}{\sqrt{c_q \rho_q}} \frac{\Delta m}{A_s} = -C_q f_0^2 \frac{\Delta m}{A_s}$$

Ecuación 13 Ecuación de Sauerbrey

Donde A_s es el área de la superficie sobre la que se deposita la masa, c_q es el módulo de cortadura del cuarzo y ρ_q es la densidad del cuarzo. C_q es una constante que depende de las características del cristal.

Se ha observado que las vibraciones del cristal se concentran en el centro del disco, perdiendo amplitud más allá de las dimensiones de los electrodos, y por tanto el cristal es más sensible en la parte central del cristal [55]. A la vista de esta expresión se puede deducir que para aumentar la sensibilidad de una microbalanza de cuarzo debe aumentarse su frecuencia de resonancia, y a su vez esto implica disminuir su espesor, por ello en la práctica es difícil trabajar con cristales con frecuencias por encima de los 30 MHz ya que son muy frágiles.

La Ecuación 13 es válida para capas uniformes, finas y rígidas perfectamente acopladas sobre la superficie del resonador de cuarzo, se utiliza en sistemas de deposición en vacío, y detección en fase gaseosa (humedad etc.), sin embargo, fue a mediados de los 80, con la contribución de Kanazawa, que amplía el modelo para aplicaciones en líquidos Newtonianos, cuando se abren nuevos campos de aplicación para el QCM (sensores químicos, biosensores).

La Ecuación 14 describe el desplazamiento de la frecuencia de resonancia cuando la superficie del sensor está sumergida en un líquido.

$$\Delta f = -f_0^{3/2} \sqrt{\frac{\eta_L \rho_L}{\pi c_q \rho_q}}$$

Ecuación 14 Desplazamiento de frecuencia si el sensor está sumergido en medio líquido

Donde ρ_L es la densidad del líquido, η_L es la viscosidad del líquido, c_q es el módulo de cortadura del cuarzo y ρ_q es la densidad del cuarzo.

La Ecuación 13 y la Ecuación 14 muestran la capacidad del resonador de cristal de cuarzo como sensor, ambas se aplican para calcular la masa adsorbida en aplicaciones de sensores químicos o para determinar la densidad/viscosidad de líquidos [14]. En la Ilustración 10 se muestra la respuesta en frecuencia de un sensor QCM de 5 MHz ante distintas concentraciones de glicerol en agua, las medidas se realizaron a 20°C y se puede apreciar que la respuesta del sensor se ajusta con gran precisión al comportamiento predicho en la Ecuación 14, de modo que, directamente a partir de la lectura de la variación de frecuencia se puede obtener el producto densidad-viscosidad de la muestra analizada.

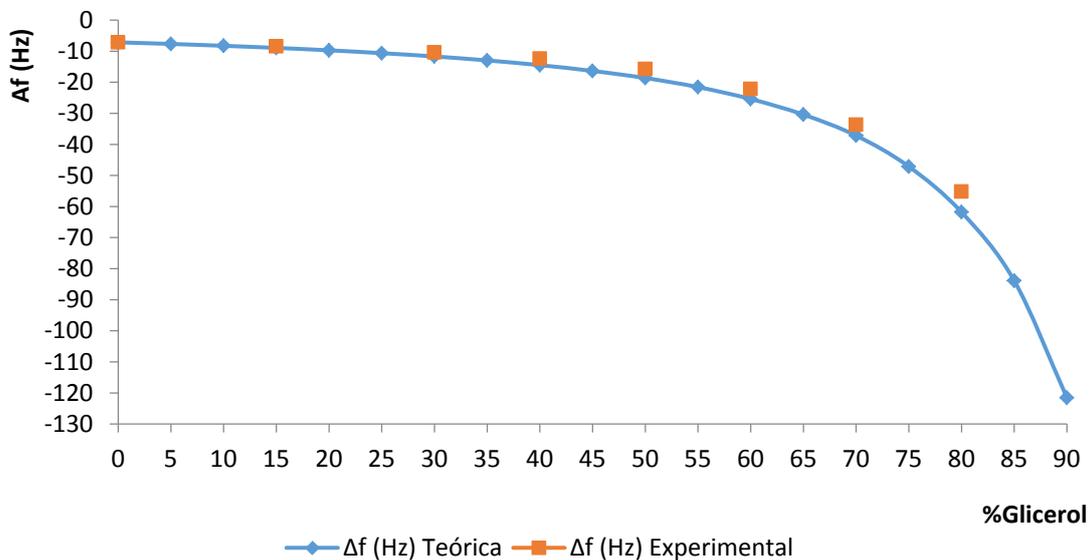


Ilustración 10 Curvas de respuesta del desplazamiento de la frecuencia de resonancia en un QCM sumergido en agua con diferentes concentraciones de glicerol.

Aunque la principal limitación de estos dispositivos es que se alcance un nivel intolerable de amortiguamiento de la onda acústica en el medio líquido, en [22] se expone una aplicación para caracterizar la degradación del aceite de un motor, lo que supone todo un reto si tenemos en cuenta la elevada densidad y viscosidad de este fluido. Los autores miden desplazamientos de la frecuencia de resonancia de 14-15 kHz al sumergir un QCM de 10 MHz

en aceite fresco y posteriormente en aceite usado, variación que atribuyen a los cambios en la viscosidad de las dos muestras.

Esta capacidad para detectar las propiedades viscoelásticas de un fluido parten del supuesto de que se trata de un líquido Newtoniano; y para comprobar la validez de esta condición es importante medir, además del desplazamiento de frecuencia, otro parámetro, que se corresponde con el valor de la resistencia serie en el circuito eléctrico equivalente del cristal, circuito de Butterworth Van Dyke, descrito con anterioridad, y que representa el amortiguamiento que provoca el líquido en las vibraciones del cristal. La Ecuación 15 relaciona la variación que sufre dicha resistencia con las propiedades del líquido (densidad y viscosidad).

$$\Delta R = 4L_q \sqrt{\int_0^3 \frac{\pi \eta_L \rho_L}{c_q \rho_q}}$$

Ecuación 15 Variación de la resistencia dinámica del sensor en medio líquido

Donde L_q es la inductancia del cristal en el circuito equivalente, constante que depende de las características del resonador, ρ_L es la densidad del líquido, η_L es la viscosidad del líquido, c_q es el módulo de cortadura del cuarzo y ρ_q es la densidad del cuarzo. Los equipos comerciales dedicados a la monitorización de los QCM, miden habitualmente tanto la frecuencia de resonancia como la resistencia.

En las últimas décadas la mejora de la sensibilidad se ha realizado aumentando la frecuencia de resonancia del sensor, puesto que la sensibilidad aumenta con el cuadrado de la frecuencia según la ecuación de Sauerbrey. Sin embargo este aumento de sensibilidad no ha sido el esperado, ya que la disminución de la estabilidad en frecuencia debida principalmente al aumento de ruido de fase (especialmente en los osciladores) hace imposible llegar a la resolución esperada [58].

Es por ello que siguen abiertas líneas de investigación dedicadas a mejorar los dispositivos que permitan monitorizar adecuadamente el sensor, trabajar con matrices de sensores o mejorar la precisión de la medida de la frecuencia [59]–[61].

En [62] se ofrece una exhaustiva revisión de los principales sistemas de caracterización empleados. En la sección siguiente se expone un extracto de esa revisión, así como otras contribuciones recientes en esta línea.

Capítulo 4

Interfaces Electrónicas para QCM

1 Introducción

Para llevar a cabo una correcta interpretación de los resultados proporcionados por el sensor se requiere seguir un proceso metódico que está constituido fundamentalmente por tres etapas [61]:

- Medir los parámetros eléctricos adecuados del resonador. Esta etapa incluye el desarrollo de sistemas de instrumentación adecuados, y sistemas de soporte para el sensor que eviten interferencias en su vibración.
- Modelado del conjunto resonador-carga y extracción de los parámetros físicos de los materiales depositados sobre el sensor, usando el modelo adecuado del resonador en función de la aplicación. Ello requiere la monitorización adecuada de los cambios de impedancia del conjunto resonador-carga, y la aplicación de algún algoritmo que a partir de las señales recibidas del sistema de instrumentación de la primera etapa sea capaz de proporcionar los parámetros físicos de los materiales.
- Interpretación cualitativa y cuantitativa del fenómeno físico, químico o biológico responsable del cambio de los parámetros del modelo seleccionado en relación a los cambios de las propiedades físicas.

Dado que en cada aplicación la monitorización del proceso supone medir cambios en los parámetros eléctricos del sensor, para poder evaluar adecuadamente su respuesta se necesita, en primer lugar, una medida precisa de los parámetros del sensor sin carga, para que sirvan como referencia. Los parámetros a medir, referidos al circuito BVD, son: la capacidad paralelo C_0 , R_1 , L_1 y C_1 del cristal. Aunque estos valores los proporciona el fabricante, muchas veces no tienen suficiente precisión, y es necesario medirlos antes del experimento [62].

Sin embargo, hay aplicaciones en las que el estado de referencia no se corresponde con el del sensor sin carga, por ejemplo, en las aplicaciones electroquímicas en las que el sensor se encuentra en contacto con la solución del electrolito, éste sería el estado de referencia, y sería necesario calibrar los parámetros del sensor en contacto con la solución electrolítica antes de comenzar el experimento [57].

A continuación se deben medir las magnitudes del cristal con carga que sean más apropiadas para caracterizar las propiedades físicas de la carga. En la mayoría de las aplicaciones con biosensores [63]–[65], las dos magnitudes medidas son la frecuencia de resonancia serie, ya que la contribución de la carga provoca la modificación de esta frecuencia, y también la resistencia, puesto que los cambios en las propiedades de la carga se reflejan en cambios de este parámetro mientras que no modifican la frecuencia. Además la medida simultánea de esos dos valores permite discriminar en la respuesta del sensor la contribución de la masa y la del líquido [46].

Los circuitos utilizados para medir la frecuencia de resonancia serie y la resistencia del cristal con carga, se pueden clasificar en 4 grandes apartados [62]:

- Sistemas basados en un analizador de impedancias o de redes
- Sistemas que utilizan el método del decaimiento
- Sistemas basados en circuitos osciladores
- Sistemas basados en bucles de enganche en fase (PLL)

A continuación se exponen los fundamentos y las principales características de cada uno de estos circuitos.

2 Sistemas basados en un analizador de impedancias o de redes

Se puede utilizar un analizador de impedancias o de redes para medir la impedancia o la admitancia del sensor de cuarzo en un margen de frecuencias alrededor de la de resonancia [66]. Los valores de frecuencia de resonancia y resistencia dinámica se obtienen a partir del modelo BVD, la frecuencia de resonancia serie se obtiene midiendo la frecuencia correspondiente al valor máximo de la conductancia, mientras que la resistencia se obtiene como la inversa del valor máximo de la conductancia [62].

La principal ventaja de estos sistemas es que el sensor se puede medir aislado, sin influencias de otros circuitos externos. Sin embargo, presentan como principales inconvenientes [62] el elevado coste, la dificultad para trasladar el equipo fuera del laboratorio por ser muy voluminosos, y que no permiten una caracterización multisensor.

Teniendo en cuenta estas limitaciones se han desarrollado otros circuitos cuyo principio de funcionamiento es hacer funcionar al sensor como elemento pasivo, tal como hacen los analizadores de impedancias, pero optimizados para permitir su portabilidad o aumentar la velocidad de adquisición de datos. Es el caso de [67] que permite adquirir el espectro de impedancia en pocos segundos.

En [68] se presenta un método basado en la obtención de la función de transferencia de un divisor de impedancias, en el que se coloca el sensor en serie con un condensador de impedancia conocida (Ilustración 11).

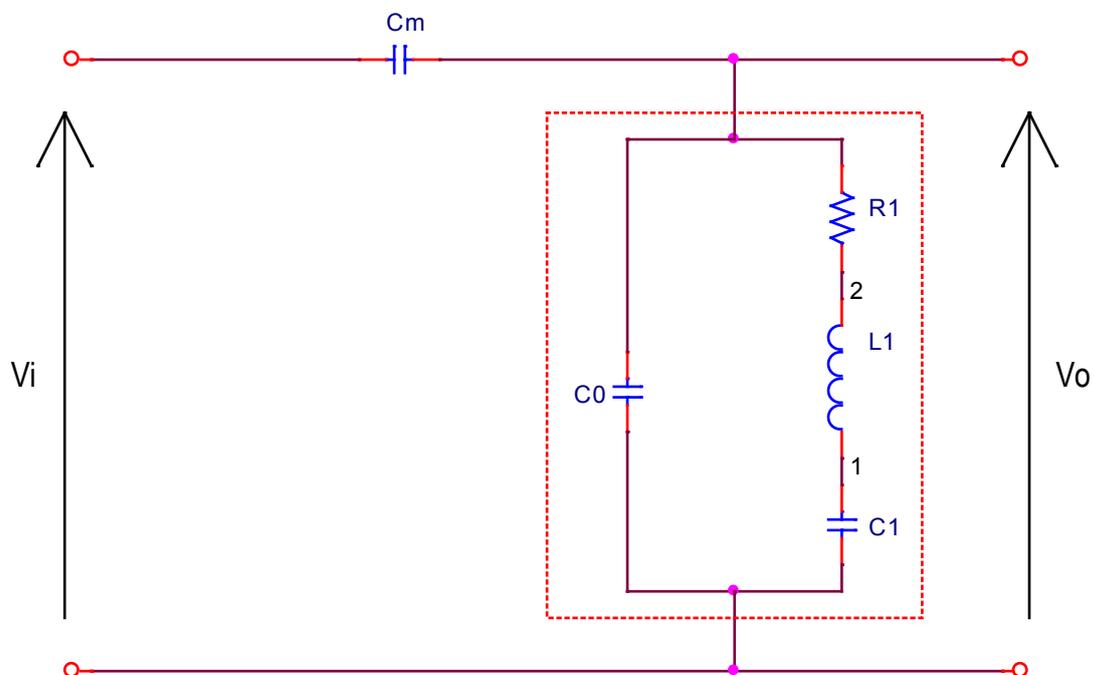


Ilustración 11 Divisor de impedancias sobre el que se obtiene la función de transferencia. Adaptada de [35].

Los autores aplican una señal sinusoidal al conjunto, haciendo un barrido de frecuencias en un margen alrededor de la frecuencia de resonancia del sensor, que en este caso era 10 MHz, y miden la tensión en bornes del resonador.

Así midiendo experimentalmente las magnitudes de la tensión de entrada y de salida, se obtienen los parámetros del sensor del modelo BVD mediante un ajuste no lineal de los valores experimentales obtenidos a la función de transferencia teórica. Los autores ponen de manifiesto la velocidad del método, en el cual los datos son adquiridos por un convertidor A/D y almacenados en un ordenador en el que se procesan.

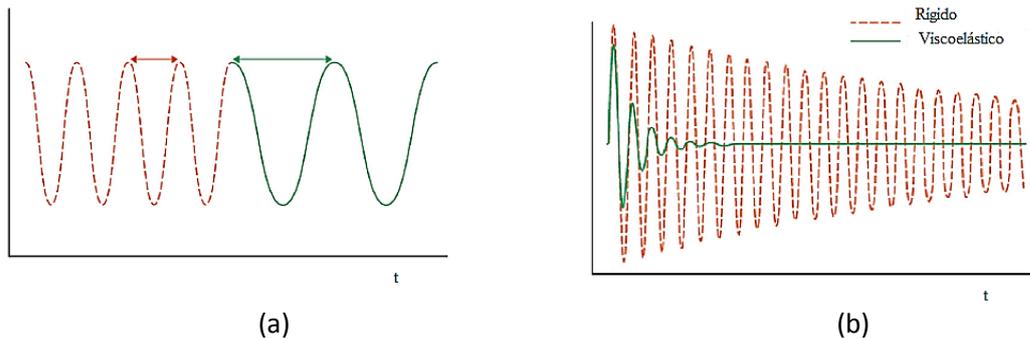
Un método similar se describe en [69], también se dispone el divisor de tensión con el sensor QCM en serie con un condensador, pero en este caso se utiliza como señal de entrada una señal modulada en doble banda lateral con portadora suprimida, en la que la frecuencia de la portadora recorre un rango de frecuencias en torno a la frecuencia de resonancia. Con este método la información de la fase y la magnitud de la impedancia del sensor se encuentran en la amplitud de la señal demodulada, que es una señal de baja frecuencia, lo que facilita enormemente la lectura de los datos de interés, convirtiéndolo en un método de adquisición muy preciso y sencillo.

3 Sistemas basados en el método del decaimiento

En este caso se mide la respuesta del sensor a una señal de excitación del armónico deseado. El amortiguamiento de la oscilación del sensor se registra a intervalos regulares para medir las propiedades de la masa depositada sobre su superficie [70], [71]. Este método proporciona una caracterización muy precisa, siendo el sistema QCM-D de la empresa Q-Sense su principal exponente [72].

El QCM se conecta a un generador de señal sintonizado a la frecuencia del armónico deseado; a continuación se desconecta la señal del generador mediante la apertura de un relé. A partir de ese instante la corriente se desvanece siguiendo una senoide atenuada exponencialmente (Ilustración 12). Esta curva se puede grabar en un osciloscopio digital y posteriormente almacenarla en un ordenador vía GPIB. La frecuencia de las oscilaciones amortiguadas se puede relacionar matemáticamente con la frecuencia de resonancia serie o paralelo del QCM con carga, y con su factor de calidad. Lo cual permite obtener los parámetros de interés (frecuencia de resonancia y resistencia). La desventaja de este método es que tanto la calidad, como las dimensiones de los equipos que se necesitan, son todavía muy elevadas si se quiere una determinación precisa de la envolvente de la senoide amortiguada[62].

En [73] se propone una variante de este método, utilizando dos armónicos de la frecuencia de resonancia, una de las frecuencias se utiliza para monitorizar tanto la frecuencia como el amortiguamiento del sensor, mientras que el otro se usa como señal de perturbación controlada para el análisis de reacciones de unión.



4 Osciladores

Una de las interfaces más utilizadas para los sensores QCM son los circuitos osciladores, sobre todo por su bajo coste, su capacidad de integración y la posibilidad de monitorización continua [62].

El esquema general de este tipo de circuitos se muestra en la Ilustración 13, donde se puede ver el resonador, representado por su modelo BVD, situado en el lazo de realimentación de un amplificador, siendo el elemento que controla la frecuencia de oscilación [54]. R_L representa una resistencia de carga. El circuito oscilará a aquella frecuencia para la que se cumplan las condiciones de Barkhausen [74], en particular, la frecuencia a la que la fase en el lazo de realimentación sea nula. Si la capacidad C_0 es prácticamente nula, es fácil ver que esa frecuencia es la de resonancia del cristal, determinada por los valores L_1 y C_1 . El amplificador debe proporcionar suficiente ganancia para compensar las pérdidas en cristal y la carga.

Sin embargo, si se tiene en cuenta la capacidad parásita C_0 , la frecuencia de oscilación ya no coincidirá en su expresión con la frecuencia de resonancia del cristal, sino que se desplazará para lograr de nuevo la condición de fase cero [74], [75]. De la misma forma las variaciones en la carga, que contribuyen a aumentar los valores de resistencia e inductancia, sobre todo cuando el cristal se sumerge en medios de alta viscosidad, alteran la condición de fase cero, y provocan que el circuito oscile a una frecuencia diferente de la de resonancia [76]. En muchos de los osciladores el amplificador utilizado para controlar la amplitud de la oscilación es un amplificador con control automático de ganancia, ya que en algunos casos a altas frecuencias es posible que el oscilador presente problemas de estabilidad [77].

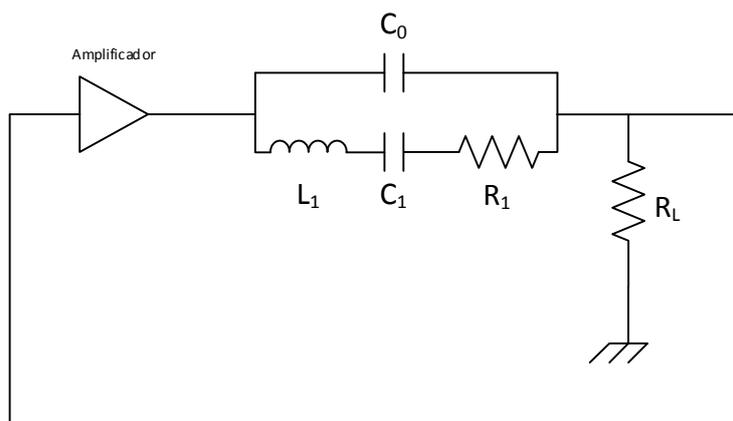


Ilustración 13 Esquema del circuito oscilador para el sensor QCM. Adaptado de [46]

Para aplicaciones de medida de gases, el resonador tiene un alto factor de calidad lo que hace que los osciladores sean una buena opción como circuito de interfaz. Pero en las aplicaciones en las que el sensor está en contacto con líquidos, su factor de calidad se reduce de forma drástica, y además tanto la amortiguación como el factor de calidad pueden variar durante el experimento [78], [79]. Esto supone que se ha de seleccionar la configuración más adecuada para el circuito oscilador y seleccionar componentes muy estables frente a cambios de temperatura, humedad, etc. La temperatura de la celda de medida se debe mantener lo más estable posible, el ruido electrónico del circuito se debe disminuir al mínimo (enfriando el circuito), el sensor debe protegerse frente a vibraciones con algún sistema inercial, etc. [62].

En el primer estudio completo sobre los circuitos osciladores para medio líquido [80] a principios de los 90, se presentaron las ideas clave para el diseño de estos circuitos, y que son: una de las caras del cristal debe estar conectada a masa; para aplicaciones electroquímicas ó biológicas y para un mejor control de la capacidad paralela, se debe medir además del desplazamiento en frecuencia, el valor de la resistencia serie; se debe usar un control automático de ganancia para mejorar la estabilidad, y la capacidad paralelo tiene una influencia constatada en la determinación de la frecuencia de oscilación. A partir de este trabajo, las líneas de investigación se centraron en mejorar esos aspectos, por ello, en muchos casos los circuitos osciladores incluyen circuitos para compensar la capacidad parásita C_0 . Es el caso del equipo de medida comercial para sensores QCM, desarrollado por Stanford Research Systems [54]

En [81] se propone un método de diseño de osciladores para QCM en medio líquido, indicando que las configuraciones estándar como Pierce o Colpitts no funcionan en este medio debido a que aunque proporcionan estabilidad en frecuencia y bajo ruido de fase, su ganancia y fase son muy sensibles a las pérdidas del resonador. En líquidos el oscilador debe mantener la ganancia y la fase en un amplio margen de valores, compensando el amortiguamiento que sufre el resonador y asegurando que se mantiene la condición de oscilación. El método se aplica al diseño de un oscilador de topología Miller. En otros trabajos [58], [78], [82] los mismos autores, desarrollan osciladores con esta topología para QCM de varias frecuencias, los caracterizan y concluyen que la disminución del ruido en los osciladores es uno de los factores más importantes para incrementar la resolución del sensor mediante el incremento de la frecuencia.

En [59] se presenta un método para aumentar la sensibilidad del QCM sin aumentar la frecuencia de resonancia del cristal (Ilustración 14). Los autores proponen un circuito

multiplicador de sensibilidad que puede ser utilizado en combinación con los montajes clásicos basados en circuitos osciladores para excitar el resonador. El módulo multiplicador de sensibilidad consigue aumentar el desplazamiento en frecuencia del QCM, multiplicándolo por un factor ajustable, mediante el uso de dos circuitos PLL multiplicadores de frecuencia, un circuito mezclador digital y un filtro paso bajo. Realizan pruebas tanto en aire como en líquidos, logrando con un cristal de 10MHz multiplicar su sensibilidad por 6.

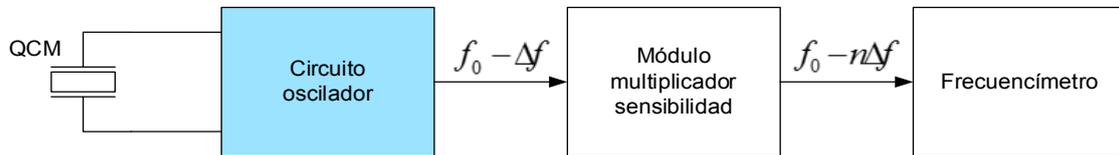


Ilustración 14 Diagrama de bloques con el módulo multiplicador de sensibilidad. Adaptada de [29]

En [62] se analizan varios tipos de osciladores para su uso en medio líquido (oscilador acoplado por emisor, oscilador tipo puente, oscilador diferencial) señalando sus principales limitaciones, en cuanto a que en algún caso se requiere tanto la caracterización del cristal sin carga, como la calibración del circuito oscilador, para lo que es necesario un analizador de impedancias, lo que supone una fuerte limitación debido al coste del equipamiento necesario. Hay muchas propuestas en la literatura basadas en modificaciones de circuitos osciladores [83], que incluyen control automático de ganancia [84],[85] o técnicas de compensación de la capacidad paralelo [86],[87] en esta última referencia se compensa la capacidad en un amplio margen de frecuencias y ello permite medir con mayor precisión, tanto la frecuencia de resonancia como la resistencia serie.

36

En resumen, al formar parte el resonador del lazo de realimentación del oscilador, se requiere un circuito muy estable que mantenga también estable la fase para mantener las condiciones de oscilación.

Sin embargo, hay muchas aplicaciones electroquímicas y de biosensores donde las pérdidas se mantienen constantes, por lo que los osciladores son la mejor alternativa por simplicidad y coste [62].

5 Circuitos de enganche en fase (PLL)

Una alternativa a los osciladores, que intenta solventar los problemas comentados de ajuste preciso de los componentes del circuito son los bucles de enganche en fase. En estos circuitos se utiliza un oscilador controlado por tensión (VCO) externo para engancharse a la frecuencia de la rama serie del sensor con fase cero. Para aplicar este método se precisa, además, un circuito de compensación de la capacidad paralela [62]. Un equipo comercial que utiliza este tipo de circuitos es el PLO-10i de Inficon^R [88].

El diagrama de bloques de la Ilustración 15 muestra un diagrama de bloques general de los bucles enganchados en fase para QCM [89].

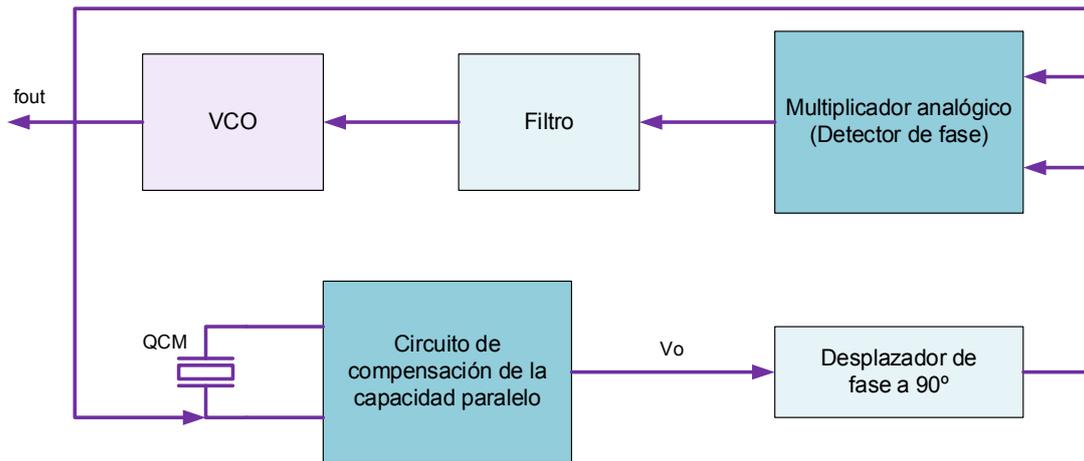


Ilustración 15 Diagrama de bloques de un circuito PLL para la lectura de la frecuencia de resonancia del QCM [89].

En este caso particular el circuito de compensación de la capacidad incluye un potenciómetro que a través de su ajuste permite cancelar la capacidad paralela en condiciones de carga del cristal. Sin embargo, para calibrar el circuito, seleccionando adecuadamente los valores de algunos de sus componentes, es preciso utilizar un analizador de impedancias que proporcione los parámetros del cristal sin carga.

Otros autores [76],[90] proponen esquemas parecidos, con el cristal conectado a masa por una de sus caras, lo cual es interesante para aplicaciones electroquímicas, y con diferente técnica para la compensación de la capacidad paralela que permite aplicar procedimientos de calibración más sencillos, que no precisan del analizador de impedancias.

En [91] se propone un circuito con dos PLL, que permite excitar y hacer el seguimiento del QCM en dos frecuencias: la fundamental y el tercer armónico. Esto permite medir dos pares de señales: las dos frecuencias de resonancia serie, y una tensión proporcional al factor de calidad (o lo que es lo mismo inversamente proporcional a la resistencia de la rama serie) para cada frecuencia.

Para finalizar esta revisión de interfaces electrónicas, se incluye una de las referencias más recientes en este campo [72], en la que se propone un nuevo método de caracterización para este tipo de sensores basado en las variaciones de fase de la rama serie y no en el desplazamiento de frecuencia. Los autores obtienen y validan una expresión que relaciona esas variaciones de fase con el cambio de masa en el recubrimiento del cristal sumergido en un líquido, y han desarrollado un circuito capaz de detectar tales variaciones de fase. El circuito se basa en interrogar al cristal con una señal externa de frecuencia fija, muy estable y cercana a la de resonancia. Está formado por dos ramas paralelas, idealmente iguales pero desfasadas 90°, en una de ellas se encuentra el sensor, y en la otra un circuito equivalente del mismo que simula el sensor a la frecuencia de resonancia. La salida del circuito la proporciona un detector de fase, y un detector de amplitud, cuyas salidas son nulas si no varía ninguna de las propiedades del medio en el que se encuentra el sensor, y serán proporcionales a los cambios que se produzcan en la masa del recubrimiento del cristal.

Capítulo 5

Método propuesto

1 Introducción

En este capítulo se desarrolla la explicación del método propuesto para la caracterización del QCM. La propuesta está basada en el modelo simple de Butterworth-Van Dyke (BVD) [4], [46]. En su aproximación más simple, el circuito equivalente del modelo es el mostrado en la Ilustración 16.

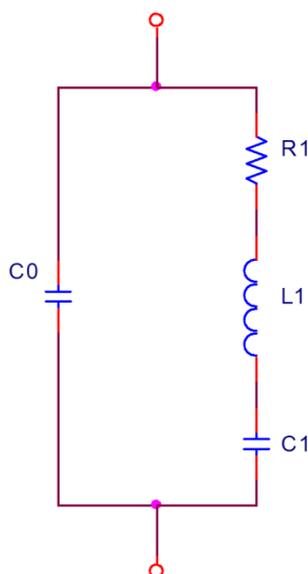


Ilustración 16 Circuito equivalente del QCM Butterworth-Van Dyke (BVD)

Como se puede observar, el modelo eléctrico posee dos ramas dispuestas en paralelo. La primera de ellas tiene un condensador C0 y la otra un circuito RLC serie con una resistencia R1, un inductor L1 y un condensador C1. Existen muchas alternativas al modelo simple de BVD empleado en esta investigación, como las presentadas en [92], [93], que han sido desarrolladas con el objetivo de alcanzar una mejor aproximación a su comportamiento para casos concretos de uso del QCM. Sin embargo, debido a que se obtienen resultados altamente satisfactorios con el modelo en su configuración más simple, esta opción es la que se emplea en el desarrollo del trabajo.

Tal y como se ha explicado en un capítulo precedente, la capacidad C0 depende directamente de la geometría del QCM [14]. Sin embargo la rama serie no posee un significado eléctrico concreto; modela el comportamiento mecánico del cristal [14]. Los cambios introducidos al QCM pueden ser incluidos mediante la adición de nuevos componentes pasivos al modelo en su rama serie.

2 Método de obtención de los parámetros en el que se fundamenta la investigación

Para la tarea de caracterización del QCM, este trabajo está basado en la teoría expuesta en el trabajo [46]. En él se deducen las expresiones para hallar los parámetros del modelo eléctrico del QCM. Son varios los casos contemplados en el modelo descrito:

- Medio líquido
- Adición de masa al QCM

La Ilustración 16 tan sólo muestra el QCM en su forma más simple en un medio aire, sin masa y sin perturbación. Las expresiones que permiten el cálculo del valor de los diferentes parámetros del modelo eléctrico son las que se muestran a continuación:

$$C0 = \frac{\varepsilon_{22}A}{h}$$

Ecuación 16 Capacidad paralelo C0

$$C1 = \frac{8K_0^2 C0}{(N\pi)^2}$$

Ecuación 17 Capacidad serie C1

$$L1 = \frac{1}{\omega_s^2 C1}$$

Ecuación 18 Inductancia serie L1

$$R1 = \frac{\eta_q}{c_{66} C1} \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2$$

Ecuación 19 Resistencia serie R1

En donde:

- ε_{22} es la permitividad del cuarzo.
- A es la superficie activa del cristal de cuarzo.
- h es el espesor del cristal de cuarzo.
- K_0 es la constante de acoplamiento electromecánico.
- N es el número de armónico =1, 3, 5,...
- ω_s es la frecuencia de resonancia serie para el QCM sin perturbar = $2\pi f_s$, f_s es la frecuencia de resonancia serie en hertzios.
- η_q es la viscosidad efectiva del cuarzo.
- c_{66} es la constante de elasticidad del cuarzo.

La Ecuación 16 muestra que C0 es función de las características físicas del cristal (propiedades del material y dimensiones) del QCM. Del análisis de la Ecuación 17 a la Ecuación 19 se concluye que C₁, R₁ y L₁ son también función de las características físicas del QCM, y de los valores obtenidos del resto de componentes del modelo. Por tanto, disponiendo de las características del cristal de cuarzo, en primer lugar, será necesario obtener el parámetro C0.

Un aspecto muy frecuente, es que cuando se emplean cristales de cuarzo con el objetivo de emplearlos como QCM, es que el tipo de corte del material sea AT. Si se tiene en cuenta este

hecho, los parámetros correspondientes a las propiedades materiales del cristal de cuarzo de la Ecuación 16 a la Ecuación 19 se pueden considerar como constantes.

Tal y como se puede observar en las ecuaciones, si se dispone del valor de C_0 es posible obtener el valor de C_1 , y a su vez con él, es posible calcular los valores de L_1 y de R_1 . Por tanto, para lograr el modelo, tan sólo sería necesario conocer los parámetros del QCM en cuanto a dimensiones. Si bien, desde un punto de vista práctico los valores de C_0 no son tan fáciles de lograr por esta vía.

3 Procedimiento de obtención de los parámetros del modelo del QCM en aire

Tal y como se ha visto en la sección anterior, la caracterización por el método expuesto en el que se basa la investigación, comienza por la obtención del parámetro C_0 . Posteriormente con el valor de la capacidad paralelo se pueden obtener la rama serie del modelo. C_0 es el único parámetro que depende de las dimensiones del QCM. La obtención de las dimensiones reales del QCM puede ser una tarea difícil por diferentes razones como: accesibilidad, aspectos de simetría, imperfecciones, etc. [62]. Esta es la razón fundamental por la que en esta investigación se describe una nueva propuesta para la obtención del parámetro C_0 sin la necesidad de la obtención de las dimensiones reales del QCM, eliminando de este modo los problemas que esta tarea conlleva.

El nuevo método se basa en el circuito mostrado en la Ilustración 17 en el que, como se puede observar, se ha incluido una bobina en serie con el QCM.

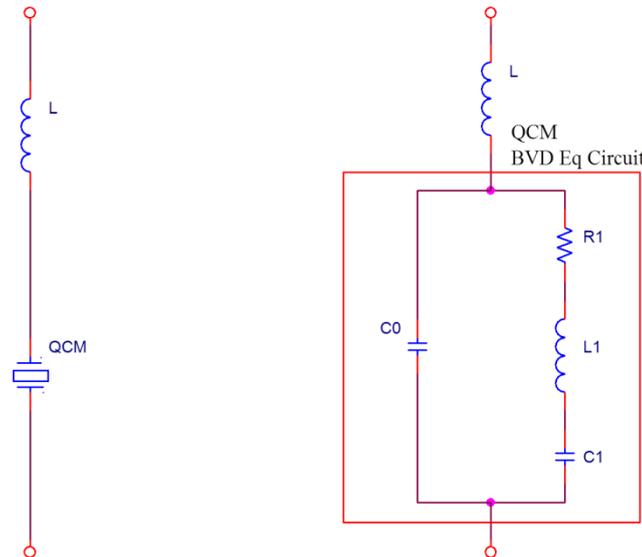


Ilustración 17 Circuito en el que se basa la propuesta

La propuesta está basada en el principio de operación cuando se produce el fenómeno de resonancia serie entre la capacidad C_0 del modelo BVD del QCM y la bobina añadida L . Se denominará ω_r a esta frecuencia de resonancia expresada en radianes. Es necesario, por tanto, alimentar el circuito de la Ilustración 17 con una fuente alterna y llevar a cabo un barrido de frecuencias. Cuando la frecuencia de la fuente de alimentación coincide con la frecuencia de resonancia ω_r , entonces la impedancia correspondiente a C_0 en serie con la bobina añadida L ,

es cero. Si la bobina añadida es conocida, entonces, será posible obtener el valor de la capacidad C_0 tal y como se indica en la Ecuación 20.

$$\left. \begin{array}{l} X_L = j\omega L \\ X_{C_0} = \frac{1}{j\omega C_0} \end{array} \right\} \rightarrow j\omega_r L + \frac{1}{j\omega_r C_0} = 0 \rightarrow C_0 = \frac{1}{\omega_r^2 L}$$

Ecuación 20 Obtención de C_0 por el método propuesto

Comúnmente, la frecuencia de los equipos de laboratorio se presenta en hertzios (Hz), por tanto, tan sólo es necesario convertir la frecuencia ω_r mediante la Ecuación 21.

$$\omega_r = 2\pi f_r$$

Ecuación 21 Conversión de la frecuencia a hertzios

Si la frecuencia se obtiene en hertzios, el valor de la capacidad C_0 se obtiene mediante la Ecuación 22.

$$C_0 = \frac{1}{L(2\pi f_r)^2}$$

Ecuación 22 Obtención de C_0 a partir de frecuencia en hertzios

Desde un punto de vista práctico, es necesario implementar el circuito de la Ilustración 18, en el que se ha incluido una resistencia en serie al circuito de la Ilustración 17. El motivo es que cuando se da el fenómeno de resonancia, la impedancia de los dos elementos en resonancia es cero, y la fuente que alimenta el circuito estaría en cortocircuito, algo no deseable para un correcto funcionamiento.

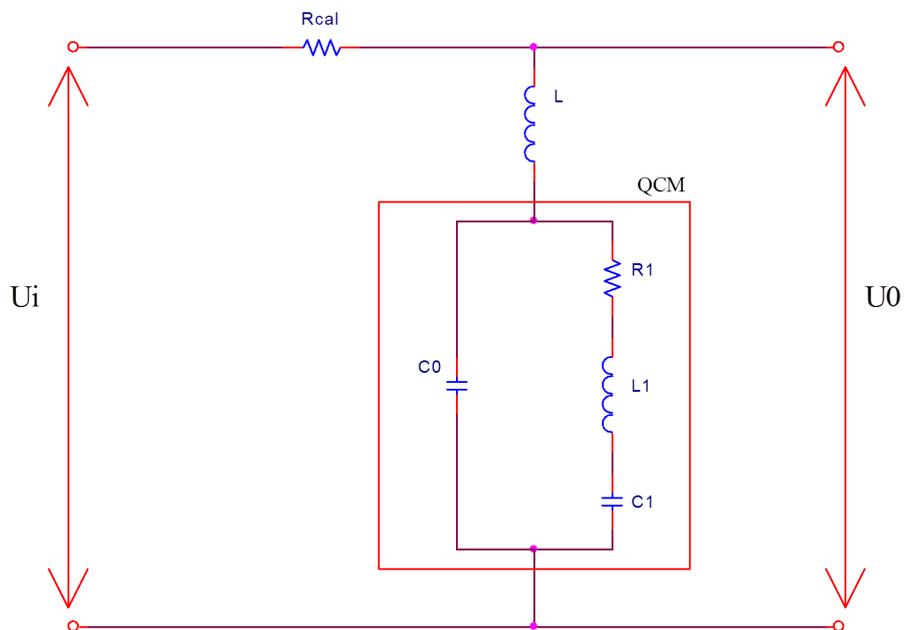


Ilustración 18 Circuito desde un punto de vista práctico

Con el objetivo de obtener un valor satisfactorio de la capacidad C_0 del modelo BVD del QCM, es necesario realizar las pruebas lejos de la frecuencia de resonancia del cristal. En [62], se recomienda escoger el doble de la frecuencia de resonancia. Otra consideración importante es

el empleo de elementos con buenas características en cuanto a precisión y repetitividad, sobre todo en lo que a la bobina L se refiere. El valor de la resistencia R no es algo de suma importancia, dado que su principal objetivo es proteger a la fuente que alimenta el circuito ante cortocircuitos. Sin embargo, en tareas posteriores de obtención del resto de parámetros es muy importante que la resistencia tenga un valor muy preciso, y que su tolerancia sea mínima.

4 Método específico de cálculo del valor de la resistencia del modelo de QCM en aire

En varias investigaciones como [46], [92], se indica la Ecuación 19 como posible método de obtención del valor de R1 del modelo BVD (Ilustración 16). Sin embargo, otros estudios como [62][94] prueban que el resultado conseguido de este modo es erróneo en ocasiones. Dado este hecho, incluso en [46] se obtiene el valor de la resistencia R1 por otro método a mayores del de la Ecuación 19.

Por lo comentado, con el objetivo de obtener el valor real de la resistencia del modelo BVD, se lleva a cabo un método similar al propuesto para la bobina. Tan sólo es necesario eliminar la bobina del circuito de la Ilustración 18. El nuevo circuito se muestra en la Ilustración 19.

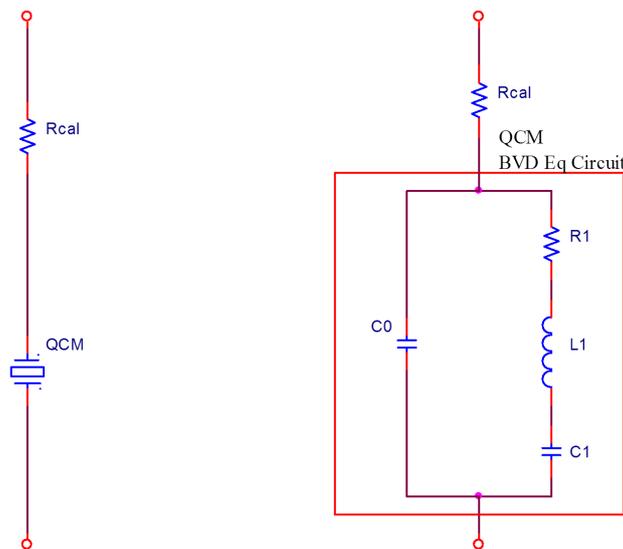


Ilustración 19 Circuito para obtención de R1 del modelo BVD

Al igual que para el caso de la obtención de la capacidad C0, es necesario realizar un barrido de frecuencias con la fuente de alimentación, poniendo especial atención cuando se produce el fenómeno de resonancia serie en el QCM. Cuando se alimenta el circuito a la frecuencia de resonancia, la rama serie del modelo BVD del QCM se reduce a la resistencia R1, dado que las impedancias de C1 y L1 se anulan. En esas condiciones el circuito es un divisor de tensión. Puesto que, tanto el voltaje aplicado como la resistencia Rcal son conocidos, se obtiene el valor real de R1 midiendo el voltaje en bornes del QCM y resolviendo la Ecuación 23.

$$V_{QCM} = \frac{R1}{R1 + Rcal} V_{in} \rightarrow R1 = \frac{Rcal * V_{QCM}}{V_{in} - V_{QCM}}$$

Ecuación 23 Expresión para obtención de R1

5 Procedimiento de obtención de los parámetros del modelo del QCM en agua

Muchas de las aplicaciones basadas en QCM que se llevan a cabo, se hacen en medio líquido. De hecho, el sensor ha sido caracterizado en una cazoleta apta para su utilización en medio líquido. Bajo estas condiciones de operación de medio líquido, el modelo equivalente de BVD incluye dos nuevos componentes: una inductancia (L2) y una resistencia (R2). Estos se disponen en serie en la rama serie del modelo de la Ilustración 16. El modelo equivalente para el QCM en medio líquido es el que se muestra en la Ilustración 20.

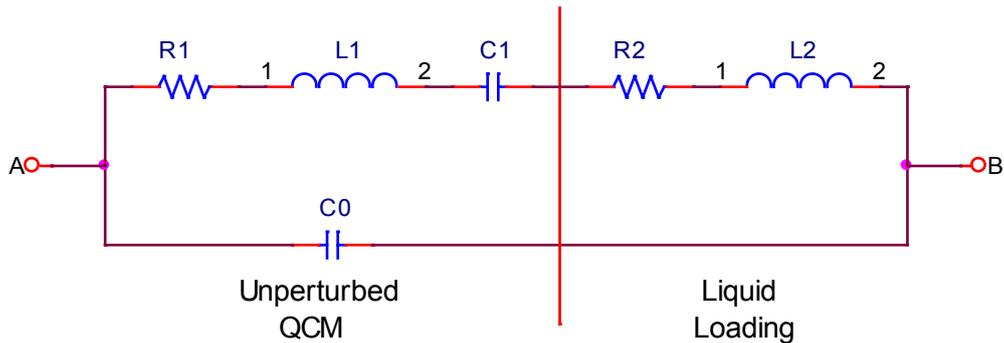


Ilustración 20 Modelo equivalente del QCM en medio líquido

Por tanto en este caso la nueva frecuencia de resonancia es la de la Ecuación 24. El valor de C1 de esa ecuación es el mismo que el hallado para el QCM en aire.

46

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} \rightarrow L = L_1 + L_2$$

Ecuación 24 Frecuencia de resonancia del QCM en medio líquido

Es posible por tanto, obtener en primer lugar el valor de L1, y a continuación con el QCM sumergido en una disolución, obtener el valor de L. Para obtener este último es necesario implementar el circuito mostrado en la Ilustración 21. Se realiza un barrido de frecuencias y se localiza la frecuencia de resonancia serie, que es aquella en la que las impedancias de L1 y L2 del modelo equivalente del QCM, se anulan con la de la capacidad C1. Es fácil de localizar dado que en ese preciso instante la impedancia del cristal es mínima.

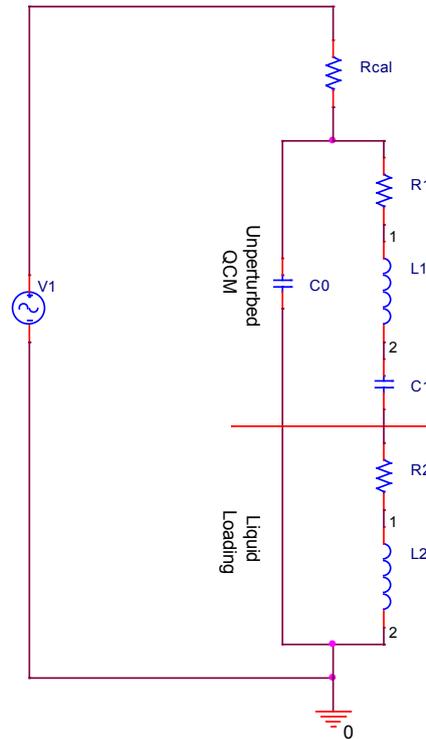


Ilustración 21 Circuito para obtener L y R del QCM en medio líquido

El mismo circuito permite obtener el valor de $R=R_1+R_2$. El procedimiento a seguir es realizar un barrido de frecuencias hasta llegar a la frecuencia de resonancia serie. Cuando se da ese evento, en la rama serie, tan sólo quedarían las resistencias R_1 y R_2 , cuya suma da el valor de la resistencia R . Al igual que en el caso anterior, dado que se está en la frecuencia de resonancia, la impedancia del condensador se anula con la de las bobinas L_1 y L_2 . La Ecuación 25 permite obtener el valor de las resistencias.

$$V_{QCM} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_{cal}} V_{in} \rightarrow R_1 + R_2 = \frac{R_{cal} * V_{QCM}}{V_{in} - V_{QCM}}$$

Ecuación 25 Expresión para obtención de R_1+R_2

6 Necesidad de calibración de la bobina empleada en el proceso de obtención de los parámetros

Tal y como se ha mencionado previamente, es muy importante disponer de un valor preciso de la bobina para obtener el valor de la capacidad paralelo C_0 del modelo BVD. Dado que las tolerancias de las bobinas son usualmente muy elevadas, entonces, es necesario obtener su valor real para un buen desempeño del método que se propone. Para medir los valores reales de las bobinas, en esta investigación se emplea el circuito de la Ilustración 22.

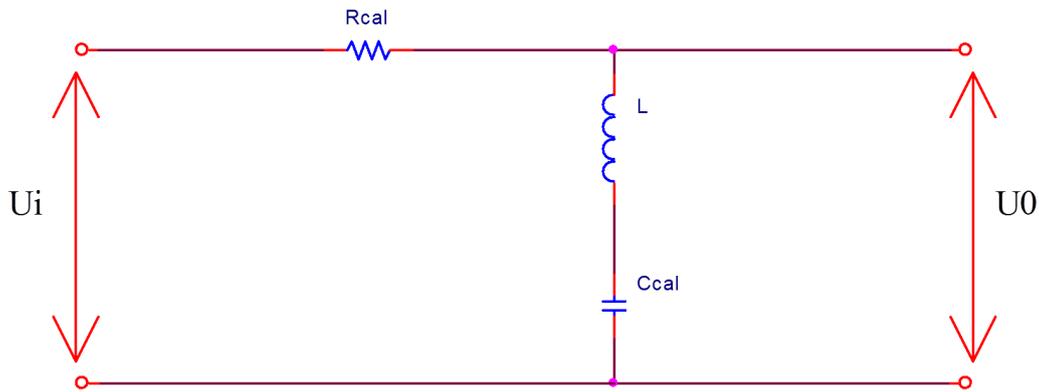


Ilustración 22 Circuito para calibración de la bobina

Al igual que en el punto anterior, para resolver el problema, se utiliza el fenómeno de resonancia serie entre elementos pasivos. El circuito dispone de una fuente que permite hacer los barridos de frecuencia. En este caso, el condensador C_{cal} es conocido y, ha de seleccionarse con una tolerancia muy pequeña, de modo que su valor sea preciso. Después, conociendo la capacidad (C_{cal}), es posible obtener el valor de la inductancia L mediante la resolución de la Ecuación 26.

$$\left. \begin{array}{l} X_L = j\omega L \\ X_{C_{cal}} = \frac{1}{j\omega C_{cal}} \end{array} \right\} \rightarrow j\omega_r L + \frac{1}{j\omega_r C_{cal}} = 0 \rightarrow C_{cal} = \frac{1}{\omega_r^2 L} \rightarrow L = \frac{1}{\omega_r^2 C_{cal}}$$

Ecuación 26 Expresión para obtención de los valores reales de las bobinas

También en este caso ha sido necesario incluir la resistencia R_{cal} , con el objetivo de eliminar la posibilidad de cortocircuito. En este caso, no es necesario conocer el valor exacto de la resistencia, pues el único objetivo de la misma es la protección de la fuente.

Capítulo 6

Implementación práctica

1 Obtención de los parámetros del QCM con la propuesta

Para llevar a cabo la propuesta desarrollada, será necesaria la utilización de diversos equipos de medida, junto con el desarrollo y fabricación de unos circuitos impresos que permitan la realización de las pruebas correspondientes.

1.1 Equipos de medida

Los equipos de medida utilizados para la obtención de los parámetros del QCM, los podemos clasificar en dos grupos: los utilizados para la implementación de la propuesta, y los utilizados para la validación de la misma.

Los equipos necesarios para la implementación de la propuesta propiamente dicha, serán un osciloscopio y un generador de funciones.

- Osciloscopio modelo DSO3062A de Agilent (Ilustración 23). Con un ancho de banda de funcionamiento de 60 MHz y un muestreo máximo de 1 GS/s (*"Giga Samples per second"*, miles de millones de muestras por segundo). El osciloscopio será el encargado de realizar las medidas de caída de tensión en las diferentes pruebas. Además, este modelo dispone de puerto de comunicaciones GPIB, que hará posible la automatización de los experimentos.
- Generador de funciones modelo 33220A de Agilent (Ilustración 24). Con una capacidad de generación de hasta 20 MHz (para señales de tipo senoidal), y un rango de tensiones de funcionamiento de hasta 10 V pico a pico. El generador será el encargado de alimentar cada uno de los circuitos. La tensión de alimentación será siempre de 1 V pico a pico, y la forma de onda senoidal; en cada prueba, se hará un barrido variando la frecuencia dentro del rango establecido. Al igual que en el caso del osciloscopio, este equipo dispone de puerto de comunicaciones GPIB para automatizar los experimentos.

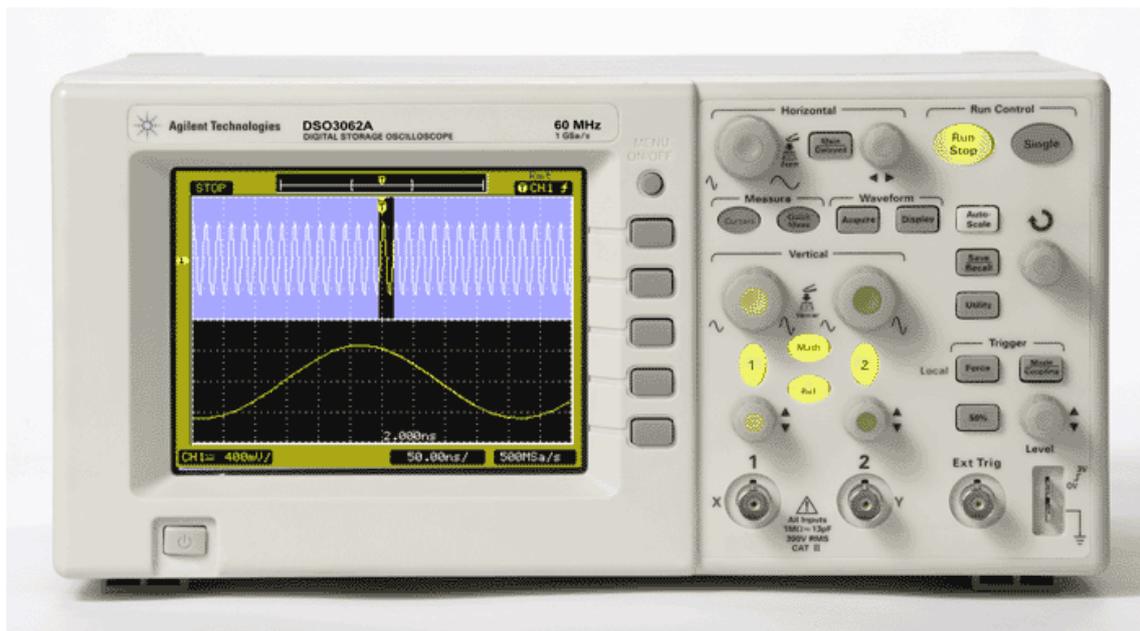


Ilustración 23 Osciloscopio Agilent DSO3063A



Ilustración 24 Generador de funciones Agilent 33220A

Los equipos utilizados para la validación de la propuesta, son equipos comerciales que realizan un barrido de frecuencias en automático, registrando en cada instante la respuesta del circuito. Comercialmente se llaman analizadores de redes vectoriales, y se han utilizado dos diferentes.

52

- El modelo ZVR de Rohde & Schwarz (Ilustración 25), que tiene un rango de funcionamiento de 9 kHz a 4 GHz.
- El modelo Bode 100 de OMICRON Lab (Ilustración 26), que tiene un rango de funcionamiento de 1 Hz a 40 MHz.



Ilustración 25 Analizador de redes vectorial ZVR Rohde & Schwarz



Ilustración 26 Analizador de redes vectorial Bode 100

Además de los equipos mencionados, para realizar las pruebas de manera automatizada, es necesario también el uso de un convertidor GPIB a Ethernet para la comunicación entre los equipos de medida mencionados (osciloscopio, y generador de funciones), y un PC. El conversor utilizado en este caso es el GPIB-ENET/100 de National Instruments (Ilustración 27).



Ilustración 27 Equipo conversor de GPIB a Ethernet

1.2 Circuitos desarrollados

Para llevar a cabo las pruebas de la propuesta, ha sido necesaria la fabricación de circuitos impresos para los esquemas presentados en el capítulo anterior. Debido a que estos esquemas son muy parecidos entre sí, se ha decidido la fabricación de un circuito impreso, que permitiese la selección de un esquema u otro mediante la sustitución de componentes pasivos.

Estos componentes pasivos tienen que ser de la mayor precisión posible, ya que la fiabilidad de las medidas obtenidas con la propuesta estará ligada a dicha precisión. Por ese motivo, se ha optado por el uso de componentes en formato SMD, dado que son de los componentes que mayor precisión, menor variabilidad y en general mejores características ofrecen.

El cristal de cuarzo analizado en la propuesta posee una frecuencia de resonancia de 5 MHz, tiene forma circular de una pulgada (25,4 mm) de diámetro, y 331 micras de espesor, estando los contactos de oro dispuestos en sus dos caras. En la Ilustración 28 puede verse una fotografía del mismo. Sin embargo, debido a la dificultad de manipulación del cristal aislado, comercialmente se suministra un soporte para el mismo que facilita su manipulación y su conexión, ya que dispone de un conector estándar tipo BNC (Ilustración 29).

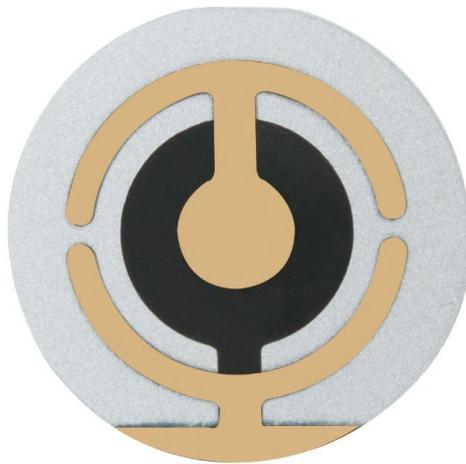


Ilustración 28 Cristal de cuarzo utilizado sin soporte

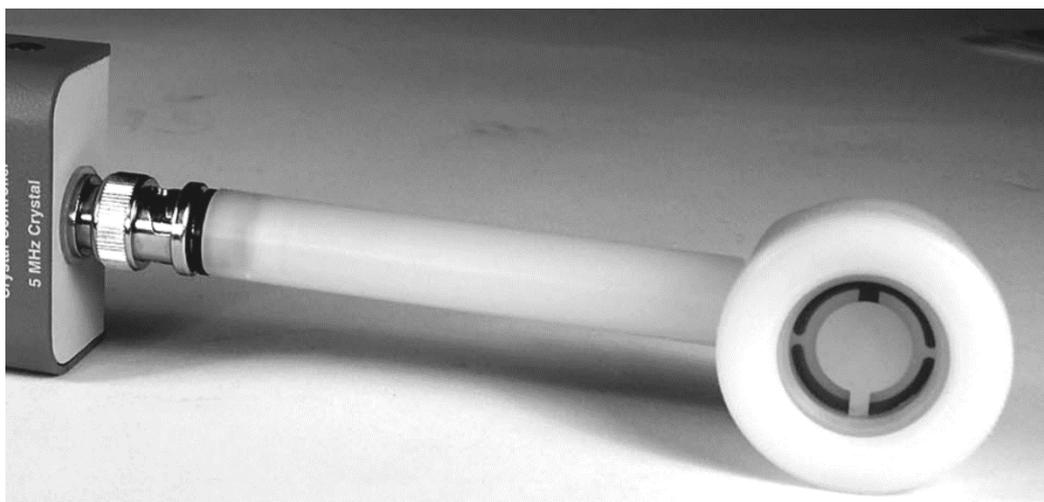


Ilustración 29 Cristal de cuarzo utilizado con soporte

Debido a las dos configuraciones posibles mostradas, se diseñaron dos circuitos impresos totalmente diferentes. El primero de ellos, consta de 3 conectores BNC, y se diseñó para poder hacer la caracterización del QCM con el soporte. En la parte posterior del circuito, las pistas tienen los alojamientos para los componentes pasivos que permiten usar el mismo circuito

para la realización de todas las pruebas como se mencionó anteriormente. En la Ilustración 30 y en la Ilustración 31 pueden verse fotografías del circuito impreso fabricado.



Ilustración 30 Circuito impreso para las pruebas con soporte

El otro circuito impreso fabricado, tiene como objetivo la caracterización del cristal sin soporte, para lo cual se ha implementado en el propio circuito impreso, la parte correspondiente a los electrodos de conexión con el cristal de cuarzo. También en este caso se ha diseñado la placa para usar el mismo circuito impreso en todas las pruebas, cambiando el esquema según la ubicación de los componentes pasivos utilizados en los experimentos.



Ilustración 31 Circuito impreso para las pruebas sin soporte

Los dos circuitos se han diseñado utilizando el programa de paquete informático OrCAD de diseño y simulación de circuitos electrónicos. En la Ilustración 32 se puede ver el esquema del circuito. La Ilustración 33 y la Ilustración 34 muestran, respectivamente, el diseño de la placa de circuito impreso con soporte y sin soporte, para los diferentes casos del procedimiento.

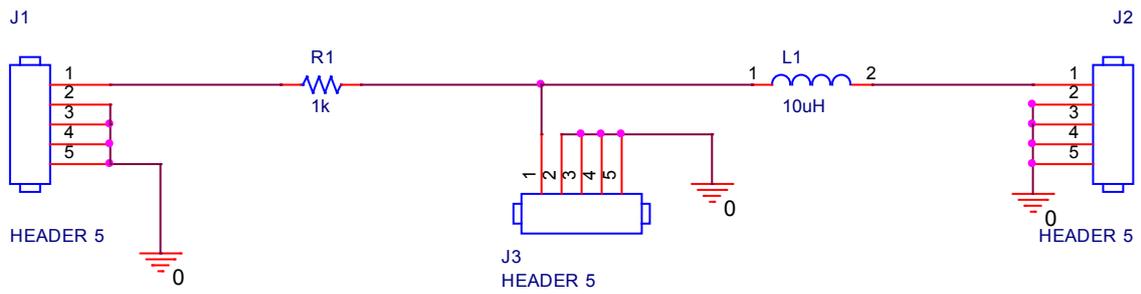


Ilustración 32 Esquema y diseño del circuito de pruebas con soporte

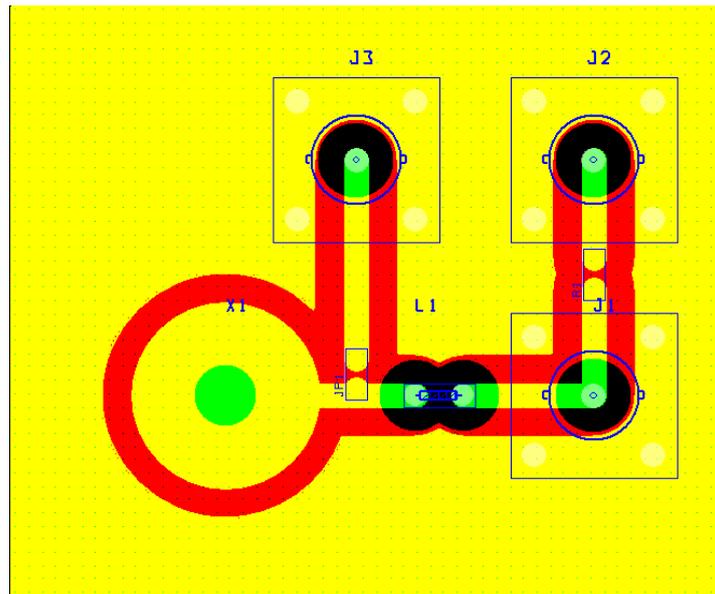


Ilustración 33 Diseño del circuito de pruebas sin soporte

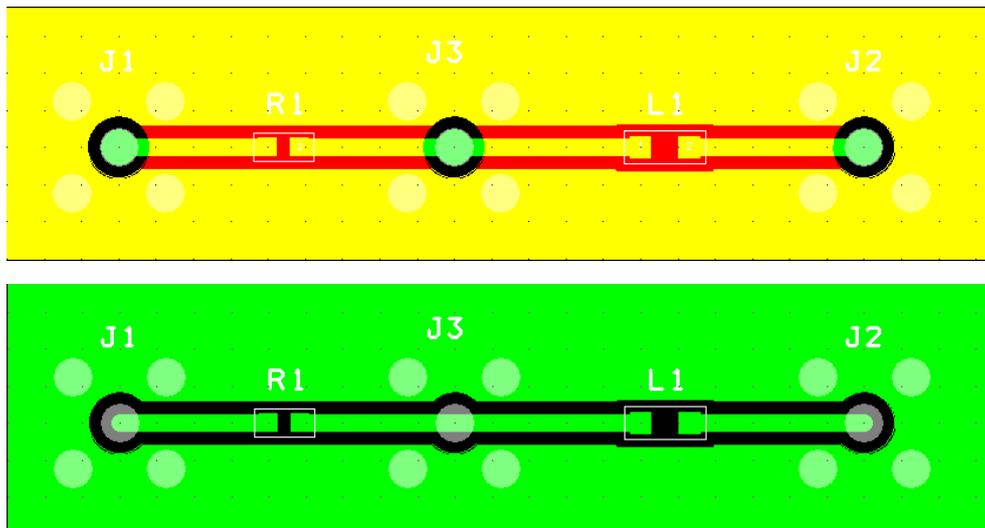


Ilustración 34 Diseño del circuito de pruebas con soporte

A la hora de realizar el diseño de los circuitos, se ha tenido en cuenta la distancia necesaria entre el plano de masa y las pistas propiamente dichas, para evitar en la medida de lo posible las interferencias en las medidas. La frecuencia máxima que se alcanza en las pruebas es de 20 MHz, que es la máxima frecuencia de trabajo del generador de funciones empleado. Esta

frecuencia se tuvo en cuenta para seleccionar tanto las dimensiones de las pistas, como la separación entre las mismas, así como la elección de unos cables de prueba que produjese la mínima caída de tensión y ruido en los experimentos.

1.3 Funcionamiento conjunto de la propuesta

A la hora de interconectar los diferentes elementos mencionados, se ha tenido en cuenta el esquema mostrado en la Ilustración 35. En este esquema se puede ver cómo, tanto el generador de señal como el osciloscopio, están controlados por un ordenador a través del bus de comunicaciones GPIB. El circuito bajo prueba, es diferente según la prueba que se esté llevando a cabo, como se explica en los siguientes apartados.

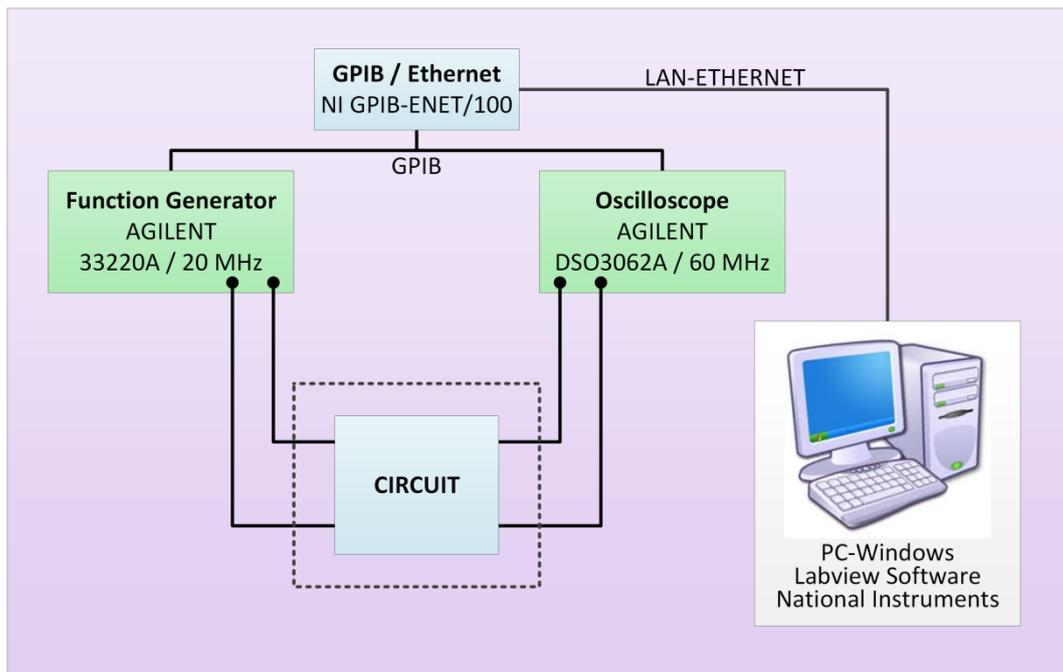


Ilustración 35 Esquema de los experimentos para la propuesta

Los experimentos son todos muy similares en lo que se refiere al procedimiento para realizarlos. En todos ellos se parte de una señal senoidal con una amplitud fija de 1 voltio pico a pico, y se realiza un barrido desde una frecuencia inicial, hasta una final. Al automatizar las pruebas mediante un programa desarrollado en el entorno LabVIEW de National Instruments, el procedimiento consiste únicamente en la fijación de la frecuencia inicial, la final y los incrementos de frecuencia elegidos.

El programa almacena automáticamente los valores de tensión medidos, junto con la frecuencia de excitación del sistema en cada momento. Una vez finalizada la prueba, el mismo programa determina la zona de mínima tensión, que está en torno a la frecuencia de resonancia; el principio en el que se basan todos los experimentos. Se podrían reajustar automáticamente los parámetros para iniciar una nueva prueba en un entorno centrado en dicha frecuencia, y reducir los incrementos de frecuencia para aumentar así la precisión de las medidas.

2 Obtención de los valores reales de los componentes usados en la propuesta

Para poder caracterizar el QCM según la propuesta descrita, ya se ha explicado que hay que realizar diversas pruebas. Todas ellas están basadas en el fenómeno de resonancia en componentes pasivos, y en los siguientes apartados se expondrán las mínimas diferencias existentes entre las mismas, así como las medidas que hay que tomar en cada una, y el parámetro que se calcula en cada caso.

2.1 Circuitos para el cálculo de las bobinas

Para el cálculo de las bobinas, se utiliza el circuito mostrado en la Ilustración 36. En esta ilustración se muestran los cambios realizados en el circuito fabricado, junto con la posición del condensador de precisión y la bobina bajo prueba.



Ilustración 36 Circuito utilizado para el cálculo de la inductancia real de las bobinas

Al realizar la prueba correspondiente para el cálculo de la inductancia real de cada bobina, el resultado de la misma es el valor de la frecuencia de resonancia. La caída de tensión medida durante estos experimentos no es relevante. Una vez obtenida la frecuencia de resonancia,

con el valor del condensador de precisión utilizado, se puede calcular el valor real de auto-inductancia de la bobina bajo prueba.

Para mejorar la fiabilidad de las medidas, se han utilizado un total de 4 condensadores, para calcular el valor real de las 7 bobinas disponibles. Además, con cada condensador se han realizado como mínimo 50 experimentos, considerando como valor real el obtenido de la media de todas las pruebas para cada bobina.

2.2 Circuitos para el cálculo de C_0

Para calcular el valor de C_0 , los circuitos empleados son los de la Ilustración 37 y la Ilustración 38, haciendo las modificaciones sobre los anteriores. En este caso se muestran los dos circuitos posibles, ya que para calcular el valor de C_0 del QCM, éste podría caracterizarse tanto con soporte como sin él. En el caso anterior de las bobinas, al no haber variación posible, siempre se ha utilizado el mismo circuito.

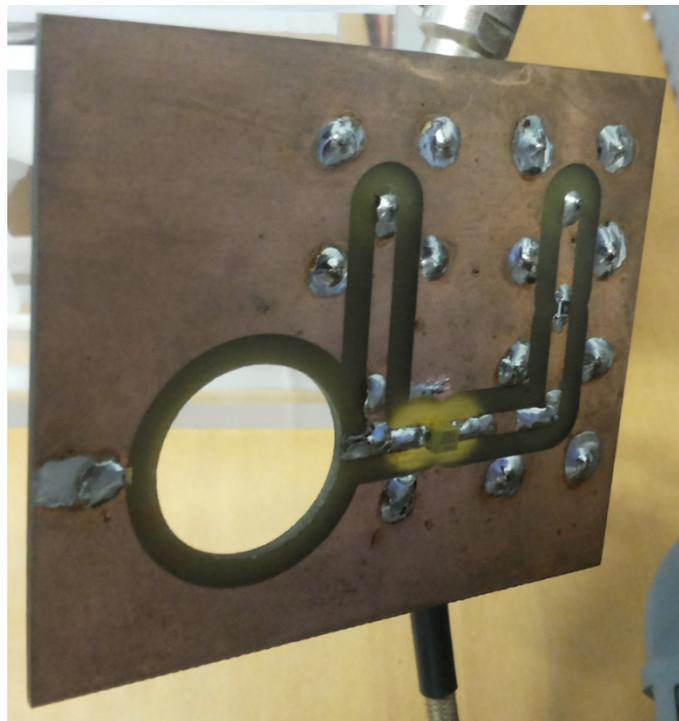


Ilustración 37 Circuito utilizado para el cálculo del valor de C_0

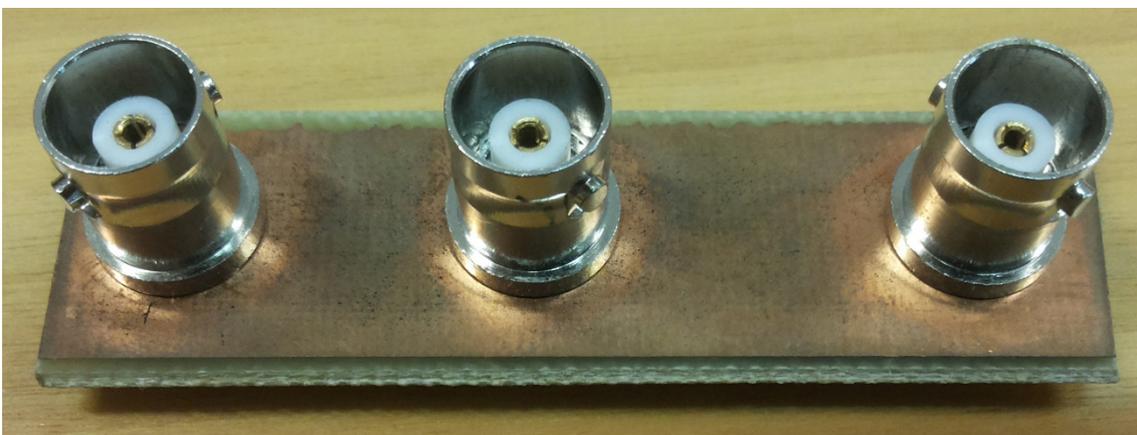


Ilustración 38 Circuito utilizado para el cálculo del valor de C_0

Al igual que en el caso anterior, la medida que se hace en este experimento es la del valor de la frecuencia de resonancia. Una vez medida esta frecuencia, y al disponer del valor real de autoinductancia de la bobina, se calcula el valor de la capacidad del condensador C_0 .

En este caso también se da por válido el valor medio de, como mínimo, 50 pruebas con cada una de las bobinas disponibles. El montaje para llevar a cabo las pruebas se puede ver en la Ilustración 39.

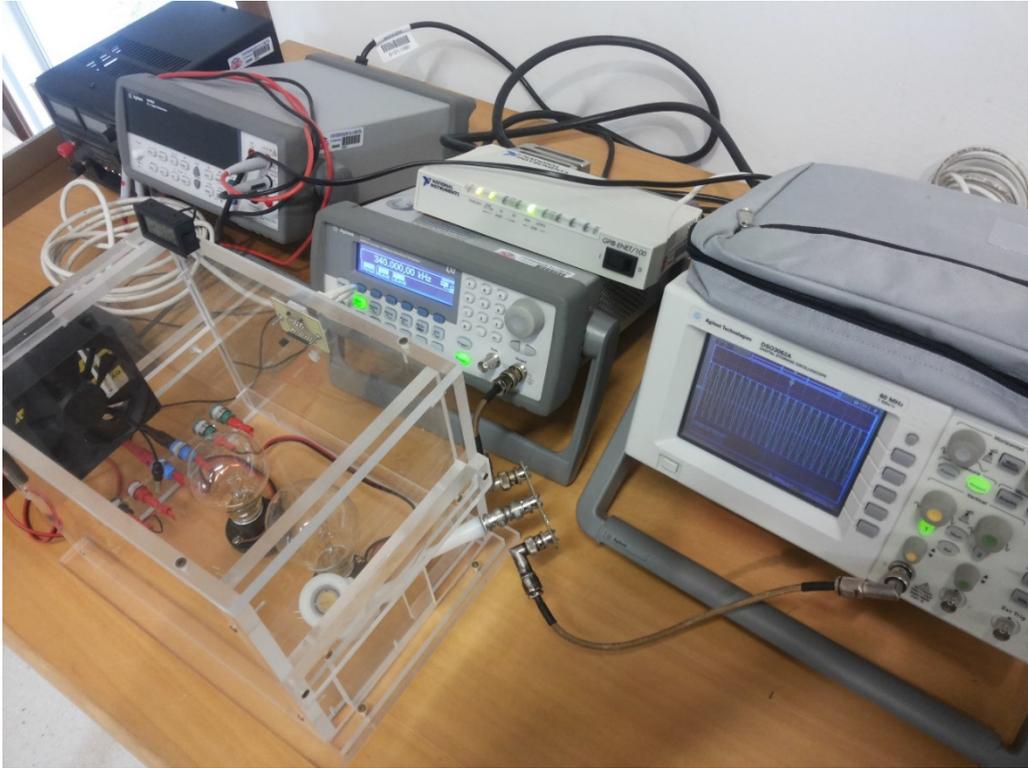


Ilustración 39 Montaje para obtención de los parámetros del cristal en ambiente controlado

2.3 Circuitos para el cálculo de R_1

Para el cálculo del valor de R_1 , se utiliza el circuito mostrado en la Ilustración 40. Para este caso, las pruebas únicamente utilizan una resistencia de precisión en serie con el QCM.



Ilustración 40 Circuito utilizado para el cálculo del valor de R_1

Las medidas a registrar en esta prueba son tanto la frecuencia de resonancia obtenida, al igual que en los experimentos mencionados anteriormente, como la caída de tensión en el QCM. La frecuencia de resonancia se utiliza para el cálculo de los valores de C1 y L1, junto con el valor de C0 obtenido a través de la prueba correspondiente. Teniendo en cuenta que al entrar en resonancia L1 con C1, el único valor en la rama serie del circuito equivalente del cristal de cuarzo es R1; se puede calcular el valor de R1 teniendo en cuenta el divisor de tensión que se forma junto con la resistencia de precisión, de valor conocido.

Para hacer unas medidas más fiables, esta prueba se divide en dos fases. En la primera, se utiliza una resistencia de precisión de valor arbitrario; en concreto se utilizó una resistencia de 100 ohmios. Después de la realización de esta prueba, se calcula el valor de R1, pero no se da por bueno de antemano; sino que para mejorar la fiabilidad en las medidas, se eligen cinco nuevas resistencias de precisión, de valores similares al calculado para R1. Esta elección se fundamenta en la búsqueda de la obtención de la misma tensión en el QCM y en la resistencia externa.

Una vez realizadas, como mínimo, 50 pruebas con cada una de las 5 resistencias de precisión, se toma finalmente la media de todos los valores obtenidos tanto para R1 como para la frecuencia de resonancia. Una vez obtenida la frecuencia de resonancia, se procede a continuación a calcular los valores para L1 y C1 junto con el valor calculado de C0.

2.4 Circuitos para el cálculo de los parámetros del QCM en agua

A la hora de calcular los parámetros para caracterizar el QCM en un medio líquido, hay que tener en cuenta que ahora ya sólo se puede usar el circuito fabricado para realizar las medidas con el soporte, ya que sin él no se pueden hacer estos experimentos.



Ilustración 41 Montaje utilizado para las pruebas en medio líquido

El circuito implementado para estas pruebas, es similar el mostrado en el apartado anterior, ya que lo único que hay que calcular ahora es la nueva resistencia de la rama serie, y la nueva frecuencia de resonancia. En la Ilustración 41 puede verse el montaje utilizado para este experimento.

En esta prueba, al igual que en la realizada para calcular la resistencia R1, interesa medir la caída de tensión en el QCM, junto con la frecuencia de resonancia del mismo. Se sigue el mismo procedimiento en dos fases, primero se utiliza una resistencia arbitraria para calcular una primera aproximación al valor de R1+R2, y posteriormente se seleccionan 5 valores próximos a ese primer valor obtenido para mejorar la fiabilidad.

Una vez calculada la media de la caída de tensión después de, como mínimo, 50 pruebas con cada una de las resistencias de precisión seleccionadas, se calcula el valor de R2, teniendo en cuenta que el divisor de tensión en este caso consta de 3 resistencias: la de precisión, y la combinación serie de R1 y R2. Además, al haber medido también con esta prueba la nueva frecuencia de resonancia del cristal, se puede calcular el valor de la inductancia L2 debida al medio líquido. Como el valor de C1 y el de L1 se habrían calculado previamente, a través de la nueva frecuencia de resonancia se puede calcular el valor de L2. La nueva frecuencia de resonancia es la generada entre C1 y la inductancia combinada en serie de L1 y L2.

3 Desarrollo del software usado para las pruebas

Para la realización de las pruebas se ha desarrollado un sistema de instrumentación formado por los equipos mencionados anteriormente, el generador de funciones Agilent 33220A y el osciloscopio DSO3062A. Ambos instrumentos están dotados de puertos de comunicación GPIB que permiten su control desde un PC mediante una aplicación que ha de desarrollarse para llevar a cabo la tarea que se pretende realizar con el sistema de instrumentación.

Aunque el control mediante GPIB de los instrumentos del sistema de instrumentación puede realizarse con un PC que disponga de un interface GPIB, en este caso, se ha utilizado el controlador NI GPIB-ENET/100 junto con el driver NI-488.2 de National Instruments, que permite el control de los dispositivos GPIB desde cualquier lugar en una red TCP/IP basada en Ethernet. La configuración final del sistema se ha mostrado en la Ilustración 35 del apartado 1.3 de este capítulo.

Para el control del sistema de instrumentación se ha desarrollado una aplicación que permite la realización de las distintas pruebas mencionadas. Dicha aplicación está realizada mediante LabVIEW (acrónimo de **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench) que es a la vez un lenguaje y un entorno de programación gráfica. LabVIEW originalmente estaba orientado a la realización de aplicaciones de control de equipos electrónicos usados en el desarrollo de sistemas de instrumentación, lo que se conoce como instrumentación virtual. Por este motivo los programas creados en LabVIEW se guardan en ficheros llamados VI (**V**irtual **I**nstrument). Con la misma filosofía de instrumento virtual, también se da nombre a las dos ventanas principales que se tienen en el entorno de programación: Panel Frontal que será el interface de la aplicación software con el usuario del instrumento virtual y, Diagrama de Bloques donde se realiza la programación de dicha aplicación.

3.1 Especificaciones de la aplicación.

A la hora de programar la aplicación software, se han planteado cuales deberían ser los objetivos que ha de cumplir dicha aplicación.

Según se ha descrito en los distintos apartados del método propuesto, se ha de realizar un barrido en frecuencia, en donde, se buscará el valor de la frecuencia a la cual se obtiene el valor mínimo de tensión en el punto de medida. Es por ello que, esencialmente, la aplicación debería permitir la realización de un barrido en frecuencia ajustando el rango de frecuencias a barrer y la resolución del mismo, con la posibilidad de anidar un segundo barrido que permitiese realizar el análisis, en torno al mínimo detectado y con una resolución en frecuencia mayor. La aplicación deberá graficar cada uno de los barridos mientras se está realizando para permitir visualizar la evolución del mismo.

Una vez realizado cada uno de los barridos, los datos obtenidos se deberán de guardar en un fichero. Además, en el caso de realizar más de un barrido, se deberá generar un fichero resumen que contendrá los valores de frecuencia a los que se ha obtenido el valor mínimo de lectura. El formato de los ficheros almacenados ha de ser tal que permita el tratarlos en otra aplicación, o bien, recuperarlos en la misma para su visualización gráfica o posterior tratamiento.

A la hora de diseñar la aplicación, su implementación ha de permitir la ampliación futura de su funcionalidad. Asimismo, para mayor facilidad en el diseño de la aplicación se utilizarán las librerías facilitadas por NI con los vi's para el control de los instrumentos utilizados.

3.2 Librerías utilizadas y sub-vi's diseñados.

Como se ha mencionado anteriormente, a la hora de desarrollar la comunicación con los instrumentos se ha hecho uso de las librerías disponibles para tal efecto. En la Ilustración 42 se muestran los vi's utilizados de ambas librerías.

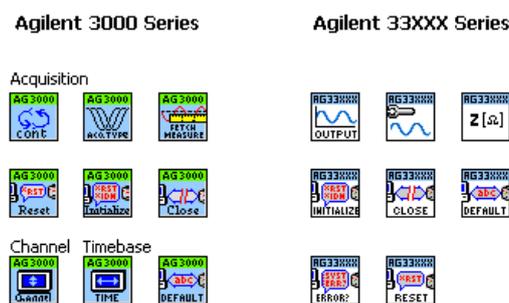


Ilustración 42 Vi's de comunicación utilizados

Por otro lado, para favorecer la legibilidad del programa, así como, la reutilización de código y modularidad, se han realizado una serie de sub-vi's (equivalentes a sub-rutinas o funciones) que posteriormente son utilizados en distintas partes del programa. En la Ilustración 43 se muestra el diagrama jerárquico del programa principal, donde se pueden ver tanto los vi's de las librerías de instrumentos mencionadas anteriormente, como los vi's desarrollados, y dónde son utilizados cada uno de ellos.

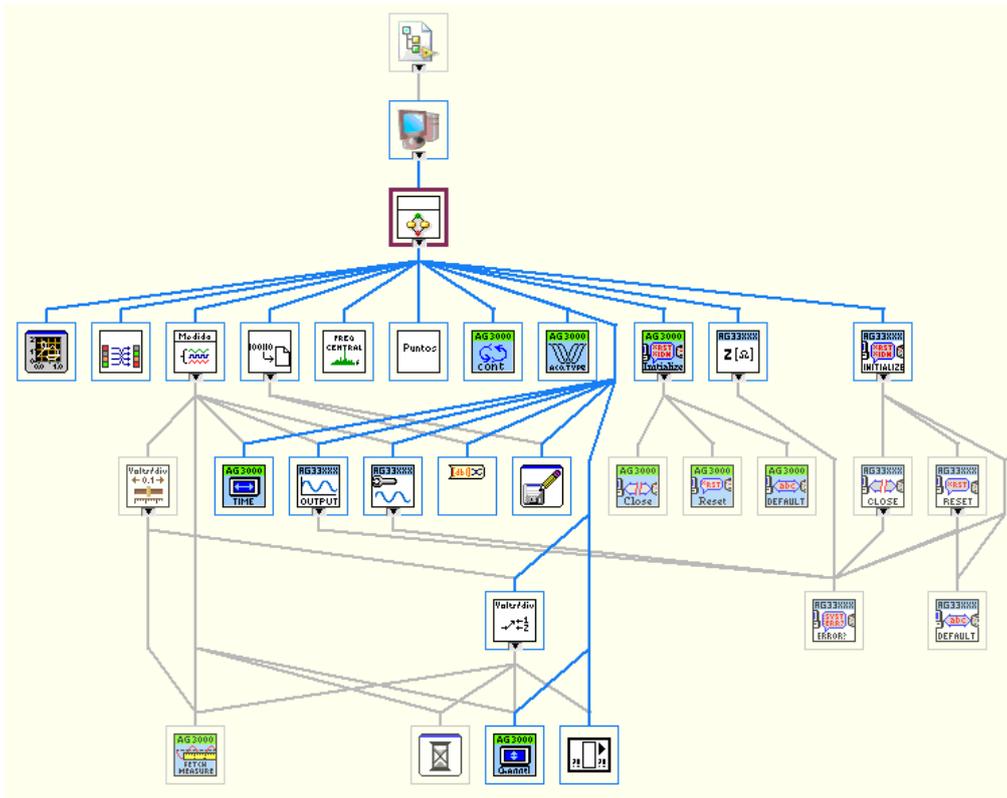


Ilustración 43 Diagrama jerárquico del programa

A continuación se describirán cada uno de los sub-vi desarrollados, que luego se utilizarán en el programa principal.

3.2.1 Sub-vi Calculo Ganancia Vertical (Volt/div)

Este sub-vi cuyo panel frontal se muestra en la Ilustración 44 realiza el cálculo para el ajuste de la ganancia vertical del osciloscopio.

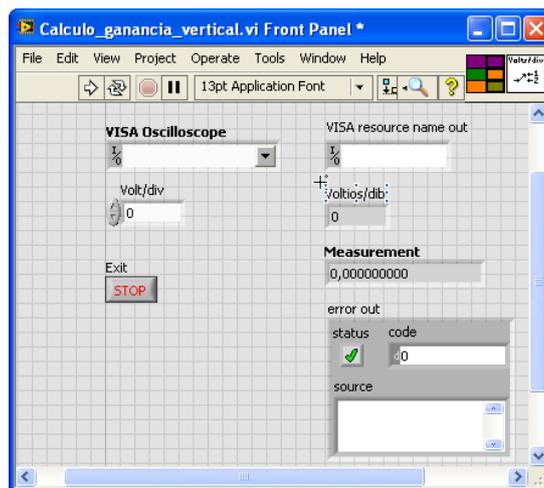


Ilustración 44 Panel frontal sub-vi Calculo Ganancia Vertical

Las entradas de este sub-vi son la dirección VISA del Osciloscopio, un valor inicial de la ganancia del amplificador vertical (Volt/div) y una entrada de stop que permite interrumpir la ejecución del sub-vi.

Las salidas del sub-vi son la dirección VISA del Osciloscopio, el valor calculado de la ganancia del amplificador vertical (Voltios/div), la última medida realizada (Measurement), y un cluster de error.

En la Ilustración 45 se muestra el diagrama de bloques de este sub-vi. Está programado mediante un bucle While en donde en primer lugar se configura la ganancia del canal 1 del osciloscopio mediante el sub-vi correspondiente y a continuación, después de un tiempo de espera para las comunicaciones, se realiza la medida de la tensión pico a pico de dicho canal. Con este valor se entra a un *Case de rango*, de forma que en función de la medida obtenida, se ajusta el valor de la ganancia del amplificador vertical del osciloscopio. El sub-vi deja de ejecutarse cuando con la ganancia vertical ajustada, la señal ocupe entre 4 y 7 cuadros verticales del osciloscopio. El último valor de ganancia ajustado es el que proporciona como salida este sub-vi.

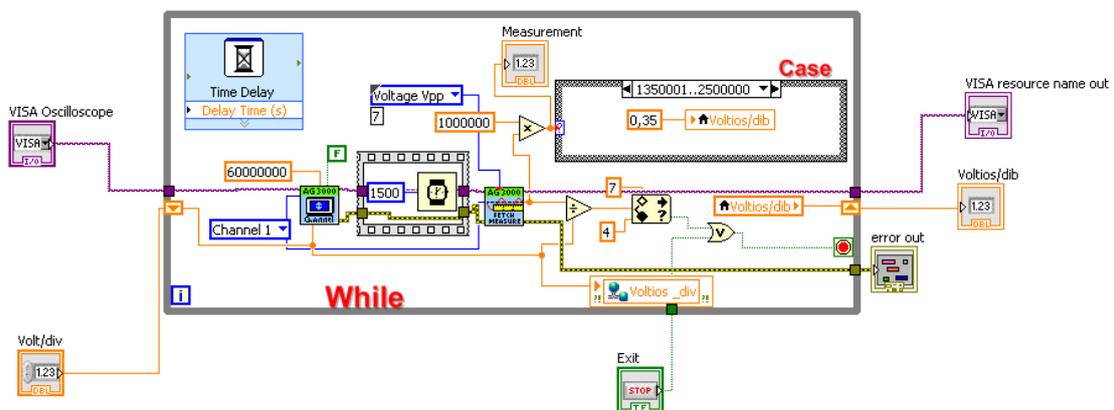


Ilustración 45 Diagrama de bloques del sub-vi Calculo Ganancia Vertical

3.2.2 Sub-vi Control Ganancia Vertical (Volt/div)

Este sub-vi cuyo panel frontal se muestra en la Ilustración 46 realiza el control del valor de tensión medido por el osciloscopio y contiene al sub-vi explicado en el apartado anterior.

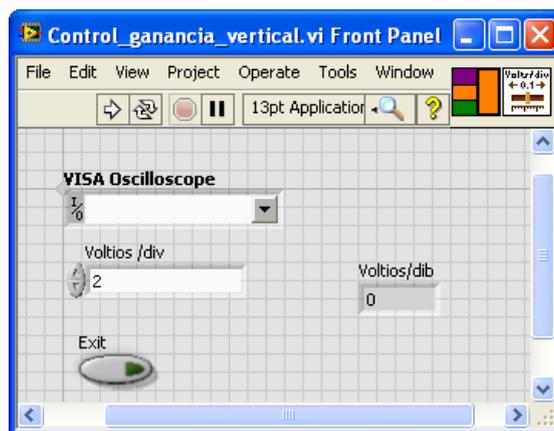


Ilustración 46 Panel frontal del sub-vi Control Ganancia Vertical

En el caso de que se produzca un incremento de amplitud elevado en la tensión a medir, se puede dar el caso de que la señal sobrepase el rango de presentación del osciloscopio para el valor ajustado de ganancia vertical. Si se da este caso, la medida devuelta por el osciloscopio

es de 0 voltios. El sub-vi comprueba los valores devueltos por el osciloscopio, de forma que, si se da la condición anterior, se recalcula el ajuste de la ganancia vertical.

Las entradas de este sub-vi son la dirección VISA del Osciloscopio, un valor inicial de ganancia del amplificador vertical y una entrada de stop que permite interrumpir la ejecución del sub-vi. La salida del sub-vi es el valor calculado de la ganancia del amplificador vertical.

En la Ilustración 47 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a este sub-vi. En él, se comprueba la medida devuelta por el osciloscopio, y si es igual a cero se ejecuta la opción True del *Case binario*. Esta opción contiene el sub-vi explicado en el apartado anterior, *Calculo Ganancia Vertical*, que obtendrá la ganancia adecuada para el amplificador vertical. En el caso de que el resultado de la comparación sea *False*, la opción del *Case* está vacía, por lo que se mantiene el ajuste del amplificador vertical del osciloscopio.

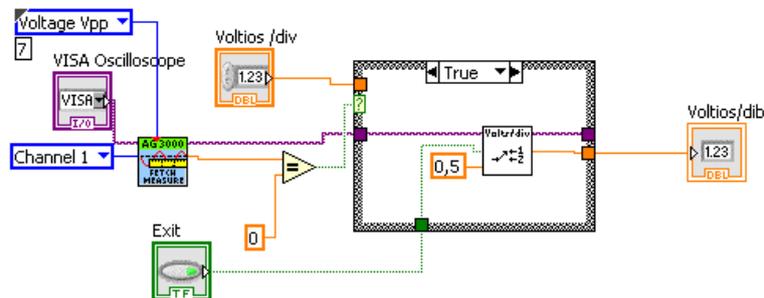


Ilustración 47 Diagrama de bloques del sub-vi Control de Ganancia Vertical

3.2.3 Sub-vi Medida

Este sub-vi se encarga de realizar el proceso de medida que consiste en ajustar en el generador, el valor de la frecuencia a generar, y medir con el osciloscopio el valor de la amplitud en el punto de medida. El panel frontal del mismo se muestra en Ilustración 48.

Las entradas correspondientes a este sub-vi son: dirección GPIB del osciloscopio, dirección GPIB de generador de funciones, frecuencia de la señal a generar, valor del amplificador de ganancia vertical y entrada de interrupción del sub-vi.

Las salidas del sub-vi son el valor de la frecuencia, y dos valores de medida. Uno de estos dos valores de medida se obtiene haciendo la media de tres lecturas (Measurement Mean) mientras que el otro valor se obtiene cuando en sucesivas lecturas coinciden dos de las tres últimas.

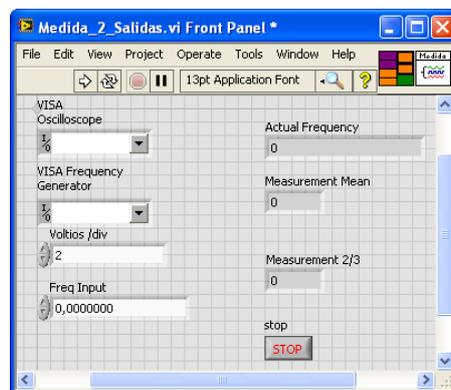


Ilustración 48 Panel frontal sub-vi Medida

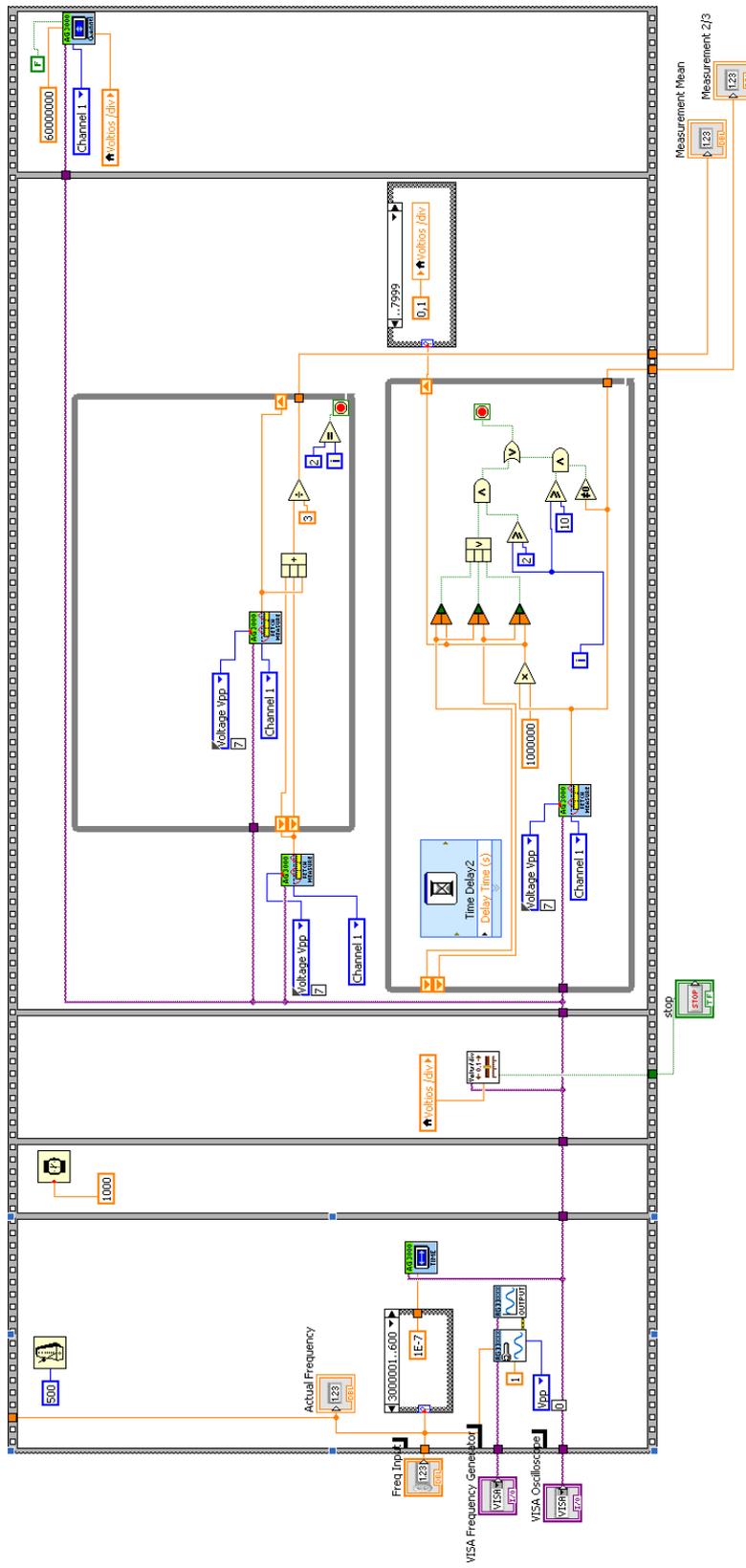


Ilustración 49 Diagrama de bloques del sub-vi Medida

En la Ilustración 49, se muestra el diagrama de bloques del sub-vi. En este caso se utiliza la estructura de control *Frame* que asegura que el programa se ejecutará en una determinada secuencia.

En primer lugar, se ajusta la frecuencia del generador al valor introducido en la entrada, y en paralelo se configura la base de tiempos del osciloscopio, al valor adecuado, según la frecuencia de entrada por medio de un *Case*.

A continuación, y tras un tiempo, se ejecuta el sub-vi *Control de amplitud vertical* comentado en el apartado anterior, para comprobar si la lectura del osciloscopio es distinta de cero.

En el siguiente paso, se obtiene en paralelo el valor de la media de tres lecturas o bien el valor coincidente de dos de tres lecturas. En este mismo paso, según el valor de la medida realizada, se asigna el valor de la ganancia del amplificador vertical.

En el último paso se configura el valor de dicha ganancia en el osciloscopio.

3.2.4 Sub-vi Fichero

Este sub-vi, que se muestra en la Ilustración 50, realiza la función de guardado de los datos procedentes de dos arrays, uno con los valores de las frecuencias barridas, y otro con las medidas de tensión obtenidas a dichas frecuencias. También almacena los datos de frecuencia mínima, máxima e incremento, además de un comentario opcional.

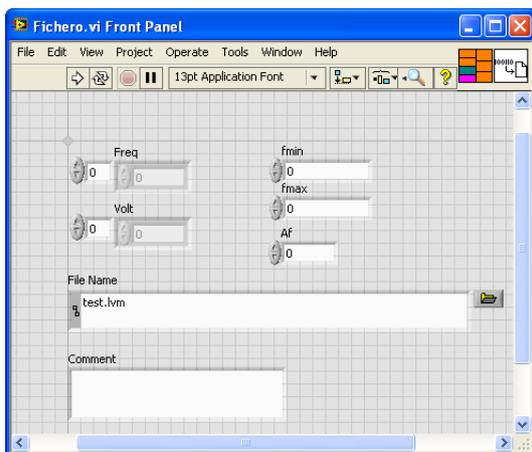


Ilustración 50 Panel frontal sub-vi Fichero

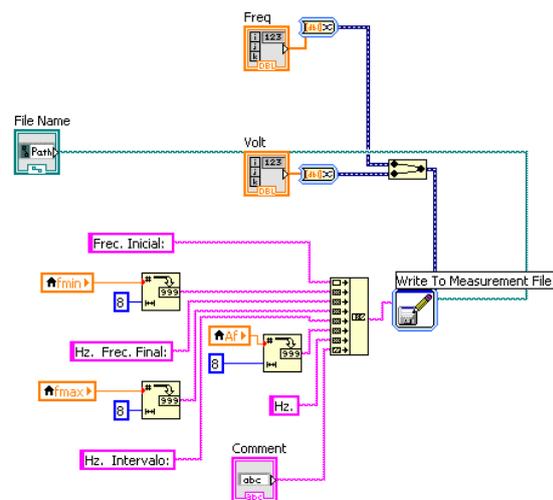


Ilustración 51 Diagrama de bloques del sub-vi Fichero

El diagrama de bloques correspondiente se muestra en la Ilustración 51. En él se muestran las distintas operaciones de conversión de formato y concatenación para introducir los valores de configuración y comentarios en el fichero. Asimismo, se muestran las entradas al sub-vi *Write To Measurement File* que, además de la ya mencionada, son los arrays con las frecuencias y valores medidos, y el nombre del fichero.

3.2.5 Sub-vi Read File

Este sub-vi, del cual se muestra el panel frontal en la Ilustración 52, realiza la función de recuperación de la información guardada a fichero, procedente de los barridos realizados y

guardados con el sub-vi del apartado anterior. Estos datos se almacenan en formato de hoja de cálculo, donde en una columna, se almacena el valor de la frecuencia, y en otra, el valor de la medida obtenida.

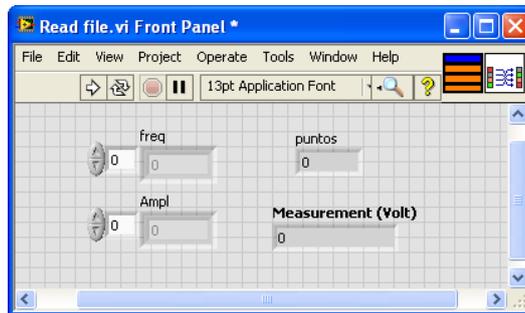


Ilustración 52 Panel frontal del sub-vi Read File

Una vez ejecutado el sub-vi se tendrán dos arrays, uno con los valores de frecuencia y otro con los de amplitud, el número de puntos del barrido y el valor de la medida del último valor.

El diagrama de bloques se muestra en la Ilustración 53, donde se indican las distintas operaciones con arrays hasta extraer los datos en el formato requerido.

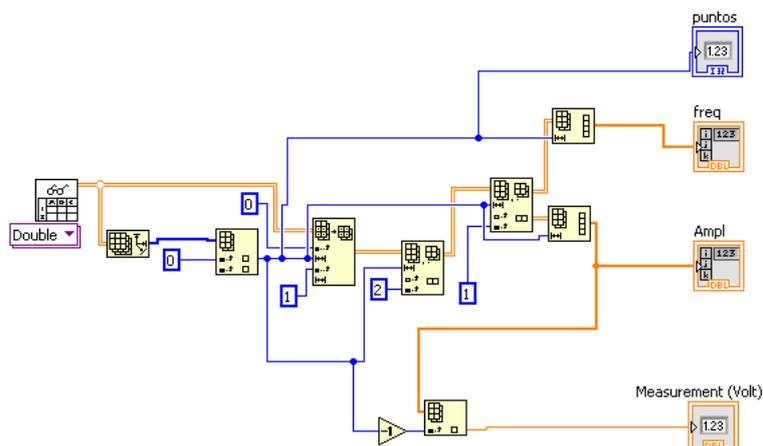


Ilustración 53 Diagrama de bloques del sub-vi Read File

3.2.6 Sub-vi Frecuencia Central

Mediante este sub-vi, del cual se muestra el panel frontal en la Ilustración 54, se realiza el cálculo del centro del intervalo de frecuencias a las cuales se obtiene el valor mínimo de los valores medidos durante el barrido, en el caso de que haya más de una frecuencia a la que se obtenga el valor mínimo de medida.

Las entradas al sub-vi son el número de puntos del barrido, y los arrays de frecuencia y de medidas.

Como salida se obtiene el mayor valor de la frecuencia a la que se obtiene la mínima medida (Freq Max Value), el menor valor de frecuencia a la que se obtiene la mínima medida (Freq Min Value), la frecuencia central del intervalo dado por los valores anteriores (Central Freq), y el valor mínimo de la medida (Min Value).

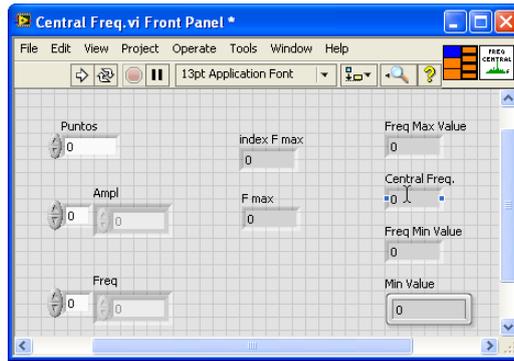


Ilustración 54 Panel frontal sub-vi Central Freq

En la Ilustración 55 se muestra como se utiliza una función para detectar el mínimo del array de medida de amplitud, y a partir de su índice se obtiene el valor de la frecuencia de ese mínimo. A continuación se usa un bucle *For* para recorrer los valores del array de frecuencias para detectar el valor máximo de frecuencia en el cual, la medida se corresponde con el valor mínimo de amplitud.

Finalmente, obtenidos los valores de frecuencia, se calcula el valor del punto central del rango de frecuencias donde se obtuvo el valor mínimo de medida.

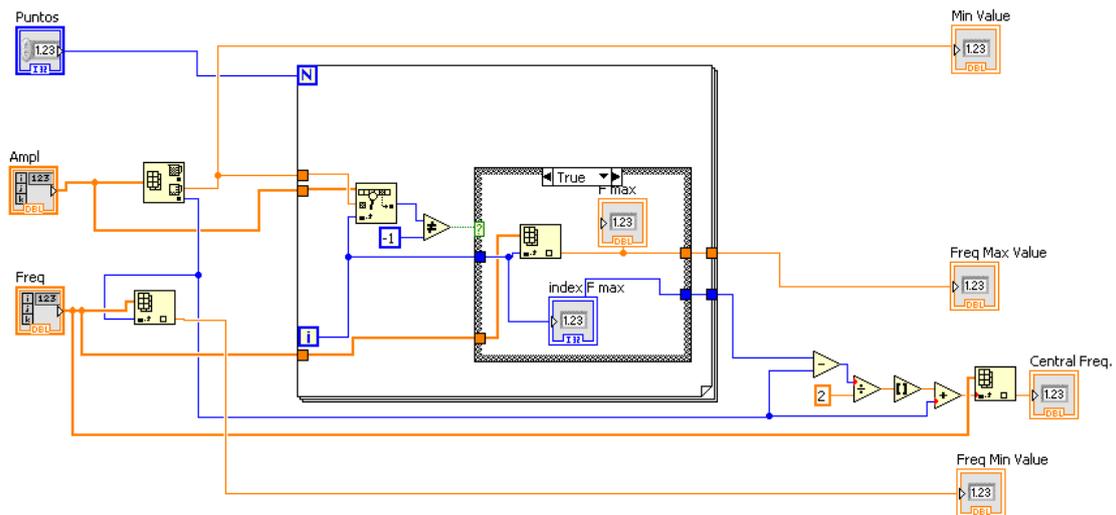


Ilustración 55 Diagrama de bloques sub-vi Central Freq

3.2.7 Sub-vi Puntos

Este sub-vi, que se muestra en la Ilustración 56, calcula el número de puntos que será necesario barrer dadas una frecuencia mínima, una máxima y un intervalo. Se utilizará a la hora de realizar los barridos.

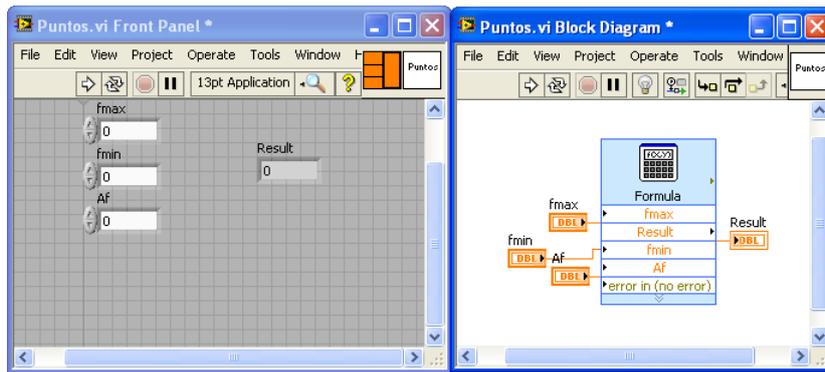


Ilustración 56 Panel Frontal y Diagrama de bloques del sub-vi Puntos

3.3 Panel Frontal

El panel frontal del instrumento virtual diseñado, se basa en tres pestañas superpuestas, que se activarán en función de la etapa en la que se encuentre la aplicación. Además, en la parte inferior de las mismas, se ubica una barra de botones que nos permite el acceso a las distintas utilidades de la aplicación. Las pestañas diseñadas a tal efecto se denominan Configuración, Test y Graphics.

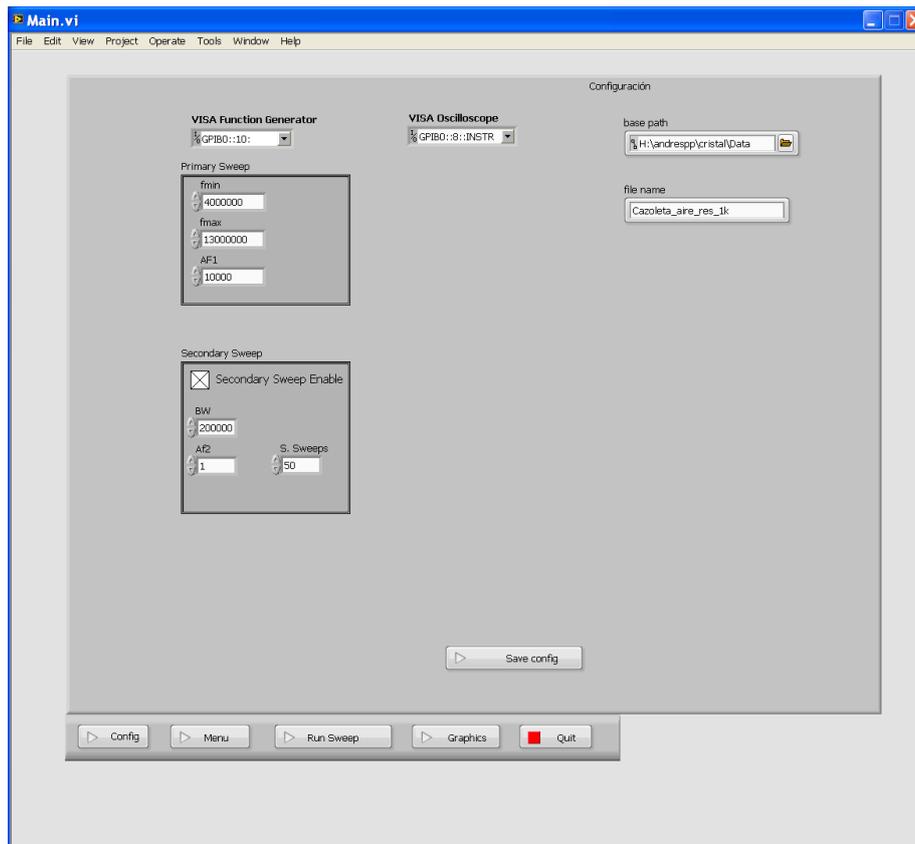


Ilustración 57 Pantalla de Configuración

La pestaña Configuración que se muestra en la Ilustración 57, permite la configuración del instrumento virtual. En dicha pestaña se introduce la dirección GPIB de los instrumentos a utilizar, generador de funciones y osciloscopio, así como la configuración del barrido que se va

a realizar. En cuanto a éste, hay que especificar la frecuencia mínima, la máxima y la distancia entre puntos o incremento de frecuencia. Como se puede observar, en la configuración del barrido se puede seleccionar un barrido secundario o anidado. El objetivo de esta opción es realizar un barrido primario con un incremento de frecuencia grueso para realizar un análisis rápido, y una vez obtenido el valor de la frecuencia a la que se obtiene el mínimo valor en la amplitud de la señal medida, se procede a realizar otro barrido más fino en torno al valor de frecuencia obtenido. En este caso, también se puede configurar el número de barridos que se realizarán, para luego obtener el valor promedio de las lecturas del valor de frecuencia al que se obtiene el valor mínimo en la señal medida.

La pestaña Test, que se muestra en la Ilustración 58 es la que se utiliza como pantalla principal de referencia.

Esta pantalla muestra información agrupada por campos, además de mostrar la información gráfica sobre el barrido.

El campo “Function Generator” facilita información sobre la dirección GPIB del dispositivo, frecuencia mínima y máxima del barrido en ejecución, incremento de frecuencia entre puntos del barrido y la frecuencia instantánea.

El campo “Oscilloscope” muestra la dirección GPIB y el valor de la última medida realizada por el mismo.

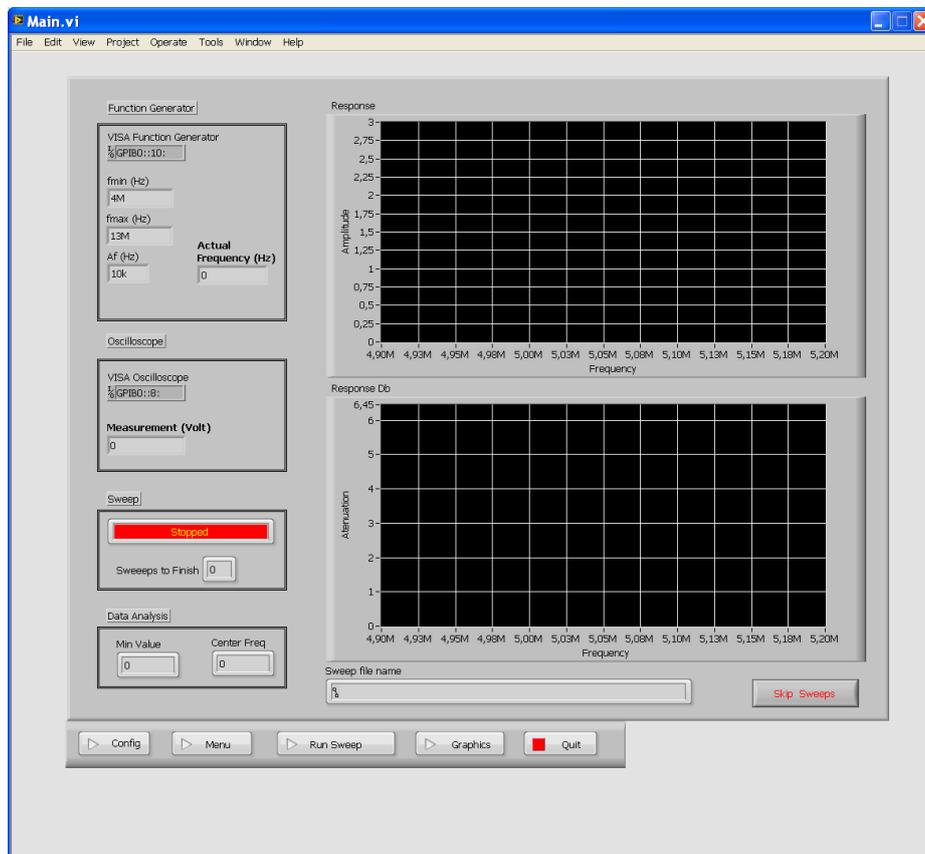


Ilustración 58 Pantalla de Test

El campo “Sweep”, muestra el estado del barrido mediante un indicador que parpadea en distintos colores, mostrando tres posibles mensajes, “Stopped”, “Primary Sweep in Progress” y “Secondary Sweep in Progress”. Este campo tiene además un indicador numérico que muestra el número de barridos restantes para alcanzar el valor programado.

Además de los indicadores mencionados, se muestran dos gráficas con la evolución del barrido en curso. Bajo las gráficas aparece un indicador con la ruta y nombre del fichero que se grabará una vez finalizado el barrido. Junto a este indicador se dispone un botón que permite detener el barrido en curso.

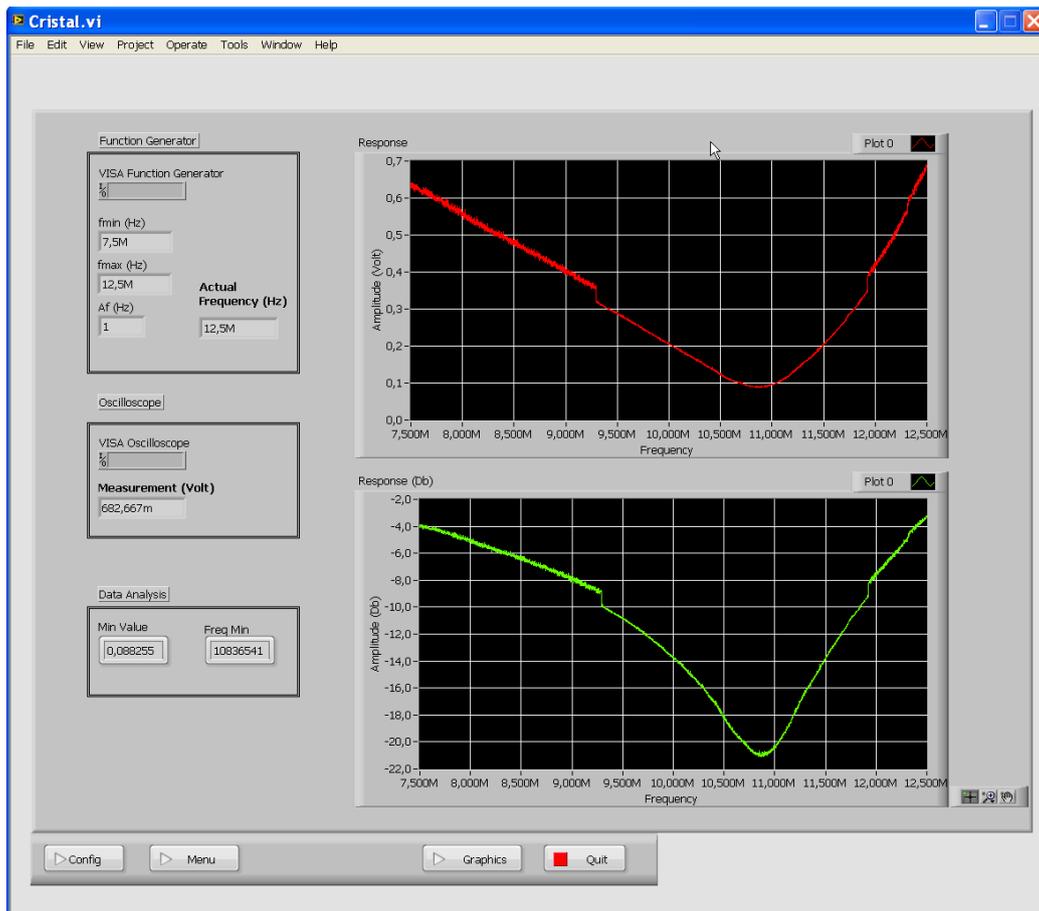


Ilustración 59 Pantalla Graphics

La pestaña Graphics, que se muestra en la Ilustración 59, permite visualizar gráficamente uno de los barridos realizados que se haya guardado a fichero. En esta pestaña, además de visualizar gráficamente los datos, se muestran los valores del rango de frecuencias barrido, y también, se muestra el valor mínimo medido, y la frecuencia a la cual se ha obtenido dicho valor mínimo.

Cada uno de los botones de la barra de botones que aparece en la parte inferior de las pestañas, estará visible en función del punto de funcionamiento de la aplicación. Por ejemplo, cuando se entra en el modo configuración, desaparecerán los botones de forma que, solo se puede acceder a un botón que permita salir del modo configuración.

3.4 Estructura de la aplicación.

A la hora de programar la aplicación, se ha decidido utilizar una estructura de máquina de estados, que es la recomendada por NI para la implementación de programas de cierta entidad. Esto permite una mayor facilidad en el control de la aplicación, así como la posibilidad de realizar ampliaciones en la misma de forma sencilla. El diagrama de estados se muestra en la Ilustración 60.

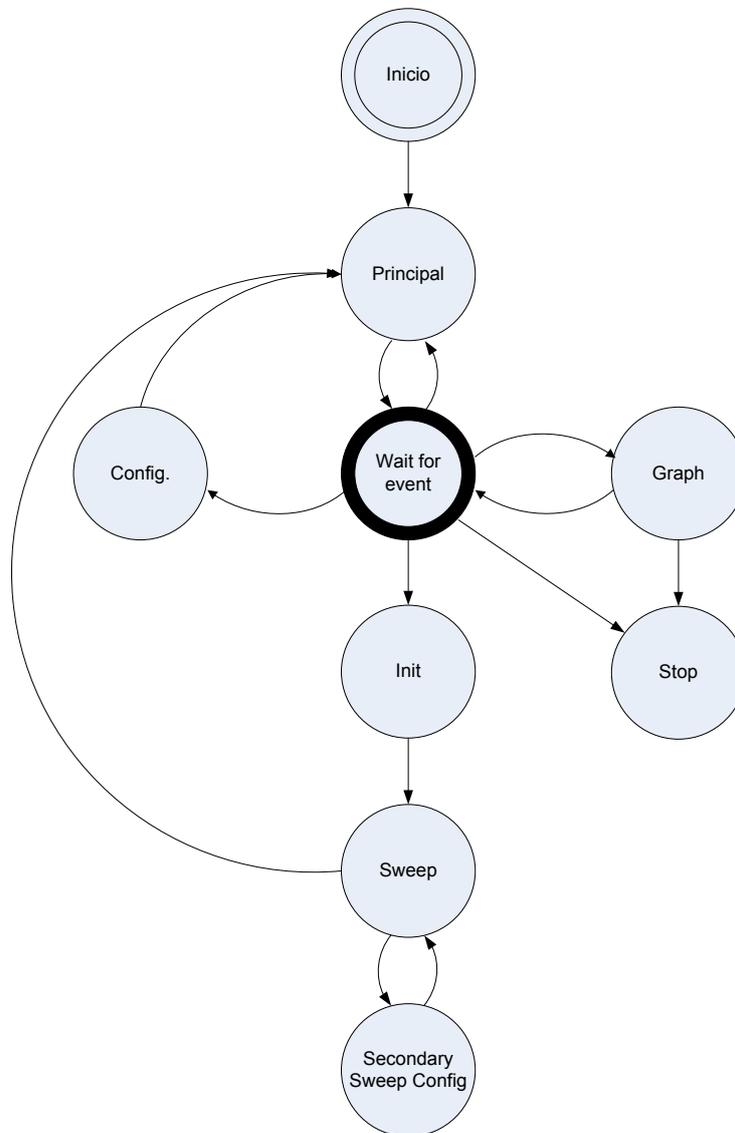


Ilustración 60 Diagrama de estados de la aplicación

3.5 Diagrama de Bloques

Para implementar el diagrama de estados mostrado en la Ilustración 60, se ha utilizado la estructura de máquina de estados en LabView, formada por un bucle *While* que contiene un *Case*. Las posibles opciones de selección del *Case* se corresponden con las distintas etapas que forman la máquina de estados (Principal, Config, Wait for Event, Init, Sweep, Sec. Sweep Config, Graph y Stop). El estado Wait for Event, es una etapa de espera por un evento, para hacer que el programa evolucione en función del evento acaecido.

Cada una de las etapas, tiene asociada la activación de una de las pestañas descritas en la sección correspondiente al Panel Frontal, salvo en Wait for Event, donde no se cambia de pestaña, permaneciendo activa la correspondiente al estado de procedencia.

A continuación se describirán las distintas etapas.

3.5.1 Inicio.

Inicio no está contemplado como una etapa propiamente dicha en la máquina de estados. Aquí se realiza la declaración de algunas variables y se definen las propiedades de algunos elementos. Las variables y propiedades que se inicializan son las que aparecen externas al bucle While en la Ilustración 63, identificadas con el número 1 dentro de un rectángulo.

En el recuadro 1 se pueden ver las variables que se definen: “Primary Sweep”, “Secondary Sweep” y “Sweep”, todas de tipo Cluster. Además se define también la propiedad de visibilidad de varias variables como son: “SS”, “P. Sweep” y “Sweep”, y se desactiva la visibilidad del “Tab Control”.

Por otro lado, a la izquierda del bucle *While*, en la elipse identificada con el 2, se puede ver la inicialización de algunos de los registros de desplazamiento que están ubicados en el bucle While. En este caso, se observa que el control denominado “Initial State” tiene seleccionado el valor “Principal”. Dicho control está conectado al registro de desplazamiento del bucle While, que a su vez, se conecta al terminal de selección del *Case*, de forma que, en el primer ciclo de ejecución del bucle *While* se activará el estado “Principal” del *Case*.

3.5.2 Etapa Principal

Las acciones a realizar en esta etapa, son las que se encuentran dentro del *Case* en la Ilustración 63. Se activa la pestaña “Test” en el panel frontal mediante el Tab Control; se inicializan los valores de los indicadores que están colocados en la mencionada pestaña, así como, la visibilidad de los botones de la barra inferior del panel frontal.

Una vez ejecutado el código programado dentro del *Case*, la aplicación evolucionará al estado del *Case* que se programe en el Control etiquetado como Next State, que en este caso es “Wait for Event”

3.5.3 Etapa Wait for Event

El *Case* que controla esta etapa incluye, dentro de su programación, una *estructura de eventos* que permite configurar una lista que, hará que la aplicación evolucione en función del evento activado.

En esta aplicación, se ha asociado un evento a cada uno de los cinco botones presentes en la barra confeccionada en el panel frontal.

La programación correspondiente a este estado, se puede ver en la Ilustración 61 donde, se muestra uno de los estados de la *estructura de eventos*. La acción asociada al evento aquí mostrado, la pulsación del botón “Run Sweep”, es en este caso, mostrar un cuadro de diálogo con botones asociados para ir a la etapa de “Configuración” o a la de “Init”. El selector colocado a la salida del sub-vi de diálogo, hará que la aplicación evolucione bien a “Configuración”, bien a “Init”, en función del botón pulsado.

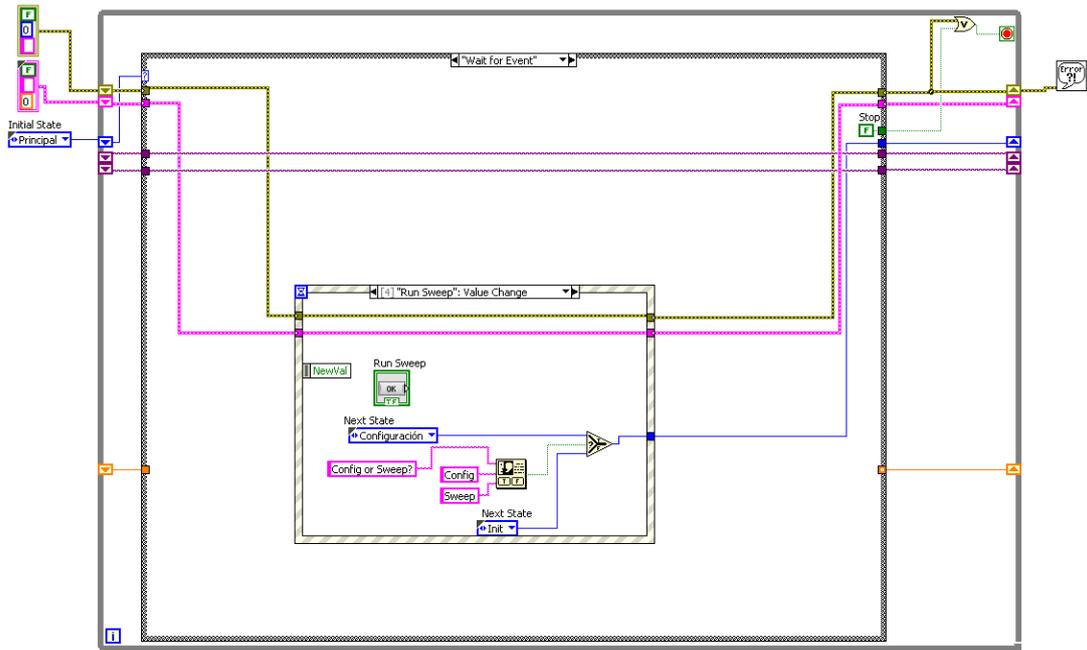


Ilustración 61 Etapa Wait for Event

3.5.4 Etapa Configuración

El código asociado a este Case se muestra en la Ilustración 62.

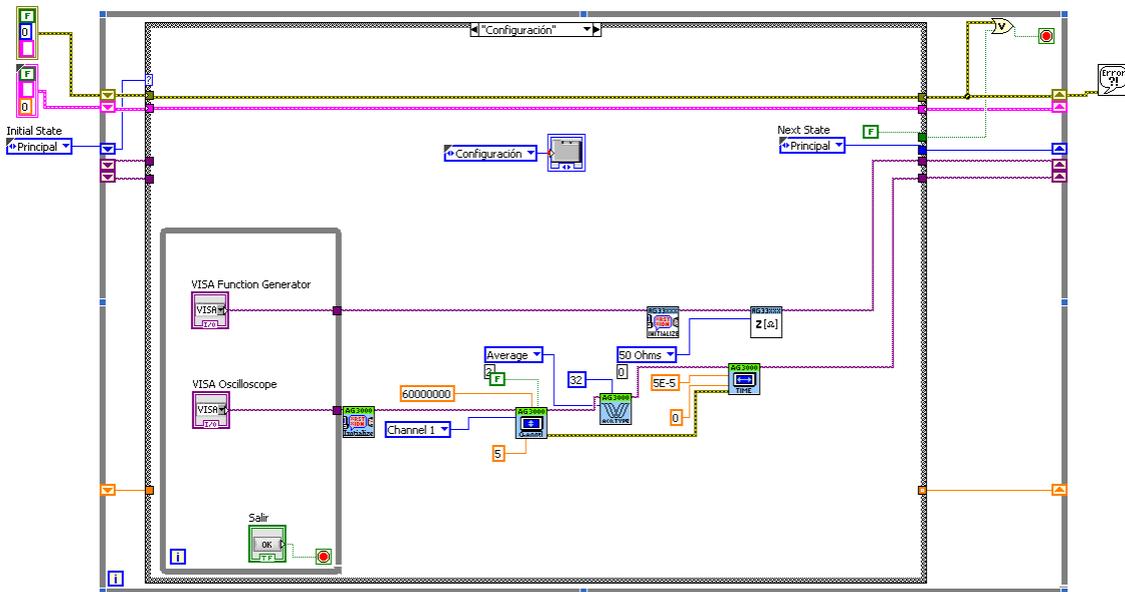


Ilustración 62 Etapa Configuración

Como su nombre indica, en esta etapa se realiza la configuración de los distintos parámetros del barrido a realizar, se asignan las direcciones de los instrumentos, y se asigna el nombre base de los ficheros que se grabarán tras la realización de cada uno de los barridos.

En esta etapa se activa la pestaña de "Configuración", que se ha mostrado en el apartado de Panel Frontal, y ahí es donde se realizará la configuración mencionada.

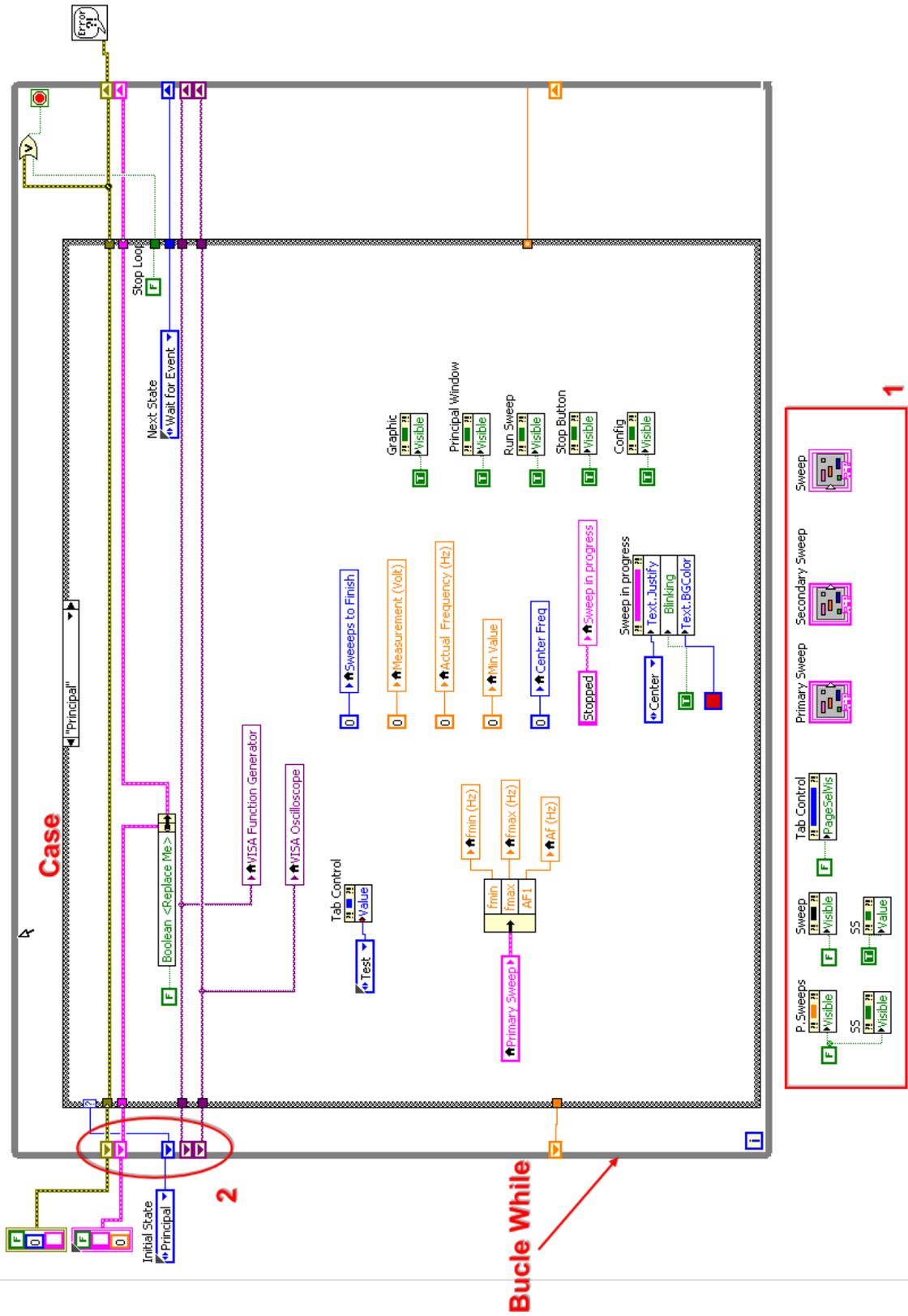


Ilustración 63 Etapa Principal

Se ha dispuesto un botón específico en esta pestaña, para salir del modo “Configuración”. Una vez pulsado el mencionado botón, hace que se salga del bucle While programado en esta etapa, se ejecute la configuración de los parámetros básicos de los equipos, y una vez realizada esta, la aplicación evolucione a la etapa “Principal”.

3.5.5 Etapa Init

Se accede a esta etapa desde el estado “Wait for Event” cuando se pulsa el botón “Run Sweep” de la Pestaña Test. El código asociado a esta etapa, que se muestra en la Ilustración 64, va encaminado a realizar la configuración de la frecuencia del primer punto de barrido del generador de funciones, configurar la base de tiempos del osciloscopio en función de la frecuencia consignada en el generador, y calcular la ganancia vertical inicial del osciloscopio.

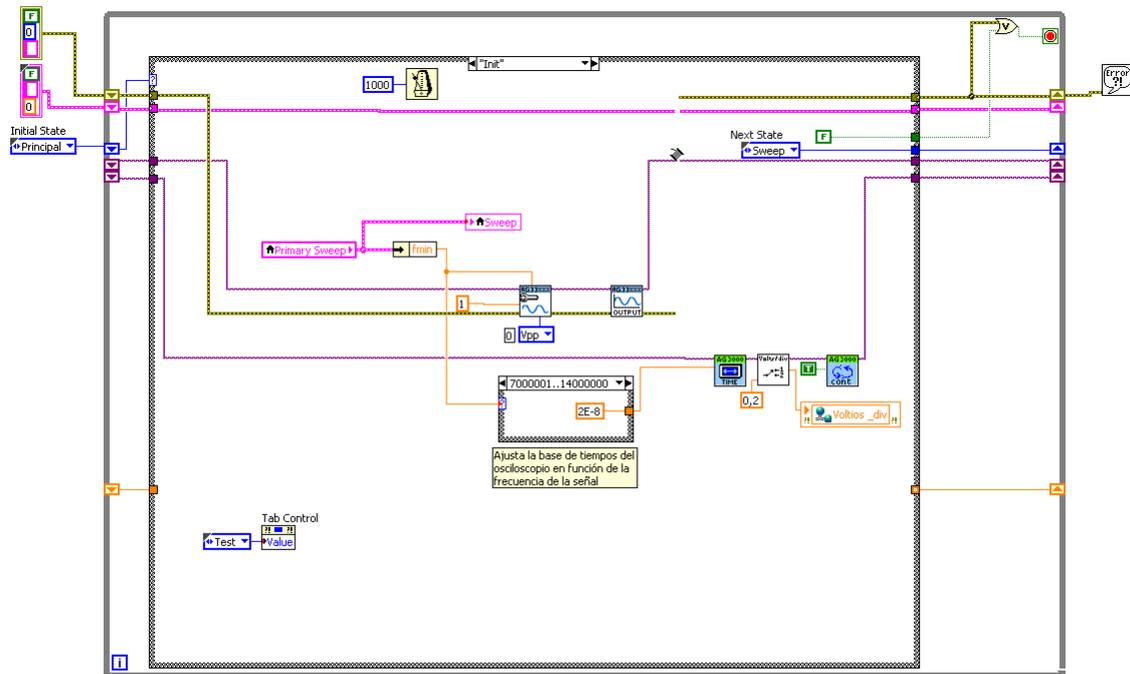


Ilustración 64 Etapa Init

Una vez realizadas estas tareas, la aplicación evoluciona a la siguiente etapa, “Sweep”.

3.5.6 Etapa Sweep

Es la etapa donde se realizan los barridos programados en Configuración. La programación de dicha etapa se muestra en Ilustración 65.

El control de los barridos anidados se realiza mediante dos bucles *For*, y es en esta etapa donde se utilizan los sub-vi programados y explicados anteriormente Medida, Puntos, Fichero y Center Freq.

Además de la gestión del barrido y presentación de los datos en las gráficas según se está realizando el mismo, en esta etapa, se hace la gestión de los nombres de los ficheros que almacenarán los distintos barridos, indicando en su nombre a qué tipo de barrido corresponden (principal o secundario), el número de barrido que le corresponde y la fecha del mismo. Una vez finalizados todos los barridos, adicionalmente se genera un fichero resumen con los valores mínimos y frecuencia a la que se han alcanzado estos en cada uno de los barridos.

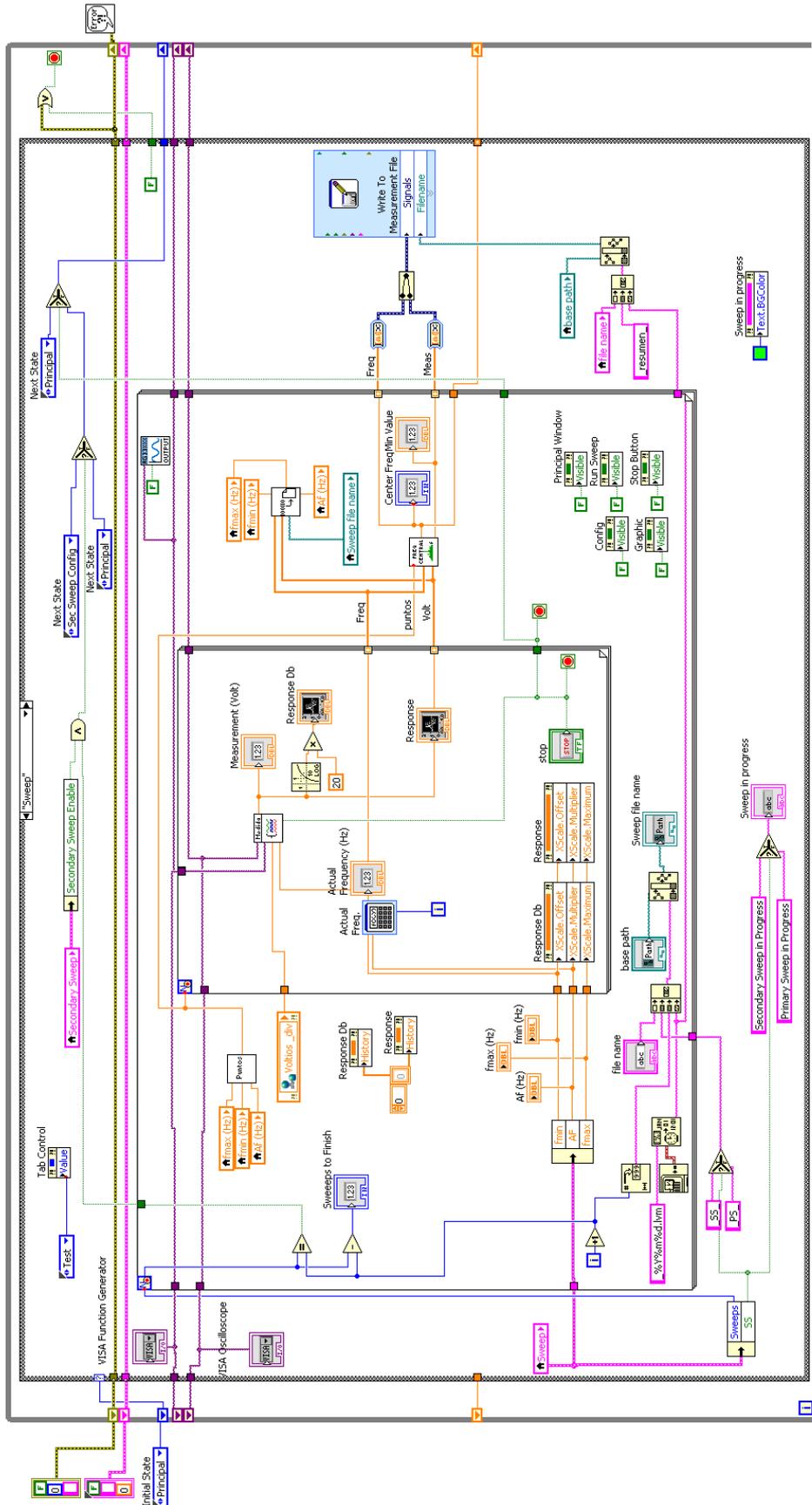


Ilustración 65 Etapa Sweep

En el caso de que haya programado un barrido secundario, esta etapa evoluciona a la etapa *Sec Sweep Conf*, mientras que si sólo hay un barrido secundario configurado, una vez finalizado el principal, evoluciona a la etapa *Principal*.

3.5.7 Etapa Sec Sweep Conf

En esta etapa se configuran los datos para que se realice el barrido secundario en la etapa *Sweep*. Como se mencionó anteriormente, solo se ejecuta si está programado un barrido secundario.

La programación de esta etapa se muestra en la Ilustración 66.

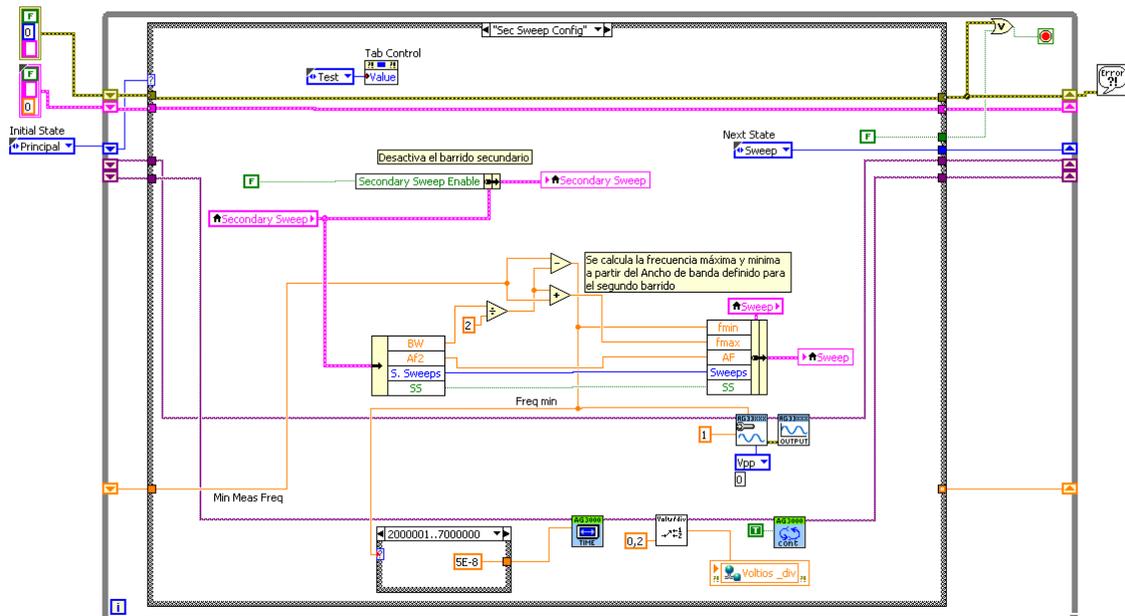


Ilustración 66 Etapa Sec Sweep Conf

En ella, se calculan los datos de frecuencia mínima, frecuencia máxima e incremento para realizar el barrido. Una vez obtenidos estos datos, se ajusta el generador de funciones a la frecuencia mínima para el barrido, se ajusta la base de tiempos del osciloscopio en función de la nueva frecuencia y se calcula el valor adecuado del amplificador vertical del mismo. Una vez realizadas estas tareas, se ejecutará la etapa “Sweep”.

3.5.8 Etapa Graphic

Mediante esta etapa se dota a la aplicación de la funcionalidad que permite realizar una visualización de cualquiera de los barridos realizados y almacenados.

La programación asociada a esta etapa se muestra en la Ilustración 67. En ella se utiliza el subvi programado, Read File, descrito anteriormente, que permite que se muestren los datos en los paneles gráficos correspondientes. Se calcula también el valor de la frecuencia a la que se obtiene el valor mínimo medido.

En este caso se utiliza la pestaña Graphic del panel Frontal para mostrar los resultados.

Una vez mostrados los datos, la etapa evoluciona de nuevo al estado “Wait for Event”, permitiendo que se cargue un fichero nuevo, se configure un nuevo barrido, o se retorne a la pantalla principal de la aplicación.

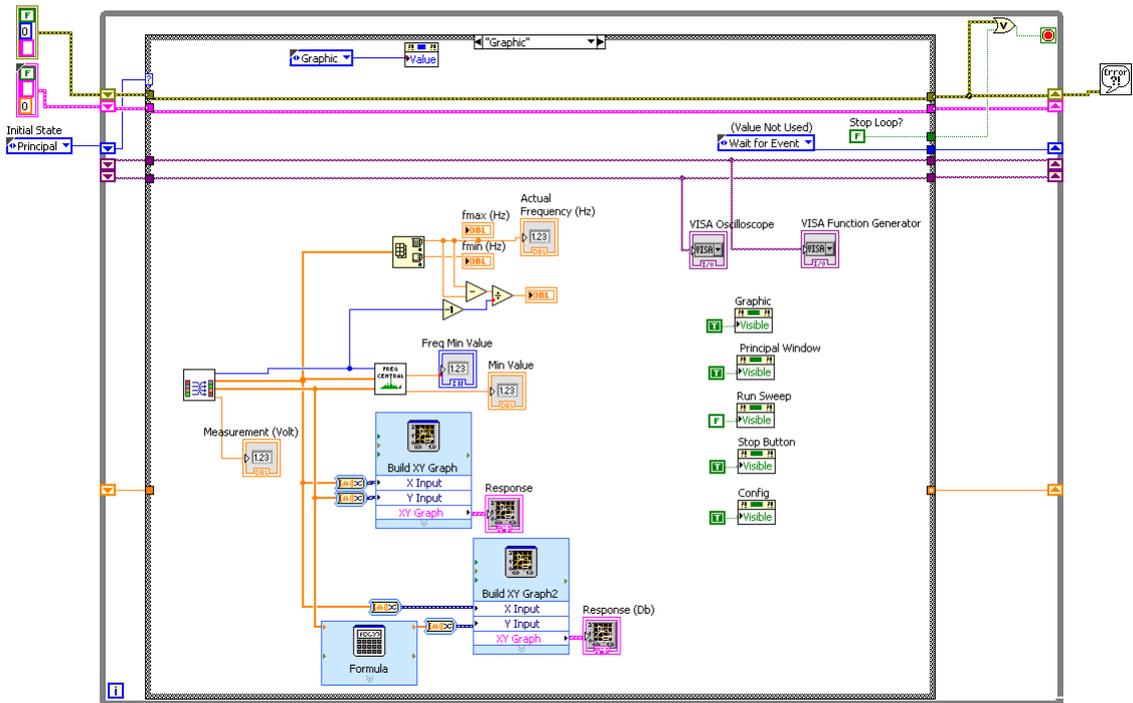


Ilustración 67 Etapa Graphic

Capítulo 7

Resultados

1 Calibración de las bobinas

Con el fin de obtener valores reales de las bobinas que se emplearán en la obtención de los parámetros del modelo, se calibran de acuerdo al método explicado los diferentes componentes que se han tenido en cuenta. Se han escogido valores que abarcan un rango importante de frecuencias que permitirá a su vez una mejor generalización. Tal y como se ha mencionado es necesario este paso, debido a la tolerancia que presenta este tipo de componentes. La relación de subapartados que se presentan a continuación atiende a las pruebas realizadas a cada una de las bobinas con el fin de hallar su valor real.

1.1 Bobina de 20 micro henrios (μH)

En este apartado se muestran los resultados de la calibración para la bobina de 20 μH . Al igual que para el caso anterior, son 4 los condensadores calibrados que se han empleado en dicha tarea. Las capacidades escogidas son 10pF, 15pF, 20pF y 22pF.

En la Tabla 1 se muestran los resultados logrados para los experimentos llevados a cabo sobre la bobina de 20 μH con condensador de precisión de 10 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,00E-11	11144804	20,39
2	1,00E-11	11143713	20,40
3	1,00E-11	11227572	20,09
4	1,00E-11	11188619	20,23
5	1,00E-11	11169055	20,31
6	1,00E-11	11142977	20,40
7	1,00E-11	11172354	20,29
8	1,00E-11	11147237	20,38
9	1,00E-11	11189510	20,23
10	1,00E-11	11208946	20,16
11	1,00E-11	11159636	20,34
12	1,00E-11	11232412	20,08
13	1,00E-11	11203987	20,18
14	1,00E-11	11169904	20,30
15	1,00E-11	11249785	20,01
16	1,00E-11	11227974	20,09
17	1,00E-11	11219147	20,12
18	1,00E-11	11159805	20,34
19	1,00E-11	11249516	20,02
20	1,00E-11	11187262	20,24
21	1,00E-11	11221333	20,12
22	1,00E-11	11172149	20,29
23	1,00E-11	11153037	20,36
24	1,00E-11	11205495	20,17
25	1,00E-11	11191715	20,22
26	1,00E-11	11153881	20,36

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
27	1,00E-11	11167160	20,31
28	1,00E-11	11218653	20,13
29	1,00E-11	11147559	20,38
30	1,00E-11	11167033	20,31
31	1,00E-11	11236527	20,06
32	1,00E-11	11229085	20,09
33	1,00E-11	11192920	20,22
34	1,00E-11	11197724	20,20
35	1,00E-11	11180437	20,26
36	1,00E-11	11160575	20,34
37	1,00E-11	11231389	20,08
38	1,00E-11	11239031	20,05
39	1,00E-11	11219694	20,12
40	1,00E-11	11180611	20,26
41	1,00E-11	11142659	20,40
42	1,00E-11	11178791	20,27
43	1,00E-11	11233572	20,07
44	1,00E-11	11162417	20,33
45	1,00E-11	11191366	20,22
46	1,00E-11	11240473	20,05
47	1,00E-11	11145058	20,39
48	1,00E-11	11215349	20,14
49	1,00E-11	11225558	20,10
50	1,00E-11	11237812	20,06
Average	1,00E-11	11192666	20,22

Tabla 1. Calibración de bobina de $20\mu\text{H}$ con condensador de 10pF

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos para el caso del condensador de precisión de 15 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,50E-11	9125657	20,28
2	1,50E-11	9149515	20,17
3	1,50E-11	9131982	20,25
4	1,50E-11	9096663	20,41
5	1,50E-11	9182685	20,03
6	1,50E-11	9102798	20,38
7	1,50E-11	9137180	20,23
8	1,50E-11	9185436	20,01
9	1,50E-11	9163593	20,11
10	1,50E-11	9109198	20,35
11	1,50E-11	9113342	20,33
12	1,50E-11	9126456	20,27

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
13	1,50E-11	9139497	20,22
14	1,50E-11	9175037	20,06
15	1,50E-11	9131133	20,25
16	1,50E-11	9184565	20,02
17	1,50E-11	9125524	20,28
18	1,50E-11	9129658	20,26
19	1,50E-11	9140323	20,21
20	1,50E-11	9175839	20,06
21	1,50E-11	9128158	20,27
22	1,50E-11	9175096	20,06
23	1,50E-11	9181648	20,03
24	1,50E-11	9179826	20,04
25	1,50E-11	9108518	20,35
26	1,50E-11	9146462	20,19
27	1,50E-11	9174532	20,06
28	1,50E-11	9167108	20,09
29	1,50E-11	9162495	20,12
30	1,50E-11	9117193	20,32
31	1,50E-11	9150476	20,17
32	1,50E-11	9099524	20,39
33	1,50E-11	9163250	20,11
34	1,50E-11	9101147	20,39
35	1,50E-11	9134640	20,24
36	1,50E-11	9185036	20,02
37	1,50E-11	9110490	20,35
38	1,50E-11	9096320	20,41
39	1,50E-11	9182781	20,03
40	1,50E-11	9180006	20,04
41	1,50E-11	9186663	20,01
42	1,50E-11	9104272	20,37
43	1,50E-11	9159265	20,13
44	1,50E-11	9157922	20,14
45	1,50E-11	9126851	20,27
46	1,50E-11	9120736	20,30
47	1,50E-11	9160067	20,13
48	1,50E-11	9129310	20,26
49	1,50E-11	9127871	20,27
50	1,50E-11	9166599	20,10
Average	1,50E-11	9144207	20,20

Tabla 2. Calibración de bobina de $20\mu\text{H}$ con condensador de 15pF

En la Tabla 3 se muestran los resultados logrados para el caso del condensador de precisión de 20 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,00E-11	7942326	20,08
2	2,00E-11	7924699	20,17
3	2,00E-11	7890649	20,34
4	2,00E-11	7880872	20,39
5	2,00E-11	7936204	20,11
6	2,00E-11	7896700	20,31
7	2,00E-11	7878585	20,40
8	2,00E-11	7951622	20,03
9	2,00E-11	7937894	20,10
10	2,00E-11	7946453	20,06
11	2,00E-11	7912946	20,23
12	2,00E-11	7935702	20,11
13	2,00E-11	7935483	20,11
14	2,00E-11	7902553	20,28
15	2,00E-11	7888232	20,35
16	2,00E-11	7877833	20,41
17	2,00E-11	7891673	20,34
18	2,00E-11	7931889	20,13
19	2,00E-11	7930542	20,14
20	2,00E-11	7922944	20,18
21	2,00E-11	7952097	20,03
22	2,00E-11	7953540	20,02
23	2,00E-11	7945596	20,06
24	2,00E-11	7932435	20,13
25	2,00E-11	7954530	20,02
26	2,00E-11	7936435	20,11
27	2,00E-11	7947807	20,05
28	2,00E-11	7911297	20,24
29	2,00E-11	7923082	20,18
30	2,00E-11	7924409	20,17
31	2,00E-11	7913639	20,22
32	2,00E-11	7894445	20,32
33	2,00E-11	7928615	20,15
34	2,00E-11	7882758	20,38
35	2,00E-11	7935484	20,11
36	2,00E-11	7931309	20,13
37	2,00E-11	7946144	20,06
38	2,00E-11	7914809	20,22
39	2,00E-11	7903880	20,27
40	2,00E-11	7922988	20,18
41	2,00E-11	7916536	20,21
42	2,00E-11	7953733	20,02
43	2,00E-11	7908432	20,25

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
44	2,00E-11	7913405	20,22
45	2,00E-11	7883986	20,38
46	2,00E-11	7930133	20,14
47	2,00E-11	7912797	20,23
48	2,00E-11	7934068	20,12
49	2,00E-11	7886799	20,36
50	2,00E-11	7950895	20,03
Average	2,00E-11	7921238	20,19

Tabla 3. Calibración de bobina de $20\mu\text{H}$ con condensador de 20pF

Los resultados de la Tabla 4 son los conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 22 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,20E-11	7564701	20,12
2	2,20E-11	7541921	20,24
3	2,20E-11	7545830	20,22
4	2,20E-11	7517758	20,37
5	2,20E-11	7573590	20,07
6	2,20E-11	7536236	20,27
7	2,20E-11	7526104	20,33
8	2,20E-11	7564879	20,12
9	2,20E-11	7539937	20,25
10	2,20E-11	7565118	20,12
11	2,20E-11	7581715	20,03
12	2,20E-11	7570280	20,09
13	2,20E-11	7529856	20,31
14	2,20E-11	7524261	20,34
15	2,20E-11	7556266	20,17
16	2,20E-11	7585490	20,01
17	2,20E-11	7545813	20,22
18	2,20E-11	7538028	20,26
19	2,20E-11	7515426	20,38
20	2,20E-11	7535720	20,28
21	2,20E-11	7521770	20,35
22	2,20E-11	7516983	20,38
23	2,20E-11	7521760	20,35
24	2,20E-11	7546000	20,22
25	2,20E-11	7528960	20,31
26	2,20E-11	7570928	20,09
27	2,20E-11	7564148	20,12
28	2,20E-11	7546819	20,22
29	2,20E-11	7523442	20,34

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
30	2,20E-11	7529136	20,31
31	2,20E-11	7533017	20,29
32	2,20E-11	7567075	20,11
33	2,20E-11	7510491	20,41
34	2,20E-11	7556091	20,17
35	2,20E-11	7537291	20,27
36	2,20E-11	7571124	20,09
37	2,20E-11	7550919	20,19
38	2,20E-11	7576018	20,06
39	2,20E-11	7539848	20,25
40	2,20E-11	7526034	20,33
41	2,20E-11	7530289	20,30
42	2,20E-11	7514297	20,39
43	2,20E-11	7514336	20,39
44	2,20E-11	7580235	20,04
45	2,20E-11	7576632	20,06
46	2,20E-11	7565311	20,12
47	2,20E-11	7546412	20,22
48	2,20E-11	7561254	20,14
49	2,20E-11	7574050	20,07
50	2,20E-11	7527583	20,32
Average	2,20E-11	7545744	20,22

Tabla 4. Calibración de bobina de $20\mu\text{H}$ con condensador de 22pF

1.2 Bobina de 40 micro henrios (μH)

Es la bobina de $40\mu\text{H}$ la que se calibra en este apartado. Al igual que para el caso anterior, son 4 los condensadores calibrados que se han empleado en dicha tarea. Las capacidades escogidas son 10pF , 15pF , 20pF y 22pF .

La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos para los experimentos realizados sobre la bobina de $40\mu\text{H}$ con condensador de precisión de 10pF .

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,00E-11	7924145	40,34
2	1,00E-11	7897723	40,61
3	1,00E-11	7893577	40,65
4	1,00E-11	7895179	40,64
5	1,00E-11	7859514	41,01
6	1,00E-11	7874105	40,85
7	1,00E-11	7918949	40,39
8	1,00E-11	7887960	40,71
9	1,00E-11	7894198	40,65
10	1,00E-11	7857115	41,03

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
11	1,00E-11	7905434	40,53
12	1,00E-11	7917339	40,41
13	1,00E-11	7925315	40,33
14	1,00E-11	7855126	41,05
15	1,00E-11	7875066	40,84
16	1,00E-11	7853404	41,07
17	1,00E-11	7909004	40,49
18	1,00E-11	7858901	41,01
19	1,00E-11	7918817	40,39
20	1,00E-11	7868275	40,91
21	1,00E-11	7875858	40,84
22	1,00E-11	7902234	40,56
23	1,00E-11	7873961	40,86
24	1,00E-11	7913710	40,45
25	1,00E-11	7911395	40,47
26	1,00E-11	7877172	40,82
27	1,00E-11	7861801	40,98
28	1,00E-11	7861577	40,98
29	1,00E-11	7876469	40,83
30	1,00E-11	7850569	41,10
31	1,00E-11	7867560	40,92
32	1,00E-11	7885890	40,73
33	1,00E-11	7879063	40,80
34	1,00E-11	7868639	40,91
35	1,00E-11	7925639	40,32
36	1,00E-11	7854911	41,05
37	1,00E-11	7854396	41,06
38	1,00E-11	7871671	40,88
39	1,00E-11	7914007	40,44
40	1,00E-11	7902992	40,56
41	1,00E-11	7889974	40,69
42	1,00E-11	7925652	40,32
43	1,00E-11	7883096	40,76
44	1,00E-11	7921580	40,37
45	1,00E-11	7864288	40,96
46	1,00E-11	7908823	40,50
47	1,00E-11	7920153	40,38
48	1,00E-11	7879063	40,80
49	1,00E-11	7868480	40,91
50	1,00E-11	7852129	41,08
Average	1,00E-11	7886638	40,73

Tabla 5. Calibración de bobina de $20\mu\text{H}$ con condensador de 10pF

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos para el caso del condensador de precisión de 15 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,50E-11	6437487	40,75
2	1,50E-11	6409964	41,10
3	1,50E-11	6455775	40,52
4	1,50E-11	6443887	40,67
5	1,50E-11	6414767	41,04
6	1,50E-11	6451140	40,58
7	1,50E-11	6460422	40,46
8	1,50E-11	6439988	40,72
9	1,50E-11	6415561	41,03
10	1,50E-11	6438722	40,73
11	1,50E-11	6468417	40,36
12	1,50E-11	6445260	40,65
13	1,50E-11	6424568	40,91
14	1,50E-11	6408893	41,11
15	1,50E-11	6424212	40,92
16	1,50E-11	6444659	40,66
17	1,50E-11	6466161	40,39
18	1,50E-11	6429514	40,85
19	1,50E-11	6423003	40,93
20	1,50E-11	6460307	40,46
21	1,50E-11	6436486	40,76
22	1,50E-11	6417733	41,00
23	1,50E-11	6431985	40,82
24	1,50E-11	6462536	40,43
25	1,50E-11	6463526	40,42
26	1,50E-11	6416039	41,02
27	1,50E-11	6447949	40,62
28	1,50E-11	6460267	40,46
29	1,50E-11	6416416	41,02
30	1,50E-11	6428859	40,86
31	1,50E-11	6472336	40,31
32	1,50E-11	6455431	40,52
33	1,50E-11	6410111	41,10
34	1,50E-11	6426090	40,89
35	1,50E-11	6444842	40,66
36	1,50E-11	6420122	40,97
37	1,50E-11	6444048	40,67
38	1,50E-11	6427790	40,87
39	1,50E-11	6433779	40,80
40	1,50E-11	6421257	40,96

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
41	1,50E-11	6409327	41,11
42	1,50E-11	6448451	40,61
43	1,50E-11	6409107	41,11
44	1,50E-11	6428506	40,86
45	1,50E-11	6443440	40,67
46	1,50E-11	6468685	40,36
47	1,50E-11	6434216	40,79
48	1,50E-11	6438749	40,73
49	1,50E-11	6452962	40,55
50	1,50E-11	6425043	40,91
Average	1,50E-11	6437176	40,75

Tabla 6. Calibración de bobina de 20 μH con condensador de 15pF

En la Tabla 7 se muestran los resultados logrados para el caso del condensador de precisión de 20 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,00E-11	5572038	40,79
2	2,00E-11	5562984	40,93
3	2,00E-11	5589029	40,55
4	2,00E-11	5596615	40,44
5	2,00E-11	5596981	40,43
6	2,00E-11	5568606	40,84
7	2,00E-11	5579556	40,68
8	2,00E-11	5570298	40,82
9	2,00E-11	5556009	41,03
10	2,00E-11	5574601	40,76
11	2,00E-11	5602974	40,34
12	2,00E-11	5572604	40,78
13	2,00E-11	5570420	40,82
14	2,00E-11	5555662	41,03
15	2,00E-11	5591823	40,50
16	2,00E-11	5555813	41,03
17	2,00E-11	5583915	40,62
18	2,00E-11	5567119	40,86
19	2,00E-11	5561777	40,94
20	2,00E-11	5586028	40,59
21	2,00E-11	5593054	40,49
22	2,00E-11	5597045	40,43
23	2,00E-11	5581625	40,65
24	2,00E-11	5600659	40,38
25	2,00E-11	5594157	40,47
26	2,00E-11	5565863	40,88

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
27	2,00E-11	5564629	40,90
28	2,00E-11	5597765	40,42
29	2,00E-11	5600330	40,38
30	2,00E-11	5574615	40,75
31	2,00E-11	5556063	41,03
32	2,00E-11	5602670	40,35
33	2,00E-11	5553935	41,06
34	2,00E-11	5586206	40,59
35	2,00E-11	5586055	40,59
36	2,00E-11	5565519	40,89
37	2,00E-11	5570918	40,81
38	2,00E-11	5576511	40,73
39	2,00E-11	5564460	40,90
40	2,00E-11	5573464	40,77
41	2,00E-11	5573305	40,77
42	2,00E-11	5559187	40,98
43	2,00E-11	5602124	40,36
44	2,00E-11	5594121	40,47
45	2,00E-11	5596707	40,43
46	2,00E-11	5579776	40,68
47	2,00E-11	5570400	40,82
48	2,00E-11	5592041	40,50
49	2,00E-11	5570349	40,82
50	2,00E-11	5560829	40,96
Average	2,00E-11	5578385	40,70

Tabla 7. Calibración de bobina de $20\mu\text{H}$ con condensador de 20pF

En la Tabla 8 se muestran los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 22 pF .

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,20E-11	5330913	40,51
2	2,20E-11	5296576	41,04
3	2,20E-11	5339714	40,38
4	2,20E-11	5324720	40,61
5	2,20E-11	5317493	40,72
6	2,20E-11	5302022	40,96
7	2,20E-11	5311544	40,81
8	2,20E-11	5296605	41,04
9	2,20E-11	5314805	40,76
10	2,20E-11	5316787	40,73
11	2,20E-11	5298272	41,02
12	2,20E-11	5313036	40,79

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
13	2,20E-11	5307427	40,87
14	2,20E-11	5342965	40,33
15	2,20E-11	5338559	40,40
16	2,20E-11	5309910	40,84
17	2,20E-11	5334004	40,47
18	2,20E-11	5297925	41,02
19	2,20E-11	5310497	40,83
20	2,20E-11	5308267	40,86
21	2,20E-11	5300386	40,98
22	2,20E-11	5337674	40,41
23	2,20E-11	5334807	40,46
24	2,20E-11	5336863	40,42
25	2,20E-11	5297264	41,03
26	2,20E-11	5310997	40,82
27	2,20E-11	5304221	40,92
28	2,20E-11	5338418	40,40
29	2,20E-11	5322230	40,65
30	2,20E-11	5322151	40,65
31	2,20E-11	5327183	40,57
32	2,20E-11	5308494	40,86
33	2,20E-11	5328374	40,55
34	2,20E-11	5293387	41,09
35	2,20E-11	5306308	40,89
36	2,20E-11	5344147	40,31
37	2,20E-11	5320705	40,67
38	2,20E-11	5307801	40,87
39	2,20E-11	5326225	40,59
40	2,20E-11	5334485	40,46
41	2,20E-11	5320610	40,67
42	2,20E-11	5337292	40,42
43	2,20E-11	5303271	40,94
44	2,20E-11	5337160	40,42
45	2,20E-11	5318283	40,71
46	2,20E-11	5296810	41,04
47	2,20E-11	5333662	40,47
48	2,20E-11	5338378	40,40
49	2,20E-11	5312912	40,79
50	2,20E-11	5313690	40,78
Average	2,20E-11	5318525	40,70

Tabla 8. Calibración de bobina de $20\mu\text{H}$ con condensador de 22pF

1.3 Bobina de 56 micro henrios (μH)

Se llevan a cabo en este apartado las pruebas para la bobina de 56 μH . Los condensadores calibrados que se han empleado tienen capacidades de 10pF, 15pF, 20pF y 22pF.

La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos para los experimentos realizados sobre la bobina de 40 μH con condensador de precisión de 10 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,00E-11	6602436	58,11
2	1,00E-11	6605959	58,05
3	1,00E-11	6613246	57,92
4	1,00E-11	6606012	58,04
5	1,00E-11	6592557	58,28
6	1,00E-11	6616269	57,86
7	1,00E-11	6592191	58,29
8	1,00E-11	6626819	57,68
9	1,00E-11	6616176	57,87
10	1,00E-11	6621278	57,78
11	1,00E-11	6613238	57,92
12	1,00E-11	6619702	57,80
13	1,00E-11	6620092	57,80
14	1,00E-11	6609018	57,99
15	1,00E-11	6617113	57,85
16	1,00E-11	6620786	57,79
17	1,00E-11	6635174	57,54
18	1,00E-11	6611432	57,95
19	1,00E-11	6640606	57,44
20	1,00E-11	6626756	57,68
21	1,00E-11	6655801	57,18
22	1,00E-11	6648432	57,31
23	1,00E-11	6632727	57,58
24	1,00E-11	6650064	57,28
25	1,00E-11	6648016	57,31
26	1,00E-11	6625257	57,71
27	1,00E-11	6636090	57,52
28	1,00E-11	6641574	57,42
29	1,00E-11	6652048	57,24
30	1,00E-11	6620065	57,80
31	1,00E-11	6644955	57,37
32	1,00E-11	6642478	57,41
33	1,00E-11	6601228	58,13
34	1,00E-11	6622854	57,75
35	1,00E-11	6642360	57,41

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
36	1,00E-11	6602559	58,11
37	1,00E-11	6636443	57,51
38	1,00E-11	6653453	57,22
39	1,00E-11	6647613	57,32
40	1,00E-11	6639554	57,46
41	1,00E-11	6625440	57,70
42	1,00E-11	6638045	57,49
43	1,00E-11	6657102	57,16
44	1,00E-11	6611484	57,95
45	1,00E-11	6599698	58,16
46	1,00E-11	6642879	57,40
47	1,00E-11	6653812	57,21
48	1,00E-11	6599344	58,16
49	1,00E-11	6605181	58,06
50	1,00E-11	6656733	57,16
Average	1,00E-11	6626803	57,68

Tabla 9. Calibración de bobina de 56 μH con condensador de 10pF

En la Tabla 10 se muestran los resultados logrados para el caso del condensador de precisión de 15 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,50E-11	5393047	58,06
2	1,50E-11	5423196	57,42
3	1,50E-11	5409949	57,70
4	1,50E-11	5400404	57,90
5	1,50E-11	5435385	57,16
6	1,50E-11	5387937	58,17
7	1,50E-11	5423213	57,42
8	1,50E-11	5406592	57,77
9	1,50E-11	5433810	57,19
10	1,50E-11	5399082	57,93
11	1,50E-11	5416653	57,56
12	1,50E-11	5394444	58,03
13	1,50E-11	5393292	58,06
14	1,50E-11	5419440	57,50
15	1,50E-11	5406921	57,76
16	1,50E-11	5435783	57,15
17	1,50E-11	5403298	57,84
18	1,50E-11	5407156	57,76
19	1,50E-11	5392659	58,07
20	1,50E-11	5403902	57,83
21	1,50E-11	5425441	57,37

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
22	1,50E-11	5428890	57,30
23	1,50E-11	5421662	57,45
24	1,50E-11	5390438	58,12
25	1,50E-11	5387503	58,18
26	1,50E-11	5426786	57,34
27	1,50E-11	5430783	57,26
28	1,50E-11	5406781	57,77
29	1,50E-11	5408461	57,73
30	1,50E-11	5390486	58,12
31	1,50E-11	5400895	57,89
32	1,50E-11	5406945	57,76
33	1,50E-11	5383101	58,28
34	1,50E-11	5412201	57,65
35	1,50E-11	5435324	57,16
36	1,50E-11	5405637	57,79
37	1,50E-11	5400189	57,91
38	1,50E-11	5388738	58,15
39	1,50E-11	5386872	58,19
40	1,50E-11	5428973	57,29
41	1,50E-11	5423227	57,42
42	1,50E-11	5408692	57,73
43	1,50E-11	5421492	57,45
44	1,50E-11	5414292	57,61
45	1,50E-11	5413513	57,62
46	1,50E-11	5395463	58,01
47	1,50E-11	5432553	57,22
48	1,50E-11	5426143	57,35
49	1,50E-11	5416485	57,56
50	1,50E-11	5401504	57,88
Average	1,50E-11	5410113	57,70

Tabla 10. Calibración de bobina de $56\mu\text{H}$ con condensador de 15pF

En la Tabla 11 se muestran los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 20 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,00E-11	4681094	57,80
2	2,00E-11	4684253	57,72
3	2,00E-11	4706722	57,17
4	2,00E-11	4703441	57,25
5	2,00E-11	4680386	57,82
6	2,00E-11	4671041	58,05
7	2,00E-11	4671829	58,03

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
8	2,00E-11	4673927	57,98
9	2,00E-11	4672940	58,00
10	2,00E-11	4687927	57,63
11	2,00E-11	4676047	57,92
12	2,00E-11	4693642	57,49
13	2,00E-11	4674431	57,96
14	2,00E-11	4669387	58,09
15	2,00E-11	4672248	58,02
16	2,00E-11	4683612	57,74
17	2,00E-11	4664557	58,21
18	2,00E-11	4675417	57,94
19	2,00E-11	4664455	58,21
20	2,00E-11	4704252	57,23
21	2,00E-11	4697709	57,39
22	2,00E-11	4674458	57,96
23	2,00E-11	4681663	57,78
24	2,00E-11	4679516	57,84
25	2,00E-11	4675301	57,94
26	2,00E-11	4663548	58,23
27	2,00E-11	4692329	57,52
28	2,00E-11	4662125	58,27
29	2,00E-11	4672559	58,01
30	2,00E-11	4666228	58,17
31	2,00E-11	4671551	58,03
32	2,00E-11	4683543	57,74
33	2,00E-11	4697133	57,40
34	2,00E-11	4691370	57,55
35	2,00E-11	4692255	57,52
36	2,00E-11	4673567	57,98
37	2,00E-11	4672999	58,00
38	2,00E-11	4693508	57,49
39	2,00E-11	4685652	57,69
40	2,00E-11	4680065	57,82
41	2,00E-11	4706975	57,16
42	2,00E-11	4677823	57,88
43	2,00E-11	4684366	57,72
44	2,00E-11	4668850	58,10
45	2,00E-11	4700301	57,33
46	2,00E-11	4694484	57,47
47	2,00E-11	4705552	57,20
48	2,00E-11	4702782	57,27
49	2,00E-11	4663982	58,22
50	2,00E-11	4684780	57,71

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
Average	2,00E-11	4682172	57,77

Tabla 11. Calibración de bobina de $56\mu\text{H}$ con condensador de 20pF

La Tabla 12 muestra los resultados logrados para el caso del condensador de precisión de 22 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,20E-11	4474533	57,51
2	2,20E-11	4480367	57,36
3	2,20E-11	4481070	57,34
4	2,20E-11	4478703	57,40
5	2,20E-11	4456528	57,97
6	2,20E-11	4468263	57,67
7	2,20E-11	4449520	58,16
8	2,20E-11	4487362	57,18
9	2,20E-11	4463374	57,80
10	2,20E-11	4482702	57,30
11	2,20E-11	4449562	58,15
12	2,20E-11	4484023	57,26
13	2,20E-11	4460779	57,86
14	2,20E-11	4447138	58,22
15	2,20E-11	4448226	58,19
16	2,20E-11	4446898	58,22
17	2,20E-11	4473312	57,54
18	2,20E-11	4468296	57,67
19	2,20E-11	4450143	58,14
20	2,20E-11	4482138	57,31
21	2,20E-11	4483015	57,29
22	2,20E-11	4466126	57,72
23	2,20E-11	4482237	57,31
24	2,20E-11	4461074	57,85
25	2,20E-11	4460708	57,86
26	2,20E-11	4480704	57,35
27	2,20E-11	4462945	57,81
28	2,20E-11	4467010	57,70
29	2,20E-11	4447444	58,21
30	2,20E-11	4481819	57,32
31	2,20E-11	4444955	58,28
32	2,20E-11	4445928	58,25
33	2,20E-11	4474182	57,52
34	2,20E-11	4480619	57,35
35	2,20E-11	4475186	57,49
36	2,20E-11	4449190	58,16

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
37	2,20E-11	4479464	57,38
38	2,20E-11	4463556	57,79
39	2,20E-11	4482708	57,30
40	2,20E-11	4452367	58,08
41	2,20E-11	4459726	57,89
42	2,20E-11	4473282	57,54
43	2,20E-11	4477134	57,44
44	2,20E-11	4453722	58,05
45	2,20E-11	4452755	58,07
46	2,20E-11	4459774	57,89
47	2,20E-11	4464667	57,76
48	2,20E-11	4452416	58,08
49	2,20E-11	4460065	57,88
50	2,20E-11	4465208	57,75
Average	2,20E-11	4465858	57,73

Tabla 12. Calibración de bobina de $56\mu\text{H}$ con condensador de 22pF

1.4 Bobina de 100 micro henrios (μH) sin núcleo

Este apartado muestra los resultados de la calibración llevada a cabo para la bobina de 100 micro henrios sin núcleo. Se emplean nuevamente las capacidades de 10pF , 15pF , 20pF y 22pF .

En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos para las pruebas realizadas a la bobina de $100\mu\text{H}$ sin núcleo para un condensador de precisión de 10 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,00E-11	4914118	104,89
2	1,00E-11	4940340	103,78
3	1,00E-11	4934786	104,02
4	1,00E-11	4932792	104,10
5	1,00E-11	4922342	104,54
6	1,00E-11	4931983	104,14
7	1,00E-11	4928300	104,29
8	1,00E-11	4938235	103,87
9	1,00E-11	4912877	104,95
10	1,00E-11	4903322	105,36
11	1,00E-11	4932904	104,10
12	1,00E-11	4911451	105,01
13	1,00E-11	4917733	104,74
14	1,00E-11	4949999	103,38
15	1,00E-11	4933847	104,06
16	1,00E-11	4934761	104,02
17	1,00E-11	4924219	104,46
18	1,00E-11	4911578	105,00

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
19	1,00E-11	4917428	104,75
20	1,00E-11	4948530	103,44
21	1,00E-11	4944048	103,63
22	1,00E-11	4940336	103,78
23	1,00E-11	4939356	103,82
24	1,00E-11	4919751	104,65
25	1,00E-11	4911283	105,01
26	1,00E-11	4939621	103,81
27	1,00E-11	4913137	104,94
28	1,00E-11	4941520	103,73
29	1,00E-11	4919184	104,68
30	1,00E-11	4920155	104,64
31	1,00E-11	4916788	104,78
32	1,00E-11	4909167	105,11
33	1,00E-11	4906754	105,21
34	1,00E-11	4904274	105,32
35	1,00E-11	4951594	103,31
36	1,00E-11	4909943	105,07
37	1,00E-11	4908206	105,15
38	1,00E-11	4939682	103,81
39	1,00E-11	4927731	104,31
40	1,00E-11	4943893	103,63
41	1,00E-11	4910554	105,05
42	1,00E-11	4910827	105,03
43	1,00E-11	4905257	105,27
44	1,00E-11	4917558	104,75
45	1,00E-11	4925917	104,39
46	1,00E-11	4927001	104,35
47	1,00E-11	4918161	104,72
48	1,00E-11	4930424	104,20
49	1,00E-11	4942913	103,68
50	1,00E-11	4910365	105,05
Average	1,00E-11	4924939	104,44

Tabla 13. Calibración de bobina de $100\mu\text{H}$ sin núcleo para condensador de 10pF

En la Tabla 14 se muestran los resultados logrados para el caso del condensador de precisión de 15 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,50E-11	4026915	104,14
2	1,50E-11	4016734	104,67
3	1,50E-11	4024344	104,27
4	1,50E-11	4021046	104,44

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
5	1,50E-11	4030009	103,98
6	1,50E-11	4028053	104,08
7	1,50E-11	4004838	105,29
8	1,50E-11	4014339	104,79
9	1,50E-11	4025047	104,23
10	1,50E-11	4027015	104,13
11	1,50E-11	4014895	104,76
12	1,50E-11	4013721	104,82
13	1,50E-11	4023495	104,31
14	1,50E-11	4031065	103,92
15	1,50E-11	4038339	103,55
16	1,50E-11	4042231	103,35
17	1,50E-11	4035332	103,70
18	1,50E-11	4021415	104,42
19	1,50E-11	4022841	104,35
20	1,50E-11	4016981	104,65
21	1,50E-11	4004653	105,30
22	1,50E-11	4040856	103,42
23	1,50E-11	4031640	103,89
24	1,50E-11	4032077	103,87
25	1,50E-11	4008297	105,11
26	1,50E-11	4012508	104,89
27	1,50E-11	4024950	104,24
28	1,50E-11	4025432	104,21
29	1,50E-11	4021382	104,42
30	1,50E-11	4026527	104,16
31	1,50E-11	4004110	105,33
32	1,50E-11	4004495	105,31
33	1,50E-11	4012534	104,88
34	1,50E-11	4038596	103,54
35	1,50E-11	4025840	104,19
36	1,50E-11	4013629	104,83
37	1,50E-11	4021178	104,43
38	1,50E-11	4023787	104,30
39	1,50E-11	4009183	105,06
40	1,50E-11	4007110	105,17
41	1,50E-11	4029385	104,01
42	1,50E-11	4041775	103,37
43	1,50E-11	4017443	104,63
44	1,50E-11	4020995	104,44
45	1,50E-11	4008672	105,09
46	1,50E-11	4013294	104,84
47	1,50E-11	4036701	103,63

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
48	1,50E-11	4004241	105,32
49	1,50E-11	4028840	104,04
50	1,50E-11	4030985	103,93
Average	1,50E-11	4021995	104,39

Tabla 14. Calibración de bobina de $100\mu\text{H}$ sin núcleo para condensador de 15pF

La Tabla 15 muestra los resultados logrados para el caso del condensador de precisión de 20 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,00E-11	3487526	104,13
2	2,00E-11	3467374	105,34
3	2,00E-11	3481879	104,47
4	2,00E-11	3479234	104,63
5	2,00E-11	3481968	104,46
6	2,00E-11	3480019	104,58
7	2,00E-11	3467140	105,36
8	2,00E-11	3500032	103,39
9	2,00E-11	3468634	105,27
10	2,00E-11	3476276	104,80
11	2,00E-11	3486884	104,17
12	2,00E-11	3484383	104,32
13	2,00E-11	3485403	104,26
14	2,00E-11	3500834	103,34
15	2,00E-11	3476715	104,78
16	2,00E-11	3489634	104,00
17	2,00E-11	3487573	104,13
18	2,00E-11	3479916	104,59
19	2,00E-11	3482558	104,43
20	2,00E-11	3483645	104,36
21	2,00E-11	3494634	103,71
22	2,00E-11	3468888	105,25
23	2,00E-11	3471065	105,12
24	2,00E-11	3469757	105,20
25	2,00E-11	3468831	105,26
26	2,00E-11	3474024	104,94
27	2,00E-11	3490630	103,94
28	2,00E-11	3475812	104,83
29	2,00E-11	3469713	105,20
30	2,00E-11	3478633	104,66
31	2,00E-11	3477641	104,72
32	2,00E-11	3468777	105,26
33	2,00E-11	3474546	104,91

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
34	2,00E-11	3481087	104,52
35	2,00E-11	3469367	105,22
36	2,00E-11	3477181	104,75
37	2,00E-11	3488509	104,07
38	2,00E-11	3500925	103,33
39	2,00E-11	3494051	103,74
40	2,00E-11	3496990	103,57
41	2,00E-11	3492597	103,83
42	2,00E-11	3480198	104,57
43	2,00E-11	3493265	103,79
44	2,00E-11	3472754	105,02
45	2,00E-11	3474423	104,92
46	2,00E-11	3470542	105,15
47	2,00E-11	3473203	104,99
48	2,00E-11	3495482	103,66
49	2,00E-11	3475458	104,85
50	2,00E-11	3499789	103,40
Average	2,00E-11	3481328	104,50

Tabla 15. Calibración de bobina de 100 μH sin núcleo para condensador de 20pF

En la Tabla 16 se muestran los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 22 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,20E-11	3319738	104,47
2	2,20E-11	3319646	104,48
3	2,20E-11	3310505	105,06
4	2,20E-11	3306222	105,33
5	2,20E-11	3312010	104,96
6	2,20E-11	3323251	104,25
7	2,20E-11	3317963	104,59
8	2,20E-11	3305289	105,39
9	2,20E-11	3335644	103,48
10	2,20E-11	3332491	103,68
11	2,20E-11	3327660	103,98
12	2,20E-11	3333793	103,60
13	2,20E-11	3324542	104,17
14	2,20E-11	3336088	103,45
15	2,20E-11	3318569	104,55
16	2,20E-11	3332546	103,67
17	2,20E-11	3311583	104,99
18	2,20E-11	3330628	103,79
19	2,20E-11	3314144	104,83

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
20	2,20E-11	3326918	104,02
21	2,20E-11	3336547	103,42
22	2,20E-11	3315436	104,75
23	2,20E-11	3310851	105,04
24	2,20E-11	3314892	104,78
25	2,20E-11	3338269	103,32
26	2,20E-11	3323211	104,26
27	2,20E-11	3321037	104,39
28	2,20E-11	3326560	104,05
29	2,20E-11	3313599	104,86
30	2,20E-11	3307938	105,22
31	2,20E-11	3328969	103,90
32	2,20E-11	3317542	104,61
33	2,20E-11	3314930	104,78
34	2,20E-11	3321041	104,39
35	2,20E-11	3326789	104,03
36	2,20E-11	3309858	105,10
37	2,20E-11	3333706	103,60
38	2,20E-11	3335214	103,51
39	2,20E-11	3314579	104,80
40	2,20E-11	3318345	104,56
41	2,20E-11	3331360	103,75
42	2,20E-11	3308862	105,16
43	2,20E-11	3322772	104,28
44	2,20E-11	3319525	104,49
45	2,20E-11	3335480	103,49
46	2,20E-11	3331624	103,73
47	2,20E-11	3333650	103,60
48	2,20E-11	3307581	105,24
49	2,20E-11	3305891	105,35
50	2,20E-11	3317598	104,61
Average	2,20E-11	3321658	104,36

Tabla 16. Calibración de bobina de $100\mu\text{H}$ con condensador de 22pF

1.5 Bobina de 100 micro henrios (μH) con núcleo

Se llevan a cabo en este apartado las pruebas para la bobina de $100\mu\text{H}$ con núcleo. Los condensadores calibrados que se han empleado tienen capacidades de 10pF , 15pF , 20pF y 22pF .

La Tabla 17 muestra los resultados obtenidos para los experimentos realizados sobre la bobina de $100\mu\text{H}$ con núcleo para un condensador de precisión de 10pF .

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,00E-11	5008748	100,97
2	1,00E-11	5010432	100,90
3	1,00E-11	5001720	101,25
4	1,00E-11	5018092	100,59
5	1,00E-11	4997970	101,40
6	1,00E-11	5022559	100,41
7	1,00E-11	4978132	102,21
8	1,00E-11	4987580	101,83
9	1,00E-11	5011759	100,85
10	1,00E-11	5003211	101,19
11	1,00E-11	4982795	102,02
12	1,00E-11	4999687	101,33
13	1,00E-11	4985869	101,90
14	1,00E-11	5014205	100,75
15	1,00E-11	4981866	102,06
16	1,00E-11	4984740	101,94
17	1,00E-11	4989022	101,77
18	1,00E-11	4994832	101,53
19	1,00E-11	4992992	101,61
20	1,00E-11	4999833	101,33
21	1,00E-11	4981252	102,09
22	1,00E-11	5020467	100,50
23	1,00E-11	5009263	100,95
24	1,00E-11	4982927	102,02
25	1,00E-11	4987543	101,83
26	1,00E-11	5017232	100,63
27	1,00E-11	5014300	100,74
28	1,00E-11	4995511	101,50
29	1,00E-11	5010519	100,90
30	1,00E-11	4985049	101,93
31	1,00E-11	4997316	101,43
32	1,00E-11	4988198	101,80
33	1,00E-11	4990107	101,72
34	1,00E-11	5024455	100,34
35	1,00E-11	5003600	101,18
36	1,00E-11	5020584	100,49
37	1,00E-11	4992989	101,61
38	1,00E-11	5024445	100,34
39	1,00E-11	4983405	102,00
40	1,00E-11	5011139	100,87
41	1,00E-11	4993441	101,59
42	1,00E-11	4991025	101,69
43	1,00E-11	5007386	101,02

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
44	1,00E-11	5009565	100,93
45	1,00E-11	5013674	100,77
46	1,00E-11	5007442	101,02
47	1,00E-11	5019779	100,52
48	1,00E-11	4989766	101,74
49	1,00E-11	5006559	101,06
50	1,00E-11	4984521	101,95
Average	1,00E-11	5000590	101,30

Tabla 17. Calibración de bobina de $100\mu\text{H}$ con núcleo para condensador de 10pF

En la Tabla 18 se muestran los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 15 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,50E-11	4087209	101,09
2	1,50E-11	4066091	102,14
3	1,50E-11	4083180	101,29
4	1,50E-11	4068266	102,03
5	1,50E-11	4102204	100,35
6	1,50E-11	4065228	102,18
7	1,50E-11	4062034	102,34
8	1,50E-11	4096155	100,65
9	1,50E-11	4082032	101,34
10	1,50E-11	4101329	100,39
11	1,50E-11	4089010	101,00
12	1,50E-11	4074726	101,71
13	1,50E-11	4075833	101,65
14	1,50E-11	4079803	101,45
15	1,50E-11	4098132	100,55
16	1,50E-11	4094318	100,74
17	1,50E-11	4079226	101,48
18	1,50E-11	4100215	100,45
19	1,50E-11	4061945	102,35
20	1,50E-11	4068937	102,00
21	1,50E-11	4078556	101,52
22	1,50E-11	4080182	101,44
23	1,50E-11	4077499	101,57
24	1,50E-11	4092340	100,83
25	1,50E-11	4094089	100,75
26	1,50E-11	4068785	102,00
27	1,50E-11	4064176	102,24
28	1,50E-11	4089669	100,97
29	1,50E-11	4068630	102,01

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
30	1,50E-11	4091121	100,89
31	1,50E-11	4077787	101,55
32	1,50E-11	4099476	100,48
33	1,50E-11	4101331	100,39
34	1,50E-11	4070874	101,90
35	1,50E-11	4064787	102,21
36	1,50E-11	4093939	100,75
37	1,50E-11	4077188	101,58
38	1,50E-11	4098989	100,51
39	1,50E-11	4079602	101,46
40	1,50E-11	4068113	102,04
41	1,50E-11	4089443	100,98
42	1,50E-11	4100040	100,46
43	1,50E-11	4095500	100,68
44	1,50E-11	4100311	100,44
45	1,50E-11	4071623	101,86
46	1,50E-11	4083812	101,26
47	1,50E-11	4087596	101,07
48	1,50E-11	4067318	102,08
49	1,50E-11	4064811	102,20
50	1,50E-11	4098842	100,51
Average	1,50E-11	4082646	101,32

Tabla 18. Calibración de bobina de $100\mu\text{H}$ con núcleo para condensador de 15pF

La Tabla 19 muestra los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 20 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,00E-11	3550573	100,46
2	2,00E-11	3533792	101,42
3	2,00E-11	3535681	101,31
4	2,00E-11	3545898	100,73
5	2,00E-11	3536661	101,26
6	2,00E-11	3537027	101,24
7	2,00E-11	3536978	101,24
8	2,00E-11	3541294	100,99
9	2,00E-11	3544967	100,78
10	2,00E-11	3546750	100,68
11	2,00E-11	3528759	101,71
12	2,00E-11	3529938	101,64
13	2,00E-11	3536480	101,27
14	2,00E-11	3526704	101,83
15	2,00E-11	3540013	101,06

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
16	2,00E-11	3535093	101,35
17	2,00E-11	3531849	101,53
18	2,00E-11	3520109	102,21
19	2,00E-11	3551681	100,40
20	2,00E-11	3540341	101,05
21	2,00E-11	3529983	101,64
22	2,00E-11	3550283	100,48
23	2,00E-11	3527120	101,81
24	2,00E-11	3532020	101,52
25	2,00E-11	3551836	100,39
26	2,00E-11	3523864	101,99
27	2,00E-11	3545245	100,77
28	2,00E-11	3540381	101,04
29	2,00E-11	3518857	102,28
30	2,00E-11	3533702	101,43
31	2,00E-11	3548221	100,60
32	2,00E-11	3531409	101,56
33	2,00E-11	3544942	100,78
34	2,00E-11	3528943	101,70
35	2,00E-11	3523904	101,99
36	2,00E-11	3542859	100,90
37	2,00E-11	3532045	101,52
38	2,00E-11	3519206	102,26
39	2,00E-11	3537954	101,18
40	2,00E-11	3544342	100,82
41	2,00E-11	3528209	101,74
42	2,00E-11	3549376	100,53
43	2,00E-11	3545685	100,74
44	2,00E-11	3522406	102,08
45	2,00E-11	3546276	100,71
46	2,00E-11	3538176	101,17
47	2,00E-11	3539506	101,09
48	2,00E-11	3526982	101,81
49	2,00E-11	3536012	101,29
50	2,00E-11	3536741	101,25
Average	2,00E-11	3536541	101,27

Tabla 19. Calibración de bobina de $100\mu\text{H}$ con núcleo para condensador de 20pF

En la Tabla 20 se muestran los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 22 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,20E-11	3372195	101,25

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
2	2,20E-11	3356197	102,22
3	2,20E-11	3364743	101,70
4	2,20E-11	3379947	100,79
5	2,20E-11	3375338	101,06
6	2,20E-11	3358454	102,08
7	2,20E-11	3362260	101,85
8	2,20E-11	3362114	101,86
9	2,20E-11	3366442	101,60
10	2,20E-11	3374719	101,10
11	2,20E-11	3382728	100,62
12	2,20E-11	3363573	101,77
13	2,20E-11	3371602	101,28
14	2,20E-11	3366076	101,62
15	2,20E-11	3367792	101,51
16	2,20E-11	3387054	100,36
17	2,20E-11	3368263	101,49
18	2,20E-11	3378460	100,87
19	2,20E-11	3356859	102,18
20	2,20E-11	3383555	100,57
21	2,20E-11	3360797	101,94
22	2,20E-11	3355119	102,28
23	2,20E-11	3376394	101,00
24	2,20E-11	3373064	101,20
25	2,20E-11	3387722	100,32
26	2,20E-11	3368123	101,49
27	2,20E-11	3354828	102,30
28	2,20E-11	3355372	102,27
29	2,20E-11	3372061	101,26
30	2,20E-11	3381842	100,67
31	2,20E-11	3367393	101,54
32	2,20E-11	3359034	102,04
33	2,20E-11	3372429	101,24
34	2,20E-11	3360131	101,98
35	2,20E-11	3380652	100,74
36	2,20E-11	3360947	101,93
37	2,20E-11	3380054	100,78
38	2,20E-11	3363217	101,79
39	2,20E-11	3375635	101,04
40	2,20E-11	3355225	102,28
41	2,20E-11	3376514	100,99
42	2,20E-11	3383172	100,59
43	2,20E-11	3361155	101,92
44	2,20E-11	3387336	100,35

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
45	2,20E-11	3357716	102,12
46	2,20E-11	3366794	101,57
47	2,20E-11	3376246	101,01
48	2,20E-11	3384790	100,50
49	2,20E-11	3374433	101,12
50	2,20E-11	3378938	100,85
Average	2,20E-11	3370110	101,38

Tabla 20. Calibración de bobina de $100\mu\text{H}$ con núcleo para condensador de 22pF

1.6 Bobina de 220 micro henrios (μH)

Se llevan a cabo en este apartado las pruebas para la bobina de $220\mu\text{H}$. Los condensadores calibrados que se han empleado tienen capacidades de 10pF , 15pF , 20pF y 22pF .

La Tabla 21 muestra los resultados obtenidos para los experimentos realizados sobre la bobina de $220\mu\text{H}$ con núcleo para un condensador de precisión de 10pF .

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,00E-11	3473371	209,96
2	1,00E-11	3477643	209,45
3	1,00E-11	3475495	209,70
4	1,00E-11	3470355	210,33
5	1,00E-11	3484870	208,58
6	1,00E-11	3457581	211,88
7	1,00E-11	3452936	212,45
8	1,00E-11	3473358	209,96
9	1,00E-11	3476829	209,54
10	1,00E-11	3477393	209,48
11	1,00E-11	3480317	209,12
12	1,00E-11	3482223	208,89
13	1,00E-11	3476481	209,59
14	1,00E-11	3451506	212,63
15	1,00E-11	3466318	210,82
16	1,00E-11	3467999	210,61
17	1,00E-11	3465191	210,95
18	1,00E-11	3479293	209,25
19	1,00E-11	3483834	208,70
20	1,00E-11	3469601	210,42
21	1,00E-11	3483407	208,75
22	1,00E-11	3455272	212,17
23	1,00E-11	3477241	209,49
24	1,00E-11	3482115	208,91
25	1,00E-11	3456486	212,02
26	1,00E-11	3466964	210,74

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
27	1,00E-11	3475246	209,73
28	1,00E-11	3459131	211,69
29	1,00E-11	3483617	208,73
30	1,00E-11	3470365	210,32
31	1,00E-11	3461911	211,35
32	1,00E-11	3475533	209,70
33	1,00E-11	3479978	209,16
34	1,00E-11	3463254	211,19
35	1,00E-11	3456605	212,00
36	1,00E-11	3480955	209,05
37	1,00E-11	3451760	212,60
38	1,00E-11	3467778	210,64
39	1,00E-11	3466246	210,82
40	1,00E-11	3460668	211,50
41	1,00E-11	3475060	209,76
42	1,00E-11	3479194	209,26
43	1,00E-11	3467167	210,71
44	1,00E-11	3471031	210,24
45	1,00E-11	3463527	211,16
46	1,00E-11	3477729	209,43
47	1,00E-11	3464548	211,03
48	1,00E-11	3472418	210,08
49	1,00E-11	3477333	209,48
50	1,00E-11	3456842	211,97
Average	1,00E-11	3470440	210,32

Tabla 21. Calibración de bobina de 220 μH para condensador de 10pF

En la Tabla 22 se muestran los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 15 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,50E-11	2844516	208,70
2	1,50E-11	2823758	211,78
3	1,50E-11	2817854	212,67
4	1,50E-11	2823769	211,78
5	1,50E-11	2836790	209,84
6	1,50E-11	2839048	209,51
7	1,50E-11	2828204	211,12
8	1,50E-11	2841448	209,16
9	1,50E-11	2839847	209,39
10	1,50E-11	2821147	212,18
11	1,50E-11	2820197	212,32
12	1,50E-11	2831436	210,64

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
13	1,50E-11	2819335	212,45
14	1,50E-11	2825805	211,48
15	1,50E-11	2845161	208,61
16	1,50E-11	2838820	209,54
17	1,50E-11	2833710	210,30
18	1,50E-11	2838871	209,54
19	1,50E-11	2840013	209,37
20	1,50E-11	2823353	211,85
21	1,50E-11	2842989	208,93
22	1,50E-11	2827450	211,23
23	1,50E-11	2821921	212,06
24	1,50E-11	2825285	211,56
25	1,50E-11	2823132	211,88
26	1,50E-11	2844262	208,74
27	1,50E-11	2825838	211,47
28	1,50E-11	2825070	211,59
29	1,50E-11	2823898	211,76
30	1,50E-11	2819906	212,36
31	1,50E-11	2829155	210,98
32	1,50E-11	2841627	209,13
33	1,50E-11	2840888	209,24
34	1,50E-11	2840756	209,26
35	1,50E-11	2835378	210,05
36	1,50E-11	2837395	209,75
37	1,50E-11	2830887	210,72
38	1,50E-11	2823782	211,78
39	1,50E-11	2823821	211,77
40	1,50E-11	2837390	209,75
41	1,50E-11	2819457	212,43
42	1,50E-11	2825995	211,45
43	1,50E-11	2841836	209,10
44	1,50E-11	2844501	208,71
45	1,50E-11	2839742	209,41
46	1,50E-11	2821970	212,05
47	1,50E-11	2827599	211,21
48	1,50E-11	2837667	209,71
49	1,50E-11	2844420	208,72
50	1,50E-11	2829287	210,96
Average	1,50E-11	2831728	210,60

Tabla 22. Calibración de bobina de 220 μH para condensador de 15pF

La Tabla 23 muestra los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 20 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,00E-11	2444485	211,95
2	2,00E-11	2441433	212,48
3	2,00E-11	2446561	211,59
4	2,00E-11	2451747	210,70
5	2,00E-11	2448338	211,28
6	2,00E-11	2443392	212,14
7	2,00E-11	2447180	211,48
8	2,00E-11	2453506	210,40
9	2,00E-11	2450188	210,97
10	2,00E-11	2450029	210,99
11	2,00E-11	2442600	212,28
12	2,00E-11	2464331	208,55
13	2,00E-11	2447564	211,42
14	2,00E-11	2452079	210,64
15	2,00E-11	2462361	208,88
16	2,00E-11	2447194	211,48
17	2,00E-11	2463989	208,61
18	2,00E-11	2453058	210,47
19	2,00E-11	2441165	212,53
20	2,00E-11	2452282	210,61
21	2,00E-11	2450469	210,92
22	2,00E-11	2453640	210,37
23	2,00E-11	2455050	210,13
24	2,00E-11	2453259	210,44
25	2,00E-11	2455414	210,07
26	2,00E-11	2455801	210,00
27	2,00E-11	2450785	210,86
28	2,00E-11	2441464	212,48
29	2,00E-11	2441274	212,51
30	2,00E-11	2460854	209,14
31	2,00E-11	2452916	210,50
32	2,00E-11	2452045	210,65
33	2,00E-11	2445554	211,77
34	2,00E-11	2452946	210,49
35	2,00E-11	2457729	209,67
36	2,00E-11	2456293	209,92
37	2,00E-11	2451176	210,80
38	2,00E-11	2446790	211,55
39	2,00E-11	2456029	209,96
40	2,00E-11	2443328	212,15
41	2,00E-11	2452812	210,51
42	2,00E-11	2442431	212,31
43	2,00E-11	2440879	212,58

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
44	2,00E-11	2454842	210,17
45	2,00E-11	2460583	209,19
46	2,00E-11	2451692	210,71
47	2,00E-11	2460934	209,13
48	2,00E-11	2459879	209,31
49	2,00E-11	2458593	209,53
50	2,00E-11	2440026	212,73
Average	2,00E-11	2451179	210,80

Tabla 23. Calibración de bobina de $220\mu\text{H}$ para condensador de 20pF

En la Tabla 24 se muestran los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 22 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,20E-11	2339539	210,36
2	2,20E-11	2327899	212,47
3	2,20E-11	2341635	209,98
4	2,20E-11	2349108	208,65
5	2,20E-11	2332912	211,55
6	2,20E-11	2334351	211,29
7	2,20E-11	2327546	212,53
8	2,20E-11	2333598	211,43
9	2,20E-11	2341504	210,00
10	2,20E-11	2328967	212,27
11	2,20E-11	2339055	210,44
12	2,20E-11	2345947	209,21
13	2,20E-11	2341662	209,98
14	2,20E-11	2331258	211,85
15	2,20E-11	2330679	211,96
16	2,20E-11	2331622	211,79
17	2,20E-11	2331906	211,74
18	2,20E-11	2341658	209,98
19	2,20E-11	2337351	210,75
20	2,20E-11	2343461	209,65
21	2,20E-11	2339253	210,41
22	2,20E-11	2335433	211,10
23	2,20E-11	2344538	209,46
24	2,20E-11	2332604	211,61
25	2,20E-11	2335447	211,09
26	2,20E-11	2342150	209,89
27	2,20E-11	2326876	212,65
28	2,20E-11	2343025	209,73
29	2,20E-11	2340348	210,21

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
30	2,20E-11	2326650	212,69
31	2,20E-11	2337541	210,72
32	2,20E-11	2343845	209,58
33	2,20E-11	2327420	212,55
34	2,20E-11	2329512	212,17
35	2,20E-11	2349113	208,65
36	2,20E-11	2337507	210,72
37	2,20E-11	2334764	211,22
38	2,20E-11	2335151	211,15
39	2,20E-11	2333730	211,41
40	2,20E-11	2331621	211,79
41	2,20E-11	2347772	208,88
42	2,20E-11	2338768	210,50
43	2,20E-11	2343286	209,68
44	2,20E-11	2342367	209,85
45	2,20E-11	2334630	211,24
46	2,20E-11	2344035	209,55
47	2,20E-11	2333821	211,39
48	2,20E-11	2337843	210,66
49	2,20E-11	2341165	210,06
50	2,20E-11	2326410	212,74
Average	2,20E-11	2336966	210,82

Tabla 24. Calibración de bobina de $220\mu\text{H}$ para condensador de 22pF

1.7 Bobina de 330 micro henrios (μH)

Se llevan a cabo en este apartado las pruebas para la bobina de $330\mu\text{H}$. Los condensadores calibrados que se han empleado tienen capacidades de 10pF , 15pF , 20pF y 22pF .

La Tabla 25 muestra los resultados obtenidos para los experimentos realizados sobre la bobina de $330\mu\text{H}$ con condensador de precisión de 10pF .

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,00E-11	2824451	317,52
2	1,00E-11	2818767	318,80
3	1,00E-11	2823907	317,64
4	1,00E-11	2822855	317,88
5	1,00E-11	2825291	317,33
6	1,00E-11	2824148	317,59
7	1,00E-11	2831472	315,95
8	1,00E-11	2825780	317,22
9	1,00E-11	2817426	319,11
10	1,00E-11	2818251	318,92
11	1,00E-11	2829031	316,49

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
12	1,00E-11	2828598	316,59
13	1,00E-11	2827953	316,73
14	1,00E-11	2822207	318,03
15	1,00E-11	2840871	313,86
16	1,00E-11	2823618	317,71
17	1,00E-11	2823894	317,65
18	1,00E-11	2816951	319,21
19	1,00E-11	2814079	319,87
20	1,00E-11	2815111	319,63
21	1,00E-11	2835219	315,11
22	1,00E-11	2829417	316,41
23	1,00E-11	2830975	316,06
24	1,00E-11	2830462	316,17
25	1,00E-11	2834881	315,19
26	1,00E-11	2828392	316,64
27	1,00E-11	2826088	317,15
28	1,00E-11	2816759	319,26
29	1,00E-11	2837276	314,66
30	1,00E-11	2817336	319,13
31	1,00E-11	2821707	318,14
32	1,00E-11	2831726	315,89
33	1,00E-11	2831953	315,84
34	1,00E-11	2839734	314,11
35	1,00E-11	2818120	318,95
36	1,00E-11	2823437	317,75
37	1,00E-11	2840800	313,88
38	1,00E-11	2831596	315,92
39	1,00E-11	2841467	313,73
40	1,00E-11	2819027	318,74
41	1,00E-11	2826746	317,01
42	1,00E-11	2836306	314,87
43	1,00E-11	2840136	314,02
44	1,00E-11	2816935	319,22
45	1,00E-11	2832236	315,78
46	1,00E-11	2835887	314,96
47	1,00E-11	2836872	314,75
48	1,00E-11	2834958	315,17
49	1,00E-11	2826843	316,98
50	1,00E-11	2816074	319,41
Average	1,00E-11	2827281	316,89

Tabla 25. Calibración de bobina de 330 μH para condensador de 10pF

En la Tabla 26 se muestran los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 15 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	1,50E-11	2304480	317,98
2	1,50E-11	2317047	314,54
3	1,50E-11	2318954	314,03
4	1,50E-11	2308950	316,75
5	1,50E-11	2318057	314,27
6	1,50E-11	2298921	319,52
7	1,50E-11	2300582	319,06
8	1,50E-11	2308038	317,00
9	1,50E-11	2320557	313,59
10	1,50E-11	2320144	313,70
11	1,50E-11	2315372	315,00
12	1,50E-11	2298480	319,64
13	1,50E-11	2303990	318,12
14	1,50E-11	2317002	314,55
15	1,50E-11	2311873	315,95
16	1,50E-11	2299158	319,46
17	1,50E-11	2298761	319,57
18	1,50E-11	2312230	315,85
19	1,50E-11	2297696	319,86
20	1,50E-11	2300819	318,99
21	1,50E-11	2318665	314,10
22	1,50E-11	2314594	315,21
23	1,50E-11	2312232	315,85
24	1,50E-11	2300572	319,06
25	1,50E-11	2303600	318,23
26	1,50E-11	2297721	319,86
27	1,50E-11	2313799	315,43
28	1,50E-11	2302550	318,52
29	1,50E-11	2315294	315,02
30	1,50E-11	2319797	313,80
31	1,50E-11	2312129	315,88
32	1,50E-11	2313859	315,41
33	1,50E-11	2304898	317,87
34	1,50E-11	2319053	314,00
35	1,50E-11	2314928	315,12
36	1,50E-11	2305388	317,73
37	1,50E-11	2307138	317,25
38	1,50E-11	2307817	317,06
39	1,50E-11	2301427	318,83
40	1,50E-11	2315764	314,89

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
41	1,50E-11	2302527	318,52
42	1,50E-11	2297935	319,80
43	1,50E-11	2298878	319,53
44	1,50E-11	2312448	315,79
45	1,50E-11	2317191	314,50
46	1,50E-11	2317740	314,35
47	1,50E-11	2306261	317,49
48	1,50E-11	2305526	317,69
49	1,50E-11	2312428	315,80
50	1,50E-11	2302986	318,40
Average	1,50E-11	2308925	316,77

Tabla 26. Calibración de bobina de 330 μH para condensador de 15pF

La Tabla 27 muestra los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 20 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,00E-11	2006783	314,49
2	2,00E-11	2001102	316,28
3	2,00E-11	2004760	315,13
4	2,00E-11	2002352	315,89
5	2,00E-11	2002352	315,89
6	2,00E-11	1994027	318,53
7	2,00E-11	2006843	314,47
8	2,00E-11	2007923	314,13
9	2,00E-11	1997281	317,49
10	2,00E-11	2000041	316,62
11	2,00E-11	1999856	316,67
12	2,00E-11	1990300	319,72
13	2,00E-11	2000242	316,55
14	2,00E-11	2005456	314,91
15	2,00E-11	2003967	315,38
16	2,00E-11	2003091	315,65
17	2,00E-11	1995705	317,99
18	2,00E-11	2003417	315,55
19	2,00E-11	1992337	319,07
20	2,00E-11	2008735	313,88
21	2,00E-11	1999664	316,73
22	2,00E-11	2002019	315,99
23	2,00E-11	2009643	313,60
24	2,00E-11	2001549	316,14
25	2,00E-11	2004929	315,07
26	2,00E-11	1995623	318,02

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
27	2,00E-11	2000310	316,53
28	2,00E-11	1990608	319,62
29	2,00E-11	2001316	316,21
30	2,00E-11	1990994	319,50
31	2,00E-11	1992947	318,87
32	2,00E-11	2007580	314,24
33	2,00E-11	2001666	316,10
34	2,00E-11	1995972	317,91
35	2,00E-11	1993224	318,79
36	2,00E-11	1999210	316,88
37	2,00E-11	1997387	317,46
38	2,00E-11	2007017	314,42
39	2,00E-11	1997636	317,38
40	2,00E-11	2005708	314,83
41	2,00E-11	1998320	317,16
42	2,00E-11	1996748	317,66
43	2,00E-11	2006506	314,58
44	2,00E-11	1993242	318,78
45	2,00E-11	1997701	317,36
46	2,00E-11	2004165	315,31
47	2,00E-11	2000539	316,46
48	2,00E-11	2001287	316,22
49	2,00E-11	2006951	314,44
50	2,00E-11	1999526	316,78
Average	2,00E-11	2000531	316,47

Tabla 27. Calibración de bobina de $330\mu\text{H}$ para condensador de 20pF

En la Tabla 28 se muestran los resultados conseguidos tras realizar las pruebas con el condensador de 22 picofaradios (pF).

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
1	2,20E-11	1899331	319,17
2	2,20E-11	1902797	318,00
3	2,20E-11	1897286	319,85
4	2,20E-11	1908489	316,11
5	2,20E-11	1907054	316,59
6	2,20E-11	1912681	314,73
7	2,20E-11	1900310	318,84
8	2,20E-11	1907478	316,44
9	2,20E-11	1902355	318,15
10	2,20E-11	1901397	318,47
11	2,20E-11	1903737	317,69
12	2,20E-11	1900544	318,76

Test index	C precision value (F)	Resonance frequency (Hz)	Inductor calculated (μH)
13	2,20E-11	1908456	316,12
14	2,20E-11	1899131	319,23
15	2,20E-11	1900676	318,71
16	2,20E-11	1902711	318,03
17	2,20E-11	1909403	315,81
18	2,20E-11	1907776	316,35
19	2,20E-11	1910177	315,55
20	2,20E-11	1905452	317,12
21	2,20E-11	1897569	319,76
22	2,20E-11	1915693	313,74
23	2,20E-11	1911121	315,24
24	2,20E-11	1911222	315,21
25	2,20E-11	1909200	315,87
26	2,20E-11	1905211	317,20
27	2,20E-11	1901803	318,34
28	2,20E-11	1908575	316,08
29	2,20E-11	1909615	315,74
30	2,20E-11	1906560	316,75
31	2,20E-11	1908375	316,15
32	2,20E-11	1907937	316,29
33	2,20E-11	1915636	313,76
34	2,20E-11	1910142	315,56
35	2,20E-11	1914813	314,03
36	2,20E-11	1898905	319,31
37	2,20E-11	1909471	315,78
38	2,20E-11	1906749	316,69
39	2,20E-11	1904928	317,29
40	2,20E-11	1898561	319,42
41	2,20E-11	1898797	319,35
42	2,20E-11	1899220	319,20
43	2,20E-11	1901335	318,49
44	2,20E-11	1907875	316,31
45	2,20E-11	1907324	316,50
46	2,20E-11	1904026	317,59
47	2,20E-11	1912922	314,65
48	2,20E-11	1899746	319,03
49	2,20E-11	1897497	319,78
50	2,20E-11	1913020	314,61
Average	2,20E-11	1905622	317,07

Tabla 28. Calibración de bobina de $330\mu\text{H}$ para condensador de 22pF

2 Resumen calibración de bobinas

Como consecuencia de las mediciones realizadas en los apartados precedentes se extrae la Tabla 29 que es el resumen de los valores reales de las bobinas que se han utilizado para llevar a cabo la caracterización del QCM.

Nombre	Valor comercial	Tolerancia	Valor calibrado
L1	20 μ H	$\pm 5\%$	20,2 μ H
L2	40 μ H	$\pm 5\%$	40,7 μ H
L3	56 μ H	$\pm 5\%$	57,7 μ H
L4	100 μ H	$\pm 5\%$	104 μ H
L5	100 μ H	$\pm 5\%$	101 μ H
L6	220 μ H	$\pm 5\%$	211 μ H
L7	330 μ H	$\pm 5\%$	317 μ H

Tabla 29. Resumen de valores reales de bobinas

3 Obtención de la capacidad paralelo C0 del modelo equivalente del QCM en aire

Con los valores reales de las bobinas obtenidos en el paso anterior, se procede al cálculo de la capacidad paralelo C0 del modelo equivalente del QCM de acuerdo con la aproximación de BVD. En los sucesivos subapartados se presentan las mediciones realizadas de la capacidad para 50 repeticiones de cada valor de bobina. El procedimiento llevado a cabo se ha descrito en apartado 3 del capítulo Método propuesto.

123

3.1 Bobina L1 20 μ H nominales – 20,2 μ H reales

La Tabla 30 muestra los valores de las 50 medidas llevadas a cabo para calcular C0 para el caso de la bobina L1 20 μ H nominales – 20,2 μ H reales.

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
1	2,02E-05	7931019	19,93
2	2,02E-05	7909426	20,04
3	2,02E-05	7955018	19,81
4	2,02E-05	7918132	19,99
5	2,02E-05	7910389	20,03
6	2,02E-05	7949046	19,84
7	2,02E-05	7933399	19,92
8	2,02E-05	7877778	20,20
9	2,02E-05	7899796	20,09
10	2,02E-05	7933569	19,92
11	2,02E-05	7941109	19,88
12	2,02E-05	7944770	19,86
13	2,02E-05	7927275	19,95
14	2,02E-05	7952670	19,82
15	2,02E-05	7927103	19,95

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
16	2,02E-05	7953810	19,82
17	2,02E-05	7879941	20,19
18	2,02E-05	7888981	20,14
19	2,02E-05	7955188	19,81
20	2,02E-05	7896035	20,11
21	2,02E-05	7935369	19,91
22	2,02E-05	7930905	19,93
23	2,02E-05	7882499	20,18
24	2,02E-05	7910230	20,03
25	2,02E-05	7884918	20,16
26	2,02E-05	7892459	20,13
27	2,02E-05	7931352	19,93
28	2,02E-05	7938598	19,89
29	2,02E-05	7926642	19,95
30	2,02E-05	7951110	19,83
31	2,02E-05	7914873	20,01
32	2,02E-05	7899919	20,09
33	2,02E-05	7940486	19,88
34	2,02E-05	7886252	20,16
35	2,02E-05	7919806	19,99
36	2,02E-05	7916465	20,00
37	2,02E-05	7954553	19,81
38	2,02E-05	7883019	20,17
39	2,02E-05	7900677	20,08
40	2,02E-05	7935679	19,91
41	2,02E-05	7933720	19,92
42	2,02E-05	7903797	20,07
43	2,02E-05	7912689	20,02
44	2,02E-05	7923047	19,97
45	2,02E-05	7915067	20,01
46	2,02E-05	7931355	19,93
47	2,02E-05	7902343	20,07
48	2,02E-05	7941952	19,88
49	2,02E-05	7947619	19,85
50	2,02E-05	7900289	20,09
Average	2,02E-05	7920643	19,98

Tabla 30. Valores de C0 para la bobina de 20 μ H nominales - 20,2 μ H reales

3.2 Bobina L2 40 μ H nominales – 40,7 μ H reales

La Tabla 31 muestra los valores de las 50 efectuadas para calcular C0 para el caso de la bobina L2 40 μ H nominales – 40,7 μ H reales.

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
1	4,07E-05	5577434	20,00
2	4,07E-05	5560357	20,12
3	4,07E-05	5585017	19,94
4	4,07E-05	5603886	19,81
5	4,07E-05	5590670	19,90
6	4,07E-05	5591161	19,90
7	4,07E-05	5574795	20,02
8	4,07E-05	5560166	20,12
9	4,07E-05	5581311	19,97
10	4,07E-05	5587523	19,92
11	4,07E-05	5593485	19,88
12	4,07E-05	5572370	20,03
13	4,07E-05	5602561	19,82
14	4,07E-05	5591597	19,90
15	4,07E-05	5563040	20,10
16	4,07E-05	5580415	19,97
17	4,07E-05	5573365	20,03
18	4,07E-05	5562630	20,10
19	4,07E-05	5563496	20,10
20	4,07E-05	5604739	19,80
21	4,07E-05	5572164	20,03
22	4,07E-05	5575047	20,01
23	4,07E-05	5595460	19,87
24	4,07E-05	5582345	19,96
25	4,07E-05	5568758	20,06
26	4,07E-05	5569211	20,06
27	4,07E-05	5551804	20,18
28	4,07E-05	5572667	20,03
29	4,07E-05	5572492	20,03
30	4,07E-05	5560698	20,12
31	4,07E-05	5588383	19,92
32	4,07E-05	5553651	20,17
33	4,07E-05	5560199	20,12
34	4,07E-05	5571511	20,04
35	4,07E-05	5597567	19,85
36	4,07E-05	5580071	19,98
37	4,07E-05	5576627	20,00
38	4,07E-05	5567858	20,07
39	4,07E-05	5567959	20,06
40	4,07E-05	5585123	19,94
41	4,07E-05	5577797	19,99
42	4,07E-05	5567332	20,07
43	4,07E-05	5551240	20,19

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
44	4,07E-05	5591492	19,90
45	4,07E-05	5564084	20,09
46	4,07E-05	5569316	20,05
47	4,07E-05	5592354	19,89
48	4,07E-05	5570825	20,04
49	4,07E-05	5560628	20,12
50	4,07E-05	5601783	19,82
Average	4,07E-05	5576729	20,00

Tabla 31. Valores de C0 para la bobina de 40 μ H nominales - 40,7 μ H reales

3.3 Bobina L3 56 μ H nominales – 57,7 μ H reales

Los datos de Tabla 32, son los correspondientes a las 50 medidas efectuadas para la obtención de la C0 para el caso de la bobina L3 56 μ H nominales – 57,7 μ H reales.

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
1	5,77E-05	4675322	20,08
2	5,77E-05	4701493	19,85
3	5,77E-05	4704115	19,83
4	5,77E-05	4705354	19,82
5	5,77E-05	4673327	20,09
6	5,77E-05	4665514	20,16
7	5,77E-05	4680850	20,03
8	5,77E-05	4707578	19,80
9	5,77E-05	4677579	20,06
10	5,77E-05	4664607	20,17
11	5,77E-05	4663644	20,18
12	5,77E-05	4681498	20,02
13	5,77E-05	4684085	20,00
14	5,77E-05	4698100	19,88
15	5,77E-05	4688506	19,96
16	5,77E-05	4681546	20,02
17	5,77E-05	4676254	20,07
18	5,77E-05	4688423	19,96
19	5,77E-05	4676882	20,06
20	5,77E-05	4697155	19,89
21	5,77E-05	4695553	19,90
22	5,77E-05	4683049	20,01
23	5,77E-05	4704146	19,83
24	5,77E-05	4677488	20,06
25	5,77E-05	4676495	20,07
26	5,77E-05	4673235	20,09
27	5,77E-05	4679918	20,04

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
28	5,77E-05	4686621	19,98
29	5,77E-05	4673191	20,09
30	5,77E-05	4706559	19,81
31	5,77E-05	4682822	20,01
32	5,77E-05	4669316	20,13
33	5,77E-05	4692636	19,93
34	5,77E-05	4706401	19,81
35	5,77E-05	4703989	19,83
36	5,77E-05	4682378	20,02
37	5,77E-05	4661602	20,19
38	5,77E-05	4669546	20,13
39	5,77E-05	4670003	20,12
40	5,77E-05	4693157	19,92
41	5,77E-05	4704308	19,83
42	5,77E-05	4694164	19,92
43	5,77E-05	4672736	20,10
44	5,77E-05	4681144	20,03
45	5,77E-05	4663148	20,18
46	5,77E-05	4675993	20,07
47	5,77E-05	4665237	20,16
48	5,77E-05	4682207	20,02
49	5,77E-05	4672734	20,10
50	5,77E-05	4662324	20,19
Average	5,77E-05	4683079	20,01

Tabla 32. Valores de C0 para la bobina de 56 μ H nominales - 57,7 μ H reales

3.4 Bobina L4 sin núcleo 100 μ H nominales – 104,0 μ H reales

Los datos de Tabla 33, son los correspondientes a las 50 medidas efectuadas para la obtención de la C0 para el caso de la bobina L4 100 μ H nominales – 104,0 μ H reales.

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
1	1,04E-04	3500612	19,80
2	1,04E-04	3472128	20,12
3	1,04E-04	3468786	20,16
4	1,04E-04	3479292	20,04
5	1,04E-04	3480995	20,02
6	1,04E-04	3471146	20,13
7	1,04E-04	3488177	19,94
8	1,04E-04	3472683	20,11
9	1,04E-04	3488707	19,93
10	1,04E-04	3472196	20,12
11	1,04E-04	3489851	19,92

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
12	1,04E-04	3468988	20,16
13	1,04E-04	3483812	19,99
14	1,04E-04	3495999	19,85
15	1,04E-04	3493223	19,88
16	1,04E-04	3498244	19,82
17	1,04E-04	3491774	19,90
18	1,04E-04	3467954	20,17
19	1,04E-04	3485474	19,97
20	1,04E-04	3482589	20,00
21	1,04E-04	3486773	19,95
22	1,04E-04	3478363	20,05
23	1,04E-04	3487180	19,95
24	1,04E-04	3494629	19,86
25	1,04E-04	3499869	19,80
26	1,04E-04	3471537	20,13
27	1,04E-04	3470053	20,15
28	1,04E-04	3472647	20,12
29	1,04E-04	3472554	20,12
30	1,04E-04	3500879	19,79
31	1,04E-04	3474905	20,09
32	1,04E-04	3489660	19,92
33	1,04E-04	3489399	19,92
34	1,04E-04	3489282	19,92
35	1,04E-04	3469278	20,15
36	1,04E-04	3478418	20,05
37	1,04E-04	3492791	19,88
38	1,04E-04	3480195	20,03
39	1,04E-04	3487085	19,95
40	1,04E-04	3484728	19,98
41	1,04E-04	3489326	19,92
42	1,04E-04	3492888	19,88
43	1,04E-04	3474481	20,09
44	1,04E-04	3500603	19,80
45	1,04E-04	3475878	20,08
46	1,04E-04	3495692	19,85
47	1,04E-04	3472094	20,12
48	1,04E-04	3478786	20,04
49	1,04E-04	3490050	19,92
50	1,04E-04	3495890	19,85
Average	1,04E-04	3483771	19,99

Tabla 33. Valores de C0 para la bobina de 100 μ H nominales - 104,0 μ H reales

3.5 Bobina L5 con núcleo 100 µH nominales – 101,0 µH reales

La Tabla 34 muestra los valores de las 50 efectuadas para calcular C0 para el caso de la bobina L5 100 µH nominales – 101,0 µH reales.

Test index	L precision value (H)	Resonance frecuency (Hz)	C0 calculated (pF)
1	1,01E-04	3546929	19,87
2	1,01E-04	3542120	19,93
3	1,01E-04	3548011	19,86
4	1,01E-04	3523072	20,14
5	1,01E-04	3522959	20,14
6	1,01E-04	3522376	20,15
7	1,01E-04	3551716	19,82
8	1,01E-04	3519787	20,18
9	1,01E-04	3549254	19,85
10	1,01E-04	3540311	19,95
11	1,01E-04	3552971	19,81
12	1,01E-04	3518031	20,20
13	1,01E-04	3544558	19,90
14	1,01E-04	3524262	20,13
15	1,01E-04	3529313	20,07
16	1,01E-04	3545790	19,89
17	1,01E-04	3525033	20,12
18	1,01E-04	3543347	19,91
19	1,01E-04	3520760	20,17
20	1,01E-04	3541944	19,93
21	1,01E-04	3528222	20,08
22	1,01E-04	3518695	20,19
23	1,01E-04	3521104	20,17
24	1,01E-04	3544940	19,90
25	1,01E-04	3525750	20,11
26	1,01E-04	3524743	20,12
27	1,01E-04	3523190	20,14
28	1,01E-04	3544598	19,90
29	1,01E-04	3544127	19,90
30	1,01E-04	3524225	20,13
31	1,01E-04	3551661	19,82
32	1,01E-04	3527603	20,09
33	1,01E-04	3531704	20,04
34	1,01E-04	3541249	19,94
35	1,01E-04	3542688	19,92
36	1,01E-04	3546102	19,88
37	1,01E-04	3545222	19,89
38	1,01E-04	3552319	19,81
39	1,01E-04	3549060	19,85

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
40	1,01E-04	3540793	19,94
41	1,01E-04	3534686	20,01
42	1,01E-04	3532017	20,04
43	1,01E-04	3547057	19,87
44	1,01E-04	3552255	19,81
45	1,01E-04	3542112	19,93
46	1,01E-04	3538448	19,97
47	1,01E-04	3535495	20,00
48	1,01E-04	3552399	19,81
49	1,01E-04	3534756	20,01
50	1,01E-04	3541430	19,93
Average	1,01E-04	3537024	19,99

Tabla 34. Valores de C0 para la bobina de 100 μ H nominales - 101,0 μ H reales

3.6 Bobina L6 220 μ H nominales – 211,0 μ H reales

Los datos de Tabla 35, son los correspondientes a las 50 medidas efectuadas para la obtención de la C0 para el caso de la bobina L6 220 μ H nominales – 211,0 μ H reales.

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
1	2,11E-04	2459392	19,88
2	2,11E-04	2448995	20,05
3	2,11E-04	2459532	19,88
4	2,11E-04	2457014	19,92
5	2,11E-04	2457897	19,91
6	2,11E-04	2441273	20,18
7	2,11E-04	2452003	20,00
8	2,11E-04	2446032	20,10
9	2,11E-04	2460640	19,86
10	2,11E-04	2461585	19,85
11	2,11E-04	2457437	19,91
12	2,11E-04	2451033	20,02
13	2,11E-04	2447507	20,08
14	2,11E-04	2441450	20,17
15	2,11E-04	2442694	20,15
16	2,11E-04	2463939	19,81
17	2,11E-04	2456062	19,94
18	2,11E-04	2443961	20,13
19	2,11E-04	2454144	19,97
20	2,11E-04	2458811	19,89
21	2,11E-04	2440340	20,19
22	2,11E-04	2449900	20,04
23	2,11E-04	2454513	19,96

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
24	2,11E-04	2445847	20,10
25	2,11E-04	2449934	20,04
26	2,11E-04	2448910	20,05
27	2,11E-04	2457415	19,91
28	2,11E-04	2450083	20,03
29	2,11E-04	2457016	19,92
30	2,11E-04	2449515	20,04
31	2,11E-04	2440105	20,20
32	2,11E-04	2450435	20,03
33	2,11E-04	2448720	20,06
34	2,11E-04	2441748	20,17
35	2,11E-04	2445974	20,10
36	2,11E-04	2454484	19,96
37	2,11E-04	2447277	20,08
38	2,11E-04	2454107	19,97
39	2,11E-04	2440561	20,19
40	2,11E-04	2461770	19,84
41	2,11E-04	2451904	20,00
42	2,11E-04	2455784	19,94
43	2,11E-04	2454406	19,96
44	2,11E-04	2443564	20,14
45	2,11E-04	2452494	19,99
46	2,11E-04	2462263	19,84
47	2,11E-04	2442792	20,15
48	2,11E-04	2442693	20,15
49	2,11E-04	2459655	19,88
50	2,11E-04	2443564	20,14
Average	2,11E-04	2451184	20,02

Tabla 35. Valores de C0 para la bobina de 220 μ H nominales - 211,0 μ H reales

3.7 Bobina L7 330 μ H nominales - 317 μ H reales

En la Tabla 36 se muestran los valores de la C0 obtenida para las 50 mediciones llevadas a cabo con la bobina L7 de 330 μ H nominales - 317 μ H reales.

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
1	3,17E-04	2001113	19,97
2	3,17E-04	1992426	20,14
3	3,17E-04	2004131	19,91
4	3,17E-04	1990517	20,18
5	3,17E-04	1992689	20,14
6	3,17E-04	2002319	19,94
7	3,17E-04	2008392	19,82

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
8	3,17E-04	1996692	20,06
9	3,17E-04	1998188	20,03
10	3,17E-04	1992854	20,13
11	3,17E-04	1993498	20,12
12	3,17E-04	2005189	19,89
13	3,17E-04	1997305	20,04
14	3,17E-04	1993707	20,12
15	3,17E-04	2007982	19,83
16	3,17E-04	1996503	20,06
17	3,17E-04	1993416	20,12
18	3,17E-04	1996789	20,05
19	3,17E-04	1995266	20,08
20	3,17E-04	1992678	20,14
21	3,17E-04	1994897	20,09
22	3,17E-04	1999025	20,01
23	3,17E-04	1990857	20,17
24	3,17E-04	1996718	20,05
25	3,17E-04	1996644	20,06
26	3,17E-04	1999046	20,01
27	3,17E-04	2007770	19,83
28	3,17E-04	1993834	20,11
29	3,17E-04	1990994	20,17
30	3,17E-04	2004284	19,90
31	3,17E-04	1998911	20,01
32	3,17E-04	2001485	19,96
33	3,17E-04	2002415	19,94
34	3,17E-04	1998906	20,01
35	3,17E-04	2002939	19,93
36	3,17E-04	1994382	20,10
37	3,17E-04	1990938	20,17
38	3,17E-04	1996632	20,06
39	3,17E-04	1991624	20,16
40	3,17E-04	2004141	19,91
41	3,17E-04	2009033	19,81
42	3,17E-04	1992360	20,14
43	3,17E-04	1994434	20,10
44	3,17E-04	1991731	20,16
45	3,17E-04	1992051	20,15
46	3,17E-04	2000359	19,98
47	3,17E-04	1996235	20,06
48	3,17E-04	2002896	19,93
49	3,17E-04	1994393	20,10
50	3,17E-04	2001943	19,95

Test index	L precision value (H)	Resonance frequency (Hz)	C0 calculated (pF)
Average	3,17E-04	1997671	20,04

Tabla 36. Valores de C0 para la bobina de 330 μH nominales - 317,0 μH reales

4 Obtención de la resistencia de la rama serie, R1, del modelo equivalente del QCM en aire

En este apartado se procede a la obtención de los valores de la resistencia R1, de la rama serie del modelo equivalente del QCM, de acuerdo al modelo según la aproximación de BVD. La primera prueba se lleva a cabo con una resistencia de precisión de un valor óhmico de 100. Con los valores obtenidos para R1 se selecciona el valor de resistencia que resulta más conveniente, para que caiga un 50% de la tensión en el QCM y así, poder obtener valores más exactos de la medida. Al igual que en los casos anteriores se llevan a cabo 50 medidas para cada valor de resistencia y se halla la media aritmética, que es la que se considerará como valor final en cada caso. El procedimiento llevado a cabo se ha descrito en el apartado 4 del capítulo Método propuesto.

4.1 Resistencia de precisión de 100 ohmios

En la Tabla 37 se muestran los valores de la R1 obtenida para las 50 mediciones llevadas a cabo con la resistencia de precisión de 100 ohmios. Dado que el valor medio de R1 obtenido es de 9,54 ohmios, se seleccionan 5 valores de resistencias de precisión en un rango centrado en torno a este valor. Por ello, en los siguientes sub-apartados se emplearán valores de resistencia de: 7,5 Ω , 8,25 Ω , 9,31 Ω , 10 Ω y 12 Ω .

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
1	100	5005945	86,82	9,51
2	100	5006010	86,32	9,45
3	100	5006038	87,82	9,63
4	100	5005601	86,25	9,44
5	100	5005543	87,56	9,60
6	100	5005609	86,45	9,46
7	100	5006175	87,23	9,56
8	100	5005500	87,47	9,59
9	100	5006215	87,53	9,59
10	100	5006430	87,65	9,61
11	100	5006169	86,62	9,48
12	100	5005500	86,41	9,46
13	100	5006176	87,97	9,65
14	100	5005708	86,94	9,52
15	100	5006195	87,06	9,54
16	100	5006417	87,90	9,64
17	100	5006176	87,75	9,62
18	100	5005763	87,55	9,59
19	100	5006192	86,45	9,46

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
20	100	5005878	86,36	9,45
21	100	5006015	87,86	9,63
22	100	5005965	87,65	9,61
23	100	5006117	87,24	9,56
24	100	5005626	86,59	9,48
25	100	5005533	87,30	9,57
26	100	5005615	86,50	9,47
27	100	5006061	87,00	9,53
28	100	5005993	86,43	9,46
29	100	5005739	86,87	9,51
30	100	5006375	87,47	9,59
31	100	5005511	87,46	9,58
32	100	5006228	87,06	9,54
33	100	5006425	87,28	9,56
34	100	5005840	87,68	9,61
35	100	5006000	87,87	9,63
36	100	5006394	86,27	9,44
37	100	5005684	86,22	9,44
38	100	5005961	86,51	9,47
39	100	5005923	86,64	9,49
40	100	5006421	86,92	9,52
41	100	5006448	87,12	9,54
42	100	5006392	87,03	9,53
43	100	5005535	86,90	9,52
44	100	5006354	87,95	9,64
45	100	5006074	86,87	9,51
46	100	5006259	86,88	9,52
47	100	5005950	86,99	9,53
48	100	5006143	87,79	9,62
49	100	5005584	86,70	9,49
50	100	5005922	86,65	9,49
Average	100,0	5005987	87,08	9,54

Tabla 37. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 100 ohmios

4.2 Resistencia de precisión de 7,5 ohmios

En la Tabla 38 se muestran los valores de la R1 obtenida para las 50 mediciones llevadas a cabo con la resistencia de precisión de 7,5 ohmios.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
1	7,5	5005992	563,68	9,69
2	7,5	5006320	561,17	9,59
3	7,5	5005868	554,86	9,35

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
4	7,5	5006432	559,41	9,52
5	7,5	5005789	554,69	9,34
6	7,5	5006234	561,73	9,61
7	7,5	5005618	565,58	9,76
8	7,5	5006102	564,61	9,73
9	7,5	5005803	556,40	9,41
10	7,5	5005907	555,00	9,35
11	7,5	5006485	560,82	9,58
12	7,5	5005936	558,47	9,49
13	7,5	5006369	558,93	9,50
14	7,5	5005594	555,04	9,36
15	7,5	5005735	564,19	9,71
16	7,5	5006495	555,73	9,38
17	7,5	5005776	558,40	9,48
18	7,5	5006137	561,95	9,62
19	7,5	5005589	560,66	9,57
20	7,5	5005801	559,73	9,53
21	7,5	5005666	556,66	9,42
22	7,5	5006181	553,77	9,31
23	7,5	5006053	565,47	9,76
24	7,5	5006406	558,96	9,51
25	7,5	5006339	556,74	9,42
26	7,5	5005951	562,60	9,65
27	7,5	5005880	553,80	9,31
28	7,5	5005988	554,36	9,33
29	7,5	5006139	560,14	9,55
30	7,5	5005671	561,25	9,59
31	7,5	5006402	561,43	9,60
32	7,5	5006284	558,32	9,48
33	7,5	5005666	557,63	9,45
34	7,5	5005983	563,89	9,70
35	7,5	5006492	564,25	9,71
36	7,5	5005669	561,66	9,61
37	7,5	5006441	560,73	9,57
38	7,5	5006497	561,78	9,61
39	7,5	5005659	564,41	9,72
40	7,5	5006391	565,27	9,75
41	7,5	5006414	557,44	9,45
42	7,5	5005854	558,29	9,48
43	7,5	5006266	557,18	9,44
44	7,5	5005625	556,43	9,41
45	7,5	5006144	560,74	9,57
46	7,5	5005726	554,83	9,35

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
47	7,5	5006084	552,20	9,25
48	7,5	5006422	559,62	9,53
49	7,5	5006142	555,86	9,39
50	7,5	5005698	567,12	9,83
Average	7,5	5006042	559,48	9,53

Tabla 38. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 7,5 ohmios

4.3 Resistencia de precisión de 8,25 ohmios

La Tabla 39 muestra los valores de la R1 obtenida para las 50 mediciones efectuadas con la resistencia de precisión de 8,25 ohmios.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
1	8,25	5006419	539,33	9,66
2	8,25	5006229	532,70	9,40
3	8,25	5006000	539,21	9,65
4	8,25	5006151	530,86	9,34
5	8,25	5005736	536,49	9,55
6	8,25	5006063	532,55	9,40
7	8,25	5006145	535,29	9,50
8	8,25	5005908	531,58	9,36
9	8,25	5006223	530,73	9,33
10	8,25	5006255	539,61	9,67
11	8,25	5005929	538,10	9,61
12	8,25	5005663	541,96	9,76
13	8,25	5006411	536,38	9,54
14	8,25	5006327	532,65	9,40
15	8,25	5006289	537,91	9,60
16	8,25	5005821	539,91	9,68
17	8,25	5006276	537,25	9,58
18	8,25	5005828	541,82	9,76
19	8,25	5005900	540,35	9,70
20	8,25	5006449	541,38	9,74
21	8,25	5005562	531,96	9,38
22	8,25	5005734	529,90	9,30
23	8,25	5006346	534,44	9,47
24	8,25	5006208	540,55	9,71
25	8,25	5005624	540,82	9,72
26	8,25	5006405	543,13	9,81
27	8,25	5005999	531,20	9,35
28	8,25	5005663	532,33	9,39
29	8,25	5006417	535,86	9,52
30	8,25	5005857	536,84	9,56

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
31	8,25	5006430	537,68	9,59
32	8,25	5005582	535,88	9,53
33	8,25	5006472	537,30	9,58
34	8,25	5005917	539,57	9,67
35	8,25	5005905	537,64	9,59
36	8,25	5005605	528,70	9,25
37	8,25	5005958	536,95	9,57
38	8,25	5005736	533,65	9,44
39	8,25	5006272	537,74	9,60
40	8,25	5005740	542,22	9,77
41	8,25	5005752	536,53	9,55
42	8,25	5005726	542,04	9,76
43	8,25	5005967	535,30	9,50
44	8,25	5005958	539,07	9,65
45	8,25	5005991	532,42	9,39
46	8,25	5006029	536,48	9,55
47	8,25	5006289	539,47	9,66
48	8,25	5005958	531,22	9,35
49	8,25	5005632	532,80	9,41
50	8,25	5005519	539,47	9,66
Average	8,25	5006005	536,51	9,55

Tabla 39. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 8,25 ohmios

4.4 Resistencia de precisión de 9,31 ohmios

En la Tabla 40 se muestran los valores de la R1 obtenida para las 50 mediciones llevadas a cabo con la resistencia de precisión de 9,31 ohmios.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
1	9,31	5006230	512,26	9,78
2	9,31	5005730	507,09	9,58
3	9,31	5005569	511,21	9,74
4	9,31	5005866	506,96	9,57
5	9,31	5006118	502,13	9,39
6	9,31	5005535	502,76	9,41
7	9,31	5005542	506,89	9,57
8	9,31	5005535	511,37	9,74
9	9,31	5005673	502,53	9,40
10	9,31	5006214	505,32	9,51
11	9,31	5006030	506,53	9,56
12	9,31	5005601	502,27	9,39
13	9,31	5005657	503,74	9,45
14	9,31	5006314	503,93	9,46

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
15	9,31	5005994	512,20	9,78
16	9,31	5005843	505,46	9,52
17	9,31	5006029	504,89	9,49
18	9,31	5005753	510,36	9,70
19	9,31	5005767	511,40	9,74
20	9,31	5005917	511,18	9,74
21	9,31	5006130	510,47	9,71
22	9,31	5005531	503,99	9,46
23	9,31	5006223	505,25	9,51
24	9,31	5006188	509,71	9,68
25	9,31	5005848	512,94	9,80
26	9,31	5006460	504,02	9,46
27	9,31	5006344	507,59	9,60
28	9,31	5005573	509,14	9,66
29	9,31	5005533	505,69	9,52
30	9,31	5005942	506,52	9,56
31	9,31	5006474	510,66	9,72
32	9,31	5006300	504,43	9,48
33	9,31	5006268	508,19	9,62
34	9,31	5005975	502,21	9,39
35	9,31	5006141	502,95	9,42
36	9,31	5005678	506,03	9,54
37	9,31	5006216	502,41	9,40
38	9,31	5006293	502,58	9,41
39	9,31	5005565	500,12	9,31
40	9,31	5006199	504,47	9,48
41	9,31	5006435	507,21	9,58
42	9,31	5005686	501,53	9,37
43	9,31	5005813	505,90	9,53
44	9,31	5006064	505,52	9,52
45	9,31	5006314	505,15	9,50
46	9,31	5005644	513,08	9,81
47	9,31	5005993	503,13	9,43
48	9,31	5006242	512,82	9,80
49	9,31	5005762	503,35	9,44
50	9,31	5005503	505,19	9,51
Average	9,31	5005945	506,45	9,55

Tabla 40. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 9,31 ohmios

4.5 Resistencia de precisión de 10 ohmios

La Tabla 41 muestra los valores de la R1 obtenida para las 50 mediciones efectuadas con la resistencia de precisión de 10 ohmios.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
1	10	5006334	490,49	9,63
2	10	5005816	490,54	9,63
3	10	5005662	488,43	9,55
4	10	5005919	491,23	9,66
5	10	5005637	485,19	9,42
6	10	5006399	487,23	9,50
7	10	5006181	483,95	9,38
8	10	5006240	484,47	9,40
9	10	5005623	484,91	9,41
10	10	5005745	487,31	9,50
11	10	5005878	481,07	9,27
12	10	5006435	490,77	9,64
13	10	5005991	482,97	9,34
14	10	5006190	489,74	9,60
15	10	5005642	489,71	9,60
16	10	5005788	491,24	9,66
17	10	5005840	493,19	9,73
18	10	5005966	487,94	9,53
19	10	5006052	491,58	9,67
20	10	5006398	488,63	9,56
21	10	5006197	494,03	9,76
22	10	5005667	490,04	9,61
23	10	5005641	489,60	9,59
24	10	5006076	485,78	9,45
25	10	5005917	483,64	9,37
26	10	5006122	485,69	9,44
27	10	5006208	486,45	9,47
28	10	5005887	486,52	9,48
29	10	5006389	487,20	9,50
30	10	5006015	484,60	9,40
31	10	5005793	485,86	9,45
32	10	5006018	487,01	9,49
33	10	5005772	492,05	9,69
34	10	5005603	485,71	9,44
35	10	5006008	489,14	9,57
36	10	5005732	484,49	9,40
37	10	5005867	491,54	9,67
38	10	5005562	493,02	9,72
39	10	5005849	483,35	9,36
40	10	5005502	485,53	9,44
41	10	5006268	491,49	9,67
42	10	5005957	491,81	9,68
43	10	5005683	486,37	9,47

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
44	10	5005679	491,29	9,66
45	10	5005528	492,47	9,70
46	10	5005930	486,86	9,49
47	10	5006372	486,34	9,47
48	10	5005883	488,45	9,55
49	10	5006342	489,07	9,57
50	10	5006139	486,13	9,46
Average	10	5005947	488,04	9,53

Tabla 41. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 10 ohmios

4.6 Resistencia de precisión de 12 ohmios

Los valores de la R1 obtenida para las 50 mediciones efectuadas con la resistencia de precisión de 12 ohmios, se presentan en la Tabla 42.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
1	12	5005600	445,93	9,66
2	12	5006201	446,95	9,70
3	12	5006195	444,67	9,61
4	12	5005618	439,20	9,40
5	12	5006120	442,08	9,51
6	12	5005657	439,10	9,39
7	12	5006274	443,05	9,55
8	12	5005569	439,73	9,42
9	12	5005995	440,84	9,46
10	12	5006278	443,07	9,55
11	12	5006301	448,18	9,75
12	12	5006492	442,77	9,54
13	12	5005661	440,53	9,45
14	12	5006335	445,74	9,65
15	12	5006297	443,75	9,57
16	12	5006285	443,54	9,57
17	12	5005726	447,96	9,74
18	12	5006382	441,59	9,49
19	12	5006200	441,40	9,48
20	12	5006390	444,32	9,60
21	12	5006210	439,03	9,39
22	12	5005944	444,86	9,62
23	12	5006489	443,29	9,56
24	12	5005976	441,65	9,49
25	12	5005836	448,22	9,75
26	12	5005543	446,80	9,69
27	12	5006372	447,01	9,70

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R1 Calculated (Ω)
28	12	5005949	442,07	9,51
29	12	5005584	447,67	9,73
30	12	5006409	440,09	9,43
31	12	5006269	436,79	9,31
32	12	5006384	444,59	9,61
33	12	5005890	448,00	9,74
34	12	5006375	443,78	9,57
35	12	5005525	441,81	9,50
36	12	5005859	437,29	9,33
37	12	5005796	438,96	9,39
38	12	5006097	440,70	9,46
39	12	5005957	445,69	9,65
40	12	5006213	448,80	9,77
41	12	5006134	447,78	9,73
42	12	5005618	444,09	9,59
43	12	5005768	442,68	9,53
44	12	5006071	440,44	9,45
45	12	5006312	443,20	9,55
46	12	5006193	442,02	9,51
47	12	5006101	440,62	9,45
48	12	5005724	441,67	9,49
49	12	5006440	440,08	9,43
50	12	5005984	440,86	9,46
Average	12	5006052	443,10	9,55

Tabla 42. Valores de R1 para la resistencia de precisión de 12 ohmios

5 Valores de los parámetros del QCM en aire según el modelo BVD

En este apartado se presentan los valores obtenidos de los diferentes parámetros del QCM en aire de acuerdo con el modelo de BVD. En todos los casos se ha hecho la media entre los diferentes valores intermedios que se han ido obteniendo en los apartados precedentes. El resumen de valores del modelo se muestra en la Tabla 43.

C0	C1	L1	R1	Fs
20 pF	125,5 fF	8,05 mH	9,54 Ω	5006 kHz

Tabla 43. Valores de los parámetros del QCM en aire para el modelo de BVD

6 Obtención de la resistencia de la rama serie R2 del modelo equivalente del QCM en agua

Se efectúa en este apartado la obtención de los valores de la resistencia R2 de la rama serie del modelo equivalente del QCM según la aproximación de BVD. Al igual que en el caso anterior del cálculo de la resistencia R1, la primera prueba se hace con una resistencia cuyo valor

óhmico es de 100. De igual forma se trata de averiguar los valores de resistencia idóneos para que caiga un 50% de la tensión en el QCM y poder de esta forma conseguir valores óptimos en la medida. Se hacen también en este apartado 50 medidas para cada valor de resistencia y se realiza la media aritmética. El procedimiento llevado a cabo ha sido descrito en el apartado 5 del capítulo Método propuesto.

6.1 Resistencia de precisión de 100 ohmios

En la Tabla 44 se muestran los valores de la R2 obtenida para las 50 mediciones llevadas a cabo con la resistencia de precisión de 100 ohmios. Dado que el valor medio de R1 obtenido es de 198,71 ohmios, se seleccionan 5 valores de resistencias de precisión en un rango centrado en torno a este valor. Por ello, en los siguientes subapartados se emplearán valores de resistencia de: 158Ω, 174Ω, 191Ω, 210Ω y 249Ω.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
1	100	5005502	676,86	199,92
2	100	5005305	675,60	198,71
3	100	5005118	670,10	193,58
4	100	5005603	673,20	196,46
5	100	5005225	665,31	189,24
6	100	5005334	675,35	198,49
7	100	5005217	682,47	205,39
8	100	5005046	676,84	199,90
9	100	5005324	670,57	194,01
10	100	5005116	670,27	193,74
11	100	5005103	667,34	191,07
12	100	5005041	669,27	192,82
13	100	5005158	678,17	201,18
14	100	5005608	673,84	197,05
15	100	5005456	671,36	194,74
16	100	5005516	670,49	193,94
17	100	5005520	674,27	197,46
18	100	5005142	676,17	199,26
19	100	5004855	672,77	196,05
20	100	5004961	678,84	201,83
21	100	5004772	680,60	203,54
22	100	5004708	677,66	200,68
23	100	5005583	677,79	200,81
24	100	5005516	677,11	200,16
25	100	5005527	673,85	197,06
26	100	5005274	681,88	204,81
27	100	5004800	677,69	200,72
28	100	5005244	675,52	198,65
29	100	5005608	682,79	205,71
30	100	5005128	679,21	202,18
31	100	5004799	677,02	200,08

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
32	100	5005681	679,48	202,45
33	100	5005470	679,98	202,93
34	100	5005420	680,72	203,66
35	100	5005395	681,18	204,11
36	100	5004822	675,06	198,21
37	100	5005526	668,76	192,35
38	100	5005033	666,39	190,21
39	100	5005267	675,52	198,64
40	100	5005259	678,31	201,32
41	100	5004773	679,09	202,08
42	100	5005493	677,49	200,52
43	100	5005205	676,05	199,14
44	100	5005111	679,67	202,64
45	100	5005088	673,80	197,02
46	100	5005696	679,43	202,40
47	100	5004975	671,56	194,92
48	100	5004836	672,77	196,05
49	100	5004814	680,87	203,80
50	100	5005541	670,08	193,56
Average	100	5005230	675,53	198,71

Tabla 44. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 100 ohmios

6.2 Resistencia de precisión de 158 ohmios

En la Tabla 45 se muestran los valores de la R2 obtenida para las 50 mediciones llevadas a cabo con la resistencia de precisión de 158 ohmios.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
1	158	5005668	571,48	201,17
2	158	5005110	573,74	203,12
3	158	5005199	569,20	199,22
4	158	5005316	563,34	194,29
5	158	5004839	573,56	202,97
6	158	5005453	569,18	199,20
7	158	5004783	572,37	201,94
8	158	5005107	565,40	196,01
9	158	5005688	573,92	203,28
10	158	5005091	568,36	198,51
11	158	5005180	568,15	198,33
12	158	5005018	568,53	198,65
13	158	5004818	562,50	193,60
14	158	5005316	569,25	199,26
15	158	5005013	571,68	201,34

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
16	158	5005363	568,24	198,40
17	158	5005387	563,05	194,05
18	158	5005698	567,29	197,60
19	158	5005637	569,75	199,69
20	158	5005371	568,69	198,78
21	158	5005659	564,83	195,53
22	158	5004947	563,06	194,06
23	158	5005359	574,23	203,55
24	158	5004905	570,56	200,38
25	158	5005373	569,10	199,13
26	158	5005053	566,65	197,06
27	158	5005512	567,66	197,91
28	158	5005055	567,81	198,04
29	158	5005443	569,33	199,33
30	158	5005316	569,60	199,55
31	158	5005337	568,42	198,55
32	158	5005286	561,86	193,08
33	158	5005270	563,95	194,80
34	158	5005386	566,48	196,92
35	158	5005465	563,69	194,59
36	158	5005204	563,93	194,78
37	158	5005199	576,08	205,17
38	158	5004789	572,97	202,45
39	158	5005238	570,35	200,20
40	158	5005656	567,06	197,40
41	158	5005595	573,23	202,68
42	158	5004723	564,39	195,16
43	158	5005271	566,55	196,98
44	158	5005072	572,64	202,17
45	158	5005435	570,51	200,34
46	158	5004732	563,12	194,11
47	158	5005330	567,94	198,15
48	158	5004976	575,10	204,31
49	158	5005091	565,70	196,26
50	158	5005527	565,42	196,02
Average	158	5005245	568,40	198,56

Tabla 45. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 158 ohmios

6.3 Resistencia de precisión de 174 ohmios

La Tabla 46 muestra los valores de la R2 obtenida para las 50 mediciones efectuadas con la resistencia de precisión de 174 ohmios.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
1	174	5004817	547,11	200,65
2	174	5004925	544,55	198,50
3	174	5005512	550,11	203,21
4	174	5005582	545,45	199,25
5	174	5005698	542,90	197,11
6	174	5004773	546,03	199,75
7	174	5004953	544,97	198,85
8	174	5005138	537,58	192,74
9	174	5005634	545,44	199,25
10	174	5005376	544,46	198,42
11	174	5005501	545,69	199,46
12	174	5004708	543,97	198,01
13	174	5005093	545,73	199,49
14	174	5004988	542,57	196,84
15	174	5005476	550,48	203,54
16	174	5005650	539,25	194,10
17	174	5004961	547,55	201,03
18	174	5004967	542,39	196,69
19	174	5005699	546,76	200,36
20	174	5005297	544,06	198,09
21	174	5004718	545,23	199,07
22	174	5005482	539,20	194,06
23	174	5004887	550,25	203,34
24	174	5004730	538,45	193,44
25	174	5005111	547,66	201,12
26	174	5005452	541,85	196,24
27	174	5005476	541,84	196,24
28	174	5005583	542,81	197,04
29	174	5005097	541,22	195,73
30	174	5005698	539,11	193,98
31	174	5004921	545,96	199,68
32	174	5004785	548,44	201,79
33	174	5005584	549,10	202,35
34	174	5005054	549,08	202,34
35	174	5005547	545,71	199,47
36	174	5004884	541,52	195,97
37	174	5005392	542,67	196,92
38	174	5005310	545,16	199,01
39	174	5005054	549,01	202,28
40	174	5005364	545,80	199,55
41	174	5005070	541,42	195,89
42	174	5005155	545,92	199,65
43	174	5005602	545,33	199,16

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
44	174	5004700	536,48	191,84
45	174	5004814	547,52	201,01
46	174	5005420	543,36	197,50
47	174	5005222	543,54	197,65
48	174	5005031	545,74	199,50
49	174	5005179	547,41	200,91
50	174	5004814	544,28	198,27
Average	174	5005198	544,56	198,53

Tabla 46. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 174 ohmios

6.4 Resistencia de precisión de 191 ohmios

En la Tabla 47 se muestran los valores de la R2 obtenida para las 50 mediciones llevadas a cabo con la resistencia de precisión de 191 ohmios.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
1	191	5005224	519,92	197,31
2	191	5004836	521,11	198,30
3	191	5005245	521,03	198,23
4	191	5004852	521,32	198,47
5	191	5005436	518,48	196,12
6	191	5005034	517,70	195,48
7	191	5005289	518,25	195,93
8	191	5005431	522,68	199,61
9	191	5005307	523,65	200,42
10	191	5004715	516,65	194,62
11	191	5005662	517,58	195,38
12	191	5005418	517,81	195,56
13	191	5005563	521,27	198,43
14	191	5005399	521,95	198,99
15	191	5005681	519,30	196,79
16	191	5005343	523,17	200,02
17	191	5005279	522,10	199,13
18	191	5005538	526,68	202,99
19	191	5005102	519,56	197,01
20	191	5005410	522,40	199,37
21	191	5005319	517,04	194,94
22	191	5005354	522,55	199,50
23	191	5004738	523,34	200,16
24	191	5005491	520,29	197,61
25	191	5005398	522,91	199,80
26	191	5005620	518,54	196,17
27	191	5004849	519,53	196,99

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
28	191	5005518	525,44	201,94
29	191	5005243	518,81	196,39
30	191	5004861	522,73	199,65
31	191	5004799	520,07	197,43
32	191	5005640	516,30	194,33
33	191	5005608	515,30	193,52
34	191	5005106	515,06	193,32
35	191	5004837	519,02	196,57
36	191	5005467	520,54	197,82
37	191	5005261	522,18	199,19
38	191	5005457	520,07	197,43
39	191	5005108	521,68	198,78
40	191	5005041	516,60	194,57
41	191	5004714	523,59	200,37
42	191	5005376	519,56	197,01
43	191	5005633	520,16	197,51
44	191	5005666	522,86	199,76
45	191	5005597	523,36	200,18
46	191	5005297	519,17	196,69
47	191	5004753	527,48	203,67
48	191	5005275	522,84	199,75
49	191	5005356	521,45	198,58
50	191	5005656	526,87	203,15
Average	191	5005276	520,76	198,02

Tabla 47. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 191 ohmios

6.5 Resistencia de precisión de 210 ohmios

La Tabla 48 muestra los valores de la R2 obtenida para las 50 mediciones efectuadas con la resistencia de precisión de 210 ohmios.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
1	210	5005532	502,58	202,64
2	210	5005604	490,43	192,57
3	210	5004804	497,27	198,18
4	210	5005489	501,06	201,35
5	210	5004762	497,45	198,32
6	210	5005444	494,64	196,00
7	210	5004927	496,78	197,77
8	210	5005584	492,85	194,54
9	210	5004887	499,13	199,73
10	210	5005273	500,21	200,63
11	210	5005676	497,49	198,36

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
12	210	5005274	502,99	202,99
13	210	5004812	500,60	200,96
14	210	5005498	499,10	199,70
15	210	5005390	502,52	202,58
16	210	5005238	499,38	199,94
17	210	5005452	495,75	196,91
18	210	5004853	498,09	198,86
19	210	5005049	491,52	193,45
20	210	5004965	494,03	195,50
21	210	5005283	493,18	194,81
22	210	5005315	493,66	195,20
23	210	5005263	490,47	192,60
24	210	5004934	494,72	196,07
25	210	5004866	499,20	199,79
26	210	5004832	497,38	198,27
27	210	5004954	496,56	197,59
28	210	5005120	491,32	193,29
29	210	5005617	494,30	195,72
30	210	5005395	497,98	198,77
31	210	5005405	496,65	197,66
32	210	5005435	496,15	197,25
33	210	5005101	493,88	195,38
34	210	5004813	497,16	198,09
35	210	5005427	503,62	203,52
36	210	5005599	497,50	198,37
37	210	5005203	491,77	193,66
38	210	5005264	493,40	194,99
39	210	5005015	498,66	199,33
40	210	5005313	495,37	196,61
41	210	5005454	497,52	198,38
42	210	5005243	498,41	199,13
43	210	5005671	503,36	203,30
44	210	5004927	500,49	200,87
45	210	5005489	493,40	194,99
46	210	5004941	497,31	198,21
47	210	5005664	499,48	200,03
48	210	5005054	495,98	197,11
49	210	5005253	499,10	199,71
50	210	5005201	499,55	200,08
Average	210	5005231	497,03	197,99

Tabla 48. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 210 ohmios

6.6 Resistencia de precisión de 249 ohmios

En la Tabla 49 se muestran los valores de la R2 obtenida para las 50 mediciones llevadas a cabo con la resistencia de precisión de 249 ohmios.

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
1	249	5005548	453,58	197,15
2	249	5005611	458,74	201,49
3	249	5005086	454,14	197,62
4	249	5004995	454,36	197,80
5	249	5005192	456,34	199,46
6	249	5005394	453,33	196,94
7	249	5005331	459,13	201,82
8	249	5004966	455,07	198,39
9	249	5004998	455,93	199,12
10	249	5004971	456,93	199,96
11	249	5004848	451,64	195,54
12	249	5005429	458,07	200,92
13	249	5004773	453,91	197,42
14	249	5005639	458,18	201,02
15	249	5005241	456,20	199,35
16	249	5005317	459,10	201,80
17	249	5005108	451,74	195,62
18	249	5004805	458,10	200,95
19	249	5004861	454,26	197,72
20	249	5005638	452,85	196,54
21	249	5004932	456,14	199,29
22	249	5005642	455,62	198,86
23	249	5005469	451,99	195,83
24	249	5005567	455,05	198,38
25	249	5004704	455,17	198,48
26	249	5005524	452,66	196,38
27	249	5005191	454,32	197,77
28	249	5005637	459,35	202,01
29	249	5005202	454,42	197,85
30	249	5005063	458,22	201,05
31	249	5005475	456,93	199,96
32	249	5005545	458,83	201,57
33	249	5005136	456,52	199,62
34	249	5004939	455,48	198,74
35	249	5005239	454,84	198,20
36	249	5005519	458,03	200,90
37	249	5004996	457,38	200,35
38	249	5005493	458,11	200,96
39	249	5004897	451,53	195,45

Test index	R precision value (Ω)	Resonance frequency (Hz)	Voltage measure (mV)	R2 Calculated (Ω)
40	249	5005550	454,48	197,90
41	249	5005134	453,78	197,32
42	249	5005366	458,33	201,14
43	249	5004727	452,91	196,59
44	249	5004984	457,29	200,27
45	249	5005294	456,13	199,28
46	249	5005555	450,03	194,21
47	249	5004742	458,33	201,15
48	249	5005451	452,29	196,07
49	249	5005587	457,36	200,33
50	249	5004829	455,35	198,63
Average	249	5005223	455,57	198,82

Tabla 49. Valores de R2 para la resistencia de precisión de 249 ohmios

7 Valores de los parámetros del QCM en agua según el modelo BVD

En este apartado se presentan los valores resultantes de los diferentes parámetros del QCM en agua de acuerdo con el modelo de BVD. En todos los casos se ha hecho la media entre los diferentes valores intermedios que se han ido obteniendo en los apartados precedentes. El resumen de valores del modelo se muestra en la Tabla 50.

150

C0	C1	L1	R1	L2	R2	Fs
20 pF	125,5 fF	8,05 mH	9,54 Ω	2,46 μ H	198,39 Ω	5005 kHz

Tabla 50 Valores de los parámetros del QCM en agua para el modelo de BVD

Capítulo 8

Validación

1 Introducción

En esta sección se muestra como se ha efectuado la validación del método propuesto. Para conseguirlo, tal y como se ha mencionado en el capítulo correspondiente a la implementación práctica, en la sub-sección de equipos de medida, el instrumental empleado es comercial. Consiste en dos analizadores de redes vectoriales:

- El modelo ZVR de la casa Rohde & Schwarz.
- El modelo Bode 100 de la casa OMICRON Lab.

El primero de ellos está catalogado como de gama alta, y el segundo de gama baja.

2 Procedimiento empleado para la caracterización con equipos comerciales.

En ambos casos el procedimiento de caracterización del cristal ha sido el mismo, y está basado en una nota técnica de aplicación, elaborada por OMICRON Lab sobre el equipo fabricado por ellos, el BODE 100 “*Equivalent Circuit Determination of Quartz Crystals*”. Los pasos seguidos se desglosan a continuación, válidos tanto para medio gaseoso como líquido:

2.1 Determinación de la capacidad paralelo.

Para la medición de la capacidad paralela C_0 es necesario medir la impedancia del cristal a una frecuencia lo suficientemente apartada de la de resonancia. Dado que este QCM posee una frecuencia de resonancia de 5MHz se realizará la lectura a 3,5MHz. Se espera una impedancia capacitiva pura en la medida, que será obtenida de forma directa por los equipos.

2.2 Determinación de las frecuencias de resonancia.

Para la medición de las frecuencias de resonancia serie y paralelo se lleva a cabo un barrido de frecuencias y se hace lectura de la ganancia, como si se tratase de un filtro. Uno de los terminales se conecta con el canal que actúa como generador y el otro al que realiza la medición.

En un barrido amplio, la medición suele dar como lectura varias frecuencias de resonancia. Sólo será necesario hacer lectura de las primeras, modificando los rangos de frecuencias para obtener una mayor resolución y hallar de forma precisa los puntos en los que se dan el máximo y el mínimo (serie y paralelo respectivamente). Se hace lectura de la frecuencia serie (f_s) y de la frecuencia paralelo (f_p) y mediante la Ecuación 27 y la Ecuación 28, se averiguan los valores de la capacidad serie (C_1) y la inductancia serie (L_1).

$$C_1 = 2C_0 \left(\frac{f_p}{f_s} - 1 \right)$$

Ecuación 27 Expresión para obtención de la capacidad serie C1

$$L_1 = \frac{1}{(4\pi^2 f_s^2 C_1)}$$

Ecuación 28 Expresión para obtención de la inductancia serie L1

2.3 Determinación de la resistencia serie.

Para hacer la medición de la resistencia serie, se ajusta el equipo a la frecuencia de resonancia y se incluye una resistencia calibrada (R_{ref}) en serie con el cristal. Se realiza un barrido de frecuencias y se lee la atenuación en decibelios (a), tras lo cual se obtiene el valor de la resistencia serie R_1 mediante la Ecuación 29.

$$R_1 = 2R_{ref} \left(10^{\frac{-a}{20}} - 1 \right)$$

Ecuación 29 Expresión para obtención de la resistencia serie R_1

2.4 Circuito empleado.

Para este caso, se ha diseñado un circuito que permita realizar el conexionado de forma sencilla con los equipos, así como la posibilidad de incluir la resistencia de referencia R_{ref} en los diferentes ensayos. Es muy importante que el circuito permita acoplar el QCM con el soporte. El resultado es el mostrado en la Ilustración 68.



Ilustración 68 Placa diseñada para realizar la validación

3 Resultados obtenidos con los equipos referencia.

Con el objetivo de realizar la validación, se ha llevado a cabo el proceso anteriormente descrito con cada uno de los equipos tanto para medio aéreo y como para medio líquido. Se han realizado un total de 50 pruebas para cada una de las medidas con el fin de comprobar que los resultados eran satisfactorios. Las medidas obtenidas con el equipo ZVR de la casa Rohde & Schwarz se muestran en la Tabla 51 y en la Tabla 52 para medio aéreo y líquido respectivamente.

Test	C0 (F)	C1 (F)	L1 (H)	R1 (Ω)
1	2,016E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,64
2	2,016E-11	1,25E-13	8,11E-03	9,63
3	2,015E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,62
4	2,016E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,61
5	2,017E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,61
6	2,023E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,64
7	2,022E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,62
8	2,016E-11	1,25E-13	8,07E-03	9,61
9	2,025E-11	1,25E-13	8,08E-03	9,60
10	2,019E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,63
11	2,020E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,60
12	2,015E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,63
13	2,024E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,62
14	2,021E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,62
15	2,016E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,60
16	2,018E-11	1,25E-13	8,08E-03	9,63
17	2,019E-11	1,25E-13	8,08E-03	9,63
18	2,021E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,60
19	2,021E-11	1,25E-13	8,08E-03	9,61
20	2,018E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,62
21	2,024E-11	1,25E-13	8,11E-03	9,60
22	2,018E-11	1,25E-13	8,07E-03	9,60
23	2,017E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,63
24	2,023E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,61
25	2,024E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,60
26	2,019E-11	1,25E-13	8,11E-03	9,64
27	2,022E-11	1,25E-13	8,08E-03	9,61
28	2,017E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,61
29	2,024E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,64
30	2,024E-11	1,25E-13	8,08E-03	9,61
31	2,018E-11	1,25E-13	8,11E-03	9,61
32	2,015E-11	1,25E-13	8,07E-03	9,62
33	2,020E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,61
34	2,021E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,61
35	2,024E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,60
36	2,017E-11	1,25E-13	8,08E-03	9,63
37	2,019E-11	1,25E-13	8,07E-03	9,62
38	2,021E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,62
39	2,015E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,63
40	2,016E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,61
41	2,022E-11	1,25E-13	8,07E-03	9,60
42	2,015E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,62
43	2,015E-11	1,25E-13	8,07E-03	9,63

Test	C0 (F)	C1 (F)	L1 (H)	R1 (Ω)
44	2,021E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,61
45	2,022E-11	1,25E-13	8,08E-03	9,62
46	2,025E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,63
47	2,023E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,61
48	2,017E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,62
49	2,016E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,62
50	2,021E-11	1,25E-13	8,10E-03	9,62
Average	2,020E-11	1,25E-13	8,09E-03	9,62

Tabla 51. Valores de los parámetros del QCM en aire con ZVR R&S

Test	C0 (F)	C1 (F)	L1 (H)	R1 (Ω)	L2 (H)	R2 (Ω)
1	2,012E-11	1,251E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,37
2	2,009E-11	1,249E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,28
3	2,012E-11	1,249E-13	8,10E-03	9,62	2,44E-06	199,39
4	2,009E-11	1,251E-13	8,09E-03	9,62	2,44E-06	199,35
5	2,011E-11	1,250E-13	8,11E-03	9,61	2,44E-06	199,12
6	2,008E-11	1,250E-13	8,09E-03	9,61	2,44E-06	199,15
7	2,011E-11	1,250E-13	8,11E-03	9,60	2,44E-06	199,02
8	2,010E-11	1,249E-13	8,11E-03	9,60	2,44E-06	199,00
9	2,012E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,09
10	2,009E-11	1,249E-13	8,11E-03	9,62	2,44E-06	199,00
11	2,009E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,43
12	2,011E-11	1,249E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,02
13	2,011E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,21
14	2,010E-11	1,251E-13	8,11E-03	9,60	2,44E-06	199,25
15	2,009E-11	1,249E-13	8,10E-03	9,60	2,44E-06	199,13
16	2,011E-11	1,249E-13	8,11E-03	9,61	2,44E-06	199,02
17	2,012E-11	1,249E-13	8,11E-03	9,60	2,44E-06	199,38
18	2,010E-11	1,251E-13	8,10E-03	9,60	2,44E-06	199,00
19	2,012E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,62	2,44E-06	198,96
20	2,008E-11	1,249E-13	8,10E-03	9,60	2,44E-06	199,37
21	2,010E-11	1,249E-13	8,11E-03	9,61	2,44E-06	199,10
22	2,010E-11	1,252E-13	8,09E-03	9,61	2,44E-06	199,26
23	2,008E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,60	2,44E-06	199,20
24	2,010E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,14
25	2,008E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,60	2,44E-06	199,38
26	2,010E-11	1,249E-13	8,11E-03	9,62	2,44E-06	199,42
27	2,009E-11	1,249E-13	8,11E-03	9,61	2,44E-06	199,29
28	2,012E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,62	2,44E-06	199,01
29	2,011E-11	1,251E-13	8,11E-03	9,61	2,44E-06	199,32
30	2,009E-11	1,251E-13	8,11E-03	9,62	2,44E-06	198,97
31	2,008E-11	1,251E-13	8,10E-03	9,60	2,44E-06	199,33
32	2,010E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,60	2,44E-06	199,18
33	2,010E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,62	2,44E-06	198,96

Test	C0 (F)	C1 (F)	L1 (H)	R1 (Ω)	L2 (H)	R2 (Ω)
34	2,011E-11	1,250E-13	8,11E-03	9,62	2,44E-06	199,27
35	2,011E-11	1,249E-13	8,10E-03	9,60	2,44E-06	199,08
36	2,011E-11	1,250E-13	8,11E-03	9,60	2,44E-06	199,28
37	2,012E-11	1,249E-13	8,11E-03	9,62	2,44E-06	199,29
38	2,008E-11	1,251E-13	8,10E-03	9,62	2,44E-06	199,17
39	2,009E-11	1,250E-13	8,11E-03	9,62	2,44E-06	199,22
40	2,010E-11	1,250E-13	8,11E-03	9,61	2,44E-06	199,21
41	2,011E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,13
42	2,012E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,62	2,44E-06	199,18
43	2,011E-11	1,251E-13	8,10E-03	9,62	2,44E-06	199,13
44	2,010E-11	1,249E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,10
45	2,009E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,41
46	2,012E-11	1,249E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	198,98
47	2,008E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,60	2,44E-06	199,07
48	2,011E-11	1,251E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,41
49	2,008E-11	1,251E-13	8,09E-03	9,61	2,44E-06	198,98
50	2,012E-11	1,250E-13	8,11E-03	9,60	2,44E-06	199,03
Average	2,010E-11	1,250E-13	8,10E-03	9,61	2,44E-06	199,18

Tabla 52. Valores de los parámetros del QCM en agua con ZVR R&S

Asimismo, los resultados conseguidos con el Bode 100 de la casa OMICRON Lab se muestran en la Tabla 53 y en la Tabla 54 para medio aéreo y líquido respectivamente.

Test	C0 (F)	C1 (F)	L1 (H)	R1 (Ω)
1	2,005E-11	1,256E-13	8,06E-03	9,54
2	2,001E-11	1,257E-13	8,09E-03	9,58
3	2,005E-11	1,259E-13	8,09E-03	9,54
4	2,004E-11	1,254E-13	8,06E-03	9,54
5	1,994E-11	1,257E-13	8,09E-03	9,59
6	1,995E-11	1,257E-13	8,09E-03	9,59
7	2,006E-11	1,258E-13	8,06E-03	9,58
8	1,993E-11	1,257E-13	8,07E-03	9,54
9	1,996E-11	1,261E-13	8,07E-03	9,54
10	2,000E-11	1,254E-13	8,10E-03	9,60
11	1,997E-11	1,257E-13	8,08E-03	9,54
12	2,007E-11	1,258E-13	8,07E-03	9,59
13	2,000E-11	1,254E-13	8,04E-03	9,58
14	1,994E-11	1,258E-13	8,04E-03	9,55
15	1,999E-11	1,258E-13	8,05E-03	9,54
16	1,997E-11	1,260E-13	8,08E-03	9,60
17	2,000E-11	1,263E-13	8,06E-03	9,55
18	1,999E-11	1,257E-13	8,05E-03	9,59
19	2,000E-11	1,262E-13	8,04E-03	9,57
20	1,994E-11	1,258E-13	8,09E-03	9,55
21	2,007E-11	1,257E-13	8,10E-03	9,57

Test	C0 (F)	C1 (F)	L1 (H)	R1 (Ω)
22	2,005E-11	1,254E-13	8,05E-03	9,54
23	1,998E-11	1,258E-13	8,07E-03	9,54
24	1,997E-11	1,262E-13	8,07E-03	9,60
25	1,996E-11	1,262E-13	8,04E-03	9,59
26	2,004E-11	1,254E-13	8,08E-03	9,58
27	2,003E-11	1,257E-13	8,07E-03	9,55
28	2,005E-11	1,261E-13	8,04E-03	9,57
29	2,001E-11	1,259E-13	8,10E-03	9,57
30	2,001E-11	1,254E-13	8,05E-03	9,58
31	1,993E-11	1,254E-13	8,09E-03	9,58
32	2,005E-11	1,254E-13	8,04E-03	9,59
33	2,003E-11	1,263E-13	8,08E-03	9,56
34	2,004E-11	1,254E-13	8,10E-03	9,60
35	2,004E-11	1,256E-13	8,09E-03	9,55
36	2,002E-11	1,263E-13	8,08E-03	9,57
37	2,006E-11	1,255E-13	8,06E-03	9,60
38	2,004E-11	1,262E-13	8,07E-03	9,54
39	2,004E-11	1,259E-13	8,06E-03	9,54
40	2,007E-11	1,254E-13	8,08E-03	9,58
41	1,998E-11	1,262E-13	8,10E-03	9,60
42	1,996E-11	1,260E-13	8,06E-03	9,56
43	2,005E-11	1,260E-13	8,09E-03	9,57
44	2,002E-11	1,262E-13	8,07E-03	9,55
45	2,005E-11	1,257E-13	8,07E-03	9,59
46	1,993E-11	1,260E-13	8,09E-03	9,58
47	1,995E-11	1,259E-13	8,04E-03	9,54
48	1,995E-11	1,254E-13	8,09E-03	9,58
49	1,994E-11	1,260E-13	8,07E-03	9,58
50	2,006E-11	1,255E-13	8,04E-03	9,60
Average	2,000E-11	1,258E-13	8,07E-03	9,57

Tabla 53. Valores de los parámetros del QCM en aire con BODE100

Test	C0 (F)	C1 (F)	L1 (H)	R1 (Ω)	L2 (H)	R2 (Ω)
1	1,998E-11	1,244E-13	8,15E-03	9,56	2,45E-06	197,89
2	1,995E-11	1,248E-13	8,13E-03	9,59	2,45E-06	197,79
3	2,002E-11	1,250E-13	8,17E-03	9,56	2,45E-06	197,22
4	2,000E-11	1,244E-13	8,15E-03	9,57	2,45E-06	197,65
5	2,003E-11	1,245E-13	8,13E-03	9,60	2,44E-06	197,99
6	1,998E-11	1,250E-13	8,14E-03	9,55	2,46E-06	197,49
7	1,999E-11	1,248E-13	8,12E-03	9,59	2,44E-06	198,07
8	2,000E-11	1,246E-13	8,16E-03	9,60	2,44E-06	198,23
9	2,004E-11	1,247E-13	8,13E-03	9,59	2,45E-06	197,02
10	1,995E-11	1,244E-13	8,16E-03	9,54	2,45E-06	198,15
11	2,002E-11	1,247E-13	8,16E-03	9,59	2,45E-06	197,62

Test	C0 (F)	C1 (F)	L1 (H)	R1 (Ω)	L2 (H)	R2 (Ω)
12	2,004E-11	1,246E-13	8,13E-03	9,61	2,44E-06	198,16
13	1,999E-11	1,251E-13	8,17E-03	9,54	2,44E-06	198,18
14	2,007E-11	1,251E-13	8,15E-03	9,59	2,45E-06	198,44
15	2,006E-11	1,245E-13	8,14E-03	9,59	2,45E-06	198,37
16	1,999E-11	1,250E-13	8,14E-03	9,54	2,44E-06	198,08
17	2,002E-11	1,244E-13	8,16E-03	9,54	2,44E-06	198,47
18	1,999E-11	1,247E-13	8,17E-03	9,60	2,44E-06	197,48
19	2,001E-11	1,245E-13	8,13E-03	9,59	2,44E-06	198,12
20	1,998E-11	1,250E-13	8,16E-03	9,53	2,45E-06	198,48
21	2,000E-11	1,249E-13	8,14E-03	9,58	2,45E-06	198,44
22	1,994E-11	1,246E-13	8,17E-03	9,60	2,44E-06	197,95
23	1,994E-11	1,245E-13	8,18E-03	9,56	2,45E-06	198,24
24	1,996E-11	1,250E-13	8,15E-03	9,56	2,44E-06	197,96
25	2,007E-11	1,252E-13	8,13E-03	9,55	2,46E-06	197,30
26	2,002E-11	1,250E-13	8,17E-03	9,59	2,45E-06	198,05
27	1,997E-11	1,244E-13	8,17E-03	9,61	2,45E-06	197,54
28	2,007E-11	1,249E-13	8,12E-03	9,58	2,45E-06	197,54
29	2,002E-11	1,249E-13	8,12E-03	9,59	2,46E-06	197,90
30	2,003E-11	1,243E-13	8,16E-03	9,60	2,45E-06	197,50
31	2,004E-11	1,250E-13	8,16E-03	9,54	2,45E-06	197,55
32	1,995E-11	1,249E-13	8,17E-03	9,54	2,44E-06	198,22
33	2,003E-11	1,252E-13	8,12E-03	9,55	2,45E-06	197,79
34	1,995E-11	1,244E-13	8,17E-03	9,57	2,45E-06	197,41
35	2,004E-11	1,247E-13	8,13E-03	9,58	2,46E-06	198,26
36	2,001E-11	1,244E-13	8,16E-03	9,54	2,46E-06	198,29
37	1,997E-11	1,246E-13	8,14E-03	9,58	2,44E-06	197,22
38	1,997E-11	1,250E-13	8,15E-03	9,57	2,45E-06	198,41
39	2,005E-11	1,252E-13	8,12E-03	9,60	2,46E-06	198,31
40	2,004E-11	1,246E-13	8,17E-03	9,55	2,45E-06	198,19
41	1,997E-11	1,244E-13	8,14E-03	9,60	2,45E-06	197,69
42	2,003E-11	1,247E-13	8,16E-03	9,59	2,45E-06	198,30
43	1,999E-11	1,251E-13	8,15E-03	9,60	2,44E-06	198,22
44	2,003E-11	1,246E-13	8,13E-03	9,57	2,44E-06	197,09
45	2,007E-11	1,250E-13	8,13E-03	9,58	2,45E-06	197,78
46	2,005E-11	1,248E-13	8,14E-03	9,58	2,46E-06	197,80
47	1,998E-11	1,249E-13	8,13E-03	9,54	2,46E-06	197,41
48	1,993E-11	1,247E-13	8,15E-03	9,55	2,45E-06	197,16
49	1,996E-11	1,250E-13	8,14E-03	9,55	2,46E-06	197,27
50	2,000E-11	1,253E-13	8,13E-03	9,54	2,46E-06	197,96
Average	2,000E-11	1,248E-13	8,147E-03	9,57	2,45E-06	197,87

Tabla 54. Valores de los parámetros del QCM en agua con BODE100

A continuación, en la Tabla 55 y en la Tabla 56 se muestra la comparación de las medidas obtenidas mediante los equipos de referencia y el método propuesto para agua y aire respectivamente.

	C0	C1	L1	R1
ZVR R&S	20,2 pF	124,9 fF	8,09 mH	9,62 Ω
BODE 100	20 pF	125,8 fF	8,07 mH	9,57 Ω
Mét. Prop.	20 pF	125,5 fF	8,05 mH	9,54 Ω

Tabla 55 Comparativa medidas en aire

	C0	C1	L1	R1	L2	R2
ZVR R&S	20,1 pF	125 fF	8,1 mH	9,61 Ω	2,44 μ H	199,18 Ω
BODE 100	20 pF	124,8 fF	8,15 mH	9,57 Ω	2,45 μ H	197,87 Ω
Mét. Prop.	20 pF	125,5 fF	8,05 mH	9,54 Ω	2,46 μ H	198,39 Ω

Tabla 56 Comparativa medidas en agua

De los resultados obtenidos se desprende que, el método propuesto obtiene valores de los parámetros muy próximos a los obtenidos mediante los equipos de referencia, lo cual valida dicho método.

Capítulo 9

Conclusiones

1 Conclusiones

Las principales conclusiones que se pueden extraer del trabajo de investigación realizado, atendiendo a los resultados que se han obtenido como consecuencia de aplicación del método que se propone y, la comparación llevada a cabo con otros métodos de caracterización ya contrastados, son las que se relacionan seguidamente en detalle:

- Se consigue desarrollar un método de caracterización alternativo y/o complementario a los existentes. Se contempla en el método los modos de operación del QCM tanto en medio aéreo como en medio líquido. Además es posible efectuar la caracterización tanto en un medio como en otro indistintamente.
- Uno de los objetivos ansiados desde el comienzo, que era la posibilidad de que se pudiese efectuar de forma sencilla, ha sido conseguido. En su aplicación de forma aproximada es rápido y si se desea precisión conlleva un poco más de tiempo, pero en ambos casos la ejecución es sencilla y procedural.
- Métodos precedentes de caracterización como el dimensional se realizan sobre el sensor QCM aislado. Esto conllevaba el tener que realizar nuevas aproximaciones o pruebas sobre el soporte en que se ubicaría el cristal de cuarzo. El método propuesto se realiza directamente con el cristal sobre el soporte, teniendo en cuenta este último ya en la caracterización. Esto es una gran ventaja, dado que las mediciones posteriores serán efectuadas con el conjunto soporte-sensor.
- El método es flexible y ampliable. Futuras aproximaciones basadas en modelos del cristal que provengan de la aproximación BVD pueden ser incorporadas al modelo, con las peculiaridades que conlleve el método.
- Uno de los problemas fundamentales en el inicio de la línea de investigación, que era la carencia de instrumental adecuado del laboratorio de electrónica, queda subsanado con el método desarrollado. Este puede ser efectuado en su aplicación de forma aproximada, únicamente con un generador de funciones y un osciloscopio. Si se desea mayor precisión sobre un mismo instrumental sería necesario automatizar la tarea con un instrumento virtual, quedando la precisión supeditada únicamente al equipamiento.
- El método es sumamente sencillo e intuitivo, por estar basado en principios básicos. Este hecho conlleva una fácil aplicación, incluso por personal que no sea de un perfil eminentemente electrónico. Se vuelve a insistir en esta conclusión parcial en el carácter procedural del método.
- Tal y como se desprende del capítulo de validación, los valores obtenidos mediante el método propuesto son satisfactorios. Las variaciones existentes pueden ser debidas entre otras a la dificultad de reproducir las mismas condiciones en las que se desarrollan los experimentos.

Capítulo 10

Producción científica y trabajos futuros

1 Producción científica y trabajos futuros

Como resultado de las investigaciones se ha publicado el siguiente artículo:

J.L. Casteleiro-Roca, J.L. Calvo-Rolle, M.C. Meizoso-Lopez, A. Piñón-Pazos, B.A. Rodríguez-Gómez, New approach for the QCM sensors characterization, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 207, 1 March 2014, Pages 1-9, ISSN 0924-4247, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2013.12.002>. Indexado en el Web of Science. Factor de impacto año 2012 de 1.841. Factor de impacto de los últimos 5 años de 2.084. Journal presente en dos categorías en el Q1 en ambas:

Category Name	Total Journals in Category	Journal Rank in Category	Quartile in Category
ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC	243	58	Q1
INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION	57	12	Q1

Tabla 57 Métrica de *Sensors and Actuators A*. Fuente WoS.

Asimismo se ha registrado el siguiente software:

Denominación: QCM_CH - Quartz Crystal Microbalance CHaracterization

Tipo de propiedad industrial: Software registrado

Inventores/autores/obtentores: Andrés Piñón Pazos; Jose Luis Casteleiro Roca; Maria del Carmen Meizoso Lopez; Jose Luis Calvo Rolle

Entidad titular: UNIVERSIDADE DA CORUÑA (UDC)

Cód. de referencia/registro: C-189-2014 Número de solicitud: C-189-2014

País de prioridad: España

Fecha: 20-06-2014

Son numerosos los trabajos que se pueden llevar a cabo a partir de los resultados conseguidos, así como de las ideas y experiencias extraídas del desarrollo del método que se propone en el presente trabajo de investigación. Entre los más relevantes, pueden citarse los siguientes:

- Uno de los trabajos inminentes es el ensayo del método en carga, ya en su faceta de sensor, y no sólo como un método de caracterización. Es necesario contrastar la validez de la aplicación del método al sensor con carga y valorar las posibles limitaciones que conlleve, así como comprobar aspectos muy relevantes en esta función, como son la precisión, repetitividad, sensibilidad y exactitud.
- Se ha planteado la posibilidad de comprobar el comportamiento del método para el análisis de aceites, con el objetivo de obtener sus características más básicas como son, por ejemplo, su densidad y viscosidad.
- Es preciso realizar estudios de la aplicación del método en su forma más precisa de una forma rápida. En este sentido se ha pensado en la posibilidad de desarrollar un modelo que ofrezca como salida el rango de barrido a efectuar para unos valores de componentes determinados.
- Mediante la aplicación de la propuesta, y estudiando el comportamiento de diferentes tipos de QCMs, para un conjunto de mediciones lo suficientemente representativo, es

posible desarrollar un clasificador de tipos de cristales atendiendo a los diferentes resultados.

- El método ha sido desarrollado con instrumental típico de laboratorio. Una posible línea de trabajo futura, sería el desarrollo de un equipo independiente que llevase a cabo el método y que no necesitase de equipamiento para la caracterización.
- Ya en una fase más avanzada de desarrollo, se ha planteado la posibilidad de adaptación del método para llevar a cabo tareas de supervisión, diagnóstico y control del estado del elemento sensor.

Capítulo 11

Referencias

1 Referencias

- [1] "CORDIS. Servicio de información comunitario sobre investigación y desarrollo." [Online]. Available: http://cordis.europa.eu/home_es.html.
- [2] J. Schultz, M. Mrksich, S. N. Bhatia, D. J. Brady, A. J. Ricco, D. R. Walt, and C. L. Wilkins, "WTEC Panel Report on INTERNATIONAL RESEARCH AND DEVELOPMENT IN BIOSENSING," Baltimore, 2004.
- [3] V. González Rumayor, E. García Iglesias, O. Ruiz Galán, and L. G. Cabezas, "Vt Informe de vigilancia tecnológica. Aplicaciones de biosensores en la industria agroalimentaria," Madrid, 2005.
- [4] G. N. M. Ferreira, A.-C. da Silva, and B. Tome, "Acoustic wave biosensors: physical models and biological applications of quartz crystal microbalance," *Trends Biotechnol.*, vol. 27, no. October, pp. 689–697, 2009.
- [5] L. P. Fonseca, V. C. B. Martins, and P. P. Freitas, "Microreactors and microdevices for analytical and biosensors applications," in *1st Portuguese Meeting in Bioengineering (ENBENG)*, 2011, pp. 1–4.
- [6] N. Hu, M. Zhao, J. Chuang, and L. Li, "The application study of biosensors in environmental monitoring," in *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, 2011, pp. 976–979.
- [7] P. Leonard, S. Hearty, J. Brennan, L. Dunne, J. Quinn, T. Chakraborty, and R. O'Kennedy, "Advances in biosensors for detection of pathogens in food and water. Review," *Enzyme Microb. Technol.*, vol. 32, pp. 3–13, 2003.
- [8] M. A. Cooper and V. T. Singleton, "Review A survey of the 2001 to 2005 quartz crystal microbalance biosensor literature: applications of acoustic physics to the analysis of biomolecular interactions," *J. Mol. Recognit.*, vol. 20, pp. 154–184, 2007.
- [9] L. D. Mello and L. T. Kubota, "Review of the use of biosensors as analytical tools in the food and drink industries.," *Food Chem.*, vol. 77, pp. 237–256, 2002.
- [10] M. Gerard, A. Chaubey, and B. D. Malhotra, "Application of conducting polymers to biosensors.," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 17, pp. 345–359, 2002.
- [11] Y. Yao, B. Yi, J. Xiao, and Z. Li, "Surface Plasmon Resonance Biosensors and its Application," in *The 1st International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE)*, 2007, pp. 1043–1046.
- [12] T. A. Erickson and K. L. Lear, "Optimization of the Local Evanescent Array-Coupled Optoelectronic Sensing Chip for Enhanced, Portable, Real-Time Sensing," *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 5, pp. 1905–1913, 2013.
- [13] A. Densmore, D.-X. Xu, P. Cheben, M. Vachon, S. Janz, R. Ma, D. Bedard, Y. Li, G. Lopinski, A. Delâge, J. H. Schmid, R. Halir, and I. Molina-Fernandez, "Integration of

vertical grating couplers and microfluidic channels with silicon photonic wire biosensor arrays," in *IEEE Sensors*, 2010, pp. 1550–1553.

- [14] A. Arnau Vives, *Piezoelectric Transducers and Applications*, 2^a edición. Springer Berlin - Heidelberg, 2008, p. Capítulos 1,3 y 14.
- [15] O. Lazcka, F. J. Del Campo, and F. X. Muñoz, "Pathogen detection: A perspective of traditional methods and biosensors," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 22, no. 7, pp. 1205–1217, 2007.
- [16] R. Lucklum and P. Hauptmann, "Acoustic microsensors the challenge behind microgravimetry," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 384, pp. 667–682, 2006.
- [17] D. W. Kimmel, G. LeBlanc, M. E. Meschievitz, and D. E. Cliffel, "Electrochemical Sensors and Biosensors.," *Anal. Chem.*, vol. 84 (2), pp. 685–707, 2012.
- [18] R. E. Speight and M. A. Cooper, "A Survey of the 2010 Quartz Crystal Microbalance Literature," *Rev. Lit. Arts Am.*, no. May, pp. 451– 473, 2012.
- [19] A. C. Hunter, "Application of the quartz crystal microbalance to nanomedicine," *J. Biomed. Nanotechnol.*, vol. 5 (6), pp. 669–675, 2009.
- [20] R. M. Lec, "Piezoelectric biosensors: recent advances and applications," in *Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition.*, 2001, pp. 419–429.
- [21] P. a. Lieberzeit, a. Rehman, B. Najafi, a. Mujahid, and F. L. Dickert, "Acoustic chemosensors for real-life environments," *2008 IEEE Int. Freq. Control Symp.*, pp. 431–433, May 2008.
- [22] F. L. Dickert, W. Greibl, A. Rohrer, and G. Voigt, "Sol-Gel-Coated Quartz Crystal Microbalances for Monitoring Automotive Oil Degradation," *Adv. Mater.*, vol. 13 (17), pp. 1327–1330, 2001.
- [23] U. Latif and F. L. Dickert, "Conductometric Sensors for Monitoring Degradation of Automotive Engine Oil," *Sensors*, vol. 11, pp. 8611–8625, 2011.
- [24] A. M. Cao-Paz, L. Rodríguez-Pardo, J. Fariña, and J. Marcos-Acevedo, "Resolution in QCM Sensors for the Viscosity and Density of Liquids: Application to Lead Acid Batteries," *Sensors*, vol. 12 (8), pp. 10604–10620, 2012.
- [25] N. M. Bergmann and N. a. Peppas, "Molecularly imprinted polymers with specific recognition for macromolecules and proteins," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 33, no. 3, pp. 271–288, Mar. 2008.
- [26] M. Ávila, M. Zouzagh, A. Escarpa, and A. Ríos, "Molecularly imprinted polymers for selective piezoelectric sensing of small molecules," *Trends Anal. Chem.*, vol. 27, no. 1, pp. 54–65, 2008.
- [27] M. C. Cela-Perez, J. M. Lopez-Vilarino, and M. V. Gonzalez-Rodriguez, "Impact of functional cross-linker on recognition properties of a Bisphenol-A imprinted polymer

- film for coating a Quartz Crystal Microbalance,” in *IEEE Sensors 2011*, 2011, pp. 1740–1743.
- [28] B. S. Ebarvia and C. A. Binag, “Biomimetic piezoelectric quartz sensor for caffeine based on a molecularly imprinted polymer,” *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 378, pp. 1331–1337, 2004.
- [29] M. Romero-Guerra, I. Chianella, E. V. Piletska, K. Karim, A. P. F. Turner, and S. A. Piletsky, “Development of a piezoelectric sensor for the detection of methamphetamine,” *Analyst*, vol. 134, pp. 1565–1570, 2009.
- [30] Y. Zhihua, Z. Liang, S. Kaixin, and H. Weiwei, “Characterization of quartz crystal microbalance sensors coated with graphene films,” in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 29, pp. 2448–2452.
- [31] X. Li, X. Chen, Y. Yao, N. Li, X. Chen, and X. Bi, “Multi-Walled Carbon Nanotubes/Graphene Oxide Composites for Humidity Sensing,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 12, pp. 4749–4756, Dec. 2013.
- [32] E. R. Hirst, Y. J. Yuan, W. L. Xu, and J. E. Bronlund, “Bond-rupture immunosensors-A review.,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 23, no. 12, pp. 1759–68, Jul. 2008.
- [33] K. Han and Y. J. Yuan, “MULTISIM- simulation process for the resonant frequency measurement of quartz crystal microbalance,” *2010 IEEE Youth Conf. Information, Comput. Telecommun.*, no. 1, pp. 146–149, Nov. 2010.
- [34] S. K. Vashist and P. Vashist, “Recent Advances in Quartz Crystal Microbalance-Based Sensors,” *J. Sensors*, pp. 1–13, 2011.
- [35] A. Tuantranont, A. Wisitsora-at, P. Sritongkham, and K. Jaruwongrungee, “A review of monolithic multichannel quartz crystal microbalance: a review.,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 687, no. 2, pp. 114–28, Feb. 2011.
- [36] F. Shen, K. H. Lee, S. J. O’Shea, P. Lu, and T. Y. Ng, “Frequency interference between two quartz crystal microbalances,” *Sensors Journal, IEEE*, vol. 3, pp. 274–281, 2003.
- [37] V. E. Bottom, *The theory and design of quartz crystal units: an introduction to the basic principles of piezoelectricity and their application to the design of quartz crystal units*. Abilene, Texas: McMurry Press, 1968.
- [38] V. E. Bottom, *Theory and Design of Quartz Crystal Units*, Second Edi. McMurry Press, 1974.
- [39] V. E. Bottom, *Introduction to quartz crystal unit design*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
- [40] D. Salt, *Hy-Q handbook of quartz crystal devices*. Wokingham: Van Nostrand Reinhold Company, 1987.
- [41] C. Lu and A. W. Czanderna, *Applications of piezoelectric quartz crystal microbalances*. Amsterdam: Elsevier, 1984.

- [42] G. Theobald and J. J. Gagnepain, "Frequency variations in quartz crystal resonators due to internal dissipation," *J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 10, pp. 6309–6315, 1979.
- [43] R. D. Mindlin and J. Yang, *An Introduction to the Mathematical Theory of Vibrations of Elastic Plates*. New Jersey: World Scientific, 2006.
- [44] M. S. Patel, *Nonlinear behavior in quartz resonators and its stability*. Proquest, Umi Dissertation Publishing, 2011.
- [45] A. Arnau Vives and F. Corr, *Componentes electrónicos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 1989.
- [46] S. J. Martin, V. E. Granstaff, and G. C. Frye, "Characterization of a quartz crystal microbalance with simultaneous mass and liquid loading," *Anal. Chem.*, vol. 63 (20), pp. 2272–2281, 1991.
- [47] A. Janshoff, H. J. Galla, and C. Steinem, "Piezoelectric Mass-Sensing Devices as Biosensors-An Alternative to Optical Biosensors?," *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 39, no. 22, pp. 4004–4032, 2000.
- [48] K. Marx, "Quartz Crystal Microbalance: A Useful Tool for Studying Thin Polymer Films and Complexes Biomolecular Systems at the Solution-Surface Interface," *Biomacromolecules*, vol. 4, pp. 1099–1120, 2002.
- [49] D. P. Morgan, *Surface-wave devices for signal processing*. Amsterdam: Elsevier, 1985.
- [50] W. P. Mason and R. N. Thurston, *Physical Acoustics*. New York: Academic Press, 1972.
- [51] V. M. Mecea, "Is quartz crystal microbalance really a mass sensor?," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 128, pp. 270–277, 2006.
- [52] D. A. Buttry and M. D. Ward, "Measurement of interfacial processes at electrode surfaces with the electrochemical quartz crystal microbalance," *Chem. Rev.*, vol. 92, no. 6, pp. 1355–1379, 1992.
- [53] C. Campbell, *Surface acoustic wave devices for mobile and wireless communications*. San Diego: Academic Press, 1998.
- [54] Stanford Research Systems, "Digital Controller QCM25 5 MHz Crystal Oscillator. Operation and Service Manual, Technical Report," 2004.
- [55] M. Jönsson, H. Anderson, U. Lindberg, and T. Aastrup, "Quartz crystal microbalance biosensor design. II. Simulation of sample transport," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 123, pp. 21–26, 2007.
- [56] M. A. Zalazar and G. F. A., "Microbalanzas de cristal de cuarzo: diseño y simulación," *Mecánica Comput.*, vol. 28, pp. 2123–2136, 2009.
- [57] C. Gabrielli, M. Keddam, and R. Torresi, "Calibration of the Electrochemical Quartz Crystal Microbalance," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 138, no. 9, pp. 2657–2660, 1991.

- [58] L. Rodriguez-Pardo, J. Fariña, C. Gabrielli, H. Perrot, and R. Brendel, "Resolution in quartz crystal oscillator circuits for high sensitivity microbalance sensors in damping media," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 103, no. 1–2, pp. 318–324, Sep. 2004.
- [59] I. Burda, A. Silaghi, A. Tunyagi, S. Simon, and O. Popescu, "Note: Sensitivity multiplication module for quartz crystal microbalance applications.," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 85, no. 2, p. 026116, Feb. 2014.
- [60] R. F. Molanes, J. Fariña, and J. J. Rodríguez-Andina, "Field-Programmable System-on-Chip for High- Accuracy Frequency Measurements in QCM Sensors," no. 1, pp. 2267–2272, 2013.
- [61] R. A. Torres-Villa, "Instrumental techniques for improving the measurements based on quartz crystal microbalances," Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [62] A. Arnau, "A Review of Interface Electronic Systems for AT-cut Quartz Crystal Microbalance Applications in Liquids," *Sensors*, vol. 8, pp. 370–411, 2008.
- [63] F. Li, J. H.-C. Wang, T. Shun, and Q.-M. Wang, "Quartz thickness shear mode resonators for living cells based functional biosensors," in *Ultrasonics Symposium, IEEE, 2004*, pp. 333–338.
- [64] L. Haider, M. Gindre, D. Le Guillou-Buffelo, P. Laugier, H. Perrot, F. Carreiras, and H. Darbeida, "Cell attachment and spreading processes monitored by the thickness shear-mode quartz sensor," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 4, no. 5, pp. 535–542, 2004.
- [65] I. Bancuta, M. Cimpoa, and I. Cernica, "Analysis of liquids and viscoelastic films by quartz crystal microbalance," in *International Semiconductor Conference (CAS), 2010*, vol. 2, no. 1, pp. 225–228.
- [66] J. Rabe, S. Biittgenbach, B. Zimmermann, and P. Hauptmann, "Design, manufacturing, and characterization of high-frequency thickness-shear mode resonators," in *Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium and Exhibition, 2000*, pp. 106–112.
- [67] J. Schröder, R. Borngräber, R. Lucklum, and P. Hauptmann, "Network analysis based interface electronics for quartz crystal microbalance," *Rev. Sci. Instruments*, vol. 72, no. 6, pp. 2750–2755, 2001.
- [68] E. J. Calvo, R. Etchenique, P. N. Bartlett, K. Singhal, and C. Santamaria, "Quartz crystal impedance studies at 10 MHz of viscoelastic liquids and films," *Faraday Discuss.*, vol. 107, pp. 141–247, 1997.
- [69] J. Kankare, K. Loikas, and M. Salomaki, "Method for measuring the losses and loading of a quartz crystal microbalance," *Anal. Chem.*, vol. 78, no. 6, pp. 1875–1882, 2006.
- [70] M. Rodahl and B. Kasemo, "A simple setup to simultaneously measure the resonant frequency and the absolute dissipation factor of a quartz crystal microbalance," *Rev. Sci. Instruments*, vol. 67, pp. 3238–3241, 1996.

- [71] M. Rodahl and B. Kasemo, "Frequency and dissipation-factor responses to localized liquid deposits on a QCM electrode," *Sensors Actuators B*, vol. 37, pp. 111–116, 1996.
- [72] Y. Montagut, J. V. García, Y. Jiménez, C. March, A. Montoya, and A. Arnau, "Validation of a phase-mass characterization concept and interface for acoustic biosensors," *Sensors*, vol. 11, pp. 4702–4720, 2011.
- [73] M. Edwardsson, M. Rodalh, B. Kasemo, and F. Hook, "A dualfrequency QCM-D setup operating at elevated oscillation amplitudes," *Anal. Chem.*, vol. 77, pp. 4918–4926, 2006.
- [74] H. Ehahoun, C. Gabrielli, M. Keddam, H. Perrot, and P. Rousseau, "Performances and limits of a parallel oscillator for electrochemical quartz crystal microbalances.," *Anal. Chem.*, vol. 74, no. 5, pp. 1119–27, Mar. 2002.
- [75] F. Eichelbaum, R. Borngräber, J. Schröder, R. Lucklum, and P. Hauptmann, "Interface circuits for quartz crystal microbalance sensors," *Rev. Sci. Instruments*, vol. 70, pp. 2537–2545, 1999.
- [76] A. Arnau, J. V. García, Y. Jiménez, V. Ferrari, and M. Ferrari, "Improved Electronic Interfaces for Heavy Loaded AT Cut Quartz Crystal Microbalance Sensors," in *Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE International*, 2007, pp. 357–362.
- [77] J. Auge, F. Dierks, F. Eichelbaum, and P. Hauptmann, "High-speed multiparameter data acquisition and web-based remote access to resonantsensors and sensor arrays," *Sensors Actuators B*, vol. 95, pp. 32–38, 2003.
- [78] L. Rodríguez-Pardo, J. Fariña, C. Gabrielli, and H. Perrot, "Sensitivity , Noise , and Resolution in QCM Sensors in Liquid Media," *IEEE Sens. J.*, vol. 5, no. 6, pp. 1251–1257, 2005.
- [79] T. Nakamoto and T. Kobayashi, "Development of Circuit for Measuring Both Q Variation and Resonant Frequency," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 41, no. 6, pp. 806–811, 1994.
- [80] C. Barnes, "Development of quartz crystal-oscillators for under liquid sensing," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 29, no. 1, pp. 56–59, 1991.
- [81] L. Rodríguez-Pardo, J. Fariña, C. Gabrielli, H. Perrot, and R. Brendel, "Methodology of Design of Electronic Circuit Oscillators for QCM Sensors in Liquid Media," in *IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference*, 2004, vol. 00, no. c, pp. 800–805.
- [82] L. Rodríguez-Pardo, J. Fariña, C. Gabrielli, H. Perrot, and R. Brendel, "Quartz crystal oscillator circuit for high resolution microgravimetric sensors in fluids," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 18, pp. 1065–1067, 2006.
- [83] K. O. Wessendorf, "The active-bridge oscillator for use with liquid loaded QCM sensors," in *Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition.*, 2001, pp. 400–407.

- [84] R. Borngräber, J. Schröder, R. Lucklum, and P. Hauptmann, "Is an oscillator-based measurement adequate in a liquid environment?," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1254–9, Sep. 2002.
- [85] C. Chagnard, P. Gilbert, A. N. Watlids, T. Bcelcr, and D. W. Paul, "An electronic oscillator with automatic gain control: EQCM applications," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 32, pp. 129–136, 1996.
- [86] R. Behrends and U. Kaatze, "A high frequency shear wave impedance spectrometer for low viscosity liquids," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 519–524, 2001.
- [87] E. Benes, M. Gröschl, W. Burger, and M. Schmid, "Sensors based on piezoelectric resonators," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 48, pp. 1–21, 1995.
- [88] Inficon, "PLO-10 Series. Operation and Service Manual," 2007.
- [89] V. Ferrari, D. Marioli, and A. Taronj, "Improving the Accuracy and Operating Range of Quartz Microbalance Sensors by a Purposely Designed Oscillator Circuit," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE, 2000*, pp. 1208–1213.
- [90] A. Arnau, T. Sogorb, and Y. Jimenez, "Circuit for continuous motional series resonant frequency and motional resistance monitoring of quartz crystal resonators by parallel capacitance compensation," *Rev. Sci. Instruments*, vol. 73, no. 7, pp. 2724–2737, 2002.
- [91] M. Ferrari, V. Ferrari, and K. K. Kanazawa, "Dual-harmonic oscillator with frequency and resistance outputs for quartz resonator sensors," *Sensors , IEEE*, pp. 1261–1264, Oct. 2008.
- [92] H. Jin, S. Dong, J. Luo, and W. Milne, "Generalised Butterworth-Van Dyke equivalent circuit for thin-film bulk acoustic resonator," *Electron. Lett.*, vol. 47, pp. 424–426, 2011.
- [93] M. Rodahl, F. Höök, and B. Kasemo, "QCM operation in liquids: an explanation of measured variations in frequency and Q factor with liquid conductivity," *Anal. Chem.*, vol. 68, pp. 2219–2227, 1996.
- [94] E. A. García-Martinez, G. Bustabad, H. Perrot, C. Gabrielli, B. Bucur, M. Lazerges, D. Rose, L. Rodriguez-Pardo, J. Fariña, C. Compère, and A. . Vives, "Development of a Mass Sensitive Quartz Crystal Microbalance (QCM)-Based DNA Biosensor Using a 50 MHz Electronic Oscillator Circuit," *Sensors*, vol. 11, no. 8, pp. 7656–7664, 2011.

