



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación

Francisco Palacio Bonet

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

FACULTAD DE FÍSICA

Departamento de Ingenierías: Sección de electrónica

Programa de doctorado en ingeniería y ciencias
aplicadas (RD 99/2011)

**Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para
aplicaciones en logística de alimentación.**

Autor:

Francisco Palacio Bonet

Directores:

Dr. José María Gómez Cama

Dr. Santiago Marco Colás

Tutor:

Dr. José María Gómez Cama

Barcelona, 2017

Para Seta, Eriky Cesc...

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

Agradecimientos.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

Si esta tesis ha llegado finalmente a buen puerto no ha sido únicamente por el esfuerzo del que la está presentando, sin la ayuda de mucha gente nunca habría llegado a finalizarse y habría quedado en el océano de los olvidos, por lo tanto, es de obligado cumplimiento agradecer a quien me ha ayudado en su realización, que ha sido mucha gente y me gustaría pedir perdón a los que no nombre y se merecieran estar en estos agradecimientos.

En primer lugar quiero agradecer a mis directores Dr. José María Gómez Cama y Dr. Santiago Marco Colás, que con su compromiso para conmigo han hecho posible este manuscrito. También a los que trabajaron en el proyecto GoodFood, Xavier Cano y Cristian Villar y a los que fueron miembros del grupo de trabajo ISP que de alguna manera u otra acabaron ayudándome, Dr. Toni Pardo, Dra. Marta Padilla, Dr. Sergi Udina, Dr. Jordi Fonollosa, Dr. Luis Fernández y un largo etcétera. Por otro lado, me gustaría incluir a los que trabajaron en el proyecto fuera del departamento, al grupo de Alemania de EADS, empezando por Jordi Sabater y el Dr. Thomas Becker y a los grupos italianos del CNR con el Dr. Stefano Zampolli y de la universidad de Perugia con el Dr. Andrea Scorzoni y el Dr. Michele Cicioni y por último a la gente del País Vasco de la empresa Tekniker, a la Dra. Estefanía Abad y Mainer Nuin.

En segundo lugar, y no por ello menos importante, me gustaría agradecer al Dr. Manel López de Miguel la oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo, sin su apoyo nunca habría llegado tan lejos. También incluir a la futura "Dra." Raquel Pruna, quien siempre da buenos consejos, aunque en ocasiones podamos llegar a discrepar ligeramente. También al Dr. Abdelhamid Errachid por su apoyo y a la Dra. Mónica Martínez por sus ganas de verme acabar.

Me gustaría agradecer los ánimos de la gente del departamento, especialmente al Dr. Mauricio Moreno que casi cada día me ha ido empujando hasta este final, al Dr. Albert Romano y al Dr. Sergi Hernández, con los que siempre hay algún tema que discutir. Al Dr. Pere Miribel que en muchos momentos ha tenido que aguantar mis cuitas y al Dr. Jordi Colomer que siempre me ha tenido en cuenta. Incluir a la Dra. Neus Vidal por sus constantes apoyos. Al grupo del Dr. Ángel Diéguez que junto con el Dr. Oscar Alonso, Joan Canals y Nill Franch he trabajado últimamente. Me gustaría agradecer a la Dra. Aïda Varea su magnífica y muy valiosa aportación y a la Dra. Cristina Paez por el apoyo mutuo en esta recta final. A los compañeros de despacho David (gracias por las gráficas), Albert, Said y Josep, que me han aguantado en silencio. Por último y no de menor importancia agradecer el apoyo del director del departamento, el Dr. Albert Cornet y del decano de la facultad de Física el Dr. Atilá Herms.

Y para finalizar el apoyo incondicional recibido por mi familia, empezando por mi madre, Paquita y siguiendo por mis hermanos Gabi y Carlos junto con mis cuñadas Montse y África y con mis sobrinos Carlos, Nerea, Aina y Asia. También un recuerdo para mi familia política, las dos Natalias y Miquel, que siempre están cuando se les necesita.

Seguro que me dejo a alguien que debería estar en los párrafos anteriores, solo puedo disculparme ante mi mala memoria...Ah, no me puedo dejar a María, que seguro que lo celebraremos como es debido.

Gracias a todos.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

Resumen.

Resumen.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

En el momento de la realización de esta tesis doctoral, sobre el año 2004, la tecnología RFID empezaba a crecer, básicamente, gracias a la mejora en el control de stocks de los almacenes que implicaba posibilidad de realizar un inventario sin la necesidad de leer los códigos de barras de los productos. Esta tecnología se basa, en resumen, en la interacción de dos dispositivos, un lector que envía energía y datos a la vez y una etiqueta que se alimenta mediante la energía enviada por el lector y responde a los datos recibidos. Para el funcionamiento de esta tecnología es necesario que la etiqueta requiera de muy bajo consumo para funcionar.

En esta tesis doctoral se pretende utilizar tecnología RFID para la monitorización en la cadena logística de distribución de productos perecederos, en concreto productos de alimentación, dentro del proyecto europeo "Food Safety and Quality Monitoring with Microsystems, GoodFood. El principal objetivo es asegurar la calidad de los productos en aquellas partes de la cadena logística donde no se tiene control de dicha calidad. En la fabricas procesadoras, en los grandes almacenes o en los mercados se realizan controles que aseguran la calidad. Pero una de las partes donde el control no se realiza, o se realiza de forma deficiente, es la fase de transporte, donde es más difícil implementar dichos controles debido a la movilidad de los elementos que la componen.

Para una mejora en el control de calidad en la cadena logística de productos perecederos se desarrolla una tarjeta RFID con sensores integrados, que permite la monitorización de los productos perecederos en la fase de transporte. Para poder realizar este tipo de tarjeta es necesario implementar una pequeña batería para poder funcionar sin la presencia del lector, además reducir su consumo, reducir su tamaño e implementarla en un formato flexible para una mayor versatilidad.

A lo largo del manuscrito de esta tesis se describe como se ha diseñado la tarjeta físicamente, teniendo en cuenta los requerimientos previos y las especificaciones del estándar ISO/IEC 15693. También se describen las técnicas de reducción de consumo implementadas en la programación de la tarjeta.

A su vez, se describe como se ha realizado el diseño de lectores, los cuales han de comunicarse con la tarjeta para configurarla o recoger sus datos.

Una vez descrito el diseño, se exponen todos los resultados obtenidos en los experimentos, donde se compara la tarjeta RFID junto a otros dispositivos comerciales, tanto en los test de laboratorio como en las pruebas de campo dentro de la cadena logística de distribución de pescado fresco. Los resultados demuestran la viabilidad y el buen funcionamiento de la tarjeta en comparación con los dispositivos comerciales.

Posteriormente se describe la implementación de sensores químicos en la tarjeta RFID. Se explican los métodos de encendido y apagado de estos sensores para una disminución drástica de su consumo energético y se analiza cómo afecta a la dinámica de los sensores este tipo de reducción de consumo. Se demuestra la viabilidad de la implementación de este tipo de sensores en tarjetas RFID de muy bajo consumo se analiza el método adecuado en función del tipo de transporte.

Para finalizar se describen las conclusiones, donde se analizan todas las mejoras aportadas por la tarjeta RFID con capacidades sensoras dentro de la cadena logística de distribución de los productos perecederos en la industria agroalimentaria.

Índice general:

1.-	Introducción.....	31
1.1.-	Introducción.....	33
1.2.-	Tecnología RFID.....	33
1.2.1.-	Introducción histórica del RFID.....	34
1.2.2.-	Conceptos básicos de los sistemas RFID.....	37
1.2.2.1.-	Campo magnético generado por el lector.....	38
1.2.2.2.-	Voltaje generado en la tarjeta.....	39
1.3.-	Clasificación y características de los sistemas RFID.....	41
1.3.1.-	Modo de operación.....	41
1.3.2.-	Memoria de la tarjeta.....	41
1.3.3.-	Tipo de memoria en la tarjeta.....	42
1.3.4.-	Principio de propagación.....	42
1.3.5.-	Secuencia de trabajo de la tarjeta.....	43
1.3.6.-	Alimentación de la tarjeta.....	43
1.3.7.-	Rango de frecuencia del sistema.....	44
1.4.-	Estándares RFID. Introducción al ISO/IEC 15693.....	45
1.4.1.-	Clasificación de tarjetas RFID según Auto-ID.....	46
1.4.2.-	Principales estándares RFID según normativa ISO/IEC.....	46
1.4.3.-	Estándares RFID ISO 18000.....	48
1.4.4.-	Estándar ISO/IEC 15693.....	48
1.4.4.1.-	ISO/IEC 15693-1: Parte 1.....	49
1.4.4.2.-	ISO/IEC 15693-2: Parte 2.....	49
1.4.4.3.-	ISO/IEC 15693-3: Parte 3.....	50
1.5.-	Estado del arte de tarjetas con sensores.....	51
1.5.1.-	Tarjetas con sensores no químicos.....	51
1.5.2.-	Sensores de gas.....	54
1.5.2.1.-	Tecnologías de sensores de gas.....	54
1.5.2.2.-	Tarjetas con sensores de gas.....	56
1.6.-	Motivación.....	57
1.7.-	Referencias.....	58
2.-	Ámbito y objetivos.....	63
2.1.-	Proyecto GoodFood.....	65
2.2.-	Aplicación del análisis de trazabilidad y sensado. La fruta y el pescado como caso de estudio.....	66

2.3.-	Objetivos de la tesis.	67
2.4.-	Referencias.....	68
3.-	Descripción de la aplicación.....	69
3.1.-	Introducción.	71
3.2.-	Cadena de distribución de la industria alimentaria.	72
3.2.1.-	Cadena de distribución de la industria alimentaria, caso de la fruta climatérica.....	72
3.2.2.-	Cadena de distribución de la industria alimentaria, caso del pescado fresco.	73
3.3.-	Escenarios de trabajo en la cadena de distribución alimentaria.....	76
3.3.1.-	Primer escenario: En las cámaras de atmosfera controlada.	77
3.3.2.-	Segundo escenario: Carga en los contenedores.	77
3.3.3.-	Tercer escenario: Dentro del contenedor.....	79
3.3.4.-	Cuarto escenario: Descarga de los contenedores.	79
3.4.-	Requerimientos del sistema de monitorización dentro de la cadena de distribución de productos perecederos.	81
3.4.1.-	Requerimientos para la monitorización de productos perecederos durante su almacenaje, transporte y venta.....	81
3.4.2.-	Requerimientos para la detección de fugas en los sistemas de refrigeración.....	83
3.4.3.-	Requerimientos en las comunicaciones entre los diferentes elementos del sistema.	86
3.5.-	Especificaciones de la tarjeta RFID.....	88
3.6.-	Referencias.....	89
4.-	Diseño de la tarjeta RFID.....	93
4.1.-	Diseño conceptual de la tarjeta RFID.....	95
4.1.1.-	Formato flexible de la tarjeta RFID.	96
4.2.-	Diseño en detalle de la Tarjeta RFID.	100
4.2.1.-	Control de energía y batería de la tarjeta.	100
4.2.2.-	Microcontrolador implementado en la tarjeta RFID.	102
4.2.2.1.-	Características del microcontrolador.	103
4.2.2.2.-	Memoria interna del microcontrolador.	104
4.2.2.3.-	Selección del Reloj de tiempo real.....	105
4.2.2.4.-	Consumo del microcontrolador.	106
4.2.2.5.-	Programación del microcontrolador.....	107
4.2.2.5.1.-	Modo de bajo consumo.....	108
4.2.2.5.2.-	Modo de acceso a memoria.....	108
4.2.2.5.3.-	Modo de intercambio de datos.	109

4.2.2.5.4.-	Modo lectura del sensor.....	109
4.2.3.-	Transpondedor o front-end RFID.....	109
4.2.3.1.-	Parte analógica del transpondedor.....	110
4.2.3.1.1.-	Antena del transpondedor.....	110
4.2.3.1.2.-	Factor de calidad Q.....	112
4.2.3.1.3.-	Diferencia de potencial, voltaje RFID del transpondedor.	113
4.2.3.2.-	Parte digital del transpondedor.....	114
4.2.3.2.1.-	Proceso de recepción.....	116
4.2.3.2.2.-	Proceso de transmisión.....	117
4.2.4.-	Sensores.....	119
4.2.4.1.-	Sensor de temperatura y humedad.....	119
4.2.4.2.-	Sensor de luz.....	121
4.2.5.-	Consumos totales de la tarjeta RFID.....	125
4.3.-	Versiones de las tarjetas RFID.....	127
4.3.1.-	Primera versión de la tarjeta RFID.....	127
4.3.2.-	Segunda versión de la tarjeta RFID.....	128
4.3.3.-	Tercera versión de la tarjeta RFID.....	130
4.3.4.-	Cuarta versión de la tarjeta RFID.....	130
4.4.-	Referencias.....	132
5.-	Diseño de los lectores RFID.....	133
5.1.-	Diseño conceptual.....	135
5.1.1.-	Lector RFID con sensores implementados.....	135
5.1.2.-	Lector RFID comercial.....	137
5.2.-	Diseño en detalle.....	139
5.2.1.-	Lector RFID con sensores implementados.....	139
5.2.1.1.-	Transpondedor Texas Instruments R1-R6C-001A (S6700).....	141
5.2.2.-	Lector RFID comercial.....	143
5.3.-	Conclusión.....	146
6.-	Tarjeta RFID en la cadena logística de pescado.....	147
6.1.-	Plan de test.....	149
6.1.1.-	Test de la tarjeta RFiD en la cadena logística de distribución de pescado fresco.....	149
6.1.1.1.-	Comprobación del correcto funcionamiento del sistema.....	150
6.1.1.2.-	Comparativa y pruebas de campo, viaje en camión refrigerado, en la cadena de distribución del pescado.....	151
6.1.1.2.1.-	Primera comparativa y prueba de campo: trayecto de Frankfurt (Alemania) a Vitoria (España).....	153

6.1.1.2.2.- Segunda comparativa y prueba de campo: trayecto de Paris (Francia) a Vitoria (España).....	153
6.1.1.3.- Prueba de campo en toda la cadena logística de distribución del pescado. 154	
6.2.- Resultados.....	155
6.2.1.- Comprobación del correcto funcionamiento del sistema.....	155
6.2.1.1.- Primer experimento funcional.....	155
6.2.1.2.- Primera comparativa en cámara climática.	156
6.2.2.- Comparativa y pruebas de campo en la cadena de distribución del pescado. 157	
6.2.2.1.- Primera comparativa y prueba de campo: trayecto de Frankfurt (Alemania) a Vitoria (España).....	157
6.2.2.2.- Segunda comparativa y prueba de campo: trayecto de Paris (Francia) a Vitoria (España).....	160
6.2.3.- Prueba de campo en toda la cadena logística de distribución del pescado. 161	
6.2.3.1.- Trayecto de Mossel Bay (Sudáfrica) a Vitoria (España).	162
6.3.- Conclusión.....	164
7.- Tarjeta RFID en la cadena logística de la fruta: Optimización del consumo de los sensores de gas.....	165
7.1.- Introducción a la matriz de sensores y al control de temperatura por pulsos.168	
7.2.- Implementación de los sensores en la tarjeta RFID.....	170
7.3.- Materiales y métodos.....	173
7.3.1.- Modos de funcionamiento.	173
7.3.2.- Adquisición de datos.....	174
7.3.3.- Montaje experimental.....	175
7.3.4.- Objetivos y evaluación de los experimentos.....	176
7.3.5.- Experimentos.....	177
7.3.6.- Concentraciones de gases.....	178
7.4.- Resultados experimentales.....	180
7.4.1.- Tiempo de estabilización de los sensores en función del modo de funcionamiento.....	180
7.4.2.- Conductancia y ruido en la línea de base de los sensores en función del modo de funcionamiento.....	183
7.4.3.- Sensibilidad de los sensores en función del modo de funcionamiento y el tipo de gas.....	187
7.4.3.1.- Sensibilidad al gas acetaldehído.	187
7.4.3.1.1.- Respuesta de los sensores al gas acetaldehído.	187

7.4.3.1.2.-	Sensibilidad de los sensores al gas acetaldehído.	189
7.4.3.1.3.-	Límite de detección de los sensores al gas acetaldehído.....	193
7.4.3.2.-	Resultados obtenidos utilizando gas etileno.....	195
7.4.3.2.1.-	Respuesta de los sensores al gas etileno.	195
7.4.3.2.2.-	Sensibilidad de los sensores al gas etileno.....	197
7.4.3.2.3.-	Límite de detección de los señores al gas etileno.....	201
7.4.3.3.-	Resultados obtenidos utilizando Amoníaco.	202
7.4.3.3.1.-	Respuesta de los sensores al gas amoníaco.....	202
7.4.3.3.2.-	Sensibilidad de los sensores al gas amoníaco.....	204
7.4.3.3.3.-	Límite de detección de los sensores al gas amoníaco.....	208
7.4.4.-	Tiempo de funcionamiento de los sensores en función del consumo asociado al tipo de PTM aplicado.....	208
7.5.-	Conclusión.	209
7.6.-	Referencias.....	213
8.-	Conclusiones.	215
9.-	Apéndice I – Norma ISO/IEC 15693.....	219
9.1.-	ISO/IEC 15693: Parte 1.	221
9.2.-	ISO/IEC 15693: Parte 2.	222
9.2.1.-	Dialogo inicial para las VICC.	222
9.2.2.-	Transferencia de energía.....	222
9.2.3.-	Interfaz de comunicaciones entre el VCD y la VICC.	223
9.2.3.1.-	Modulación de la portadora.....	223
9.2.3.2.-	Velocidad de datos y codificación.....	223
9.2.3.3.-	Envío de tramas del VCD al VICC.	224
9.2.4.-	Interfaz de comunicaciones entre la VICC y el VCD.	225
9.2.4.1.-	Subportadora.....	225
9.2.4.2.-	Velocidad de transmisión.	226
9.2.4.3.-	Representación y codificación de bit.....	226
9.2.4.4.-	Envío de tramas de la VICC al VCD.....	227
9.3.-	ISO/IEC 15693: Parte 3.	228
9.3.1.-	Identificador único.	228
9.3.2.-	Identificador de familia de aplicación.	230
9.3.3.-	Identificador del formato del almacenamiento de los datos.....	231
9.3.4.-	Comprobación de redundancia cíclica.	231
9.3.5.-	Organización de la memoria de la VICC.....	232
9.3.6.-	Descripción general del protocolo.....	232
9.3.6.1.-	Modos de funcionamiento.....	234

9.3.6.1.1.- Modo direccionado.....	234
9.3.6.1.2.- Modo no direccionado.....	235
9.3.6.1.3.- Modo seleccionado.....	235
9.3.6.2.- Formato de la trama de petición.....	235
9.3.6.3.- Significado de los Flags en la trama de petición.	236
9.3.6.4.- Formato de la trama de respuesta.	237
9.3.6.5.- Significado de los Flags en la trama de respuesta.....	237
9.3.6.6.- Códigos de error en la trama de respuesta.....	238
9.3.7.- Protocolo de Anticolisión.....	239
9.3.8.- Comandos.....	239
9.3.8.1.- Tipos de comandos.....	239
9.3.8.2.- Comandos más frecuentemente utilizados en el proyecto GoodFood.....	240
9.3.8.2.1.- Comando de identificación o inventario.....	240
9.3.8.2.2.- Comando de lectura de un solo bloque de memoria.....	241
9.3.8.2.3.- Comando de escritura de un solo bloque de memoria.....	242
9.3.8.2.4.- Comando de lectura de múltiples bloques de memoria.	243
9.3.8.2.5.- Comando de escritura de múltiples bloques de memoria. ..	245
9.4.- ISO/IEC 15693-1: Parte 4.....	246

Índice de figuras:

Figura 1: Esquema básico de funcionamiento de la tecnología radar [3].....	34
Figura 2: Llave de Renault con seguridad RFID de arranque.	36
Figura 3: Diagrama de bloques básico de un sistema RFID de campo cercano [8].	39
Figura 4: Tarjeta RFID HF con memoria programable de 2048 bits de la empresa Texas Instruments.....	42
Figura 5: Diferentes tarjetas RFID LF a 125kHz de la empresa SOKYMAT Industry & Logistics.....	44
Figura 6: Ejemplos de tarjetas RFID UHF de 860MHz a 960MHz de la empresa UPM-Raflatac inc.....	45
Figura 7: Esquema de comunicaciones entre la tarjeta RFID y el nodo AmI.	71
Figura 8: Registrador de temperatura Ryan CR-1 de la compañía Sensitech.	74
Figura 9: Etiqueta de papel con código de barras para identificar el contenido de los palés, ejemplo de trazabilidad de la cooperativa vitivinícola de la Poble del Duc.	76
Figura 10: Posición del lector RFiD en la carretilla elevadora [10].	77
Figura 11: Ejemplo de posición de la tarjeta RFiD en un palé de manzanas.	79
Figura 12: Producción de etileno en función del estado de crecimiento de las manzanas [11].....	82
Figura 13: Compuestos volátiles producidos por el pescado fresco en función del tiempo [26].....	85
Figura 14: Proceso de fabricación del PCB de la tarjeta RFID en formato flexible..	97
Figura 15: Límite máximo del tamaño de la tarjeta RFID en formato flexible.....	97
Figura 16: Representación del funcionamiento de las cintas adhesivas ACA [2]. ...	98
Figura 17: Variación de tensión y frecuencia de control a la salida del TPS62202.	102
Figura 18: Diferencias entre los montajes de encapsulado SMD, <i>wire bonding</i> y <i>flip chip</i>	103
Figura 19: Implementación de la antena diseñada para la tarjeta RFID.	111
Figura 20: Simulación del programa de decodificación de una trama.....	116
Figura 21: Señales correspondientes a la decodificación de una trama enviada por el lector en modulación PPM.....	117
Figura 22: Simulación del envío de una trama desde la tarjeta al lector.	117
Figura 23: Cómo afecta la modulación de carga sobre la señal enviada por el lector. La señal superior corresponde al control de la modulación de carga y la inferior a la señal en el tanque resonante.	118
Figura 24: Primera versión de la tarjeta RFID con la localización de sus componentes.	127
Figura 25: Segunda versión de la tarjeta en formato rígido y emplazamiento de sus componentes.	128
Figura 26: Segunda versión de la tarjeta en formato flexible.....	128
Figura 27: Tercera versión de la tarjeta RFID en formato rígido junto con los sensores de gas en encapsulado TO-8.	130
Figura 28: Cuarta y última versión de la tarjeta RFID en formato flexible.....	131
Figura 29: Ubicación de los sensores <i>ulp</i> MOX en la tarjeta RFID.	131
Figura 30: Vista de la TRF7960 EVM con la descripción de sus componentes.....	138

Figura 31: Vista del lector RFID del proyecto GoodFood con todos los sensores conectados.....	140
Figura 32: Captura de pantalla de la GUI realizada para el proyecto GoodFood. ..	144
Figura 33: Etapas de la cadena logística de distribución del pescado.	149
Figura 34: Situación de los diferentes componentes dentro de la caja de protección para la realización de las pruebas de campo.....	152
Figura 35: Posición de la tarjeta RFiD dentro de la caja de merluza.	158
Figura 36: Apilamiento de cajas de merluza ya procesadas y clasificadas y colocación de los sensores dentro de las cajas de merluza.	163
Figura 37: Matriz de sensores de gas <i>ulp MOX</i> implementados en la tarjeta RFID [44].	169
Figura 38: Representación gráfica del funcionamiento del PTM.	173
Figura 39: Funcionamiento secuencial de los calefactores de la matriz de sensores.	174
Figura 40: Proceso de adquisición de datos para un sensor <i>ulp MOX</i>	174
Figura 41: Tercera versión de la tarjeta RFID implementando la matriz de sensores.	175
Figura 42: Lector RFID TRF7960 EVM utilizado para obtener los datos guardados en la tarjeta RFID.	175
Figura 43: Interfaz de utilizada para obtener los datos en el ordenador.	176
Figura 44: Diagrama temporal del experimento consistente en 16 entradas de gas de 40 minutos cada una.....	177
Figura 45: Interfaz de usuario del programa de control de los <i>mass flow</i> para conseguir las concentraciones requeridas.....	179
Figura 46: Modulación de la portadora para 100% ASK.....	223
Figura 47: Codificación mediante modulación por posición de pulso en el modo 1 a 4.	224
Figura 48: SOF correspondiente a la codificación 1 a 4.....	225
Figura 49: EOF correspondiente a la codificación 1 a 4.....	225
Figura 50: Representación del valor lógico '0'.	226
Figura 51: Representación del valor lógico '1'.	226
Figura 52: SOF de la comunicación VICC a VCD cuando se utilizan dos subportadoras.....	227
Figura 53: EOF de la comunicación VICC a VCD cuando se utilizan dos subportadoras.....	228
Figura 54: Formato del identificador único (UID).	228
Figura 55: Reglas de transmisión de los bytes y bits del CRC según la norma ISO/IEC 15693.	232
Figura 56: Formato de un mensaje de petición según la norma ISO/IEC 15693...233	233
Figura 57: Formato de un mensaje de respuesta según la norma ISO/IEC 15693.	233
Figura 58: Formato de una trama de petición según la norma ISO/IEC 15693.	236
Figura 59: Formato de una trama de respuesta según la norma ISO/IEC 15693..237	237
Figura 60: Formato de la trama de identificación o inventario definido en la norma ISO/IEC 15693.	240
Figura 61: Formato de la trama de respuesta al comando de identificación o inventario definido en la norma ISO/IEC 15693.....	241
Figura 62: Formato de trama del comando de lectura de un solo bloque de memoria.	241

Figura 63: Trama de respuesta al comando de lectura de un solo bloque cuando el flag de error está activado.....	242
Figura 64: Trama de respuesta al comando de lectura de un solo bloque cuando el flag de error está desactivado.....	242
Figura 65: Formato de trama del comando de escritura de un solo bloque de memoria.....	243
Figura 66: Trama de respuesta al comando de escritura de un solo bloque cuando el flag de error está activado.....	243
Figura 67: Trama de respuesta al comando de escritura de un solo bloque cuando el flag de error está desactivado.....	243
Figura 68: Formato de trama del comando de lectura de múltiples bloques de memoria.....	244
Figura 69: Trama de respuesta al comando de lectura de múltiples bloques cuando el <i>flag</i> de error está activado.....	244
Figura 70: Trama de respuesta al comando de lectura de múltiples bloques cuando el flag de error está desactivado.....	244
Figura 71: Formato de trama del comando de escritura de múltiples bloques de memoria.....	245
Figura 72: Trama de respuesta al comando de escritura de múltiples bloques cuando el flag de error está activado.....	246
Figura 73: Trama de respuesta al comando de escritura de múltiples bloques cuando el flag de error está desactivado.....	246

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

Índice de gráficas:

Gráfica 1: Descarga continua de la batería LPF 25 sobre una resistencia de 2.7 KOhms según su hoja de especificaciones de la LPF 25.....	100
Gráfica 2: Eficiencia en función del voltaje de entrada y la corriente de salida según la hoja de especificaciones del TPS62202.....	101
Gráfica 3: Rangos de alimentación mínimos y frecuencia máxima de procesado para la familia MSP430F16xx, según hoja de especificaciones.....	104
Gráfica 4: Consumo el microcontrolador MSP430F1611 en función de la tensión de entrada.....	107
Gráfica 5: Valor de Q en función de la resistencia de carga.....	112
Gráfica 6: Consumo del sensor SHT15 junto con el adaptador de tensión.....	121
Gráfica 7: Configuración para medir el voltaje en abierto del fotodiodo SLCD-61N1 en función de la intensidad de luz incidente, junto con los resultados obtenidos experimentalmente.....	123
Gráfica 8: Configuración para medir la corriente de cortocircuito del fotodiodo SLCD-61N1 en función de la intensidad de luz incidente, junto con los resultados obtenidos experimentalmente.....	123
Gráfica 9: Voltaje a la salida del módulo de transimpedancia en función de la intensidad de luz incidente.....	124
Gráfica 10: Modos de funcionamiento de la tarjeta RFID con el consumo asociado a cada uno de ellos.....	125
Gráfica 11: Días de funcionamiento de la tarjeta RFID en función de la frecuencia de sensado.....	126
Gráfica 12: Evolución de la temperatura en función de la hora del día.....	155
Gráfica 13: Resultados de los ensayos de validación de las tarjetas RFiD, tanto en formato rígido como en formato flexible.....	156
Gráfica 14: Detalle de los ensayos realizados en la cámara climática. La gráfica de la izquierda corresponde al descenso controlado de temperatura hasta los 2°C y la gráfica de la derecha corresponde al incremento controlado de temperatura hasta los 28°C.....	157
Gráfica 15: Datos de temperatura obtenidos en la primera prueba de campo.....	158
Gráfica 16: Resultados de temperatura y humedad obtenidos en la segunda prueba de campo.....	160
Gráfica 17: Datos de temperatura y humedad registrados por las tarjetas RFiD durante los 22 días de funcionamiento.....	161
Gráfica 18: Datos de temperatura y humedad de toda la cadena logística de distribución de pescado, desde el procesado, hasta la plataforma de distribución, obtenidos por las tarjetas RFiD del proyecto GoodFood.....	162
Gráfica 19: Conductancia en función del voltaje de salida del divisor de tensión utilizando una resistencia de medida de 330KΩ.....	171
Gráfica 20: Diagrama de bode de la simulación del filtro <i>Sallen Key</i>	172
Gráfica 21: Ejemplo de ajuste exponencial, en este caso el PTM del tipo 1/120. ..	181
Gráfica 22: Comparativa de tiempo de estabilización entre sensores y sus modos de funcionamiento.....	181
Gráfica 23: Interpolación de los tiempos de estabilización de los diferentes sensores en función del modo de funcionamiento de los sensores.....	182
Gráfica 24: Respuesta de un sensor de SnO ₂ +Ag para todos los tipos de PTM.....	183

Gráfica 25: Respuesta de un sensor para T_{on} variable y T_{off} constante.....	184
Gráfica 26: Conductancia de la línea de base de los diferentes sensores en función del modo de funcionamiento.....	185
Gráfica 27: Comparativa del ruido generado por los diferentes sensores en función del modo de funcionamiento.....	186
Gráfica 28: Respuesta de los ocho puntos de la secuencia de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag a las concentraciones de acetaldehído 2, 3 5, 9, 14, 23, 37 y 60ppm aplicando el tipo de PTM 2/20.....	187
Gráfica 29: Respuesta del PID a las concentraciones de acetaldehído 2, 3 5, 9, 14, 23, 37 y 60ppm. Medidas de control realizadas para asegurar el funcionamiento correcto de la estación de gases.....	188
Gráfica 30: Respuesta de un sensor de SnO_2+Ag a las concentraciones de acetaldehído 2, 3 5, 9, 14, 23, 37 y 60ppm aplicando el tipo de PTM 0.25/120.....	189
Gráfica 31: Representación de $G-G_0/G_0$ en todos los puntos de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag en utilizando el tipo de PTM 2/20 para el gas acetaldehído.	190
Gráfica 32: Ejemplo de regresión para obtener la sensibilidad del sensor, en este caso en el octavo punto de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag en el PTM aplicado de 2/20 para el gas acetaldehído.	191
Gráfica 33: Sensibilidad de todos los sensores al acetaldehído en función del consumo asociado a cada tipo de PTM.....	191
Gráfica 34: Sensibilidad de cada uno de los sensores al gas acetaldehído.....	192
Gráfica 35: Respuesta de los ocho puntos de la secuencia de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag a las concentraciones de etileno 8, 14 24, 43, 75, 131, 229 y 400ppm aplicando el tipo de PTM 2/20.....	195
Gráfica 36: Respuesta del PID a las concentraciones de etileno 8, 14 24, 43, 75, 131, 229 y 400ppm. Medidas de control realizadas para asegurar el funcionamiento correcto de la estación de gases.....	196
Gráfica 37: Respuesta de un sensor de SnO_2+Ag a las concentraciones de etileno 8, 14, 24, 43, 75, 131, 229 y 400ppm aplicando el tipo de PTM 0.25/120.....	197
Gráfica 38: Representación de $G-G_0/G_0$ en todos los puntos de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag en el modo de funcionamiento 2/20 para el gas etileno.....	198
Gráfica 39: Sensibilidad se todos los sensores al etileno en función del modo de funcionamiento aplicado.	199
Gráfica 40: Sensibilidad de cada uno de los sensores al gas etileno.....	200
Gráfica 41: Respuesta de los ocho puntos de la secuencia de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag a las concentraciones de amoníaco 60, 37, 23, 14, 9, 5, 3 y 2ppm aplicando el modo de funcionamiento 2/20.....	202
Gráfica 42: Respuesta del PID a las concentraciones de amoníaco 60, 37, 23, 14, 9, 5, 3 y 2ppm. Medidas de control realizadas para asegurar el funcionamiento correcto de la estación de gases.....	203
Gráfica 43: Respuesta del octavo punto adquirido en un sensor de SnO_2+Ag a las concentraciones de amoníaco 60, 37, 23, 14, 9, 5, 3 y 2ppm aplicando el modo de funcionamiento 0.25/120.....	204
Gráfica 44: Representación de $G-G_0/G_0$ en todos los puntos de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag en el modo de funcionamiento 2/20 para el gas amoníaco..	205
Gráfica 45: Sensibilidad de todos los sensores al amoníaco en función del tipo de funcionamiento.....	206
Gráfica 46: Sensibilidad de cada uno de los sensores al gas amoníaco.	207

Índice de tablas:

Tabla 1: Diferentes condiciones de almacenaje [7].	73
Tabla 2: Intervalos de concentración para los diferentes componentes en la etapa de conservación de las manzanas.	82
Tabla 3: Compuestos volátiles producidos por las manzanas tipo <i>Golden</i> .	82
Tabla 4: Configuración implementada de la norma ISO/IEC 15693 para la comunicación lector-tarjeta.	87
Tabla 5: Parámetros de configuración de la conexión serie lector - puerta de enlace.	87
Tabla 6: Reglas de diseño para la fabricación de la tarjeta RFID en formato flexible establecidas por Tekkniker.	98
Tabla 7: Consumos de los diferentes dispositivos en activo, durmiendo y el tiempo en activo.	125
Tabla 8: Intervalos de concentración para los diferentes componentes en la etapa de conservación de las manzanas que indican su estado de calidad.	136
Tabla 9: Codificación de los índices de protección según la norma internacional IEC60529 y la norma alemana DIN 40050-9.	151
Tabla 10: Tipos de PTM utilizados junto al consumo de energía asociado a cada uno.	177
Tabla 11: Concentraciones utilizadas en el experimento para cada tipo de gas.	178
Tabla 12: LOD del gas acetaldehído en función del modo de funcionamiento.	193
Tabla 13: LOD del gas etileno en función del modo de funcionamiento.	201
Tabla 14: Tiempos de funcionamiento de la tarjeta RFID con los sensores ulp MOX integrados en función del modo de funcionamiento.	208
Tabla 15: Comparativa de los parámetros tiempo de funcionamiento y tiempo de estabilización entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.	209
Tabla 16: Comparativa de los parámetros conductancia de la línea de base y ruido entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.	209
Tabla 17: Comparativa de los parámetros LOD y sensibilidad al gas acetaldehído entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.	210
Tabla 18: Comparativa de los parámetros LOD y sensibilidad al gas etileno entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.	210
Tabla 19: Comparativa de los parámetros LOD y sensibilidad al gas amoníaco entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.	211
Tabla 20: Dimensiones de los diferentes tipos de tarjetas según la norma ISO/IEC 7810.	222
Tabla 21: Diferentes velocidades de transmisión de datos.	226
Tabla 22: Códigos de fabricante ISO/IEC 7816-6 (28-09-2007).	229
Tabla 23: Codificación AFI de las familias de aplicación.	230
Tabla 24: Definición de los bits del 1 al 4 del campo <i>flags</i> .	236
Tabla 25: Definición de los bits del 5 al 8 del campo <i>flags</i> , cuando el bit de inventario está desactivado.	236
Tabla 26: Definición de los bits del 5 al 8 del campo <i>flags</i> , cuando el bit de inventario está activado.	237

Tabla 27: Definición de los bits del 1 al 4 del campo <i>flags</i> en la trama de respuesta.	238
Tabla 28: Definición de los códigos de error en la trama de respuesta según la norma ISO/IEC 15693.....	238
Tabla 29: Codificación de comandos según la norma ISO/IEC 15693.	239

Índice de diagramas:

Diagrama 1: Flujo de datos entre el nodo AmI, el lector y las tarjetas en el escenario de carga.....	78
Diagrama 2: Flujo de datos entre el nodo AmI, el lector y las tarjetas en el escenario de descarga.....	80
Diagrama 3: Diagrama de bloques de la tarjeta RFID del proyecto GoodFood.	96
Diagrama 4: Estados y sus transiciones donde se puede encontrar el microcontrolador.....	108
Diagrama 5: Diferentes estados y sus transiciones programados en la CPLD para realizar la codificación y decodificación de los mensajes en la tarjeta.	115
Diagrama 6: Diagrama de bloques de la programación de la CPLD.	115
Diagrama 7: Diagrama de bloques del lector RFID con sensores implementados.	139
Diagrama 8: Flujo de datos del programa implementado en el lector para comunicaciones con las tarjetas.....	142
Diagrama 9: Proceso que sigue el programa de la GUI para el funcionamiento en los escenarios de carga y descarga.	145
Diagrama 10: Comunicación Maestro - Esclavo entre la VCD y la VICC.	233

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

Índice de esquemáticos:

Esquemático 1: Conexión de los componentes según la hoja de especificaciones del TPS62202.	101
Esquemático 2: Circuito equivalente de la antena.	111
Esquemático 3: Esquemático del transpondedor RFID implementado en la tarjeta.	113
Esquemático 4: Conexiones de alimentación y del interfaz con el microcontrolador obtenidas de la hoja de especificaciones del SHT15.	119
Esquemático 5: Adaptación niveles de tensión mediante el transistor MOSFET tipo n FDN359AN.	120
Esquemático 6: Configuración del SN74AUP1T98 en modo no inversor según la hoja de especificaciones.	120
Esquemático 7: Conexión del sensor de luz con el amplificador operacional de transimpedancia.	122
Esquemático 8: Red de adaptación para obtener la máxima potencia en antenas de 50Ω	142
Esquemático 9: Sistema de control secuencial de los calefactores y del sensor a medir.	170
Esquemático 10: Componentes utilizados en la configuración del filtro tipo <i>Sallen-Key</i>	172

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

1.- Introducción.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

1.1.- Introducción.

La presente tesis doctoral se centra en el diseño, desarrollo e implementación de una tarjeta con tecnología de identificación por radio frecuencia, o en inglés, *Radio Frequency IDentification* (RFID) con sensores integrados. Las etiquetas o tarjetas RFID semi-pasivas pueden realizar medidas mediante sensores físicos y/o químicos y, a su vez, almacenar el resultado en una memoria específica de forma autónoma gracias a la incorporación de una batería.

La tecnología RFID tiene múltiples aplicaciones. En particular en esta tesis se ha utilizado para la monitorización de productos perecederos, en concreto productos de alimentación. La monitorización mediante tarjetas RFID nos permite, por ejemplo, conocer el estado de alimentos como el pescado y la fruta en diferentes puntos de la cadena logística de distribución, asegurando de esta forma su calidad cuando llega a las manos del consumidor. Este trabajo se ha enmarcado dentro del proyecto europeo "*Food Safety and Quality Monitoring with Microsystems, GoodFood* (FP6-ICT-IP grant nº508774 de la Unión Europea)", que se realizó dentro del sexto programa marco de la comunidad europea [1]. La coordinación del proyecto fue llevada a cabo por parte del Centro Nacional de Microelectrónica (CNM) y, en concreto, esta tesis se encuadraba dentro del grupo de trabajo (WP6) de logística, liderado por el socio *European Aeronautic Defence and Space* (EADS) actualmente *Airbus Group*.

1.2.- Tecnología RFID.

La identificación por radio frecuencia (RFID) es una tecnología que permite la comunicación entre dos dispositivos, llamados lector, en inglés *reader* y tarjeta, en inglés *tag*, sin la necesidad de conexión mediante cable o línea de visión entre ellos. La energía necesaria para la comunicación es suministrada por el lector. Se utiliza básicamente para la captura e identificación automática de la información contenida en la tarjeta¹.

Las tarjetas más comunes no disponen de batería. Se les conoce como dispositivos pasivos, tanto en las comunicaciones, en las que nunca son las primeras en establecer la comunicación con el lector, únicamente responden a este, como en energía, cuando este tipo de dispositivos se encuentra en la zona de influencia del lector RFID, reciben energía de éste. Esta energía se almacena temporalmente, cosa que permite que puedan transmitir la información almacenada en su memoria hacia el dispositivo receptor. La principal característica de esta tecnología es que la recuperación de la información contenida en la tarjeta se realiza vía radiofrecuencia.

¹ Aunque la terminología correcta es lector y tarjeta, la utilización de sus homólogos anglosajones *reader* y *tag* está muy extendida en la literatura, por lo que es habitual el abuso del lenguaje y su utilización en memorias y trabajos realizados en otras lenguas.

1.2.1.- Introducción histórica del RFID.

La tecnología RFID no es conceptualmente nueva, el primer uso de un dispositivo similar al RFID se realizó en la segunda guerra mundial. En aquellos años casi todas las potencias mundiales disponían de una tecnología descubierta en 1935 por el físico escocés Sir Robert Alexander Watson-Watt, el radar (Radio Detection And Ranging) [2], que detectaba la posición de cualquier aeroplano a un cierto rango de distancia mediante la reflexión de una señal tal y como se muestra en la Figura 1:

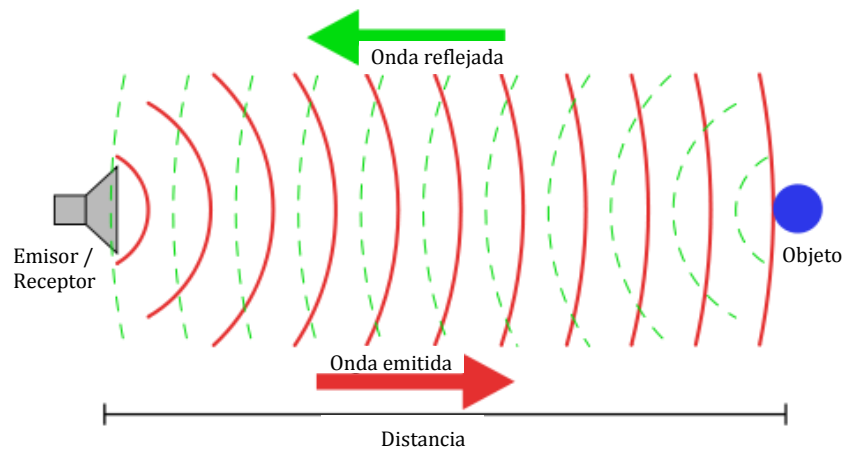


Figura 1: Esquema básico de funcionamiento de la tecnología radar [3].

Después de activar en numerosas ocasiones de forma innecesaria las alarmas antiaéreas por la detección de aeroplanos amigos, los británicos se dieron cuenta de la necesidad de identificar dichos aeroplanos y clasificarlos entre amigo o enemigo (**I**dentificación **F**riend or **F**oe **I**FF) [4]. El primer dispositivo IFF fue patentado por Watson-Watt e introducido en 1939, dicho dispositivo contenía receptores superregenerativos que detectaban las emisiones de radar de las estaciones terrestres y respondían a estas enviando a su vez otra señal codificada mucho más potente y en la misma frecuencia que la recibida [4]. La base de esta tecnología continua siendo utilizada hoy en día con sistemas más avanzados, cualquier aeroplano que vuela por el espacio aéreo lleva implantado un dispositivo de identificación IFF.

Uno de los primeros trabajos en el campo de la RFID fue el presentado por Harry Stockman en 1948 [5], donde se discute teóricamente un nuevo sistema de transmisión punto a punto. En este tipo de sistemas de comunicación normalmente se utilizan dos transmisores/receptores (en inglés *transceivers*). Sin embargo Stockman propone un sistema basado en el envío de energía modulada a través de uno de los *transceivers*, y al otro lado, modula esta energía reflejándola hacia el sistema emisor. De esta forma, se elimina uno de los *transceivers* clásicos. Esta tecnología fue denominada comunicación por energía reflejada y preveía mejoras como alta direccionabilidad, eliminación de la interferencia de desvanecimiento, diseño simple de transmisión de voz sin tubos, circuitos y fuentes de alimentación, aumento de la seguridad, y métodos simplificados para la identificación y la navegación [5]. Sin embargo, para alcanzar dichos objetivos era necesario un

importante desarrollo tecnológico y científico, inalcanzable en la época en que se pensó.

La primera patente sobre RFID fue presentada por Mario Cardullo en enero de 1973, y se basaba en una tarjeta activa con una memoria regrabable [6]. Ese mismo año, Charles Walton presentó una patente basada en una tarjeta pasiva que abría y cerraba una puerta sin utilizar llave alguna. Una tarjeta con un transpondedor embebido enviaba una señal a un lector cercano a la puerta. Cuando el lector detectaba el número de identificación grabado en la tarjeta válida es un dispositivo que recibe una señal a una determinada frecuencia y responde a otra diferente [6].

El gobierno de los Estados Unidos de América también trabajó en sistemas RFID en la época de los 70. El Laboratorio Nacional de *Los Alamos* fue requerido por el departamento de energía para desarrollar un sistema de seguimiento de materiales nucleares. Un grupo de científicos tuvo la idea de poner un transpondedor en un camión y lectores en las puertas de las instalaciones de seguridad. La antena del lector debía despertar el transpondedor en el camión, el cual debía responder con un identificador y opcionalmente otros datos, tales como la identificación del conductor, el tipo de material transportado, etc. Este sistema fue comercializado a mediados de la década de los 80 cuando los científicos que trabajaron en el proyecto fundaron una compañía de sistemas de pago automático. Los sistemas desarrollados por dicha compañía se han utilizado ampliamente en las carreteras, puentes y túneles de todo el mundo [6].

En *Los Alamos* también se desarrollaron tarjetas de RFID a petición del departamento de agricultura de los EEUU, para utilizar en el ganado bovino. El problema radicaba en que cuando el ganado enfermaba se le subministraba hormonas y medicinas, por lo tanto, existía la dificultad de asegurar que cada vaca recibía su dosis correcta y que no se le subministraran dobles dosis por error. En un principio se optó por la introducción de tarjetas que utilizaban complejos y aparatosos sistemas que operaban a UHF (Ultra High Frequency, más allá de los 800MHz), pero más adelante otras compañías desarrollaron sistemas RFID menos complejos que operaban a LF (Low Frequency a 125kHz), reduciendo así el tamaño de la tarjeta. Un transpondedor insertado en una cápsula de cristal era inyectado bajo la piel de los animales, pudiendo ser consultado fácilmente con un dispositivo lector de RFID [6]. Desde entonces, varias compañías han utilizado el seguimiento de animales basados en RFID para monitorizar vacas, cerdos, gatos, perros, e incluso pesca para controlar los brotes de enfermedades animales como la gripe aviar o la encefalopatía espongiiforme bovina (enfermedad de las vacas locas) [7].

Con el tiempo, las empresas que comercializaban sistemas que operaban a LF empezaron a desarrollar sistemas que operaban a HF (High Frequency, 13.56MHz), debido a que era una frecuencia no regulada y libre a nivel mundial. Los sistemas HF ofrecen mayor alcance y transferencia de datos que los sistemas LF. Las empresas, particularmente las europeas, empezaron a utilizar estos sistemas para el seguimiento de contenedores reutilizables y otros activos. Actualmente los sistemas RFID a 13.56MHz se utilizan en una gran variedad de aplicaciones como pueden ser control de acceso, sistemas de pago o tarjetas inteligentes "contactless". También se utilizan como sistemas anti robo en automóviles, el vehículo no arrancará si no recibe el número de identificación que está programado para buscar, dicho número

lo proporcionará la tarjeta pasiva o llave RFID mediante un lector RFID instalado en el habitáculo del vehículo [8], en la Figura 2 se muestra como ejemplo la llave de algunos vehículos de la marca Renault, los botones y la llave manual son para la apertura de puertas.



Figura 2: Llave de Renault con seguridad RFID de arranque.

A principio de la época de los 90, ingenieros de IBM desarrollaron y patentaron un sistema RFID a UHF. Este sistema ofrecía un rango de lectura superior (sobre 6 metros en óptimas condiciones), y mayor velocidad de transferencia de datos. IBM hizo algunas pruebas piloto con la colaboración de la cadena de grandes almacenes Wal-Mart, pero nunca se comercializó esta tecnología debido al coste del sistema. Cuando a mediados de los 90, IBM tuvo problemas económicos, vendió sus patentes sobre RFID a la compañía Intermec, un proveedor de sistemas de códigos de barras. Intermec desarrolló sistemas RFID para diversas aplicaciones, desde seguimiento de mercancías hasta la ganadería, pero el coste de esta tecnología era muy elevado debido al bajo volumen de ventas y la falta de estándares internacionales.

El punto de inflexión a partir del cual la tecnología RFID presenta sus credenciales en el mundo tecnológico asociado al consumo es en 1999, cuando la Uniform Code Council (organización sin ánimo de lucro que supervisa el código de producto universal, el estándar de código de barras utilizado en América del Norte), EAN International (European Article Number), Procter & Gamble (multinacional P&G de bienes de consumo) y Gillette (actualmente adquirida por P&G) aportaron fondos para establecer el Auto-ID Center en el MIT (Massachusetts Institute of Technology), una colaboración sin ánimo de lucro entre las empresas privadas y las instituciones académicas que fueron pioneras en el desarrollo de una infraestructura tipo Internet para el seguimiento de mercancías a nivel mundial a través del uso de tarjetas RFID que llevan Códigos de Productos Electrónicos (EPC). Al frente de Auto-ID Center habían dos profesores del MIT, David Brock and Sanjay Sarma, que investigaron la posibilidad de poner tarjetas RFID de bajo coste en la mayoría de productos para realizar un seguimiento en toda la cadena de distribución. Su idea fue la de poner solo un número de serie en la tarjeta para minimizar el precio (un simple microchip que grabara muy poca información debería ser más barato que otro más complejo con mucha más memoria). Los datos asociados al número de serie grabados en la

tarjeta debían ser grabados también en una base de datos que debía ser accesible desde internet.

Sarma y Brock cambiaron esencialmente la visión acerca del RFID en la cadena de suministro. Anteriormente, las tarjetas eran una base de datos móvil que lleva información sobre el producto o envase que estaban con ellos mientras viajaban. Sarma y Brock convirtieron RFID en una tecnología de red mediante la vinculación de objetos a Internet a través de la tarjeta. Para las empresas, esto fue un cambio importante, porque ahora el vendedor podía facilitar automáticamente al comprador la información de cuando un cargamento salía del muelle en una planta de fabricación o almacén, y el comprador podría facilitar automáticamente al vendedor la información de cuándo llegaban las mercancías.

Entre 1999 y 2003 el Auto-ID Center obtuvo la aprobación de más de 100 grandes empresas, además del departamento de defensa de los EEUU y muchas de las empresas de tarjetas RFID. Se abrieron laboratorios de investigación en todo el mundo, se desarrollaron dos protocolos de interfaz inalámbricos (Clase 1 y Clase 0), el esquema de numeración del EPC y una arquitectura de red para la búsqueda de datos asociados a una tarjeta RFID en Internet. La tecnología fue licenciada a la Uniform Code Council en 2003, y el Uniform Code Council creó EPCglobal, como una empresa conjunta con EAN International, para comercializar la tecnología EPC. El Auto-ID Center cerró sus puertas en octubre de 2003, y sus responsabilidades de investigación se transmitieron a Auto-ID Labs.

1.2.2.- Conceptos básicos de los sistemas RFID.

Como hemos visto hasta el momento, los componentes básicos de un sistema RFID son el lector y la tarjeta. El lector emite una señal de RF a una determinada frecuencia y la tarjeta, cuando entra dentro del campo electromagnético generado, recibe energía suficiente para poder alimentarse eléctricamente y además, emitir los datos contenidos en ella. Así pues, las funciones básicas de funcionamiento son las siguientes [9]:

Para el lector:

- Proveer de energía a la tarjeta,
- proveer una portadora a la frecuencia de trabajo determinada a la tarjeta,
- detectar y decodificar la señal modulada que envía la tarjeta.

Para la tarjeta:

- Captar la energía aportada por el lector,
- resonar a la frecuencia de la portadora aportada por el lector,
- modular sobre la portadora los datos a enviar al lector.

Para que la tarjeta pueda recibir energía el lector debe emitir un campo RF. La emisión RF del dispositivo lector no es más que un campo electromagnético modulado a una cierta frecuencia en un rango que oscila entre las decenas de kHz hasta los GHz, dependiendo del tipo de sistema RFID.

En los sistemas de RFID se producen dos tipos de acoplamiento para poder enviar energía a la tarjeta.

- Acoplamiento inductivo o de campo cercano. En este caso se induce una corriente desde la antena del lector a la antena de la tarjeta. De esta forma, la energía es suministrada por el campo magnético de la señal electromagnética de RF. Utiliza como frecuencias de funcionamiento LF y HF. Tienen distancias de lectura y escritura cortas, hasta las decenas de centímetros.
- Acoplamiento capacitivo o de campo lejano. En este caso se induce un voltaje desde las antenas del lector y la tarjeta. Aquí se aprovecha la electricidad suministrada por la señal electromagnética de RF. Utiliza frecuencias de funcionamiento de UHF y microondas. Alcanza grandes distancias para leer o escribir que pueden llegar, según el caso, a los 100 metros.

Esta tesis se centra en los sistemas que utilizan acoplamiento inductivo.

1.2.2.1.- Campo magnético generado por el lector.

Como hemos comentado anteriormente, el acoplamiento inductivo se produce cuando las antenas del lector y la tarjeta se acoplan. Esto es debido a que las antenas forman parte de un tanque resonante LC (inductancia y capacidad), siendo la inductancia la antena y estando el tanque sintonizado a la frecuencia de resonancia del sistema. Así pues, cuando la tarjeta recibe este campo de RF es capaz de generar un voltaje a través de su antena.

El campo magnético generado por el lector a través de su antena, por lo general un bucle o espiras más o menos circulares, se genera cuando la corriente pasa a través de ella. Éste campo magnético es perpendicular al plano de las espiras y viene dado por [9]:

$$B = \frac{\mu_0 I N r_1^2}{2(d^2 + r_1^2)} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$= \frac{\mu_0 I N r_1^2}{2r_1^3} \quad \text{para } r_1^2 \gg d^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

donde μ_0 es la permeabilidad del aire, I es la corriente a través de las espiras, N es el número de espiras, r_1 es el radio de las espiras y d es la distancia perpendicular desde el centro del bucle.

En la Figura 3 se muestran las líneas de campo generadas por un lector y recibidas por una tarjeta:

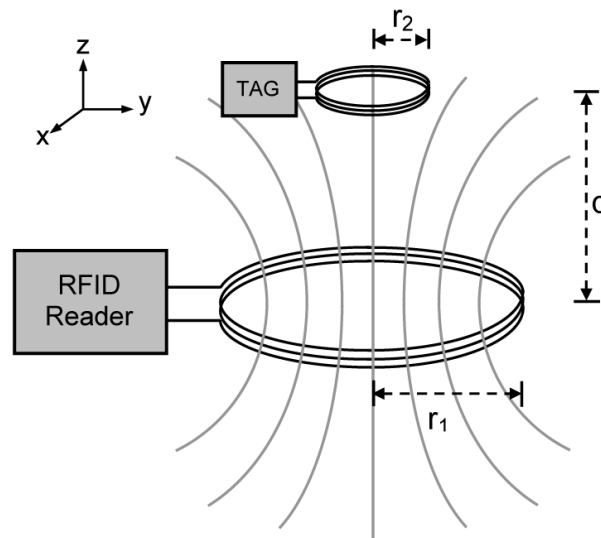


Figura 3: Diagrama de bloques básico de un sistema RFID de campo cercano [8].

Como puede verse a partir de la Ecuación 2, la fuerza del campo magnético es proporcional a $\frac{1}{r_1^3}$. Este es el principal factor limitante en la consecución de rangos de lectura más grandes en los sistemas RFID de acoplamiento inductivo.

Podríamos afirmar, según la Ecuación 2, que a mayor antena, mayor campo magnético generado, y por lo tanto, mayor distancia de lectura. O también, que a mayor número de espiras se puede alcanzar mayores distancias de lectura. Pero existen desventajas para ambas opciones. Obviamente, cuanto más grande es la antena, se vuelve más pesada y costosa. Por otro lado, las consecuencias de aumentar el número de espiras, implican un incremento en la inductancia del lector, que se traduce en mayor cantidad de energía reflejada así como en una mayor impedancia que varía significativamente con la frecuencia. Por lo tanto, se debe llegar a un compromiso de alcanzar el número más pequeño de espiras posible que permita proporcionar un campo magnético necesario para alcanzar la distancia de lectura deseada [10].

1.2.2.2.- Voltaje generado en la tarjeta.

Como hemos explicado anteriormente, las tarjetas RFID reciben energía mediante la inductancia de su antena. Este proceso es similar al que ocurre en un transformador típico en el cual las espiras de entrada, llamadas primario, transfieren voltaje a las espiras de salida, llamadas secundario a través del acoplamiento inductivo [11]. En los sistemas RFID con acoplamiento inductivo, la antena del lector actúa como el primario, transfiriendo el voltaje, y la tarjeta es el secundario, que lo recibe. El voltaje inducido viene dado por la expresión:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde N es el número de espiras y Φ es el flujo magnético generado a través de la superficie de la antena de la tarjeta. Este flujo se puede calcular como:

$$\Phi = \int B \cdot dS \quad \text{Ecuación 4}$$

donde B es el campo magnético calculado en la Ecuación 1 y S es el área de la superficie de la inductancia asociada a la antena de la tarjeta.

Cabe destacar que Φ es el producto escalar entre el campo magnético B generado por la antena del lector y el área de la superficie S de la antena de la tarjeta. Por lo tanto, el máximo flujo magnético que puede fluir por la antena se obtiene cuando las antenas del lector y de la tarjeta están en paralelo.

De este modo, para calcular el voltaje máximo inducido en la antena de la tarjeta se puede calcular combinando la Ecuación 1, la Ecuación 3 y la Ecuación 4:

$$V = -\frac{\mu_0 N_1 N_2 r_1^2 (\pi r_2^2)}{2(d^2 + r_1^2)^{\frac{3}{2}}} \frac{di}{dt} = -M \frac{di}{dt} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde V es el voltaje en la antena de la tarjeta, N_1 es el número de espiras de la antena del lector, N_2 es el número de espiras en la antena de la tarjeta, r_1 es el radio de la antena del lector, r_2 es el radio de la antena de la tarjeta, d es la distancia entre las dos antenas, i la corriente en la antena del lector y M la inductancia mutua entre las dos antenas.

El voltaje calculado se recibe en la tarjeta esta en forma de alterna (AC) y debe ser convertido a continua (DC) para que la tarjeta pueda funcionar. Esto se puede realizar mediante un simple conjunto diodo-capacidad. A menudo se implementan diodos de protección para evitar sobretensiones en la tarjeta.

1.3.- Clasificación y características de los sistemas RFID.

Existen en el mercado una gran variedad de sistemas de RFID producidos por diversos fabricantes. Para tener una visión general de los sistemas RFID se deben conocer los aspectos fundamentales principales que diferencian a un sistema de otro [12].

1.3.1.- Modo de operación.

Para la transmisión de datos entre lector y tarjeta, los sistemas RFID operan con alguno de estos dos modos, *full dúplex/ half dúplex* o por métodos secuenciales tal y como se explica a continuación:

En el modo *full y half dúplex* la tarjeta responde siempre que recibe energía del lector en su antena. Debido a que la señal emitida por la tarjeta puede ser muy pequeña en comparación con la señal generada por el lector, se deben emplear métodos de transmisión apropiados para poder diferenciar entre ambas señales. Uno de los más utilizados es amplitud modulada (AM). En este caso, se utiliza la activación o desactivación de una impedancia en la antena de la tarjeta en función de los bits a enviar, de este modo se consigue variar la corriente que circula por la antena del lector, obteniendo así una modulación en amplitud de la señal emitida por el lector. Utilizando la analogía del transformador, podríamos hablar de que se basa en una técnica de impedancia modulada en el secundario que resulta en una amplitud modulada de la corriente en el primario.

La energía recibida en la antena de la tarjeta es modulada en amplitud dependiendo de los datos a enviar por la tarjeta. Esto se consigue conmutando un transistor de modulación en paralelo con el circuito resonante formado por la antena y la capacidad [13].

Por el contrario, los métodos secuenciales emplean un sistema por el cual el campo del lector se apaga brevemente a intervalos regulares. Estos intervalos son reconocidos por la tarjeta y los utiliza para enviar datos al lector. La desventaja del método secuencial es la pérdida de energía para la tarjeta durante la pausa en la transmisión, debiendo implementar condensadores auxiliares o baterías para mantener la tarjeta encendida.

1.3.2.- Memoria de la tarjeta.

En la mayoría de sistemas, la capacidad de memoria de las tarjetas RFID varía desde unos pocos Bytes a algunos KiloBytes. Pero también se encuentran las llamadas tarjetas de 1 bit, capacidad suficiente para que el lector pueda distinguir entre dos estados. Esta solución es adecuada para muchas aplicaciones que no precisen de información adicional, como por ejemplo, las tarjetas anti robo, también conocidas por su acrónimo en inglés EAS (Electronic Article Surveillance),

utilizadas para proteger productos en tiendas y negocios. Si alguien intenta salir de la tienda con artículos que no ha pagado, cuando llegue al lector instalado en la salida, este detectará una tarjeta en su campo e iniciará la acción correspondiente, normalmente activará una alarma sonora i/o lumínica. Estas tarjetas no necesitan implementar un chip ni memoria por lo que su coste es mucho menor que cualquier otra tarjeta.

1.3.3.- Tipo de memoria en la tarjeta.

En los sistemas más básicos de RFID los datos almacenados en la tarjeta, normalmente un número, son grabados en el proceso de fabricación y no pueden ser alterados posteriormente. Por consiguiente, este tipo de dispositivos actúan como una memoria ROM (Read Only Memory). Algunos sistemas donde las tarjetas pueden ser grabadas con nuevos datos llevan incorporadas memorias EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-only Memory), pero tienen la desventaja del alto consumo que supone la operación de escritura y la limitación en ciclos de escritura. Los sistemas más modernos incorporan memoria tipo FLASH, que optimiza mucho mejor tanto el consumo en la escritura como la velocidad de acceso a los datos almacenados.



Figura 4: Tarjeta RFID HF con memoria programable de 2048 bits de la empresa Texas Instruments.

1.3.4.- Principio de propagación.

Podemos diferenciar varios tipos de sistemas dependiendo del principio de propagación, las tarjetas de los sistemas más comunes, que operan a LF y HF, reciben la energía mediante el campo electromagnético emitido por el lector, en este caso el acoplamiento es inductivo y se produce entre la bobina de la antena del lector y la de la tarjeta.

Para la mayoría de casos en los sistemas que operan en UHF y microondas, la tarjeta se alimenta del campo eléctrico generado por el lector, en este caso el acoplamiento es capacitivo y se produce entre los electrodos del lector y los de la tarjeta.

1.3.5.- Secuencia de trabajo de la tarjeta.

En los sistemas con memoria programable, cualquier tipo de petición relacionada con accesos a lectura o escritura debe controlarse mediante la lógica interna implementada en la tarjeta.

En el caso más simple la lógica de control puede realizarse mediante máquinas de estado que implementen dicha lógica en un chip. Mediante este método se puede llegar a realizar secuencias muy complejas. Las ventajas son la sencillez del sistema y el coste por tarjeta, que es muy bajo debido a la producción en masa. Pero la desventaja de utilizar máquinas de estado radica en su falta de flexibilidad respecto a los posibles cambios en sus funciones programadas. Un cambio en cualquier función necesitaría cambios en la lógica interna del chip, lo que implicaría un rediseño del propio chip y, por tanto, un sobrecoste adicional.

Si se busca un sistema más flexible, es necesario el uso de un microprocesador, que nos aporta mucha mayor flexibilidad al poderse programar para la gestión de datos. El programa se incorpora en el microprocesador durante la fabricación. Por lo tanto, implementar cambios en cualquier función repercute mucho menos en el coste y, además, el software puede ser adaptado para realizar aplicaciones muy diferentes.

1.3.6.- Alimentación de la tarjeta.

Una de las características más importantes en los sistemas de RFID es como la tarjeta obtiene la energía para poder comunicarse con el lector. Los sistemas más ampliamente utilizados son con tarjeta pasiva, en los cuales las tarjetas de RFID no cuentan con una fuente propia de energía. Su antena recibe la señal de radiofrecuencia enviada por el lector y almacena la energía de la señal en un condensador. La tarjeta utiliza esta energía para habilitar su circuito lógico y para responder al lector. Estas tarjetas pueden llegar a ser muy económicas y pequeñas.

Las denominadas tarjetas RFID activas utilizan fuentes de energía integradas, como pueden ser baterías. Este tipo de tarjetas implementa una electrónica más sofisticada, lo que incrementa su capacidad de almacenamiento de datos, interfaces con sensores, funciones especializadas, además de que permiten que exista una mayor distancia entre lector y tarjeta. Este tipo de dispositivos son más costosos y tienen un mayor tamaño. Pueden permanecer activos sin la presencia de un lector y, si se agota la batería, ser activados de nuevo cuando se encuentran dentro del rango de algún lector.

Otro tipo de tarjetas RFID son las semi-activas (en energía) o también llamadas semi-pasivas (en comunicación) que, como las activas, emplean fuente de energía integrada, pero en este caso solo para alimentar a la propia tarjeta. Para transmitir datos, una tarjeta semi-activa utiliza la energía emitida por el lector. En este tipo de sistemas, el lector siempre inicia la comunicación. La ventaja de estos dispositivos es que al no necesitar la señal del lector para alimentarse, pueden ser leídos a mayores distancias, y como el tiempo de funcionamiento es menor, pueden estar

en el rango de lectura del lector por un tiempo substancialmente menor para una apropiada lectura.

1.3.7.- Rango de frecuencia del sistema.

La característica más importante en los sistemas RFID es la frecuencia de operación y el rango resultante del sistema. La frecuencia de funcionamiento es la frecuencia a la que el lector transmite. En este caso no tenemos en cuenta la frecuencia de transmisión de la tarjeta que en la mayoría de los casos es la misma que la de transmisión del lector, ya sea por modulación de carga o por *backscatter*[11]. En cualquier caso, la potencia de transmisión de la tarjeta siempre funciona varios rangos de magnitud por debajo de la del lector.

Las diferentes frecuencias de transmisión se pueden englobar dentro de tres rangos:

- LF (low frequency, 30–300kHz).
- HF (high frequency)/RF radio frequency (3–30MHz).
- UHF (ultra high frequency, 300MHz–3GHz)/microwave (>3GHz).

Los sistemas que utilizan el rango de frecuencia LF son muy robustos en ambientes con metales y líquidos que puedan absorber la energía electromagnética, pero tienen algunas desventajas como una distancia de lectura de sólo unos cuantos centímetros y un coste por tarjeta relativamente alto. Esto es debido principalmente a la necesidad de una antena de mayores dimensiones ya que requiere de un mayor número de espiras. Además este tipo de sistemas tienen el inconveniente que sólo una tarjeta puede ser leída a la vez. Como ejemplo en la Figura 5 se muestran dos modelos de estas tarjetas:



Figura 5: Diferentes tarjetas RFID LF a 125kHz de la empresa SOKYMAT Industry & Logistics.

El rango de frecuencias comprendido por HF es el más comúnmente utilizado en los sistemas RFID. La frecuencia más extendida en este rango es la de 13.56MHz. Dependiendo si la tarjeta es pasiva o activa, la distancia de funcionamiento puede ir desde unos pocos centímetros hasta un metro. El precio de fabricación es relativamente bajo comparado con los sistemas basados en LF, debido en parte al menor número de espiras necesarias a estas frecuencias. Pueden funcionar en ambientes con líquidos, pero sin embargo, en ambientes metálicos su eficiencia baja considerablemente.

Finalmente, los sistemas RFID con rangos de funcionamiento por encima de un metro son conocidos como de largo alcance. Estos sistemas operan utilizando ondas electromagnéticas en el rango de UHF y microondas. La mayoría de estos sistemas utilizan el llamado método de reflexión o *backscatter* como principio físico de operación. Este método también utiliza la modulación de carga, como hemos visto anteriormente, para el envío de información entre tarjeta y lector, pero el acoplamiento es capacitivo y la respuesta se produce aprovechando la energía eléctrica de la señal enviada por el lector [14]. Estos sistemas tienen una velocidad mayor de transmisión de datos pero son muy sensibles a los ambientes metálicos y líquidos. En la Figura 6 se muestran dos ejemplos de estas tarjetas:



Figura 6: Ejemplos de tarjetas RFID UHF de 860MHz a 960MHz de la empresa UPM-Raflatac inc.

1.4.- Estándares RFID. Introducción al ISO/IEC 15693.

Los estándares RFID son pautas o especificaciones para todos los productos RFID. Estas normas proporcionan directrices acerca de cómo funcionan los sistemas de RFID, a qué frecuencias operan, cómo se transfieren los datos, y cómo funciona la comunicación entre el lector y la tarjeta. Por otro lado, ayudan a garantizar que los productos RFID sean interoperables, independientemente del proveedor o usuario. También proporcionan pautas mediante las cuales las empresas pueden desarrollar productos complementarios, tales como diferentes tipos de tarjetas, lectores, software y accesorios. Además, las normas ayudan a ampliar los mercados y aumentar la competencia en la industria, cosa que abarata los costes de los productos RFID. Los estándares RFID también ayudan a aumentar la confianza generalizada en la tecnología.

Los dos principales organismos encargados de redactar los estándares de RFID son [15]:

- ISO/IEC- International Standards Organization / International Electrotechnical Commission.
- Auto-ID center o EPCglobal - Electronic Product Code Global Incorporated.

Aunque estas dos organizaciones proporcionan los principales estándares RFID, también hay una gran cantidad de normas diferentes que se aplican a las áreas de RFID.

1.4.1.- Clasificación de tarjetas RFID según Auto-ID.

Con el fin de ser capaz de estandarizar las tarjetas de RFID, el Auto-ID Center ideó una serie de clases para las tarjetas RFID:

- Clase 0: Tarjeta básica de sólo lectura, pasiva y que utiliza backscatter para responder al lector. No es programable.
- Clase 1: Tarjeta básica de sólo lectura, pasiva y que utiliza backscatter para responder al lector. Es programable una sola vez.
- Clase 2: Tarjeta pasiva y que utiliza backscatter para responder al lector con memoria programable de hasta 65kbits.
- Clase 3: Tarjeta semi-pasiva con un máximo de 65kbits de memoria con una batería incorporada para proporcionar un mayor rango de distancia de lectura.
- Clase 4: Tarjeta activa que utiliza una batería para habilitar alguna funcionalidad extra dentro de la tarjeta y también proporcionar energía para la transmisión.
- Clase 5: Tarjeta activa que ofrece circuitería adicional para comunicarse con otras tarjetas de clase 5.

Estas clasificaciones engloban todos los tipos de tarjetas según Auto-ID center o EPCglobal, pero no se regulan según ISO/IEC que tienen sus propios estándares, listados en el siguiente apartado.

1.4.2.- Principales estándares RFID según normativa ISO/IEC.

A continuación se citan los principales estándares RFID según la normativa de la ISO/IEC junto con su campo de aplicación [14]:

- ISO 10536 - ISO RFID estándar para tarjetas con acoplamiento cercano.
- ISO 11784 - ISO RFID estándar que define la forma de estructurar los datos en una tarjeta RFID.
- ISO 11785 - ISO RFID estándar que define el protocolo de interfaz inalámbrico.
- ISO 14443 - ISO RFID estándar que proporciona las definiciones para el protocolo de interfaz inalámbrico para tarjetas RFID utilizadas en sistemas de proximidad - destinado para su uso con los sistemas de pago.
- ISO 15459 - Identificadores únicos para las unidades de transporte (utilizados en la gestión de la cadena de suministro).

- ISO 15693 - ISO RFID estándar para su uso con lo que se denominan tarjetas de proximidad o cercanía.
- ISO 15961 - ISO RFID estándar para la gestión de artículos. (incluye interfaz de aplicaciones (parte 1), el registro de las construcciones de datos RFID (parte 2), y construcciones de datos RFID (parte 3).
- ISO 15962 - ISO RFID estándar para la gestión de artículos. Reglas de codificación de datos y funciones para la memoria lógica.
- ISO 16963 - ISO RFID estándar para la gestión de artículos. Identificador único para tarjetas RF.
- ISO 18000 - ISO RFID estándar de la interfaz aérea o capa física para las frecuencias de RFID en todo el mundo.
- ISO 18001 - RFID para la gestión de artículos. Aplicación de perfiles de requerimientos.
- ISO 18046 - RFID métodos de prueba de rendimiento entre la tarjeta y el lector.
- ISO 18047 – El estándar ISO RFID que define los ensayos incluyendo ensayos de conformidad con el estándar RFID para tarjetas y lectores. Se divide en varias partes que reflejan las partes del estándar ISO 18000.
- ISO 24710 – Información tecnológica. Técnicas de identificación automática y captura de datos.
- ISO 24729 – Directrices de implementación RFID Parte 1: RFID habilitado de tarjetas. Parte 2: reciclabilidad de tarjetas RF. Parte 3: RFID instalación de la antena del lector.
- ISO 24730 - Sistema de localización RFID en tiempo real: Parte 1: Application Programming Interface (API); Parte 2: 2.4 GHz; Parte 3: 433 MHz; Parte 4: Sistemas de posicionamiento global.
- ISO 24752 – Protocolo de sistema de gestión para la identificación automática y captura de datos utilizando la tecnología RFID.
- ISO 24753 - Comandos de interfaz aérea para la ayuda de la batería y a la funcionalidad del sensor.
- ISO 24769 - Real Time Locating System (RTLS) métodos de prueba de conformidad dispositivo.
- ISO 24770- Real Time Locating System (RTLS) métodos de prueba de rendimiento del dispositivo.

Esta variedad de estándares confirma la gran implantación de los sistemas RFID en diferentes aspectos. Todas estas normas intentan regular todas las posibles aplicaciones de la RFID y sus diferentes escenarios de aplicación. Cabe destacar que estas normas no se aplican por si solas, sino que diversas normas regulan una

misma aplicación, por ejemplo, en el caso de la tarjeta multisensora el estándar que se utiliza es el ISO/IEC 15693 que está diseñado para ser utilizado en conjunto con otras normas internacionales desarrolladas para la gestión de artículos mediante RFID y sistemas de localización en tiempo real, tales como ISO/IEC 18000 e ISO/IEC 24730.

A continuación se lista las partes el estándar ISO 18000, una de las más importantes ya que se refiere a la capa física de las comunicaciones RFID.

1.4.3.- Estándares RFID ISO 18000.

Los estándares de la serie ISO 18000 son los que definen la interfaz aérea para las diferentes frecuencias de RFID en uso en todo el mundo. Hay un total de siete normas dentro de la serie ISO 18000 como se indica [15]:

- ISO 18000-V1 - Parámetros generales para interfaces aéreas para utilizar frecuencias globalmente aceptadas.
- ISO 18000-V2 - Interfaz aérea para 135 KHz.
- ISO 18000-V3 - Interfaz aérea para 13.56 MHz.
- ISO 18000-V4 - Interfaz aérea para 2.45 GHz.
- ISO 18000-V5 - Interfaz aérea para 5.8 GHz.
- ISO 18000-V6 - Interfaz aérea para 860 MHz to 930 MHz.
- ISO 18000-V7 - Interfaz aérea para 433.92 MHz.

Los estándares de RFID se han generalizado en su uso, y aunque EPCglobal e ISO son organizaciones separadas, se realizan esfuerzos para unificar los escenarios de estándares RFID.

En el caso de esta tesis, la utilización del estándar ISO/IEC 15693 implica el cumplimiento de la norma ISO 18000-V3, al ser ésta la norma que regula la interfaz aérea de la frecuencia de 13.56 MHz.

1.4.4.- Estándar ISO/IEC 15693.

Llegado a este punto vamos a analizar uno de los estándares más utilizados por los sistemas RFID, el estándar ISO/IEC 15693 utilizado para tarjetas de identificación, tarjetas con circuitos integrados tipo *contactless* y tarjetas de vecindad con rangos de lectura más pequeños que las tarjetas de proximidad. Cabe destacar el término tarjeta, que se refiere a la tarjeta RFID con dimensiones de tarjeta de crédito. Este protocolo está dividido en cuatro partes separadas donde se define el ámbito de actuación de cada una de ellas, como se puede ver a continuación:

- ISO/IEC 15693-1: Parte 1, características físicas.
- ISO/IEC 15693-2: Parte 2, interfaz inalámbrico e inicialización.
- ISO/IEC 15693-3: Parte 3, protocolos de transmisión y anticolidión.
- ISO/IEC 15693-4: Parte 4, conjunto de comandos extendidos y funciones de seguridad (No definido actualmente).

En capítulos posteriores se realiza una detallada explicación de este estándar, sobretodo de las partes 2 y 3, de momento realizamos un pequeño resumen de sus apartados.

1.4.4.1.- ISO/IEC 15693-1: Parte 1.

La primera parte del estándar ISO/IEC 15693 hace referencia a las características físicas de las tarjetas o tarjetas de proximidad o cercanía, en inglés *vinicity cards* (*VICCs*). Se aplica a las tarjetas de identificación del tipo ID-1, especificado en el ISO/IEC estándar 7810, que operan en proximidad por acoplamiento con otro dispositivo. Dicho dispositivo, en inglés *vinicity coupling device* (*VIC*) está definido como el lector que usa acoplamiento inductivo para proveer energía a la *VICC* y también controlar el intercambio de datos con la *VICC* [16].

En general se define que las características físicas han de ser las mismas que las especificadas para las tarjetas ID-1.

Como características adicionales hace referencia al comportamiento de las *VIC* frente a diferentes fenómenos físicos como son la luz ultravioleta, los rayos X, máximo esfuerzo por flexión dinámica y torsión dinámica, a la exposición a campos magnéticos alternos y a campos eléctricos alternos, a los efectos de la electricidad estática, a la exposición a campos magnéticos y a las temperaturas de funcionamiento [16].

Esta parte debe ser utilizada conjuntamente con las otras partes del estándar ISO/IEC 15693.

1.4.4.2.- ISO/IEC 15693-2: Parte 2.

La segunda parte del estándar ISO/IEC 15693 define la energía utilizada y el interfaz de comunicaciones entre el *VICC* (tarjeta o tarjeta) y el *VIC* (lector). La alimentación de la tarjeta se obtiene mediante el acoplamiento a una señal alterna producida por el lector. Esta señal tiene una frecuencia de 13.56MHz, frecuencia disponible en todo el mundo dentro de los rangos llamados definidos como *ISM* (*Industrial, Scientific and Medical*). Cuando la tarjeta recibe energía suficiente para funcionar es capaz de responder a comandos enviados por el lector. Se define cómo el lector tiene que mandar los comandos a la tarjeta, esto es, modulando la amplitud de la señal mediante un sistema conocido como *Pulse Position Modulation*

(PPM) o modulación por la posición del pulso, que permite codificar medio o un byte de datos mediante la posición de un único pulso con respecto a un punto de referencia conocido. Esto permite a la tarjeta extraer la máxima energía del campo casi constantemente. Por otro lado, también se define para las tarjetas pasivas, sin batería, un rango de funcionamiento máximo de 1 metro para toda señal que esté dentro de los límites de transmisión permitidos por los reguladores internacionales de radio frecuencia [17].

Por tanto, una vez definidas la energía utilizada y las comunicaciones del interfaz inalámbrico entre el lector y la tarjeta, es el momento de definir el interfaz de comunicaciones entre la tarjeta y el lector. En este caso permite tener una cierta flexibilidad al poder escoger entre diferentes parámetros, como son una o dos subportadoras, dos velocidades de transmisión de datos, como están representados los datos y su codificación en función del número de subportadoras. Cuando la tarjeta responde al lector, lo hace extrayendo más o menos energía del campo generado por el lector. Este método es conocido como modulación de carga ya que, como se ha explicado anteriormente, se selecciona entre dos cargas diferentes para representar unos y ceros.

Una vez definidas las interfaces de comunicación lector-tarjeta y tarjeta-lector, define las tramas de las comunicaciones, especificando la forma de empezar (*Start Of Frame, SOF*) y de terminar (*End Of Frame, EOF*) cualquier trama en cualquiera de las dos direcciones de la comunicación.

1.4.4.3.- ISO/IEC 15693-3: Parte 3.

En esta tercera parte, se estipula para la comunicación, que una tarjeta de proximidad o cercanía solo responde cuando recibe un comando válido que selecciona una sola tarjeta de entre un grupo de tarjetas que puedan estar dentro del alcance de un lector. Este proceso de detección de colisión y selección, también llamado anticolisión, se hace posible mediante la selección, por parte del lector, del número de identificación único (UID) de 64 bits codificado en cada tarjeta.

También se definen muchos otros parámetros, tales como la forma de estructurar los datos en la memoria de la tarjeta, o que el cálculo del código de redundancia cíclica (CRC) de 32 bits ha de seguir la definición del estándar ISO/IEC 13239, o cómo se organizan los bloques de memoria, o cual es el bloque de seguridad de la memoria para poder proteger los datos de indeseadas lecturas y una amplia descripción de la estructura de trama de petición de datos y su respuesta, de los comandos a utilizar y de los posibles estados de funcionamiento en los que se puede encontrar una tarjeta [18].

1.5.- Estado del arte de tarjetas con sensores.

Llegados a este punto hay que destacar que esta tesis doctoral se realizó en el periodo comprendido entre los años 2004 y 2008, así pues todas las referencias al estado del arte son anteriores o contemporáneas a dicho periodo.

1.5.1.- Tarjetas con sensores no químicos.

Cuando se inició la presente tesis doctoral, el mercado de tarjetas RFID con sensores incorporados se encontraba en sus inicios, no existían muchos fabricantes que ofrecieran tarjetas con capacidades sensoras. A continuación se presentan las que existían en el mercado en la época que enmarca la tesis:

La empresa italiana *CAEN* cuenta con la “*A927 Temperature Logger UHF Semi-Passive Tag*” que es una tarjeta UHF semi-pasiva. Tiene la capacidad de monitorizar la temperatura. En uso normal el tiempo de vida de la tarjeta está sobre los 3 años. Esta tarjeta puede utilizarse, por ejemplo, para monitorizar la temperatura de toda la cadena de suministro de productos médicos o perecederos. Cumple con el estándar ISO 18000- 6B [19].

La empresa india *Infratab* comercializa “*Freshtime Tag*”, también semi-pasiva y cumple con el estándar UHF 18000-6B. El fabricante anuncia que está desarrollando modelos que cumplan los estándares ISO 18000-6C (gen2) and ISO HF 15693/18000-3. Estas tarjetas se utilizan para monitorizar la temperatura de productos perecederos. En este caso el tiempo de vida de la tarjeta dura entre un día o los 3 años, dependiendo de la batería y el número de medidas a realizar. Después de la programación de los datos del producto, la tarjeta puede trabajar de forma autónoma y enviar alertas al usuario si se producen. Estas alertas pueden ir desde la superar un nivel determinado de temperatura, informar del tiempo transcurrido o del propio tiempo de vida restante de la tarjeta. También puede ir recopilando datos para tener un registro de temperaturas [20].

La empresa alemana *KSW* produce “*VarioSens Basic*”, una tarjeta HF semi-pasiva del tamaño de una tarjeta de crédito que cumple con el estándar ISO 15693-3. Permite al usuario medir y almacenar el valor de la temperatura cada cierto intervalo. Con un lector se recuperan los valores almacenados en memoria. Dependiendo de la aplicación y del intervalo de medida puede ser reutilizada [21].

La norteamericana *ALIEN* presenta una “*Battery Assisted Passive Tag*”, una tarjeta RFID de largo alcance que trabaja en la banda ISM de 2.45GHz. Incluye una batería de litio de 220mAh que le permite alargar el tiempo de vida de la tarjeta hasta 3 años. La tarjeta puede ser equipada con cualquier sensor mediante el bus I²C. La familia de productos estándar ofrece una versión con un sensor de temperatura integrado. El tamaño de la memoria es 4kB. Garantizan una distancia de lectura o escritura de hasta 30m [22].

La también norteamericana *American Thermal Instruments* comercializa la familia de productos “*Log IC*”, tarjetas HF RFID activas. Pueden utilizarse como alarmas en

ambientes con temperatura controlada o regulada. La tarjeta permite monitorizar la temperatura en función del tiempo o de sus valores medios. Tiene la funcionalidad de mostrar luces de aviso si la temperatura cae por debajo del valor especificado. Puede realizar hasta 64000 lecturas y puede ser reutilizada [23].

La italiana *Montalbanotechnology* tiene entre otros productos la serie “*MTSens*”, presentada como una tarjeta RFID inteligente con tamaño de tarjeta de crédito. Pensada para monitorizar la temperatura en la cadena de distribución de productos perecederos y capaz de almacenar más de 4000 datos de temperatura. La tarjeta es HF RFID compatible con el estándar ISO 15693 [24].

Otra empresa norteamericana, *Savi* comercializa la familia “*Sensor Tag*”, una tarjeta RFID activa para ser utilizada en contenedores metálicos. Su frecuencia de operación son los 433MHz y permite monitorizar temperatura y humedad en los contenedores durante su transporte y almacenamiento. Puede incorporar más sensores, como apertura de puerta, sensor de luz o acelerómetros para medir posibles choques. Se puede utilizar para monitorizar la seguridad e integridad de los envíos. Al ser activa, la tarjeta envía una alarma en tiempo real al lector indicando si se ha sobrepasado un determinado valor. La vida útil de la batería es de un máximo de 4 años y el rango máximo de alcance son los 100 metros. la parte que implementa la antena se encuentra fuera del contenedor para evitar problemas de comunicación debido a los metales del contenedor, también reduce significativamente el riesgo de daños en la tarjeta durante la carga, descarga y transporte[25].

Siguiendo en los Estados Unidos, *Microstrain* comercializa “*EmbedSense*”, una tarjeta pasiva que trabaja a 125kHz. La tarjeta está diseñada para máquinas rotativas, estructuras inteligentes y dispositivos médicos. Es adecuada para su uso en ambientes hostiles. Puede medir temperaturas hasta 150 ° C y fuerzas centrífugas de hasta 60 Kg. La distancia de lectura está típicamente en el intervalo de 25 a 50 mm y solo puede medir si se encuentra dentro del alcance del campo generado por un lector [26].

La compañía *Axcess Inc* comercializa la gama de productos llamados “*Active sensor family*” donde se incluyen varios tipos de tarjetas activas que utilizan la frecuencia de 315MHz. Dependiendo del modelo, pueden ser utilizadas para identificar personas o vehículos. El tiempo de vida está entre 1 y 3 años y las distancias de trabajo rondan los 10 metros. Dependiendo del modelo, puede incorporar sensores de temperatura, humedad, radiación, estado de puertas, vibración, movimiento, químicos o biológicos [27].

La empresa sueca *Bioett* comercializa “*Biosensor*”, una combinación entre código de barras y tarjeta RFID pasiva. Incorpora un biosensor que reacciona a la temperatura aumentando la fuerza de la señal eléctrica. Esta señal es captada por un lector al mismo tiempo que su identificador [28].

Evigia, empresa norteamericana, produce la familia de productos “*EV524*” que operan a la frecuencia de 2.4GHz. Estas tarjetas pueden medir temperatura, humedad o vibración. El modelo estándar incluye una batería de 2.5 años de vida útil. Otros modelos utilizan baterías cuya vida útil llega hasta los 4 años. La distancia de lectura está sobre los 60 metros. Casi todos los modelos se pueden

programar para que emitan alarmas en tiempo real si se sobrepasa un determinado rango [29].

Desde Hong Kong *Bisa* incluye entre sus dispositivos los denominados como “*ActiveTag*”, una familia de tarjetas activas que trabajan en la frecuencia de ISM 2.45GHz. Permite la monitorización de temperatura así como la detección de vibraciones o impactos. Puede ser utilizado como acelerómetro y su distancia de lectura está entre 30 y 50 metros [30].

La norteamericana *Cypac* presenta “*SecurePak*”, un paquete pensado para mensajería que incluye almacenamiento de datos y detección de manipulación y daños. El paquete incluye sensor de temperatura integrado. Tiene rango de lectura de 5 mm. Utiliza la frecuencia de 13,56 MHz y es compatible con el estándar ISO 15693 [31].

La norteamericana *G2 Microsystems* comercializa la familia “*G2C501*”, tarjetas RFID activas que trabajan en la banda de UHF. Combinan sensores de movimiento, temperatura, choque, humedad, radiación o presión. Si ocurre una anomalía en las medidas, el sensor despierta a la tarjeta y esta envía una alarma. Las medidas efectuadas se pueden almacenar en memoria interna no volátil o en memoria flash externa si un punto de acceso o el lector no está disponible. Los datos pueden ser enviados a través del punto de acceso 801.11, por lectores ISO 24730-2 o por lectores EPC [32].

Por otro lado, la austriaca *Identec Solutions* comercializa su llamado “*i-Q32T*” una tarjeta UHF activa que incorpora un sensor de temperatura. Puede enviar o recibir datos entre un rango de 30 a 100 metros, dependiendo del lector. La vida útil de su batería esta sobre los 6 años [33].

La canadiense *Scanpak* desarrolla la familia llamada “*TTB-434-01*”, una tarjeta UHF RFID activa. Se compone de 4 modelos diferentes que implementa sensores de luz, presión, temperatura o peso. Todos estos modelos incluyen sensores de manipulación, de nivel de batería y de choque. Sensor de choque despierta la tarjeta cuando se mueve. La tarjeta funciona a la frecuencia de 434MHz y puede comunicarse con un lector a una distancia de más de 100 metros [34].

La británica *Instrumentel ltd* ha desarrollado tarjetas RFID pasivas que trabajan a la frecuencia de 13.56MHz e incorporan sensores de pH. Estas tarjetas están pensadas para ser implantadas en dentaduras postizas y controlar así el nivel de acidez o alcalinidad de las comidas en la boca de los pacientes. Para monitorizar dichos niveles es necesaria la presencia de un lector [35].

La japonesa *Oki, NYK Logistics and Hills* también desarrolla tarjetas RFID pasivas a frecuencia de trabajo de 13.56MHz. Están pensadas para ser utilizadas en contenedores, pudiendo medir la temperatura interior del contenedor sin necesidad de abrirlo. Al ser pasivas, la medida se ha de realizar con la presencia de un lector [36].

Cabe destacar que la Marina de los EE.UU. está probando una red de sensores RFID para monitorizar la temperatura, humedad y presión del aire en los contenedores donde se almacenan piezas de aviones. Este sistema RFID no utiliza lectores para escanear cada tarjeta, sino que utiliza tarjetas activas que pueden pasar

información de una tarjeta a otra tarjeta hasta que los datos llega a la última transpondedor, que se comunica con un solo lector [37].

También existen en la literatura ejemplos de prototipos que utilizan tarjetas RFID con sensores, en este caso, se utiliza una tarjeta activa trabajando a 13.56MHz y con sensores de aceleración pensada para insertar dentro de los cascos de los motoristas, en este caso los sensores se encuentran fuera de la tarjeta [38].

De los ejemplos anteriores se deduce que para monitorizar las diversas variables todas las tarjetas RFID con sensores, independientemente de la frecuencia de trabajo, necesitan una batería para poder controlar los sensores y almacenar datos. Solo en el caso de las tarjetas pasivas y sin capacidad de motorizar no es necesario el uso de batería y el lector es el encargado de la monitorización de las variables de interés.

Vemos también como los rangos de lectura cambian en función de la frecuencia de trabajo, a menor frecuencia, menor distancia de comunicación. Cabe destacar la utilización de tarjetas activas, equipadas con baterías, en los casos que se requieren grandes distancias de comunicación, en la mayoría de estos casos más allá de los 100 metros. Para distancias cortas se utilizan las tarjetas semi-activas, que reducen la distancia de lectura y la capacidad de su batería obteniendo así un ahorro significativo, tanto en tamaño como en costes.

1.5.2.- Sensores de gas.

En la actualidad existe una gran variedad de tecnologías de sensores químicos que ofrecen una gama diversa de características, desafortunadamente no se puede encontrar una tecnología que englobe todas ellas. Las principales características que un sensor de gas debería cumplir son: alta sensibilidad y selectividad, baja sensibilidad a las variaciones ambientales, rápida respuesta y cortos tiempos de recuperación, estabilidad a largo plazo, vida útil duradera, alta reproducibilidad entre sensores, respuesta lineal con la concentración, gran rango dinámico, tamaño reducido y bajo consumo de energía. Por lo tanto, para escoger la tecnología de sensores de gas a utilizar, es necesaria una evaluación y priorización de dichas características, estableciendo compromisos entre varias de ellas, dependiendo principalmente de la aplicación donde el sensor vaya a ser utilizado.

1.5.2.1.- Tecnologías de sensores de gas.

Seguidamente se exponen algunas de las diversas tecnologías de sensores de gas junto con sus principales ventajas y desventajas [39], esta exposición no pretende ser exhaustiva ya que solo se describen brevemente tecnologías que puedan miniaturizarse (básicamente en silicio) para su posterior integración en una tarjeta RFID:

- Óxidos Metálicos Semiconductores (MOX): Las principales ventajas de los sensores MOX son que se fabrican utilizando técnicas microelectrónicas estándar, pudiendo ser miniaturizados, su respuesta rápida y cortos tiempos de recuperación y su alta sensibilidad [40]. Sus desventajas son que presentan una pobre selectividad, alto consumo de energía (que se puede reducir con la miniaturización) y sufren de envenenamiento irreversible cuando se exponen a los compuestos volátiles de azufre o vapores de silicona [41].
- Polímeros Conductores (CP): Estos sensores presentan muchas ventajas, como pueden ser; la gran cantidad de CP que se pueden adquirir comercialmente [42] facilita su implementación en muchas aplicaciones, operan a temperatura ambiente reduciendo así el consumo energético [43], presentan respuesta rápida y cortos tiempos de recuperación para un amplio rango de analitos. Pero por el contrario, presentan ciertas desventajas como una alta sensibilidad a los cambios de temperatura y humedad, así como deriva de la línea de base con el tiempo. Además, muestran grandes diferencias en las características de los sensores de diferentes lotes de fabricación [44].
- Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET): En la configuración más habitual se basan en utilizar un metal de puerta catalítico (Pd o Pt). Muestran una alta sensibilidad al hidrógeno. Su principal ventaja es que también pueden ser fabricados utilizando técnicas microelectrónicas estándar, incrementando así la reproducibilidad entre dispositivos. También pueden operar a temperatura ambiente, reduciendo su consumo de energía. Como desventajas presentan una respuesta baja a diferentes gases debido a la falta de materiales sensibles en su fabricación, su línea de base puede ser inestable y con derivas. Es necesario un control preciso de las condiciones ambientales por que la temperatura afecta drásticamente a su sensibilidad y selectividad.
- Sensores de onda acústica superficial - Surface Acoustic Wave (SAW): Respecto a las ventajas de los SAW tenemos que pueden detectar una amplia gama de analitos debido principalmente a la gran cantidad de recubrimientos con material sensible disponibles en el mercado [45, 46, 47], además ofrecen una gran sensibilidad y tiempos rápidos de respuesta [44]. Sin embargo los sensores SAW tienen muy baja relación/señal ruido por lo que requieren de circuitos complejos para funcionar [40] y, debido a su fabricación, su reproducibilidad es muy baja [48].
- Sensores calorimétricos, divididos en sensores catalíticos (Pellistores) y detectores de conductividad térmica - Thermal Conductivity Detectors (TCDs), que se basan principalmente en medir la disipación del calor del gas. Estos sensores son los que se utilizan en cromatografía de gases, su tiempo de respuesta depende del diseño del sensor y puede variar entre pocos segundos y algunos minutos. Son mucho más estables que otros tipos de sensores debido a que no necesita reacciones químicas para su funcionamiento. Sin embargo, los TCD's son uno de los sensores menos selectivos debido a que la conductividad térmica no es específica del gas.

Además, necesita calentar las muestras a medir, repercutiendo el consumo del sensor [49].

Existen otras tecnologías de sensores de gas, como las microbalanzas de cuarzo (QCM o QMB), o como las basadas en sensores electroquímicos (ECS) que incluyen los sensores amperométricos (AGS) y potenciométricos (PGS) y las basadas en sensores ópticos que incluyen Photoacoustic Detectors (PAD), colorímetros, fluorescencia y quimioluminiscencia, Photo Ionization Detectors (PID) o Nondispersive Infrared (NDIR) que no se detallan debido a la dificultad de integración en una tarjeta RFID tanto por el volumen del sensor como por la complejidad de la electrónica asociada.

1.5.2.2.- Tarjetas con sensores de gas.

En relación a tarjetas RFID con sensores químicos no existe ningún producto comercial que trabaje a frecuencias de HF y, además, sin batería. En este aspecto únicamente se han realizado algunos desarrollos particulares que relatamos a continuación.

Potyrailo et al. menciona que mediante la utilización de tarjetas convencionales de HF RFID es capaz de detectar una gama de productos químicos midiendo las variaciones del espectro de impedancia [50][51][52][53]. Esto lo consigue mediante el recubrimiento de la antena de la tarjeta con una capa polimérica que permite la absorción de la sustancia química a detectar. La presencia de dicha sustancia hace que cambien las características del acoplamiento magnético mutuo entre la tarjeta y el lector al cambiar las propiedades dieléctricas del recubrimiento. Esto ha sido demostrado para varios tipos de disolventes, tales como etanol, metanol, y agua, así como para detectar el grado de descomposición de la leche dentro de un cartón de leche.

Debido a que la optoelectrónica es un campo de investigación activo que está continuamente reduciendo los requisitos de tamaño y potencia de las fuentes ópticas, espectrómetros y detectores, elimina gran parte de las limitaciones para la integración de sensores optoelectrónicos en las tarjetas RFID. En particular, Steinberg et al. [54] han desarrollado un sensor que mide pH llamado *Optrode* para implementarlo en una tarjeta HF RFID pasiva. El sensor realiza medidas de Ph entre 5.2 y 8.3, y se basa en el uso de una capa delgada de sol-gel, compuesta por un colorante sensible al pH que varía su absorción óptica dependiendo del nivel de pH. El sistema se utiliza dos diodos LED con diferentes longitudes de onda y un fotodiodo como elemento sensor.

En el primer ejemplo descrito es necesario todo un instrumental de laboratorio para poder obtener resultados y en el segundo se limita solamente a medidas de pH por lo que podemos concluir que no existe ni en el mercado ni en la literatura científica equipos autónomos, de muy bajo consumo y coste, que lleven integrados sensores de gas.

1.6.- Motivación.

Tras lo expuesto anteriormente se comprueba que existen en el mercado y en la literatura científica muchos tipos de tarjetas RFID con diferentes tipos de sensores integrados, algunas de ellas son autónomas, pero sólo implementan un tipo de sensor, además las que implementan sensores de gas no son autónomas. Por lo tanto, no existe, ni en el mercado ni en la literatura científica, tarjetas RFID con varios tipos de sensores integrados, incluyendo sensores de gas, y con autonomía propia. Los motivos que, en principio, imposibilitan la implementación de sensores de gas son varios, (i) en la mayoría de tecnologías de sensado de gas, que se puedan integrar en una tarjeta RFID, el consumo de energía es muy elevado, haciendo casi inviable su implementación en equipos de muy bajo consumo, (ii) existen otras tecnologías donde el consumo de energía es menor, pero el volumen de los sensores los hace inviables para la integración en tarjetas pequeñas, (iii) también existen tecnologías con sensores poco voluminosos y con poco consumo energético pero su control y sistemas de adquisición de datos son complejos, aumentando de esta forma su consumo, tanto en energía como en espacio y, por último, (iv) tampoco se pueden utilizar otras tecnologías, como por ejemplo polímeros conductores, por su falta de robustez, gran sensibilidad cruzada a la temperatura y falta de estabilidad.

Dentro de las actividades en el ámbito de la logística (WP6) del proyecto *GoodFood* el trabajo a realizar en la presente tesis doctoral estará relacionado con la mejora en la logística de los productos alimentarios durante su transporte, almacenamiento y posterior venta. Todo ello mediante una tarjeta RFID flexible que será capaz de monitorizar la calidad de los alimentos durante toda la cadena de distribución, desde los centros de producción hasta las manos del consumidor.

Así pues, la principal motivación de esta tesis doctoral será mejorar dicha logística, explorando las posibilidades de integración de sensores de gas en tarjetas RFID de muy bajo consumo para la monitorización de diferentes compuestos en la cadena de distribución de productos perecederos. Para ello se estudiarán técnicas de reducción de consumo, así como las posibles implementaciones físicas de los sensores en las tarjetas. Todo ello será realizado respetando en todo momento la funcionalidad de la tarjeta RFID, implementando algún estándar establecido, tanto en comunicaciones como en tamaño. A su vez se integrarán otros tipos de sensores necesarios en la industria de productos perecederos. Todo ello se realizará con una base de formato flexible que facilitará la implementación de esta tarjeta en la cadena de distribución de productos perecederos.

1.7.- Referencias.

- [1] Página web general del Proyecto GoodFood, <http://www.goodfood-project.org/> (18/02/2015).
- [2] Watson, Raymond C., Jr. (2009-11-25). Radar Origins Worldwide: History of Its Evolution in 13 Nations Through World War II. Trafford Publishing. ISBN 978-1-4269-2111-7.
- [3]<http://cienciasnaturales-fisica.blogspot.com.es/2007/03/fsica-ii-el-sonido.html> (19/11/2014).
- [4] Lord Bowden of Chesterfield, "The story of IFF (identification friend or foe)", IEE PROCEEDINGS, Vol. 132, Pt. A, No. 6, OCTOBER 1985.
- [5] Stockman, Harry, "Communication by Means of Reflected Power", Proceedings of the I.R.E.. National Convention, New York, N. Y., March 22, 1948: 1196–1204.
- [6] Roberti, Mark, "The History of RFID Technology" RFID Journal Jan 16, 2005. <http://www.RFIDjournal.com/articles/view?1338>
- [7] Melanie R. Rieback et al, "The Evolution of RFID Security", PERVASIVE computing Published by the IEEE CS and IEEE ComSoc, 1536-1268/06© 2006 IEEE.
- [8] Rudy T. Sanders, Lee Fleishman., 1987. "User identifying vehicle control and security device", United States Patent 4754255, May 14, 1987.
- [9] Chen, S.C.Q. et al, "Optimization of inductive RFID technology", Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. 2001 IEEE ISEE. May 2001, 82-87.
- [10] A. Shameli et al, "A UHF Near-Field RFID System With Fully Integrated Transponder", Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 56, no. 5, pp. 1267-1277, 2008.
- [11] Finkenzeller, Klaus, "RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification", Copyright © 2003 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-84402-7.
- [12] DS21299E, "microID® 13.56 MHz RFID System Design Guide". 2004 Microchip Technology Inc.
- [13] R. Glidden et al, "Design of ultra-low-cost UHF RFID tags for supply chain applications", IEEE Communications Magazine, vol. 42, no. 8, Aug. 2004, pp. 140-151.
- [14] A. Ruhanen et al, "Sensor-enabled RFID tag handbook", BRIDGE (**B**uilding **R**adio frequency **I**Dentification for the **G**lobal **E**nvironment), January 2008.

- [15] I. Poole, "RFID Standards", Radio-Electronics.com, resources and analysis for electronics engineers. <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/radio-frequency-identification-RFID/iso-epcglobal-iec-standards.php>
- [16] ISO/IEC 15693-1 : 2000(E), Identification cards -- Contactless integrated circuit cards -- Vicinity cards -- Part 1: Physical characteristics.
- [17] ISO/IEC 15693-2 : 2000(E), Identification cards -- Contactless integrated circuit cards -- Vicinity cards -- Part 2: Air interface and initialization.
- [18] ISO/IEC 15693-3 : 2001(E), Identification cards -- Contactless integrated circuit cards -- Vicinity cards -- Part 3: Anticollision and transmission protocol.
- [19] Caen A927 Data sheet.
<http://www.caen.it/RFID/syproduct.php?fam=tag&mod=A927>
- [20] Infratab's Freshtime™ tag.
http://www.infratab.com/infratab/freshtime_tags.html
- [21] KSW - VarioSens Basic Card Data sheet.
<http://www.kswmicrotec.de/index.php?ILNKID=14&iL=2>
- [22] ALIEN - Battery Assisted Passive Tag specifications.
http://www.alientechnology.com/docs/AT_DS_BAP.pdf
- [23] American Thermal - Log IC specifications.
<http://www.americanthermal.com/log-ic.html> (26.10.2007)
- [24] Montalbanotechnology - MTSens.
<http://www.montalbanotechnology.com/mt/> (26.10.2007)
- [25] Savi - Sensor Tag datasheet.
<http://www.savi.com/products/pr.RFID.security.shtml> (26.10.2007)
- [26] Microstrain - EmbedSense datasheet.
http://www.microstrain.com/pdf/EmbedSense_Rev1_datasheet.pdf
- [27] Axcoss inc - Active sensor family.
<http://www.axcossinc.com/products/tags.html>
- [28] Bioett - Biosensor. http://www.aditus.se/news/2007_bioett_device.pdf
- [29] Evigia - EV524 preliminary specification.
<http://www.evigia.com/products/files/ProductSpecSheet524M.pdf>
- [30] Bisa - ActiveTag. <http://bisa.com.hk/ActiveTag.htm>
- [31] Cypac - SecurePak. <http://www.cypak.com/packaging.php?p=apps&s=smart>
- [32] G2 Microsystems - G2C501.
<http://www.g2microsystems.com/html/products.htm>

[33] Identec Solutions – i-Q32T specifications. http://www.identecolutions.at/fileadmin/user_upload/PDFs/product_sheets/i-Q32T_V1.1_Eng.pdf

[34] Scanpak - TTB-434-01. <http://www.scanpak.com/>

[35] Jonathan Collins, "Passive Tag Powers Sensors, Switches", RFID Journal Apr 20, 2005, <http://www.RFIDjournal.com/article/articleview/1520/1/1/>

[36] Tsunenori Tomioka, Nikkei Monozukuri, "Oki, NYK Logistics, Hills Jointly Develop Cell-Free, Passive Thermo RFID Tag Sensor", Nikkei Technology, http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20060420/116404/

[37] Mark Roberti, "Navy Revs Up RFID Sensors" RFID Journal Jun 18, 2004, <http://www.RFIDjournal.com/article/articleview/990/1/1/>

[38] W. J. Fischer, "Smart RF-transponder chips with on-chip or external sensors for usage in portable systems". First Int. Workshop on Networked Sensing Systems Program, June 22-23, Tokyo, Japan(2004)

[39] Arshak, K., et al. "A review of gas sensors employed in electronic nose applications." *Sensor review* 24.2 (2004): 181-198.

[40] Pearce, Tim C., et al., eds. *Handbook of machine olfaction: electronic nose technology*. John Wiley & Sons, 2003.

[41] Dickinson, Todd A., et al. "Current trends in artificial-nose technology." *Trends in Biotechnology* 16.6 (1998): 250-258.

[42] Bai, H., Shi, G., 2007. Gas sensors based on conducting polymers. *Sensors* 7, 267–307.

[43] Shurmer, Harold V., and Julian W. Gardner. "Odour discrimination with an electronic nose." *Sensors and Actuators B: Chemical* 8.1 (1992): 1-11.

[44] Nagle, H. Troy, Ricardo Gutierrez-Osuna, and Susan S. Schiffman. "The how and why of electronic noses." *Spectrum, IEEE* 35.9 (1998): 22-31.

[45] Carey, W. P., K. R. Beebe, and B. R. Kowalski. "Selection of adsorbents for chemical sensors arrays by pattern recognition." *Anal. Chem* 59 (1987a): 1529-1534.

[46] Carey, W. Patrick, Kenneth R. Beebe, and Bruce R. Kowalski. "Multicomponent analysis using an array of piezoelectric crystal sensors." *Analytical chemistry* 59.11 (1987b): 1529-1534.

[47] Grate, Jay W., and Michael H. Abraham. "Solubility interactions and the design of chemically selective sorbent coatings for chemical sensors and arrays." *Sensors and Actuators B: Chemical* 3.2 (1991): 85-111.

[48] Schaller, Emmanuelle, Jacques O. Bosset, and Felix Escher. "'Electronic noses' and their application to food." *LWT-Food Science and Technology* 31.4 (1998): 305-316.

[49] Wu, Y. E., Chen, K., Chen, C. W. and Hsu, K. H. (2002). "Fabrication and characterization of thermal conductivity detectors (TCDs) of different flow channel and heater designs." *Sensors and Actuators A: Physical*, 100(1), 37-45.

[50] Potyrailo, R.A., and Morris, W.G. "Multianalyte chemical identification and quantitation using a single radio frequency identification sensor". *Anal. Chem.* 2007, 79, 45-51.

[51] Potyrailo, R.A., Mouquin, H., and Morris, W.G. "Position-independent chemical quantitation with passive 13.56-MHz radio frequency identification (RFID) sensors". *Talanta*. 2008, 75, 624-628.

[52] Potyrailo, R.A., Morris, W.G., Sivavec, T., Tomlinson, H.W., Klensmeden, S., and Lindh, K. "RFID sensors based on ubiquitous passive 13.56-MHz RFID tags and complex impedance detection". *Wirel. Commun. Mob. Comp.* 2009, 9, 1318-1330.

[53] Potyrailo, R.A., Surman, C., and Morris W.G. "Combinatorial screening of polymeric sensing materials using RFID sensors: combined effects of plasticizers and temperature". *J. Comb. Chem.* 2009, 11, 598-603.

[54] Steinberg, I.M., and Steinberg, M.D. "Radio frequency tag with optoelectronic interface for distributed wireless chemical and biological sensor applications". *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2009, 138, 120-125.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

2.- Ámbito y objetivos

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

2.1.- Proyecto GoodFood

El proyecto GoodFood tenía como objetivo general desarrollar la nueva generación de métodos analíticos basados en soluciones *Micro Systems Technologies* y *Micro and Nano Technologies* (MST y M&NT) para certificar la seguridad y la calidad a lo largo de la cadena de distribución alimentaria en la industria agroalimentaria. Las preocupaciones actuales y futuras relativas a seguridad y calidad requieren cada vez más de un enfoque multidisciplinar y universal basado en el uso masivo de sistemas de detección simples capaces de ser utilizados “cerca de los alimentos”[1].

Usualmente las tecnologías utilizadas para evaluar la seguridad y calidad de los alimentos están basadas en soluciones de laboratorio que son voluminosas, costosas, y con tiempos de análisis largos. Por esta razón, en muchos escenarios en el campo de la agroalimentación el control no se realiza sobre la totalidad de los productos sino únicamente sobre un muestreo. Por el contrario, el enfoque de GoodFood cumplía, a través del desarrollo de soluciones innovadoras de M&NT, con las necesidades de ubicuidad, bajo coste y potencia, rápida respuesta, fácil uso e interconexión con los centros de control.

Para hacer frente a los muchos requisitos del sector agroalimentario se requiere una integración multidisciplinaria entre el **know-how** del momento y las nuevas tecnologías. GoodFood era un proyecto integrado con el objetivo de mantener una visión global de todo el proceso de manufacturación y distribución de la industria alimentaria. Este objetivo consistía en la integración de diferentes Micro y Nano tecnologías desde el origen del producto hasta prácticamente el usuario final. Las principales demandas identificadas por el sector agroalimentario fueron las aplicaciones que impulsaron GoodFood. La necesidad de aumentar el control de los productos en los diferentes puntos críticos de la cadena de distribución alimentaria (control de materias primas, la mejora de la elaboración de alimentos, control del almacenamiento y logística, y el control de la seguridad y calidad de los productos finales) fue abordado por GoodFood mediante la integración multidisciplinar de la biología y la electrónica, que permitía el desarrollo de un conjunto de sistemas para abordar los requisitos específicos de calidad, seguridad y trazabilidad.

Las soluciones M&NT desarrolladas en el proyecto se preveían como los peldaños de la visión GoodFood a largo plazo:

“llevar el laboratorio a la cadena de distribución desde el campo al mercado.”

En el dominio de la logística, el concepto de trazabilidad es clave. Se pueden encontrar múltiples definiciones para el término trazabilidad, estos son algunos ejemplos “la capacidad de seguir los movimientos de los alimentos a través de las diferentes etapas de producción, procesado y distribución”, Codex Alimentarius [2], Jedermann [3] la definió como “la capacidad de registrar el historial, aplicativo o localización de lo que esté bajo consideración” o “cuando se considera un producto, la trazabilidad puede estar relacionada con el origen de los materiales y partes, el historial de su procesado, y la distribución y ubicación del producto después de la entrega”[3].

Las soluciones propuestas estaban integradas bajo un enfoque de *Inteligencia Ambiental* [4] o en inglés *Ambient Intelligence* (AmI), que permite la interconexión entre los diferentes sistemas de multisensado, la realización de algún tipo de procesamiento previo y la transmisión de los datos a un sistema central, que permita lanzar acciones en función de los diferentes tipos de detecciones obtenidas, y todo ello de forma transparente al usuario final.

2.2.- Aplicación del análisis de trazabilidad y sensado. La fruta y el pescado como caso de estudio.

La idea general de este trabajo de investigación es combinar diferentes tecnologías, potenciando las ventajas específicas de cada una de ellas para crear una plataforma de detección multiusos, capaz de monitorizar los diversos parámetros ambientales y/o físicos que proporcionan información sobre el estado de los alimentos.

La utilización de tecnologías MST permitirá el desarrollo de dispositivos portables y de bajo coste. Estos dispositivos se integrarán dentro de un entorno de comunicaciones de datos para la monitorización online de los productos alimenticios a lo largo de la cadena de distribución alimentaria. Esto permitirá a los productores, las empresas logísticas y clientes localizar sus productos, si es necesario, en cualquier momento. Por otro lado, los consumidores también estarán protegidos contra fraudes y del posible consumo de alimentos nocivos.

Tanto los consumidores como los productores y los grupos encargados de la logística tendrán al alcance, y de forma cuasi instantánea, el historial completo de un cierto producto, todo ello gracias a la implementación del sistema de trazabilidad y seguimiento que incluye una tarjeta RFID con sensores implementados. Esta tarjeta contendrá un sistema capaz de detectar y monitorizar la calidad de los alimentos, controlando a la vez su seguridad, para ello deberá analizar y almacenar los datos obtenidos así como implementar un sistema de comunicaciones. Esta tarjeta formará parte de un sistema más complejo que permitirá un intercambio de datos con la red de calidad y control de los alimentos, la infraestructura de comunicación y la base de datos que se implementarán en el nodo AmI. Una de las ventajas de este sistema es que se puede aplicar en muchos otros sectores alimenticios.

2.3.- Objetivos de la tesis.

Por lo expuesto anteriormente, los objetivos de esta tesis se resumen en los siguientes apartados:

- Desarrollo de una tarjeta RFID con capacidades de sensado químico para la cadena logística de distribución alimentaria.
- Estudio de técnicas de reducción de consumo en sensores de gas junto con el estudio del comportamiento de los sensores al ser sometidos a las técnicas de reducción de consumo con el objetivo de ser implementados en sistemas autónomos de muy bajo consumo.
- Estudio de la aplicación de tarjetas RFID semi pasivas para monitorización de parámetros físicos y/o químicos en la cadena logística de distribución alimentaria.

Para la consecución de estos objetivos generales deberán alcanzarse los siguientes objetivos específicos:

1. Definición de las especificaciones en función de la aplicación logística seleccionada. y elección del standard de comunicaciones, desarrollo de diagramas de bloque, requerimientos de medida, sensores necesarios para la realización de los análisis, selección de componentes en función de su consumo, tamaño y, en el caso del procesador, capacidad de procesado e integración.
2. Desarrollo e implementación del sistema RFID con comunicaciones pasivas que permita comunicaciones a 5cm de distancia.
3. Análisis de funcionalidad del sistema RFID. Pruebas de Campo, testeo de la comunicación y transferencia de datos.
4. Estudio de viabilidad de la implementación del sistema RFID en sustratos flexibles.
5. Pruebas de campo en escenarios reales de la cadena logística de distribución alimentaria para la validación de todo el sistema.

2.4.- Referencias.

[1] Annex I - "Description of Work", INTEGRATED PROJECT Food Safety and Quality Monitoring with Microsystems GOODFOOD, SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME, PRIORITY 2, INFORMATION SOCIETY TECHNOLOGIES.

[2] Codex Alimentarius, 2004. Comisión para el Codex Alimentarius. FAO/WHO.

[3] Jedermann, R., Lang, W., "Semi-passive RFID and beyond: steps towards automated quality tracing in the food chain" International Journal of Radio Frequency Identification Technology and Applications, Volume 1, Number 3/2007, 247-259.

[4] J.Bohn et all, "Social, Economic, and Ethical Implications of Ambient Intelligence and Ubiquitous Computing", Ambient Intelligence 2005, pp 5-29.

3.- Descripción de la aplicación.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

En este capítulo se describen los diferentes escenarios donde se va a utilizar el sistema, en base a los cuales se determinaran los requerimientos del sistema. Se profundiza en los objetivos de esta tesis doctoral y se describe el plan de trabajo a seguir para materializar dichos objetivos.

3.1.- Introducción.

Uno de los objetivos del proyecto es la monitorización de productos perecederos a lo largo de la cadena logística, desde el almacenaje, hasta la distribución de productos perecederos, concretamente de la fruta y el pescado fresco. La Figura 7 muestra de una forma esquemática la definición del sistema con todos sus componentes.

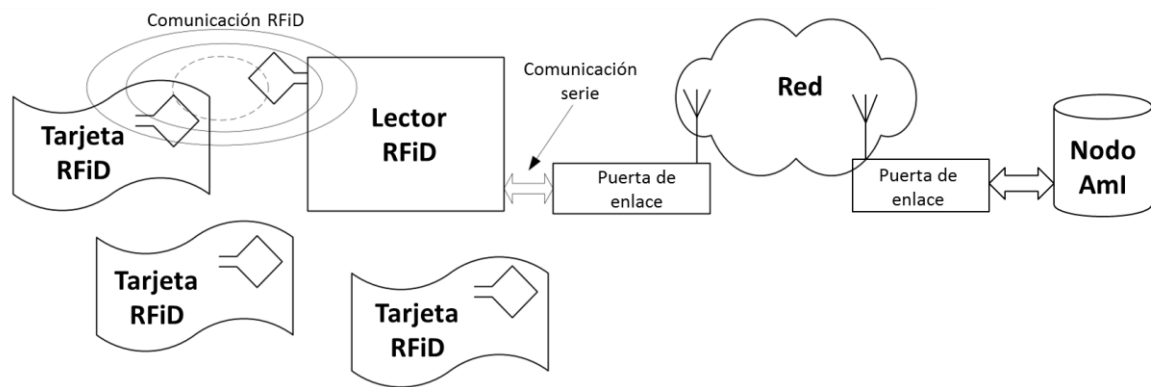


Figura 7: Esquema de comunicaciones entre la tarjeta RFID y el nodo Aml.

Las tarjetas RFID están concebidas para funcionar de una forma autónoma, con sensores integrados, en la fase de transporte, así pues su tiempo de funcionamiento está limitado a la duración de éste. En cuanto al lector, está concebido para funcionar durante toda la cadena logística de distribución, también con sensores integrados, pero dependiente de suministro de energía externo. Los datos de dicha monitorización serán enviados, a través de una puerta de enlace tal y como muestra la Figura 7, hacia un nodo Aml donde los datos recibidos podrán ser analizados y realizar las acciones oportunas según los resultados obtenidos en dichos análisis.

3.2.- Cadena de distribución de la industria alimentaria.

Los productos alimentarios perecederos tales como hortalizas, frutas, carne o pescado requieren de ambientes controlados durante las fases de almacenaje y transporte. Uno de los parámetros a controlar es la temperatura, que ha de mantenerse entre ciertos rangos, que dependen del tipo de producto a tratar. Al mantenimiento de estos rangos de esta temperatura se le conoce como la cadena de frío, que es el proceso de garantizar el mantenimiento de la temperatura de los productos alimentarios a lo largo de fases sucesivas de almacenaje y transporte.

Los productos perecederos están sometidos a un riesgo de pérdida de valor comercial, éste está relacionado directamente con descontroles en el tiempo, la temperatura, la humedad y los procesos relacionados con el avance hacia la senescencia y el desarrollo de podredumbres. El control de la calidad y supervisión de los productos durante su transporte y distribución es de gran importancia, siendo el mayor reto asegurar una cadena de frío continua desde el productor hasta el consumidor.

Seguidamente se detallan dos tipos de cadena de distribución donde se pretende realizar mejoras en el control de la calidad, el primer caso es el de la cadena de distribución de la fruta climatérica y el segundo caso es el de la cadena de distribución del pescado fresco.

3.2.1.- Cadena de distribución de la industria alimentaria, caso de la fruta climatérica.

Cuando se habla de los diferentes sistemas de cosechado de frutas y verduras [1], uno de los conceptos fundamentales es el de discernir si el producto es climatérico o no climatérico. Esta diferenciación se desarrolló inicialmente sobre la base de la presencia o ausencia de un incremento de la tasa respiratoria durante la maduración. Actualmente, la presencia de un climatérico en los frutos se basa en la evidencia de una producción de etileno autocatalítica, más que en la respiración [2, 3]. Así pues, los frutos se clasifican en climatéricos (plátano, manzana, pera, palto, mango, papaya, etc.) o no climatéricos (piña, frutos secos, uvas, aceituna, cereza, cítricos en general (pomelo, limón, lima, mandarina, naranja, etc)) según la maduración sea o no regulada por el etileno. Todos los vegetales producen etileno, sin embargo durante la maduración, algunos incrementan enormemente la producción de este compuesto (los denominados climatéricos), mientras que otros, los no climatéricos, mantienen la generación del etileno prácticamente constante.

En proyecto GoodFood, la fruta a monitorizar son las manzanas, en concreto la variedad *Golden*. Dicha fruta, como todas las del tipo climatérico, permite ser cosechada y manipulada en estado pre-climatérico, para luego ser madurada durante su comercialización y transporte, preservando sus características de calidad para el consumidor final. Así pues, se puede considerar que un fruto climatérico es aquel que es capaz de seguir madurando incluso después de haber sido recolectado.

Actualmente los métodos de almacenamiento de manzanas se dividen en tres tipos [4, 5, 6]: el método de almacenamiento en frío (**cold storage** CS), el método de almacenamiento a bajo oxígeno o también llamado atmósfera controlada (**low oxygen** LO) y el método de almacenamiento a muy bajo oxígeno (**ultra low oxygen** ULO). Mientras que CS es el procedimiento habitual durante la fase de transporte y venta, referida al almacenamiento en la tienda, LO o ULO son técnicas que se utilizan para alargar el tiempo de conservación sin dañar a la fruta, estos tiempos pueden llegar a ser de hasta siete meses. La Tabla 1 resume las diferentes condiciones de almacenamiento:

Almacenaje	O ₂ (%)	CO ₂	R.H. (%)	T (°C)	Balace	Presión
CS	21	200 ppm	90 - 96	0	-	1 atm
LO	3	2.3 - 3.5%	90 - 96	-1 - +1	N ₂	1 atm
ULO	1.3 - 1.5	< 1%	93 - 95	0.3 - 0.5	N ₂	1 atm

Tabla 1: Diferentes condiciones de almacenamiento [7].

En la actualidad, en las cámaras de conservación solo se monitorizan las concentraciones de oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂) y en las etapas de transporte y venta, solo la temperatura. Sin embargo, la monitorización de estos gases no aporta casi ninguna información sobre el estado de conservación o calidad de la fruta. Así pues, existe la necesidad de monitorizar otros tipos de gases mediante las nuevas tecnologías M&NT que den solución a estas necesidades.

3.2.2.- Cadena de distribución de la industria alimentaria, caso del pescado fresco.

El consumo total de productos del mar está creciendo exponencialmente debido, en gran medida, a la globalización (que permite consumir pescado fresco de proveniente cualquier país), a los avances en la tecnología del procesado de pescado y a la necesidad de consumir pescado fresco por sus propiedades saludables. Por este motivo, la cadena logística de productos del mar es más compleja cada día debido a que el origen se encuentra lejos del destino y para que se mantenga fresco, el transporte de origen a destino ha de realizarse en pocos días.

Esto implica, entre otras acciones, la necesidad de manipulación del pescado a bordo de los buques, el transporte aéreo y el incremento de los puntos intermedios dentro de la cadena logística de distribución, en resumen, aumentar los eslabones de la cadena. Como consecuencia de ello, es necesario garantizar la seguridad y calidad de los alimentos, por este motivo son necesarios medios para proporcionar más información sobre el origen, la transformación y la distribución de productos alimenticios dentro de las cadenas de suministro asegurando así su seguridad y calidad.

Sin embargo, la trazabilidad en los productos alimenticios para el control de la calidad alimentaria ha sido señalada como un área donde se necesita una mayor vigilancia y transparencia. La preocupación mundial por la seguridad y calidad

alimentaria está siendo tratada por el desarrollo de nuevas normas internacionales, directrices de la industria y nueva legislación. Recientes leyes sobre alimentación en diferentes países, como la Directiva de la UE 178/2002 [8], responsabilizan de garantizar la seguridad y calidad del producto a los productores, procesadores y minoristas.

En el caso del pescado fresco, el requisito más importante es la monitorización de la temperatura a lo largo de toda la cadena logística de distribución con el fin de garantizar la calidad. Los sistemas de monitorización de temperatura que se utilizan actualmente en la cadena de frío que sigue el producto durante el almacenamiento y el transporte, como los grabadores de banda o registradores de datos de temperatura son generalmente caros, voluminosos y no están automatizados, por lo que requieren de una inspección manual, como se puede apreciar en las imágenes de Figura 8 que muestran un registrador de temperatura Ryan CR-1 de la compañía Sensitech (USA) [9]:

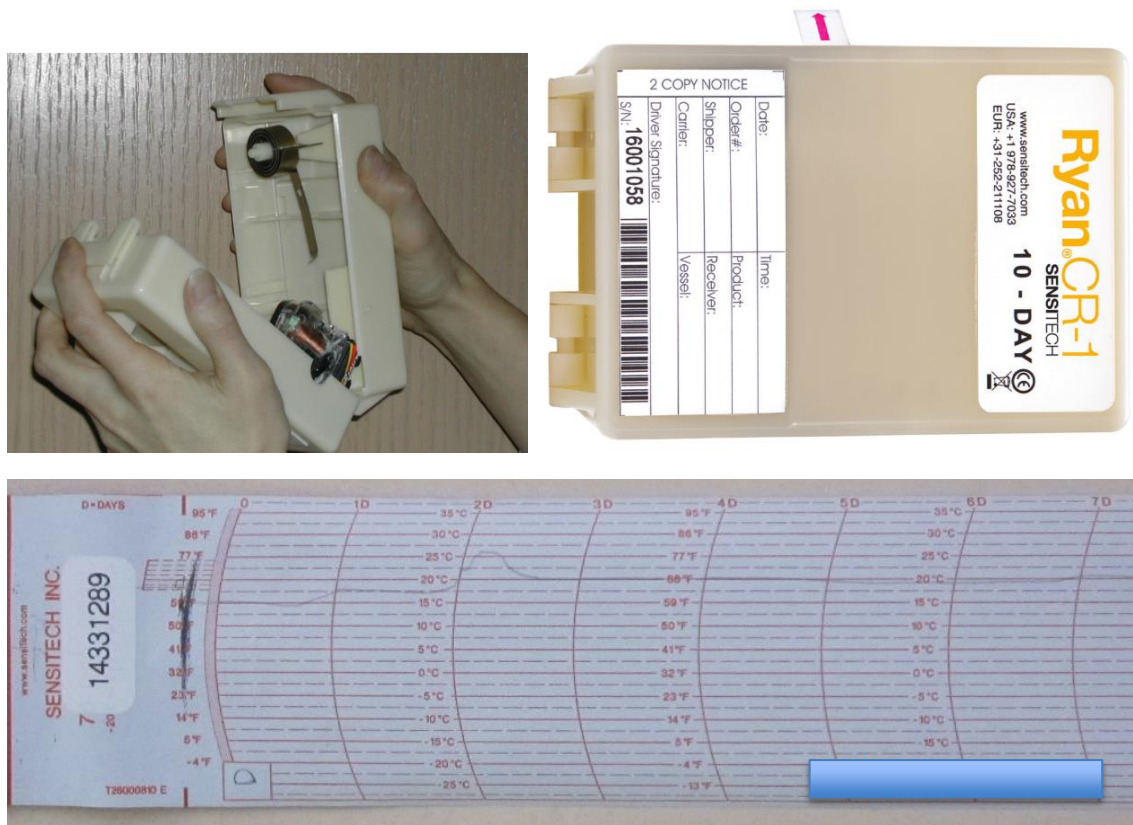


Figura 8: Registrador de temperatura Ryan CR-1 de la compañía Sensitech.

Además, para obtener la información de la temperatura registrada, es necesario abrir el envase o paquete que contiene el pescado fresco, y por lo tanto, sólo se pueden leer los datos registrados en el destino final. Por esta razón, su uso se limita sólo a algunas partes de la cadena de frío, mientras que en otras partes importantes de la cadena, no se monitoriza la temperatura, dejando incompleto el seguimiento de la cadena.

Otro inconveniente es que los datos están grabados en un papel, por lo que la información que contienen se revisa de forma visual, pudiendo incurrir en errores de transcripción. Por otro lado, la información es accesible únicamente en el

destino final, siendo muy complicado el acceso a los datos desde cualquier otro sitio, de esta forma resulta muy complicado realizar estudios para mejorar la cadena de distribución del pescado fresco.

Aunque la industria logística del pescado no está muy tecnificada, en algunos casos, un registro de papel puede ser más conveniente, por su robustez, que un registro electrónico, a pesar de ello, existen otras opciones robustas que se podrían implementar en sustitución de los registradores de temperatura en papel. Se podrían implementar registradores digitales con sensor de temperatura integrado, como los utilizados para realizar comparativas con la tarjeta RFID en el capítulo 6, pero la mayoría de estos dispositivos tienen el hándicap de tener que conectarse a un ordenador mediante cable para poder acceder a los datos registrados, por lo que el acceso a los datos solamente se podría realizar una vez llegado al destino, una vez abierto el envase o paquete contenedor.

Así pues, la utilización de tarjetas RFID con sensores de temperatura integrados puede ayudar a mejorar los controles de calidad en la cadena de frío, monitorizando la temperatura en todos los pasos de la cadena de distribución y pudiendo acceder a los datos registrados automáticamente en cualquier punto de esta sin la necesidad de abrir el envase o paquete.

3.3.- Escenarios de trabajo en la cadena de distribución alimentaria.

En esta sección se explica en detalle un escenario de trabajo donde aplicar el sistema compuesto por lector y tarjeta RFID. Este escenario se sitúa en la cadena de distribución de la fruta, pero puede ser aplicable a cualquier otra cadena de distribución de productos perecederos únicamente variando los parámetros a monitorizar. De esta forma, añadiendo o eliminando posibles escenarios, el sistema se convierte en una aplicación versátil y con múltiples usos.

Únicamente la implementación de tarjetas RFID sin sensores en la cadena de distribución de la fruta ya sería un gran avance para la trazabilidad de los productos. Esto se debe a que, en el momento de este estudio, el estándar es uso de etiquetas de papel con información almacenada con código de barras. La Figura 9 muestra un ejemplo de estas etiquetas.



Figura 9: Etiqueta de papel con código de barras para identificar el contenido de los palés, ejemplo de trazabilidad de la cooperativa vitivinícola de la Poble del Duc.

El escenario de trabajo en la cadena de distribución de la fruta se dividiría en cuatro escenarios diferentes, (i) el primero corresponde a la introducción del lector en las cámaras de almacenaje junto con los palés llenos de fruta, pueden pasar muchos meses hasta llegar al segundo escenario. (ii) El segundo se sitúa cuando la fruta se distribuye la fruta una vez sacada de las cámaras de almacenaje, justo en el momento de la carga en los camiones. (iii) El tercero corresponde a la fase de transporte, dentro de un contenedor frigorífico. La duración de esta fase dependerá del tipo de transporte, que puede variar entre pocas horas (trayectos por carretera) hasta llegar a durar meses (trayectos por mar). (iv) El cuarto y último escenario corresponde al final del trayecto, cuando el contenedor llega a su destino. Seguidamente se detallan todos los escenarios.

3.3.1.- Primer escenario: En las cámaras de atmosfera controlada.

El primer escenario consiste en la introducción del lector RFIID dentro de las cámaras de almacenaje de atmosfera controlada. Para monitorizar el estado dentro de las cámaras, el lector RFIID adquiere los datos de los sensores de gas y envía esta información al nodo Aml mediante comunicaciones sin cables o *wireless*. Hay que tener en cuenta que debido al largo tiempo de almacenaje, el lector ha de tener una fuente de energía dentro de la misma cámara. Por este motivo, el lector RFIID se conecta a la alimentación general de la cámara.

Una vez acabado el tiempo de almacenaje, la fruta ha de ser distribuida a los puntos de venta. Esto se lleva a cabo cargando los palés anteriormente almacenados en contenedores o camiones refrigerados. En este proceso de carga es donde empieza el segundo escenario.

3.3.2.- Segundo escenario: Carga en los contenedores.

En el inicio del segundo escenario se adhiere a cada uno de los palés una tarjeta RFIID con sensores integrados, y un transpondedor de RFIID necesario para comunicarse con el lector RFIID. Los palés se cargan mediante carretillas elevadoras en los contenedores. Puesto que en este estadio el instrumento más cercano a los palés serán justamente las carretillas, se consideró como óptima la incorporación el lector RFIID en las palas de éstas, tal y como se muestra la Figura 10:



Figura 10: Posición del lector RFIID en la carretilla elevadora [10].

El nodo AmI cambia la funcionalidad del lector para que empiece a comunicarse con las tarjetas RFID. El inicio de este proceso se realizaba manualmente, ya que no estaba previsto ningún sistema de detección automatizado. El Diagrama 1 muestra el proceso de comunicación entre el nodo AmI, el lector RFID y la tarjeta. El “Principio del proceso”, que aparece en dicha figura corresponde con la activación manual por parte del operario del inicio del segundo escenario. El nodo AmI se comunica con el lector RFID pidiendo un inicio de proceso de búsqueda de tarjetas. El lector inicia el proceso de búsqueda de tarjetas y, una vez se ha establecido la conexión, el lector RFID envía la identificación de la tarjeta leída al nodo AmI, con lo que se cierra el bucle de búsqueda.

El nodo AmI envía los datos correspondientes al lote que se está cargando al lector RFID para que éste los transfiera a la tarjeta. Una vez se ha grabado correctamente esta información, la tarjeta enviará un ACK al lector RFID que será a su vez retransmitida al nodo AmI. Este proceso se explica en el Diagrama 1 y se repite para los diferentes palés que se utilicen en este escenario.

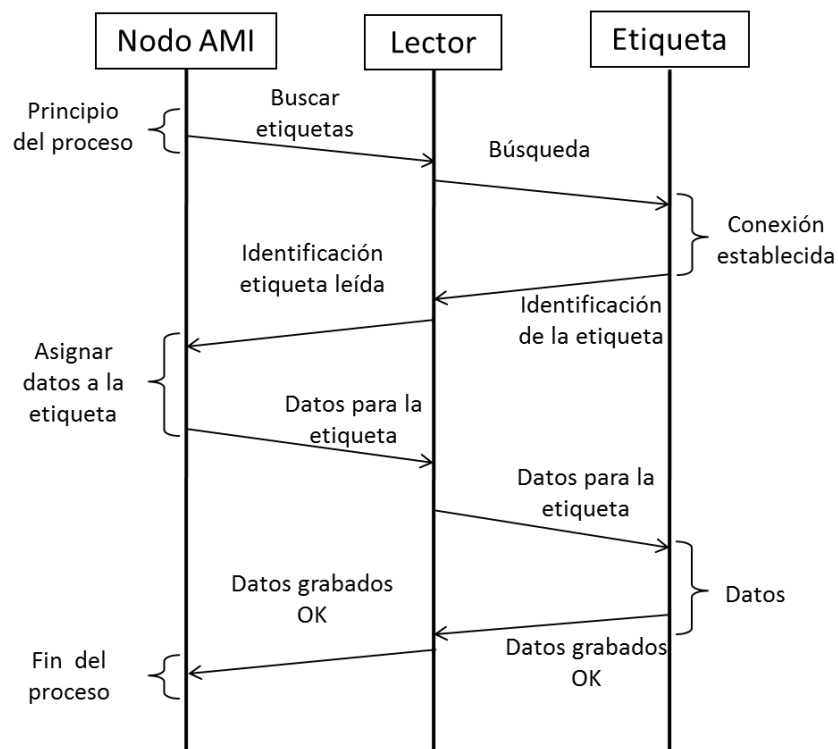


Diagrama 1: Flujo de datos entre el nodo AmI, el lector y las tarjetas en el escenario de carga.

A modo de ejemplo visual, en la Figura 11 se observa la zona donde se adhieren las tarjetas en los palés para la comunicación con el lector RFID. En el momento que el lector y la tarjeta se alinean, y tarjeta recibe el campo magnético del lector y éste pregunta por su identificador.

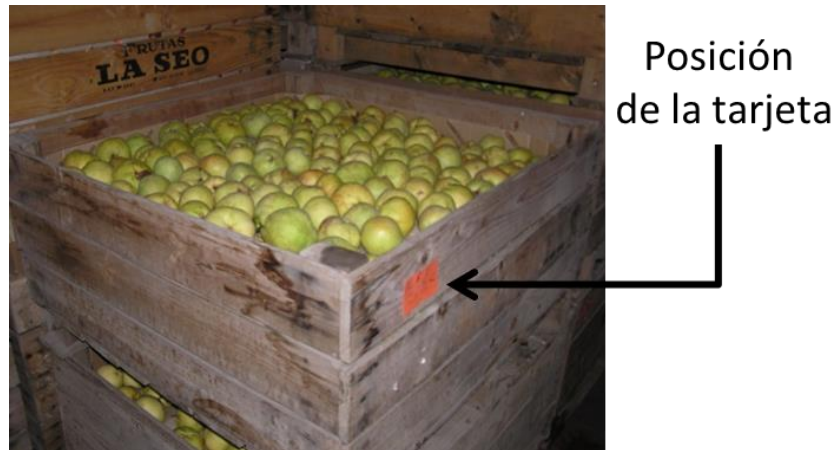


Figura 11: Ejemplo de posición de la tarjeta RFID en un palé de manzanas.

El lector envía el identificador al nodo AmI que le devuelve los datos referentes al producto que han de ser grabados en la tarjeta. El lector envía dichos datos a la tarjeta para que los grave en su memoria. Todo este proceso se realiza mientras la carretilla elevadora tiene el palé en posición. Cuando la carretilla elevadora deja el palé en el contenedor, la tarjeta detecta que ya no está en el campo del lector y a partir de ese momento, empieza su función principal, adquirir datos periódicamente en función de los parámetros grabados en su memoria. La alimentación del lector RFID se suministra por la carretilla elevadora. Mientras que las tarjetas RFID se alimentan a través del campo magnético generado por el lector RFID.

3.3.3.- Tercer escenario: Dentro del contenedor.

Para el transporte del producto a su destino final, los palés se almacenan dentro de contenedores frigoríficos. En ese momento se desactivan todas las comunicaciones y, tanto el lector como las tarjetas, se centran en adquirir datos, de una manera periódica, durante todo el trayecto. El periodo de adquisición depende directamente de la duración del trayecto. La alimentación de las tarjetas se realiza mediante una pequeña batería individual. El lector RFID está alimentado a través de la batería del contenedor.

3.3.4.- Cuarto escenario: Descarga de los contenedores.

Cuando el viaje acaba, el lector RFID se acopla a otra carretilla elevadora y el nodo AmI cambia su funcionalidad. Igual que ocurre en el estado de carga, empieza a comunicarse con las tarjetas RFID. De este modo, mientras se descargan los palés, el lector se conecta con las tarjetas y obtiene los datos almacenados en el estado de carga, junto con las posibles alarmas que se hayan podido producir durante el viaje. Estos datos se van enviando al nodo AmI, tal como se indica en el Diagrama 2:

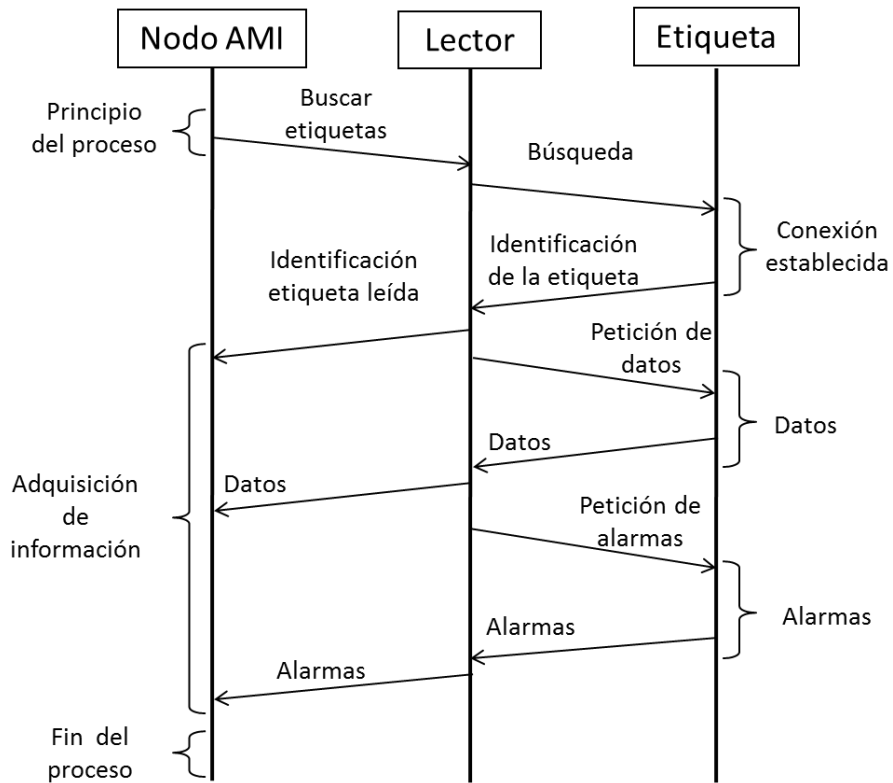


Diagrama 2: Flujo de datos entre el nodo AmI, el lector y las tarjetas en el escenario de descarga.

Una vez descargados todos los palés, finaliza el proceso y el nodo AmI se encarga de analizar los datos y se realizar las acciones oportunas.

3.4.- Requerimientos del sistema de monitorización dentro de la cadena de distribución de productos perecederos.

Para la viabilidad del sistema, éste ha de cumplir con ciertos requerimientos que demanda la industria agroalimentaria.

Estos se detallan a continuación:

- Requerimientos para la monitorización de productos perecederos durante su almacenaje, transporte y venta.
- Requerimientos para la detección de fugas en los sistemas de refrigeración.
- Requerimientos en las comunicaciones entre los diferentes elementos del sistema.

3.4.1.- Requerimientos para la monitorización de productos perecederos durante su almacenaje, transporte y venta.

En el caso de la fruta a estudiar, hay tres componentes químicos que tienen correlación con su etapa de conservación. Estos componentes son etileno, etanol y acetaldehído. La presencia de etileno es un indicador de madurez de la fruta climatérica. El etileno está también considerado como una hormona que desencadena su maduración. Por lo tanto, un exceso de este gas es una amenaza para el proceso de conservación por que puede provocar una maduración prematura de la fruta y su posterior falta de calidad al ser demasiado madura para su comercialización.

El etanol y el acetaldehído son compuestos que aparecen como resultado de someter a la fruta a estrés en las cámaras climáticas. Este estrés se produce por dos causas principales: (i) la primera es por los impactos sufridos por la fruta, por ejemplo en su recolección, limpieza, clasificación, etc. (ii) La segunda es el estrés en su respiración debido a una falta de oxígeno en las cámaras climáticas. Este problema puede aparecer cuando la fruta se almacena en condiciones de LO o ULO.

Normalmente, los controles de etileno, etanol y acetaldehído se realizaban fuera de las cámaras climáticas mediante medidas cromatográficas de muestras extraídas de las cámaras y llevadas al laboratorio. Las frecuencias de estas medidas eran muy bajas, llegando a ser semanales. Esta es demasiado baja para hacer frente a los problemas de conservación de una manera eficiente puesto que la dinámica de aumento del etileno puede ser eventualmente más rápida [11], en la Figura 12 se aprecia como cuando las manzanas alcanzan la madurez, la producción de etileno se incrementa drásticamente en un corto intervalo de tiempo.

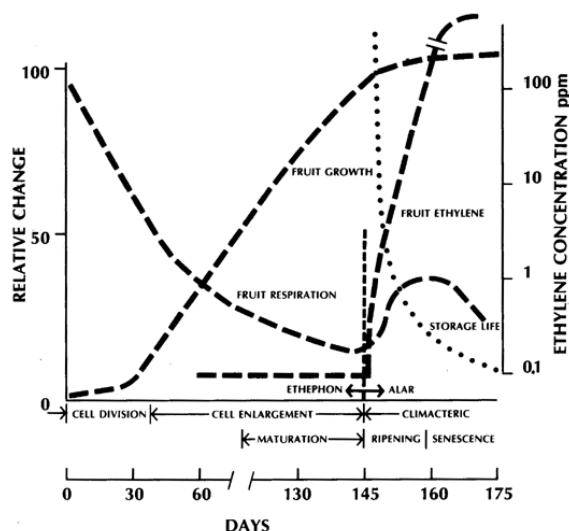


Figura 12: Producción de etileno en función del estado de crecimiento de las manzanas [11].

La Tabla 2 muestra los niveles normales, de alarma y máximos para estos compuestos volátiles en las manzanas tipo *Golden*, mientras están almacenadas en las cámaras de conservación.

	Nivel normal (ppm)	Nivel de alarma (ppm)	Nivel máximo (ppm)
Etileno	1 - 100	400	-
Etanol	-	2	7
Acetaldehído	-	10	200

Tabla 2: Intervalos de concentración para los diferentes componentes en la etapa de conservación de las manzanas.

Cuando la fruta climatérica empieza a madurar, se incrementa la producción de diversos compuestos volátiles, relacionados con su aroma y sabor. La Tabla 3, resume algunos de los compuestos volátiles más frecuentes producidos por las manzanas tipo *Golden* y sus concentraciones [12]:

Especie	Concentración (ppb)
Butil acetato	~80
Acetato de hexilo	~50
Hexanol	~20
Butirato de butilo	~15
Butanol	~10
Acetato de isoamilo	~2

Tabla 3: Compuestos volátiles producidos por las manzanas tipo *Golden*.

Las concentraciones de los compuestos volátiles que figuran en la Tabla 3 hacen referencia a las manzanas bajo condiciones de CS de conservación. Para condiciones de LO o ULO, las concentraciones de la mayoría de los compuestos volátiles se reducen significativamente. Además, un exceso de concentración de CO₂, con la consecuente falta de oxígeno, activa el proceso de respiración anaeróbica, dando lugar a una reducción significativa del desarrollo del aroma y del sabor de fruta [12].

Existen otros parámetros físicos, tales como la temperatura de almacenamiento, humedad relativa y la exposición a la luz, que también pueden provocar una maduración prematura, por lo tanto estos parámetros necesitan ser supervisados de forma continua.

3.4.2.- Requerimientos para la detección de fugas en los sistemas de refrigeración.

Casi todas las diferentes industrias de alimentación utilizan sistemas de refrigeración en sus instalaciones de procesado y en sus almacenes frigoríficos. Debido a la prohibición mundial del denominado *Frigen*TM (Chlorinedifluormethane, CHClF₂) en los últimos años el uso de amoníaco o NH₃ como sustancia refrigerante se ha incrementado rápidamente [13, 14, 15]. Sin embargo, el amoníaco se considera un gas con un alto riesgo para la salud en concentraciones superiores a 50 ppm. Incluso a concentraciones mucho menores (<20 ppm) el NH₃ actúa como veneno para los alimentos almacenados en los sistemas de refrigeración [16]. Difícilmente un alimento que haya estado en contacto con el amoníaco pueda llegar a ser consumido, esto es debido a que dicho alimento desprendería un olor y tendría un gusto desagradable. En cualquier caso, el amoníaco es una sustancia corrosiva y los efectos principales de la exposición al amoníaco ocurren en el sitio de contacto directo (por ejemplo, la piel, los ojos, la boca, y los sistemas respiratorio y digestivo). Cabe destacar que el amoníaco puede autoproducirse en cantidades apreciables en los tejidos de algunas plantas o alimentos en descomposición, la principal fuente de producción de amoníaco en el tejido vegetal es el catabolismo proteico, por otro lado, una cantidad limitada de amoníaco también puede liberarse a través de la biosíntesis de etileno a partir de metionina.

En cuanto a los efectos del amoníaco, niveles de 8 ppm pueden causar daños en los tejidos, incluso niveles de tan solo 3 ppm pueden causar daños en las especies más sensibles. Por lo tanto, la acumulación de niveles bajos de amoníaco en un sistema cerrado puede dar lugar a daños en los tejidos de los alimentos, actuando sobre el pH de dichos tejidos [17]. Además, la temperatura parece no afectar a la sensibilidad al amoníaco, por lo tanto, los productos almacenados a baja temperatura serían igualmente afectados que los almacenados a temperaturas más elevadas [17].

Por otra parte, el amoníaco es un gas inflamable, con un límite inferior de explosión (LEL) del 15% (10% LEL @ 15,000 ppm) en aire [18], y podría producirse una deflagración o un incendio si se alcanzara esta concentración

crítica en el ambiente. Esto podría ser el origen de un daño ambiental, además del peligro mencionado anteriormente.

En los almacenes frigoríficos de alimentos perecederos, el amoníaco se utiliza en el sistema primario de refrigeración, situado fuera del edificio, normalmente en la azotea. Esto implica que el amoníaco no está en la unidad de refrigeración dentro del propio almacén, por lo que es muy poco probable que la fruta o el pescado se contaminen [19]. Sin embargo, en la etapa de transporte la posibilidad de contaminar los alimentos con amoníaco aumenta significativamente debido a que la unidad de refrigeración forma parte de la caja de almacenaje.

Debido a la importancia medioambiental y al potencial tóxico de amoníaco, se reclaman normativas por parte de los legisladores con el fin de minimizar el riesgo potencial del amoníaco para los seres humanos y el medio ambiente. Diferentes regulaciones se aplican sobre los requisitos de seguridad de los refrigeradores que utilizan el amoníaco estableciendo los límites de concentración seguros y regulando los equipos de monitorización del amoníaco [20, 21, 22, 23, 24].

El cumplimiento de dichas normas lleva a la demanda de un adecuado sistema de detección de amoníaco, pero en el momento de iniciar esta tesis doctoral no existe un sistema que satisfaga esta demanda.

Así pues, el desarrollo de un adecuado sensor de amoníaco no sólo se justifica por la necesidad de detectar la intoxicación alimentaria por la fuga de amoníaco, sino también porque el amoníaco es un indicador fiable de la frescura del pescado. Una de las principales características del proceso de descomposición del pescado fresco son los compuestos volátiles que se generan. Esta descomposición puede ser causada por reacciones químicas o daños físicos. Sin embargo, la principal causa de la descomposición de los alimentos es el crecimiento microbiano y el metabolismo, dando como resultado la formación de aminas, sulfuros, alcoholes, aldehídos, cetonas y ácidos orgánicos con desagradables inconvenientes [25]. La Figura 13 muestra la evolución de dichos compuestos en función del tiempo.

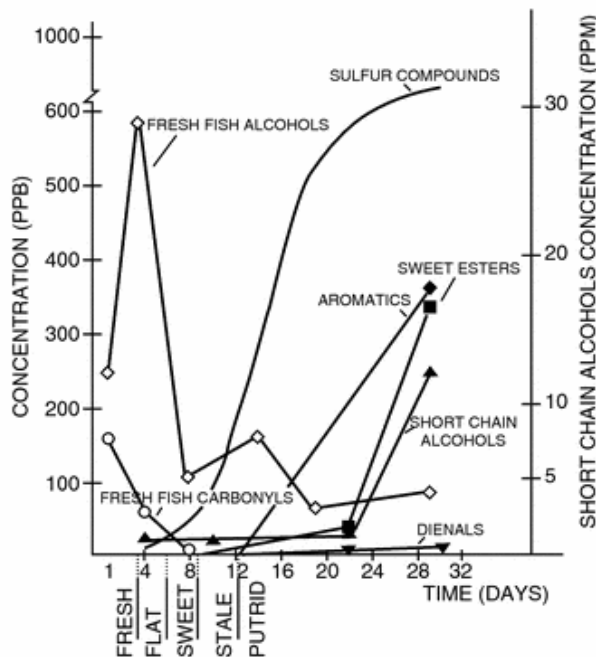


Figura 13: Compuestos volátiles producidos por el pescado fresco en función del tiempo [26].

De dichos compuestos los denominados *Total Volatile Nitrogen* (TVN) son los más utilizados como criterio de frescura en pescado fresco [27]. Los componentes principales de TVN son la trimetilamina (TMA) y el amoníaco, y ambos aumentan sus concentraciones con el transcurso del tiempo de almacenamiento [28].

En la literatura podemos encontrar diversas tecnologías de sensores para la detección de la descomposición del pescado, por ejemplo Pacquit [29] utiliza sensores colorimétricos para detectar amoníaco y así determinar el nivel de descomposición del pescado fresco. Otro ejemplo es el reportado por Schweizer-Berberich [30], en este caso utiliza una matriz de sensores amperométricos para la detección de múltiples compuestos, entre ellos el amoníaco. En la actualidad, el uso de las denominadas narices electrónicas, basadas en multi sensado y reconocimiento de patrones, se utiliza como dispositivo de detección de la descomposición del pescado [31].

Todos los ejemplos de detección de amoníaco para la determinar la frescura del pescado se basan en dispositivos de laboratorio, de un alto coste, alto consumo energético y lo más importante, que las medias se realizan fuera de la cadena de logística de distribución del pescado fresco. Es por ello que la implementación de dispositivos capaces de monitorizar en tiempo real compuestos como el amoníaco garantiza la calidad del pescado fresco, resultando un gran avance en el sector.

3.4.3.- Requerimientos en las comunicaciones entre los diferentes elementos del sistema.

En relación al tipo de tecnología a utilizar para la monitorización de productos perecederos en la cadena logística de distribución se ha escogido la RFID HF de acoplamiento inductivo, que utiliza frecuencias de trabajo en el rango de los megahercios (MHz), concretamente el que cumple con el estándar ISO/IEC 15693. Los motivos de esta elección son dos, en primer lugar, el estándar ISO/IEC 15693 es una de los más utilizados por lo que existen muchos más recursos para su implementación, por otro lado, las comunicaciones en el rango de los MHz se ven menos afectadas por las condiciones ambientales que presenta la cadena logística de distribución de productos perecederos [32, 33].

Respecto a las otras tecnologías de RFID, no se escoge RFID LF debido a sus pequeñas velocidades de transmisión y la necesidad de una antena relativamente grande, tampoco se escoge RFID UHF debido principalmente a que la naturaleza de los productos perecederos, que en su mayoría se componen de una gran cantidad de agua, y el medio ambiente donde se almacenan, que puede utilizar hielo para mantener la frescura de estos, convierte en una tarea muy difícil las comunicaciones en las frecuencias de trabajo de la RFID UHF debido a que para una máxima transferencia de energía, es necesario que las antenas tengan la misma impedancia, y como el agua es un dieléctrico que está entre dichas antenas, repercute en la impedancia de ambas haciendo que las impedancias sean diferentes, disminuyendo así la transferencia de energía [32, 33].

A continuación se detallan algunas de las características del sistema:

- La tecnología RFiD permite diseñar e implementar tarjetas totalmente pasivas. Aunque la tarjeta del proyecto GoodFood necesite de una pequeña batería, ésta solamente se utiliza para la alimentación de los sensores durante el escenario de transporte. El objetivo a largo plazo es que se desarrollen tarjetas, capaces de implementar sensores, que no necesiten de una batería para su funcionamiento y que tengan suficiente con la energía emitida por el lector.
- La banda 13,56 MHz es muy adecuada para este tipo de escenario, teniendo en cuenta los problemas comentados anteriormente con los alimentos en bandas más altas de frecuencia, los ambientes donde realizarán su función (humedad, temperatura, etc.) y rango de comunicación.
- Dado que la implementación en la tarjeta RFiD de una batería es solo para alimentar los sensores, el resto de componentes, incluidos los referidos a la comunicación, se alimentarán mediante el campo electromagnético generado por el lector. Esto permitirá acceder a los datos registrados de los sensores, incluso si la batería está agotada. Esta es una característica importante, ya que el acceso a la memoria será totalmente compatible con la norma ISO/IEC 15693, lo que permitirá la extracción de los datos almacenados y, en particular, la información de trazabilidad con un lector compatible con la norma ISO/IEC 15693.

Para demostrar la viabilidad y la funcionalidad técnica de los prototipos, no se implementará la norma ISO/IEC 15693 en su totalidad, detallada en el Apéndice, al quedar fuera del alcance del proyecto. La Tabla 4 muestra la configuración a implementar de dicho estándar:

Frecuencia principal	13,56 MHz
Modulación de la portadora	ASK 100%
Codificación de los datos	PPM 1 a 4
Velocidad de transmisión tarjeta-lector	Alta 26,69 kbits/s
Numero de subportadoras	2
Máxima distancia lectura/escritura	10 cm
Dimensiones de la tarjeta	ISO 7810 ID-1 (tarjetas de crédito)

Tabla 4: Configuración implementada de la norma ISO/IEC 15693 para la comunicación lector-tarjeta.

En lo referente a la comunicación entre el lector y la puerta de enlace, ésta ideada para ser utilizada mediante una típica conexión serie de tres cables, recepción (Rx), transmisión (Tx) y común. Los parámetros de configuración se muestran en la Tabla 5:

Velocidad de transmisión	9600 bps
Número de bits	8 bits
Paridad	Sin paridad
Bits de Stop	1 bit de Stop
Handshake	Sin Handshake

Tabla 5: Parámetros de configuración de la conexión serie lector - puerta de enlace.

A su vez, la puerta de enlace se conecta al nodo AmI mediante una conexión sin hilos (*wireless*.)

Cabe remarcar, que la comunicación entre el lector y la puerta de enlace será diseñada e implementada por otro socio del consorcio del proyecto GoodFood. Es por este motivo que no se profundiza en los aspectos relacionados con dicha comunicación y se considera fuera del alcance de esta tesis doctoral.

3.5.- Especificaciones de la tarjeta RFID.

Tras lo expuesto en este capítulo, la tarjeta RFID debería cumplir las siguientes especificaciones de funcionamiento:

- Dimensiones de la tarjeta según el estándar ISO 7810, ID-1: 85,60 x 53,98mm.
- La tarjeta deberá ser implementada en formato flexible, con grosor de 50 micras, pudiendo ser implementada en formato rígido para realizar test.
- Tiempo de funcionamiento entre 1 día y varios meses, en función del tipo de transporte donde se utilice.
- Frecuencia de medidas dinámica, dependiendo del tipo de transporte y el modo de funcionamiento, modo alarma o modo monitorización en tiempo real.
- Implementación de una batería, entre 20 y 40 mAh, de pequeñas dimensiones y de formato flexible, que permita el suministro de energía durante las fases donde el lector no está presente.
- El sistema ha de ser capaz de monitorizar los siguientes parámetros:
 - Temperatura entre -20 y 40°C.
 - Humedad relativa entre 0 y 100% RH.
 - Luz a partir de 10 Lux.
 - Gas acetaldehído a partir de 10ppm.
 - Gas etileno a partir de 400ppm.
 - Gas amoníaco a partir de 50ppm.

En los capítulos siguientes se detallan tanto el diseño de la tarjeta RFID, procurando cumplir con las especificaciones, como las pruebas de campo realizadas para comprobar su correcto funcionamiento y los estudios y experimentos realizados para la implementación de sensores de gas en dispositivos de muy bajo consumo.

3.6.- Referencias.

- [1] A.A. Kader, "Ethylene-induced senescence and physiological disorders in harvested horticultural crops," *Hortscience*, vol. 20, (no. 1), pp. 54-57, 1985.
- [2] Sozzi, G. O.. "Fisiología de la maduración de los frutos de especies leñosas". En Sozzi, G. O. "Árboles frutales. Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento. Buenos Aires: Facultad de Agronomía." pp. 667-687. ISBN 950-29-0974-7 (2007).
- [3] Kidd, F., West, C. "The course of respiratory activity throughout the life of an apple". Report of the Food Investigation Board. Londres, Reino Unido. pp. 27-33 (1925).
- [4] M.H. Jijakli and P. Lepoivre, "State of the art and challenges of post-harvest disease management in apples," *Fruit and Vegetable Diseases*, vol. 1, pp. 59-94, 2004.
- [5] A. Brackmann, J. Streif, and F. Bangerth, "Influence of CA and ULO storage conditions on quality parameters and ripening of preclimacteric and climacteric harvested apple fruits .2. Effect on ethylene, CO₂, aroma, and fatty-acid production," *Gartenbauwissenschaft*, vol. 60, (no. 1), pp. 1-6, 1995.
- [6] G.A. Willaert, P.J. Dirinck, H.L. Depooter, and N.N. Schamp, "Objective measurement of aroma quality of golden delicious apples as a function of controlled-atmosphere storage time," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 31, (no. 4), pp. 809-813, 1983.
- [7] E.M. Yahia, C. Barry-Ryan, and R. Dris, "Treatments and techniques to minimise the postharvest losses of perishable food crops," *Production Practices and Quality Assessment of Food Crops*, Vol 4, vol. 4, pp. 95-133, 2004.
- [8] European Parliament, 2002. Regulation (EC) No. 178/2002 of the European Parliament and of the Council. Official Journal of the European Communities, pp. L31/1-L31/24.
- [9] Sensitech, "Ryan CR-1 datasheet".
- [10] <http://www.appleinspires.me/forklift-icon/> 07/07/2015.
- [11] E. Kupferman, "The role of ethylene in determining apple harvest and storage life", *Post Harvest Pomology Newsletter*, vol. 4, (no. 1), 1986.
- [12] Ralf, Cord-Ruwisch; H-J, Seitz; R, Conrad, "The capacity of hydrogenotrophic anaerobic bacteria to compete for traces of hydrogen depends on the redox potential of the terminal electron acceptor", *Archives of Microbiology*. 149 (4). pp. 350-357 (1988).
- [13] E. Minciuc, O. Le Corre, V. Athanasovici, M. Tazerout, I. Bitir, "Thermodynamic analysis of trigeneration with absorption chilling machine", *Appl Therm Eng*, 23 (11) (2003), pp. 1391-1405.

- [14] G.G. Maidment, R.M. Tozer, "Combined cooling heat and power in supermarkets", *Appl Therm Eng*, 22 (2002), pp. 653–665.
- [15] E. Minciuc, O. Le Corre, V. Athanasovici, M. Tazerout, "Fuel savings and CO₂ emissions for tri-generation systems", *Appl Therm Eng*, 23 (2003), pp. 1333–1346.
- [16] Asociación de Exportadores de Frutas de Chile A.G., "GUÍA DE USO Y MANEJO DE AMONÍACO EN LA REFRIGERACIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS FRESCAS: PLAN DE EMERGENCIAS", Registro de Propiedad Intelectual N° 0144786 – 201. P10.
- [17] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de Estados Unidos, "Resúmenes de Salud Pública - Amoníaco (Ammonia)", https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs126.html (Diciembre 2016)
- [18] U.S. Department of Health & Human Services "Ammonia information page <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/7664417.html>", The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).
- [19] J. Bassols, B. Kuckelkorn, J. Langreck, R. Schneider, H. Veelken, "Trigeneration in the food industry" *Appl Therm Eng*, 22 (6) (2002), pp. 595–602.
- [20] Ministerio de medioambiente, y medio rural y marino, "Normativa ambiental sobre sistemas de refrigeración y aire acondicionado para usuarios comerciales e institucionales.", RD 795/2010.
- [21] Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos, "Peligros sobre la Liberación de Amoníaco en Instalaciones de Almacenamiento y Refrigeración.", Oficina de Desechos Sólidos y Atención a Emergencias (5104 A), EPA 550-F-01-009 Agosto 2001.
- [22] Ministerio de industria, "Orden por la que se aprueban las instrucciones complementarias denominadas instrucciones MI IF con arreglo a lo dispuesto en el Reglamento de Seguridad para Plantas e Instalaciones Frigoríficas.", BOE núm. 29, de 3 de febrero de 1978, páginas 2672 a 2708.
- [23] Ministerio de industria, "Almacenamiento de amoníaco anhidro", BOE núm. 164, de 10 de julio de 1987, páginas 21063 a 21068.
- [24] Ministerio de trabajo e inmigración, "REAL DECRETO 379/2001", BOE núm. 112 de 10 de mayo de 2001 BOE nº 112 10-05-2001.
- [25] Gram, L. et al "Fish spoilage bacteria – problems and solutions", *Current Opinion in Biotechnology* 2002, Vol 13:262–266.
- [26] D. Josephson, R. Lindsay, and G. Olafsdottir. "Measurement of volatile aroma constituents as a means for following sensory deterioration of fresh fish and fishery products", In D. Kramer and L. Liston, editors, *Seafood Quality Determination Symp.*, pages 27–47. Elsevier, Nov. 1986. 3.1, 3.2.1
- [27]. Ólafsdóttir, G. et al. , "Methods to evaluate fish freshness in research and industry", *Trends in Food Science & Technology*. August 1997 [Vol. 8].

- [28] Haaland, H. y Leif R Njaa. "Ammonia (NH₃) and total volatile nitrogen (TVN) in preserved and unpreserved stored, whole fish", *Journal of the science of food agriculture*, 1988, Vol 44, 335-342.
- [29] Pacquit, A., Lau, K. T., McLaughlin H., Frisby, J., Quilty, B., Diamond, D., "Development of a volatile amine sensor for the monitoring of fish spoilage", *Talanta*, 69(2), 515-520.
- [30] Schweizer-Berberich, P.-M., Vaihinger S. y Göpel, W., "Characterisation of food freshness with sensor arrays", *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 18, Issues 1-3, March 1994, Pages 282-290
- [31] Ólafsdóttir, G., & Kristbergsson, K. (2006). "Electronic-nose technology: application for quality evaluation in the fish industry", In *Odors in the Food Industry*(pp. 57-74). Springer US.
- [32] P. Foster and R. Burberry, "Antenna Problems in RFID Systems", *IEE Colloquium on RFID Technology*, pp. 3/1-3/5, 25. October 1999.
- [33] D. M. Dobkin, S. M. Weigand, "Environmental effects on RFID tag antennas", *IEEE Microwave Symposium Digest*, Jun. 2005, pp. 135-138.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

4.- Diseño de la tarjeta RFID.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

En este capítulo se describen el diseño conceptual como el diseño en detalle de la tarjeta RFID. Se detallan los componentes escogidos para cumplir con las especificaciones necesarias descritas en el capítulo anterior.

4.1.- Diseño conceptual de la tarjeta RFID.

En esta sección se describen conceptualmente los elementos que componen la tarjeta RFID. Esta tarjeta se diseñará para realizar dos funciones principales:

- Monitorizar los parámetros relacionados con la monitorización de los productos perecederos tanto en la fase de transporte como en la fase de venta.
- Realizar comunicaciones RFID con el lector para enviarle los datos adquiridos durante la monitorización.

Así pues, la tarjeta deberá integrar diversos sensores: luz, temperatura, humedad y gas, dependiendo de la aplicación donde se le quiera hacer funcionar. En posteriores secciones se detallan tanto los sensores, como su implementación en la tarjeta.

Cabe destacar que las tarjetas están pensadas para ser adheridas a los palés, lo más cerca posible de los productos que se desean monitorizar.

Tal y como se ha comentado anteriormente, las tarjetas deberán incorporar una batería, del tamaño más pequeño posible y a poder ser flexible, para poder realizar las medidas de los sensores. Esto es debido a que las tarjetas estarán adheridas a los palés, elemento totalmente pasivo en cuanto energía, y que el lector proporcionará energía solo en la fase de carga y descarga. Por este motivo, el diseño de la tarjeta tendrá que ser realizado con elementos de muy bajo consumo.

Así pues, la tarjeta está concebida para obtener la trazabilidad de ciertos parámetros en las fases de transporte y venta. Incorporará, además de los sensores, control de energía, una batería, un conmutador de energía y un transpondedor o *front-end* RFID.

El Diagrama 3 muestra todos los componentes de la tarjeta RFID del proyecto GoodFood en el diagrama de bloques y el flujo de energía y de datos.

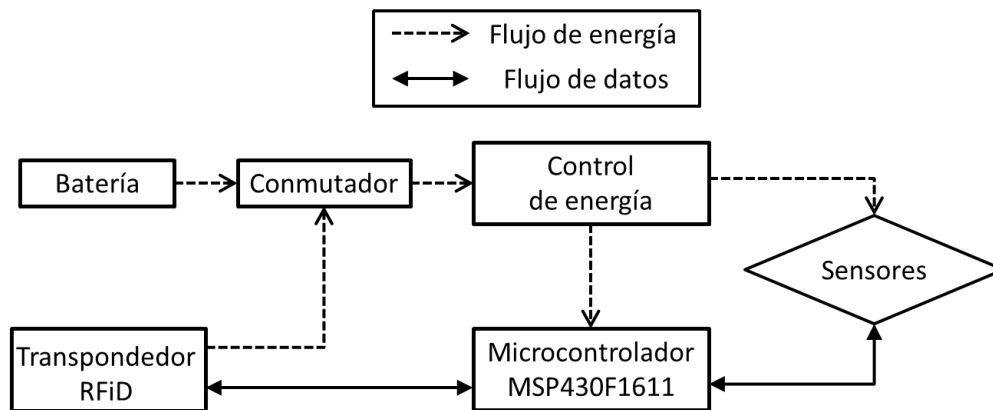


Diagrama 3: Diagrama de bloques de la tarjeta RFID del proyecto GoodFood.

Uno de los hitos a conseguir es implementar el diseño de la tarjeta en un formato flexible. Esto permitirá, entre otras posibilidades, la colocación de dicha tarjeta en cualquier superficie rugosa y no metálica. Cabe recordar que la mayor parte de la cadena logística de distribución de productos perecederos se realiza mediante distribución en palets, como se comentó en el anterior capítulo. Para verificar la viabilidad y el funcionamiento también se realizarán prototipos en formato rígido.

Otra posibilidad es la implementación de cualquier sensor que necesite una PCB muy fina. Este caso es el de la matriz de sensores de gas, que más adelante se verá su colocación.

4.1.1.- Formato flexible de la tarjeta RFID.

La fabricación y la elección del material del PCB de las tarjetas RFID en sustrato flexible se realizaron en los laboratorios de la Fundación Tekniker del País Vasco, socio del proyecto GoodFood. El material empleado para la realización de las tarjetas RFID en formato flexible es el Pyralux AP 8525R, de la empresa norteamericana DuPont. Es un material de doble cara y revestido de cobre laminado. Éste es un laminado sin adhesivo para aplicaciones de PCB flexibles. Éste tiene un espesor de 50 micras y la capa de cobre tiene un grosor de 18 micras en cada lado. Tiene una fuerza de adhesión Cu-poliámidas muy alta y la temperatura de funcionamiento máxima es de 180°C, pudiendo ser mayor para cortos espacios de tiempo, lo que permite realizar soldaduras para ensamblar algunos de los componentes de la tarjeta.

El proceso de fabricación del PCB flexible de la tarjeta se llevó a cabo siguiendo el proceso descrito en la Figura 14:

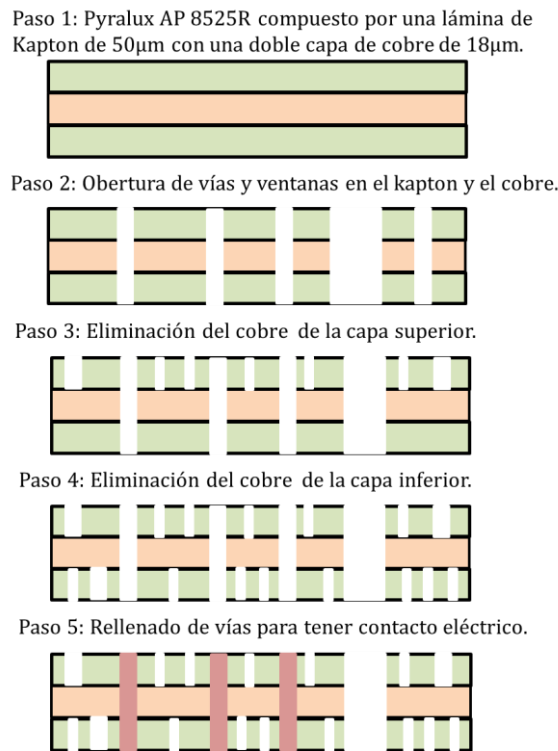


Figura 14: Proceso de fabricación del PCB de la tarjeta RFID en formato flexible.

Este procedimiento incluía la apertura vías mediante la técnica de ablación con láser de femtosegundo, los patrones, con las pistas, vías y *pads* de los componentes, de las dos capas de cobre por fotolitografía y grabado húmedo (*wet etching*) y, finalmente, el llenado de las vías para obtener contacto eléctrico entre las capas.

Este proceso incluía dos pasos de litografía, llevados a cabo en las instalaciones de sala blanca de Tekniker, donde el equipo de litografía estaba preparado para trabajar con obleas de 4 pulgadas, 100 mm de diámetro. Esto significaba que el tamaño PCB de la tarjeta RFID, incluyendo electrónica y antena, debía limitarse a un rectángulo que cupiera dentro de un círculo de 100 mm de diámetro, tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura 15:

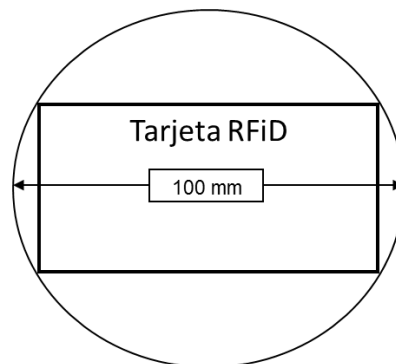


Figura 15: Límite máximo del tamaño de la tarjeta RFID en formato flexible.

Desde el punto de vista de fabricación del sustrato flexible, no había ninguna restricción en relación con la colocación de los componentes electrónicos, ya fuera en el interior o en el exterior de la antena. Sí que existían unas reglas de diseño que se tenían que cumplir para poder realizar los procesos anteriormente comentados, estas reglas de diseño, establecidas por Tekkniker, son las que muestra la Tabla 6:

Numero de capas	2 capas
Ancho de línea	50 μm
Distancia entre líneas	50 μm
Diámetro mínimo de vía	1000 μm

Tabla 6: Reglas de diseño para la fabricación de la tarjeta RFID en formato flexible establecidas por Tekkniker.

El ensamblaje de la mayoría de componentes sobre el sustrato flexible se realizó utilizando pasta de soldar para montaje superficial o *Surface Mount Solder Paste* (SMSP). Los componentes utilizados que no tenían encapsulado se ensamblaron mediante el método de *flip chip*, utilizando para ello cinta adhesiva 5460R de la compañía 3M, cinta adhesiva de conducción anisotrópica (ACA) [2]. Las ACA se componen de una resina adhesiva y partículas conductoras, formadas por polímeros de 6 micras de tamaño recubiertos de oro [3]. La concentración de las partículas conductoras está por debajo del umbral de percolación con el fin de evitar que las partículas entren en contacto entre sí en la dirección X Y, esto se resume esquemáticamente en la Figura 16:

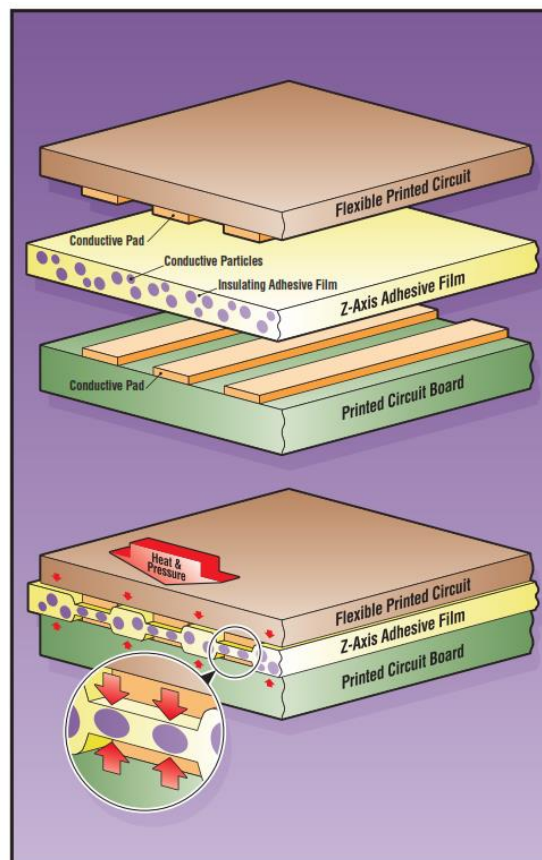


Figura 16: Representación del funcionamiento de las cintas adhesivas ACA [2].

Durante la unión entre el sustrato y el componente, se introduce una presión en la dirección Z de tal manera que se logra la conducción en la dirección Z mientras se mantiene el aislamiento en los otros ejes. La conducción eléctrica es proporcionada por contactos mecánicos entre las partículas conductoras y los contactos del componente y sustrato. Estos contactos son retenidos por la fuerza de adhesión del polímero adhesivo una vez curado.

A partir de la segunda versión de la tarjeta RFID, el diseño se realizará teniendo en cuenta las reglas de diseño de la tarjeta RFID flexible, por este motivo todas las tarjetas, ya fueran flexibles o rígidas eran iguales en su diseño.

4.2.- Diseño en detalle de la Tarjeta RFID.

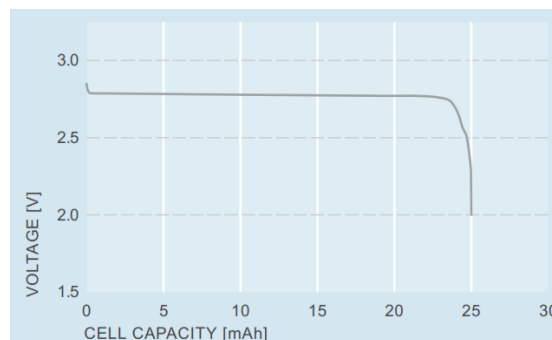
Seguidamente se describen en detalle los diferentes dispositivos que componen el sistema de la tarjeta RFID, tal y como se describen en el Diagrama 3 del diseño conceptual:

- Control de energía y batería.
- Microcontrolador.
- Transpondedor o *front-end* RFID.
- Sensores: de luz, de temperatura y humedad y de gas.
- Formato flexible.
- Versiones de la tarjeta.

4.2.1.- Control de energía y batería de la tarjeta.

Una de las premisas más importantes en la tarjeta RFID es, junto con el tamaño reducido y el formato flexible, que ha de tener un muy bajo consumo de energía. Por este motivo se alimenta a todos los componentes del sistema, en la medida de lo posible, con un voltaje de 1.8V. Este valor bajo de alimentación permite reducir el consumo, alargando así el tiempo de vida de la tarjeta. En la práctica, a 1.8 Voltios funciona toda la parte digital, mientras que la parte analógica funciona al valor nominal de la batería.

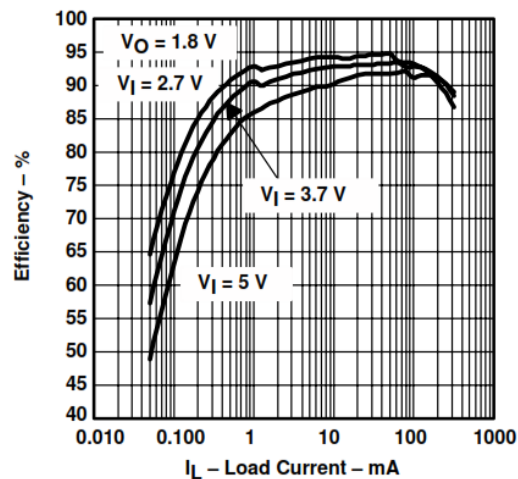
Como batería se escogió la Varta LPF 25 que, según su hoja de especificaciones, es capaz de suministrar un voltaje nominal de 3V y una capacidad nominal de 25 mAh. Esta batería tiene un formato flexible y ultra fino (440 μm) y está compuesta de litio y dióxido de manganeso. Una característica que hay que tener en cuenta es que, aunque su voltaje nominal sea de 3V, se descarga muy rápidamente hasta los 2.7V hasta que se agota. Este fenómeno puede observarse en la Gráfica 1:



Gráfica 1: Descarga continua de la batería LPF 25 sobre una resistencia de 2.7 KOhms según su hoja de especificaciones de la LPF 25.

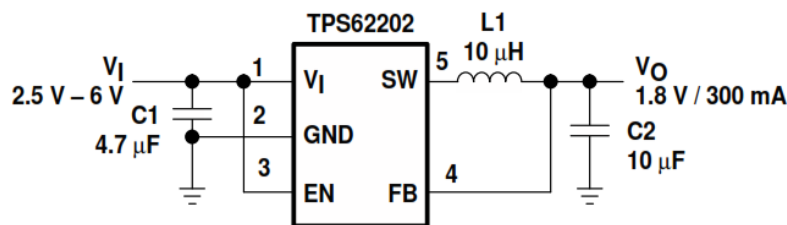
Se tuvo muy en cuenta esta bajada de tensión para seleccionar el resto de componentes de la tarjeta, para que pudieran funcionar a tensiones de 2.8V o inferiores.

Para obtener los 1.8V de la parte digital se utilizó un regulador no lineal, el TPS62202 de Texas Instruments, un convertidor reductor de continua a continua (DC/DC), de alta eficiencia, diseñado especialmente para baterías de litio. Como muestra la Gráfica 2, para tensiones de entrada (V_I) de 2.7V y tensiones de salida (V_O) de 1.8V la eficiencia se sitúa entre el 92% hasta el 95%, para consumos (I_L) superiores a 1mA.



Gráfica 2: Eficiencia en función del voltaje de entrada y la corriente de salida según la hoja de especificaciones del TPS62202.

Otro aspecto importante a destacar del TPS62202 es los pocos componentes externos, dos capacidades y una inductancia, necesarios para su correcto funcionamiento y su reducido tamaño (3x2.75mm). El Esquemático 1 muestra la aplicación típica del TPS62202:



Esquemático 1: Conexión de los componentes según la hoja de especificaciones del TPS62202.

Los reguladores no lineales DC/DC se basan en el control de interruptores, normalmente transistores, a frecuencias en el orden de kHz. Este control produce un ruido a la salida en forma de variación de tensión a la salida que, dependiendo de la aplicación, puede afectar al sistema. La Figura 17 muestra la variación de tensión a la salida del TPS62202. Esta medida se realizó utilizando un osciloscopio la compañía Textronix TDS2022B y con todos los componentes de la tarjeta como carga del regulador:

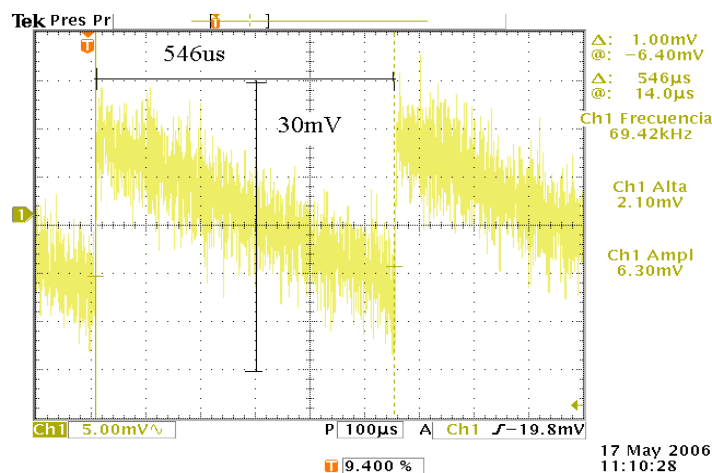


Figura 17: Variación de tensión y frecuencia de control a la salida del TPS62202.

La variación de tensión que introduce la implementación de un regulador no lineal, no afecta a nuestro sistema debido a que los $1.80V \pm 0.03V$ de salida alimentan a la parte digital de la tarjeta, donde las transiciones no se ven afectadas por los 30mV de ruido.

4.2.2.- Microcontrolador implementado en la tarjeta RFID.

Dos fueron las principales premisas para escoger el microcontrolador: el bajo consumo y las dimensiones. Después de una búsqueda en el mercado de los microcontroladores existentes se escogió un microcontrolador de la familia MSP430 de Texas Instruments. Ésta familia ofrece opciones de muy bajo consumo de energía, llegando a consumos de corriente de solo $0.2\mu A$.

Otra de las opciones que disponía esta familia es que se podían adquirir con un encapsulado en formato dado. Este formato consiste en que el chip no está encapsulado, reduciendo el espacio de montaje en placa al no tener patillas de conexión. La Figura 18 muestra un ejemplo de reducción de espacio cuando se utiliza el formato dado.

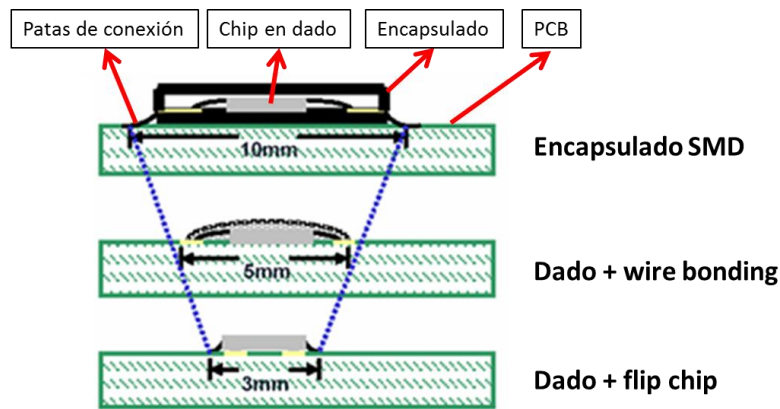


Figura 18: Diferencias entre los montajes de encapsulado SMD, *wire bonding* y *flip chip*.

Para conectar este componente se accede directamente a los *pads* del propio chip mediante diversas técnicas, como pueden ser las técnicas denominadas *flip-chip* o *wire bonding*.

Esta familia de microcontroladores ofrece la opción de alimentar la parte analógica a diferente tensión que la parte digital. Para el diseño de la tarjeta era necesario alimentar la parte digital a 1.8V para reducir el consumo y la parte analógica tenía el requerimiento del convertidor analógico a digital (ADC) que sólo podía funcionar a partir de 2.2V. Por lo tanto, para no tener que introducir un nuevo regulador de tensión, se alimentó la parte analógica con los 2.7V que proporcionaba la batería.

4.2.2.1.- Características del microcontrolador.

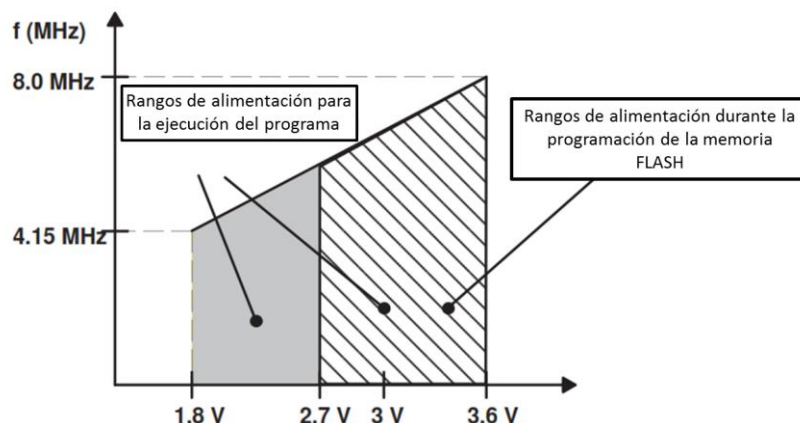
Las características de la familia de microcontroladores MSP430 de Texas Instruments son las siguientes:

- Diversos conjuntos de periféricos específicos para multitud de aplicaciones, que permiten adquirir datos con un ADC, generar voltajes de referencia, comunicaciones con otros dispositivos.
- Cinco modos de bajo consumo, necesarios para poder realizar una aplicación de muy bajo consumo.
- CPU de 16-bit RISC con registros de 16 bits que pueden realizar operaciones matemáticas para implementar diferentes aplicaciones, como por ejemplo filtros digitales.
- Dos temporizadores de 16 bits necesarios para aplicaciones donde se necesite precisión o control del tiempo.
- Un convertidor analógico a digital (ADC) de 12 bits para adquirir señales analógicas.

- Dos convertidores digital a analógico (DAC) de 12 bits para implementar otros voltajes en DC o señales periódicas.
- Dos interfaces de comunicación universales serie síncronos/asíncronos (USART) para las comunicaciones entre dispositivos.
- Compatible con el bus de comunicaciones de dos cables *Inter-Integrated Circuit* (I²C), generalmente utilizadas para comunicaciones con periféricos externos, por ejemplo memorias.
- Acceso directo a memoria (DMA) por parte de los periféricos, esta característica libera al procesador en los procesos donde los periféricos quieren acceder a memoria, pudiendo reducir el consumo general del microprocesador.
- 48 pines configurables de entrada/salida (E/S) para poder controlar cualquier dispositivo digital periférico con interfaz paralelo, como por ejemplo una *complex programmable logic device*(CPLD).

4.2.2.2.- Memoria interna del microcontrolador.

De los microcontroladores de la familia MSP430 se escogió el MSP430F1611 por ser el microcontrolador con 10KBytes de memoria de acceso aleatorio, RAM. Otros microcontroladores tenían más memoria FLASH, pero no podía ser utilizada en esta aplicación debido a que la parte digital del microcontrolador estaba alimentada a 1.8V y la memoria FLASH del microcontrolador necesita un mínimo de 2.7V para funcionar tal y como indica la Gráfica 3:



Gráfica 3: Ranges de alimentación mínimos y frecuencia máxima de procesado para la familia MSP430F16xx, según hoja de especificaciones.

Debido a la necesidad, por parte de la aplicación, de guardar datos en memoria no volátil, para poder recuperar los datos incluso si la batería se agotaba, y no poder utilizar la memoria FLASH interna del microcontrolador, se optó por utilizar una memoria FLASH externa que funcionara a 1.8V. La memoria FLASH escogida fue la

24AA1025 de la compañía Microchip Corporation. Las principales características de esta memoria son:

- Capacidad de almacenamiento de 1024Kbits.
- Rangos de alimentación de 1.8V a 5.5V.
- Compatible con el bus de comunicaciones I²C, con la posibilidad de conectar 8 dispositivos en el mismo bus.
- Hasta un millón de ciclos de borrado y escritura.
- 200 años de retención de datos.

La conexión entre el microcontrolador y la memoria FLASH externa se realizó mediante el bus I²C.

4.2.2.3.- Selección del Reloj de tiempo real.

Respecto a la frecuencia de procesado, el microcontrolador MSP ofrece un reloj interno denominado oscilador controlado digitalmente (DCO), que puede llegar hasta los 4MHz, que es la máxima frecuencia de trabajo a 1.8V de alimentación como indica la gGráfica 3. Este reloj interno puede tener variaciones de hasta el 10% en función de la temperatura y el voltaje de alimentación. Dependiendo de la aplicación, esta variación no influye en el buen funcionamiento de los procesos, pero hay otras aplicaciones que son muy sensibles a estas variaciones, como es el caso del periodo en que se toman los datos, que necesita un reloj a tiempo real. Por este motivo, es necesaria la utilización de un cristal externo que nos proporcione una señal de reloj muy estable.

Como reloj a tiempo real se escogió el MX1V-L2N-32,768 KHz de la compañía Micro Crystall Switzerland. Se escoge la frecuencia de 32.768 kHz por que 32.768 se corresponde a 2^{15} , así pues, utilizando un contador de 15 bits se obtiene 1 segundo exacto, por este motivo a estos cristales se les denomina de tiempo real.

Internamente los MSP430 disponen de tres diferentes relojes, el reloj principal o maestro (MCLK), que controla la velocidad de procesado de la CPU, el reloj secundario (SMCLK), que controla la velocidad de funcionamiento de los periféricos y el reloj auxiliar (ACLK), para los sistemas de tiempo real. Para la generación de estos relojes se dispone de diferentes, el ACLK se consigue a través de un cristal externo de baja frecuencia (LFXT), como el caso del MX1V-L2N-32,768 KHz, el MCLK y el SMCLK se pueden conseguir del cristal anterior, de un oscilador externo de frecuencia más elevada (XT) o del DCO. Todas las posibilidades se configuran mediante la programación de diferentes registros.

En el caso de nuestra aplicación se utilizan todos los relojes, el MCLK y el SMCLK, obtenido utilizando el DCO, para el control del procesador y los periféricos del microcontrolador y el ACLK, obtenido utilizando un cristal externo, para la generación de temporizadores a tiempo real.

4.2.2.4.- Consumo del microcontrolador.

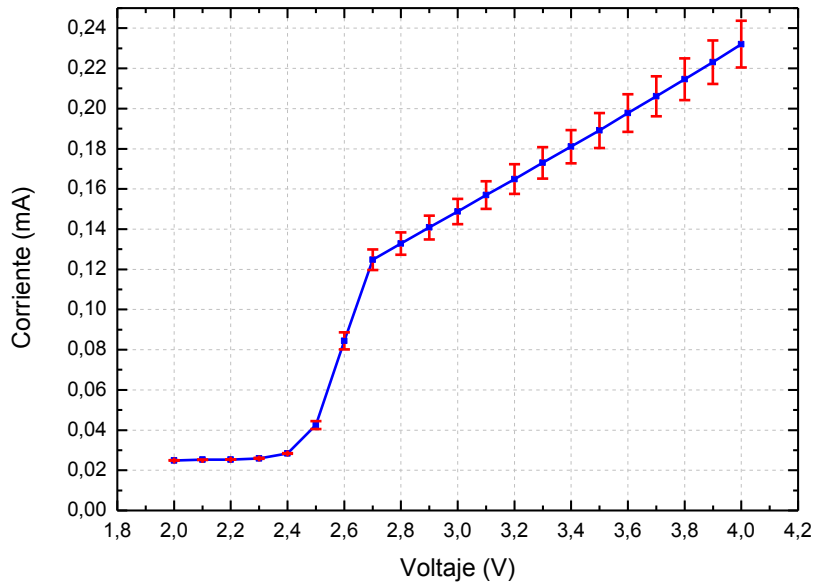
Mediante la desactivación de diferentes partes de procesamiento interno, los MSP430 consiguen rangos de muy bajo consumo en función del modo en que se quiera trabajar, según los datos de la hoja de características estos modos de funcionamiento son los siguientes:

- Modo activo, todos los relojes están activos. Consumos de hasta 400 μA dependiendo de la velocidad de proceso.
- Modo bajo consumo 0 (LPM0), se desactivan la CPU y el MCLK. Quedan activos el ACLK y el SMCLK. Consumos de hasta 60 μA dependiendo de la velocidad de proceso.
- Modo bajo consumo 1 (LPM1), se desactivan la CPU y el MCLK. Quedan activos el ACLK y el SMCLK. Si no se utiliza, se desactiva el DCO si no se utiliza en el modo activo. Consumos de hasta 50 μA dependiendo de la velocidad de proceso.
- Modo bajo consumo 2 (LPM2), se desactivan la CPU, el MCLK y el SMCK. Quedan activos el ACKL y el DCO si se utiliza en el modo activo. Consumos de hasta 11 μA dependiendo de la velocidad de proceso.
- Modo bajo consumo 3 (LPM3), se desactivan la CPU, el MCLK, el SMCK y el DCO. Queda activo el ACKL. Consumos de hasta 1.3 μA dependiendo de la velocidad de proceso.
- Modo bajo consumo 4 (LPM4), se desactivan la CPU, el MCLK, el SMCK y el DCO y se para el cristal del ACKL. Consumos de hasta 0.2 μA .

Para esta aplicación de la tarjeta RFID, no se utiliza el modo de bajo consumo 4 por que para salir de este modo es necesaria una interrupción externa y no se dispone de ningún elemento que pueda proporcionar dicha interrupción cuando la tarjeta está en el contenedor, sería necesario la implementación de un dispositivo externo, cuyo coste en consumo sería mayor que el ahorro de energía ofrecido por el modo de bajo consumo 4. Así pues, el modo de menor consumo que permite volver al modo activo es el modo de bajo consumo 3. Una vez en que el microcontrolador entra en este modo, una interrupción de un temporizador controlado por el ACKL hace que vuelva al modo activo.

Se realizó un test para determinar el consumo, utilizando tres microcontroladores MSP430F1611 y el convertidor DC/DC montados en el PCB de la tarjeta. Los microcontroladores se configuraron para que funcionaran con el reloj MCLK y el SMCKL a 1MHz, proporcionado por el DCO, el reloj ACKL estaba fijado a 32.768kHz. Estaban programados para realizar siempre el mismo bucle y en modo activo, sin entrar en ningún modo de bajo consumo. La parte digital del microcontrolador se fijó a los 1.8V de tensión suministrados por el DC/DC. Para realizar el test se fue variando el voltaje de alimentación, tanto del DC/DC como de la parte analógica del microcontrolador, de 2V a 4V con pasos de 0.1V. Las medidas se realizaron utilizando la fuente de alimentación de la compañía Keithley, modelo 2400 como fuente de alimentación de la PCB de la tarjeta, en serie con una resistencia de 100

Ω y 0.5% de tolerancia. Midiendo la caída de tensión en la resistencia con un voltímetro Fluke modelo 177, se obtuvieron los resultados que muestra la Gráfica 4:



Gráfica 4: Consumo del microcontrolador MSP430F1611 en función de la tensión de entrada.

Como puede apreciarse en la Gráfica 4, la corriente se mantiene a 25 μA hasta llegar a los 2.5V, a partir de este valor aumenta significativamente hasta los 110 μA para 2.7V. Desde este valor hasta los 4V la corriente aumenta de forma lineal hasta los 220 μA . Tras la realización de este test se puede concluir que existe una pequeña dispersión entre los tres microcontroladores. Otra conclusión es que a partir de los 2.5V el consumo aumenta muy significativamente. Asimismo se puede afirmar que el microcontrolador no superará los 130 μA en el modo activo.

4.2.2.5.- Programación del microcontrolador.

Como se ha comentado anteriormente en la descripción de los escenarios, la tarjeta puede estar en tres diferentes estados, en el estado de carga, en el estado de contenedor y en el estado de descarga. Para la programación de la tarjeta, el estado de carga y descarga prácticamente es el mismo, solo cambian los comandos recibidos por el lector. El Diagrama 4 muestra los estados y sus transiciones en los que se puede encontrar el microcontrolador:

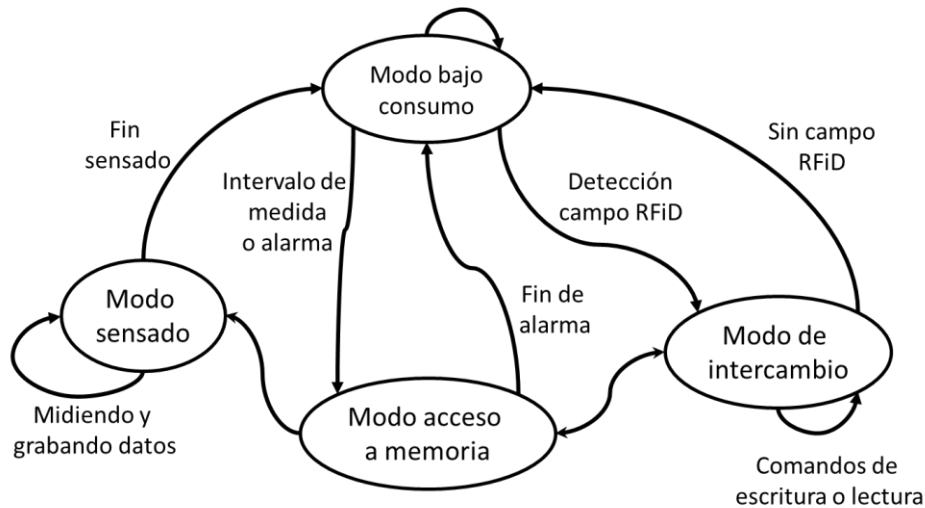


Diagrama 4: Estados y sus transiciones donde se puede encontrar el microcontrolador.

4.2.2.5.1.- Modo de bajo consumo.

En el modo de bajo consumo el microcontrolador se encuentra en LPM3 esperando a que ocurra uno de los tres posibles eventos que hacen que cambie de estado. Estos eventos son, que se supere el intervalo de medidas, que se genere una alarma o que se detecte la presencia de un lector mediante la detección del campo electromagnético.

Este modo está asociado únicamente al estado contenedor, donde la tarjeta solo toma medidas periódicamente o por alarma, estando en reposo el resto del tiempo.

Estando en presencia del lector, el microcontrolador nunca llegará al estado de bajo consumo ni al estado de sensado.

Si se cumple el intervalo de medidas o existe una alarma, en este caso de luz, el microcontrolador va al estado de acceso a memoria. Si se detecta la presencia del lector, el microcontrolador pasa al estado de modo de intercambio.

4.2.2.5.2.- Modo de acceso a memoria.

En el estado de acceso a memoria el microcontrolador direcciona la memoria para su posible utilización, ya sea para guardar datos en ella en el estado de sensado, guardar las alarmas o para leer o escribir datos en el caso de presencia del lector.

Este modo está asociado a todos los estados de la tarjeta, ya que direcciona la memoria para ser utilizada correctamente y en el formato correspondiente de la norma ISO/IEC 15693.

4.2.2.5.3.- Modo de intercambio de datos.

En el modo de intercambio de datos el microcontrolador solo se dedica a interpretar los comandos recibidos mediante la comunicación RFID con el lector. Cambiará de modo cuando desaparezca el campo magnético asociado al lector, pasando al modo de bajo consumo, o cuando el lector realice cualquier petición, pasando al estado de acceso a memoria.

Este modo se puede asociar tanto al estado de carga como al de descarga.

4.2.2.5.4.- Modo lectura del sensor.

En el modo de sensado el microcontrolador lleva a cabo el proceso de medida secuencialmente, empieza tomando las medidas del sensor de temperatura y humedad y continúa con el sensor de gas. Una vez acaba la secuencia, graba los datos en memoria y pasa al modo de bajo consumo.

Este modo está asociado únicamente al estado contenedor, donde la tarjeta solo toma medidas periódicamente, estando en reposo el resto del tiempo.

Estando en presencia del lector, el microcontrolador nunca llegará al estado de bajo consumo ni al estado de sensado.

Una de las ventajas de utilizar un microcontrolador es que la tarjeta puede ser reprogramada y cambiar su funcionalidad cuantas veces sea necesario. Por ejemplo, puede ser programada para que solo guarde los datos de alarmas cuando se rebasa un límite determinado, o puede guardar todos los datos que se han producido en un trayecto. En nuestro caso se programó para obtener todos los datos del trayecto, permitiendo ser estudiados con posterioridad. Las otras posibles funcionalidades quedan fuera de los objetivos de la tesis.

4.2.3.- Transpondedor o front-end RFID.

El transpondedor o *front-end* RFID de la tarjeta es el encargado de establecer la comunicación con el lector y, a su vez, recoger la energía del campo magnético generado por el lector. Ésta comunicación está basada en el acoplamiento magnético que se produce en las antenas del lector y de la tarjeta.

El transpondedor está diferenciado en dos partes, la analógica, encargada de la demodulación y la modulación, y la digital, encargada de la decodificación y codificación.

4.2.3.1.- Parte analógica del transpondedor.

El principio de funcionamiento del acoplamiento inductivo es que el paso de una corriente eléctrica por una inductancia o antena crea un campo magnético proporcional (ley de Ampère). También es conocido que todo flujo magnético variable en el tiempo que atraviesa una superficie cerrada por un circuito o antena, induce una diferencia de potencial en este circuito (ley de Faraday).

La inductancia por la que pasa una corriente eléctrica es la antena del lector, en este caso los datos tomados son los del lector del proyecto, esta corriente eléctrica varía a 13.56MHz. La Ecuación 6 calcula el campo magnético aproximado generado por el lector:

$$B = \frac{\mu_0 I N r_1^2}{2(d^2 + r_1^2)} \cong 75nT \quad \text{Ecuación 6}$$

donde $\mu_0 = 4\pi * 10^{-9}$, $I = \frac{P}{V} = \frac{200mW}{5V} = 0.04mA$, $N = 1$ (Antena lector), $d = 0.1m$ y $r = 0.28m$ (Antena lector).

Para que la tarjeta pueda acoplarse y recibir el campo magnético generado por el lector necesita de una inductancia o antena junto con una capacidad. Estos componentes forman un tanque resonante cuya frecuencia de resonancia tiene que ser 13.56MHz.

4.2.3.1.1.- Antena del transpondedor.

Para la tarjeta se diseñó, por parte del *Istituto per la Microelettronica e Microsistemi* (IMM, Italia), una antena que permitiera alcanzar la máxima distancia de comunicación teniendo en cuenta el tamaño máximo de la tarjeta. La antena resultante, realizada en la misma PCB, tenía unas dimensiones de 58.1x52.7mm², las pistas tenían un grosor de 0.3mm y contaba con 5 espiras. Una de las novedades de esta antena era que podía realizarse un ajuste fino a la sintonización de la frecuencia deseada mediante un condensador diseñado en el propio PCB, un electrodo del condensador se disponía en la capa trasera del PCB siendo un rectángulo de 83.25mm², el otro electrodo era una matriz de 6x4 pequeños cuadrados de 2.25mm², estos cuadrados podían ser desconectados de la matriz, variando así el valor de la capacidad. La Figura 19 muestra el dibujo de la antena junto con sus dimensiones:

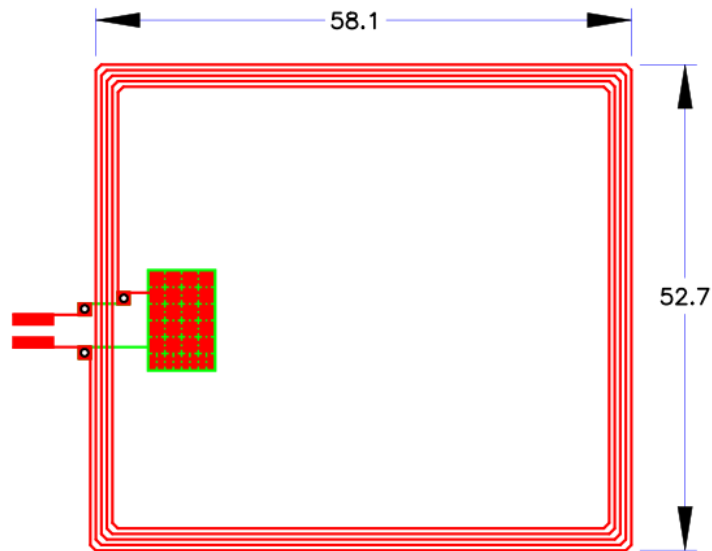
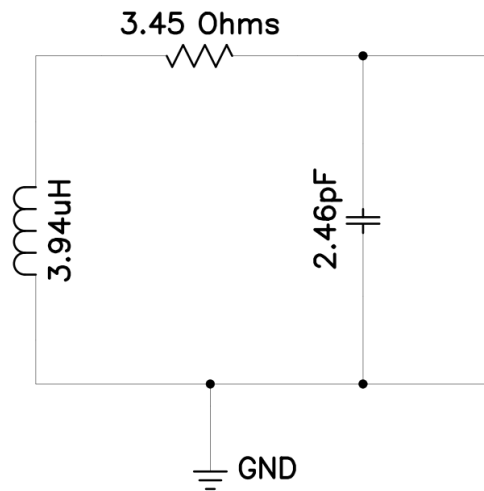


Figura 19: Implementación de la antena diseñada para la tarjeta RFID.

La implementación de la antena de la Figura 19 resulta en un circuito equivalente que se muestra en el Esquemático 2:



Esquemático 2: Circuito equivalente de la antena.

Para sintonizar el tanque resonante a la frecuencia de 13.56MHz se utilizó una capacidad variable. El valor de esta capacidad se obtuvo de la Ecuación 7:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \rightarrow C = \frac{1}{L(2\pi * f_r)^2} \cong 32.5pF \quad \text{Ecuación 7}$$

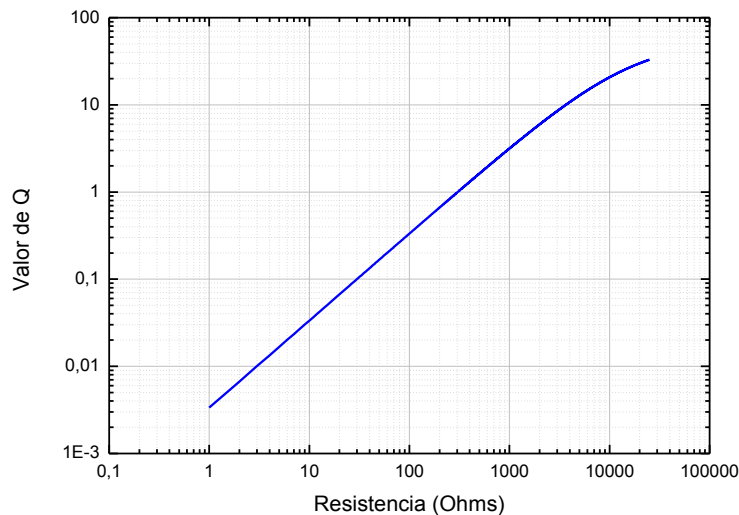
4.2.3.1.2.- Factor de calidad Q.

La comunicación mediante modulación de carga se realiza variando el valor de una resistencia en paralelo con el tanque resonante, tal y como establece el estándar ISO/IEC 15693, explicado en el anexo, esto implica una disminución en el factor de calidad Q del tanque resonante. Las tarjetas RFID comerciales tienen valores de Q entre 30 y 80. Valores más altos de Q generalmente no son adecuados para las comunicaciones porque la información, tanto en amplitud modulada como en frecuencia modulada, contenida en las bandas laterales se ve atenuada por la respuesta en frecuencia característica de filtro pasa banda de los tanques resonantes. El valor de la Q puede ser calculado a partir de la Ecuación 8:

$$Q \cong \frac{1}{\frac{R_{Ant}}{\omega_0 L} + \frac{\omega_0 L}{R_L}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde R_{Ant} es la resistencia serie de la antena, R_L es la resistencia de carga y se consideró que $\omega_0 L \gg R_L$ a las frecuencias de relevancia.

Con estos datos se buscó el valor de la resistencia de carga adecuada para un valor de Q entre 30 y 50. La Gráfica 5 muestra los valores de Q en función de la resistencia de carga:



Gráfica 5: Valor de Q en función de la resistencia de carga.

Con los valores de Q obtenidos se escogió el valor de 11kΩ para la resistencia de carga que proporcionaba una Q de valor 36.88. Para poder realizar las comunicaciones de respuesta entre la tarjeta y el lector se necesitaba cambiar el valor de la carga. Este cambio se realizó mediante dos resistencias de 100Ω controladas por dos transistores, cuando los transistores estaban activos la resistencia de carga pasaba a ser el paralelo de 11 kΩ y 100Ω, siendo el resultado $\approx 100\Omega$, de este modo el valor de Q pasaba a ser de ≈ 0.33 .

4.2.3.1.3.-Diferencia de potencial, voltaje RFID del transpondedor.

La diferencia de tensión producida por el campo magnético del lector en la antena de la tarjeta, viene dada por la Ecuación 9:

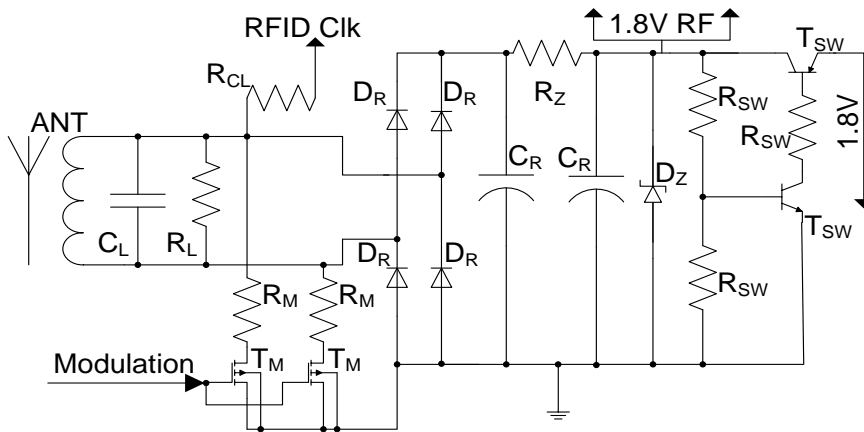
$$V = 2\pi fNSQB \cong 3V \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde $f = 13.56\text{MHz}$, $N = 5$, $S = 0.003\text{m}^2$ (Antena tarjeta), $Q_{11k\Omega} = 24.51$ y $B \cong 75\text{nT}$.

Este es un voltaje en alterna a 13.56MHz por lo que es necesario convertirlo a continua y regularlo a 1.8V para alimentar a la tarjeta. Para ello se utilizan varios componentes, en primer lugar un puente de diodos, el HSMS-2828 de la compañía Agilent Technologies de muy pequeñas dimensiones (3x2.65mm), que rectifica la tensión alterna y la convierte a tensión continua junto con una capacidad para filtrar el ruido. Como regulador de voltaje se escogió regulador lineal, un diodo zener de 1.8V, el CMDZ1L8 de la compañía Central Semiconductor Corporation con medidas de 1.2x2.4 mm.

Mediante una resistencia colocada antes del puente rectificador se extrae el reloj de RFID a la frecuencia de 13.56MHz que utilizará la parte digital del transpondedor.

Como últimos componentes se introdujeron unos transistores para poder cambiar la alimentación de la tarjeta. En el Esquemático 3 se encuentran todos los componentes de la parte analógica del transpondedor.



Esquemático 3: Esquemático del transpondedor RFID implementado en la tarjeta.

Tal y como muestra el Esquemático 3, el transpondedor RFID está compuesto por: un tanque resonante (antena y CL), la modulación de carga (RL, RM y TM), un puente rectificador (DR), un regulador de voltaje lineal para alimentar la parte digital del transpondedor (CR, RZ and DZ), el extractor del reloj RFID (RCL) y la alimentación para la parte digital del resto de la tarjeta (RSW and TSW).

4.2.3.2.- Parte digital del transpondedor.

La parte digital del transpondedor es la encargada de decodificar la información enviada por el lector y codificar la correspondiente a la respuesta hacia el lector. El encargado de la decodificación no puede ser el microcontrolador, esto es debido a que su parte digital está alimentada por 1.8V y, por este motivo, el reloj de procesado ha de ser como máximo 4MHz, impidiendo su correcta funcionalidad con señales RFID de 13.56MHz.

Así pues, se decidió realizar el proceso de decodificación y codificación en un dispositivo programable digital, o en inglés *Complex Programmable Logic Device* (CPLD). Se escogió la CPLD ispMATCH 4064Z, de la compañía Lattice Semiconductors Corporation. Las principales características por lo que esta CPLD fue escogida son:

- Voltaje de alimentación de 1.8V.
- Consumo de corriente en estático de 40 μ A.
- Hasta 64 macroceldas para programar el diseño.
- Frecuencia máxima de procesado de 168 MHz.
- Encapsulado de 48 pines.

Para programar esta CPLD se pueden utilizar los lenguajes de programación *Very High Speed Integrated Circuit (VHSIC) Hardware Description Language (VHDL)* o Verilog, llamados lenguajes de descripción de circuitos digitales. En nuestro caso el lenguaje utilizado fue VHDL.

Para nuestra aplicación la CPLD implementa el protocolo de comunicaciones lector-tarjeta y tarjeta-lector que se especifica en la norma ISO/IEC 15693, que se puede consultar en el apéndice, en concreto la decodificación de la modulación por posición de pulso (PPM) 1 a 4 junto con el 100% de modulación de la amplitud (ASK), en el caso de la comunicación lector-tarjeta, y la codificación mediante codificación Manchester, ver apéndice, y modulación en frecuencia (FSK), en el caso de la comunicación tarjeta-lector. El Diagrama 5 muestra el diagrama de flujo del programa de la CPLD:

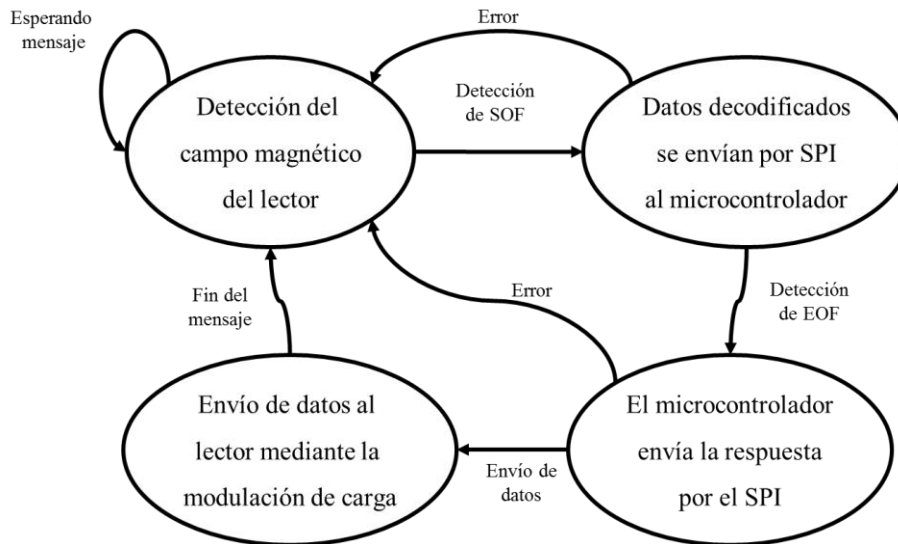


Diagrama 5: Diferentes estados y sus transiciones programados en la CPLD para realizar la codificación y decodificación de los mensajes en la tarjeta.

Junto con la CPLD se implementa un oscilador a 13.56MHz, el AMB3 de la compañía Abracom Corporation. Este oscilador proporcionará el reloj en el momento que se realice las comunicaciones lector-tarjeta, debido a que en la modulación 100% ASK deja de haber señal durante el tiempo de símbolo, ver apéndice.

La comunicación con el microcontrolador se realizó mediante el bus serie SPI, donde la CPLD es el master y el microcontrolador el esclavo. El Diagrama 6 muestra el diagrama de bloques de la programación de la CPLD:

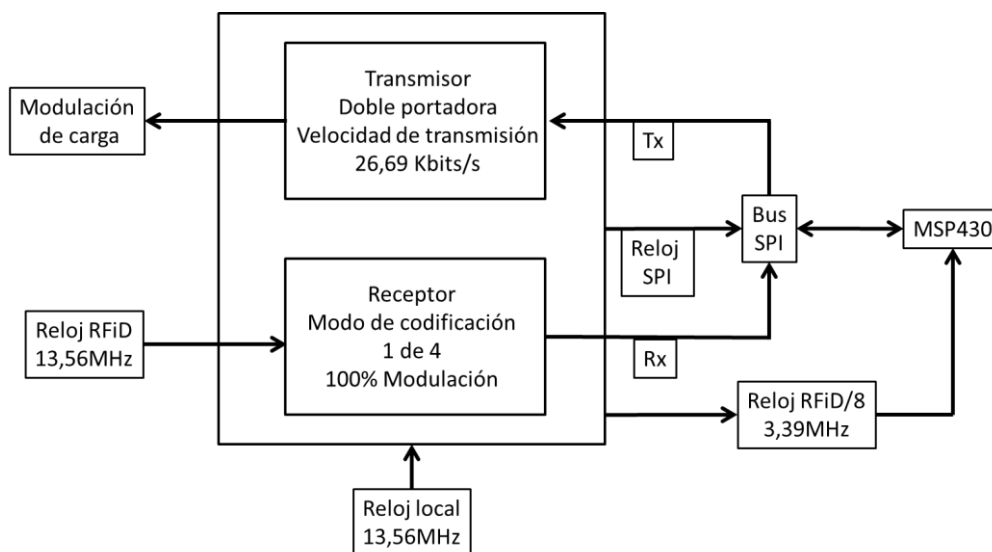


Diagrama 6: Diagrama de bloques de la programación de la CPLD.

Cuando la tarjeta recibe el campo magnético del lector, la CPLD envía un reloj de 3.39MHz al microcontrolador, éste lo utiliza como reloj principal para poder realizar las tareas de comunicación y cumplir con los tiempos establecidos en la norma ISO/IEC 15693 de una forma precisa.

4.2.3.2.1.-Proceso de recepción.

La comunicación empieza con la detección por parte de la CPLD del símbolo de principio de trama (SOF), definido en el apéndice. Después del SOF, cada 75.52 μ s se obtiene un símbolo que corresponde a 2 bits de la trama, definido en el apéndice. Cada vez que la CPLD decodifica un símbolo, lo envía al microcontrolador mediante dos ciclos de reloj del SPI con sus respectivos 2 bits. El proceso finaliza con la detección del final de trama (EOF) definido en el apéndice.

La Figura 20 muestra la simulación de la decodificación de una trama enviada por el lector en modulación PPM.

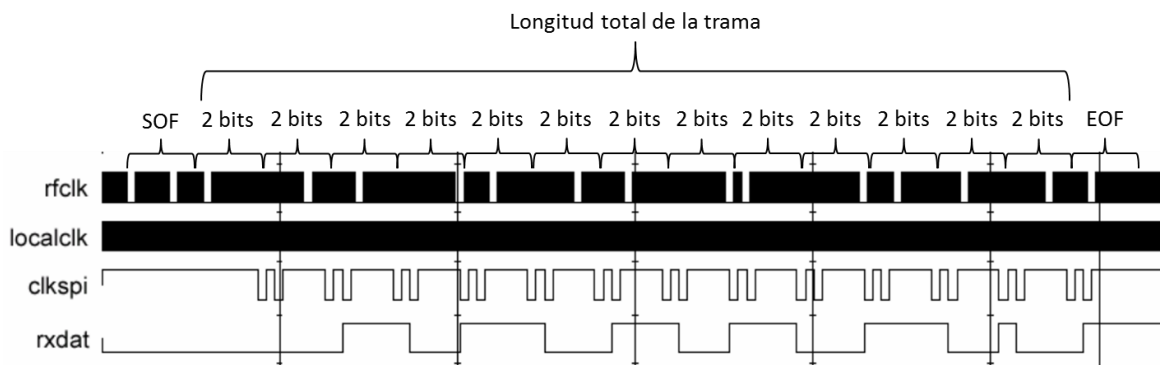


Figura 20: Simulación del programa de decodificación de una trama.

En la Figura 20 los nombres de las señales se corresponden con: *rfclk* al reloj RFID, *localclk* al reloj de la CPLD, *clkspi* al reloj del SPI y *rxdat* a los datos del SPI enviados desde la CPLD.

La Figura 21 muestra las señales de la decodificación de otra trama obtenidas con el osciloscopio de la compañía Tektronix TDS2022B:

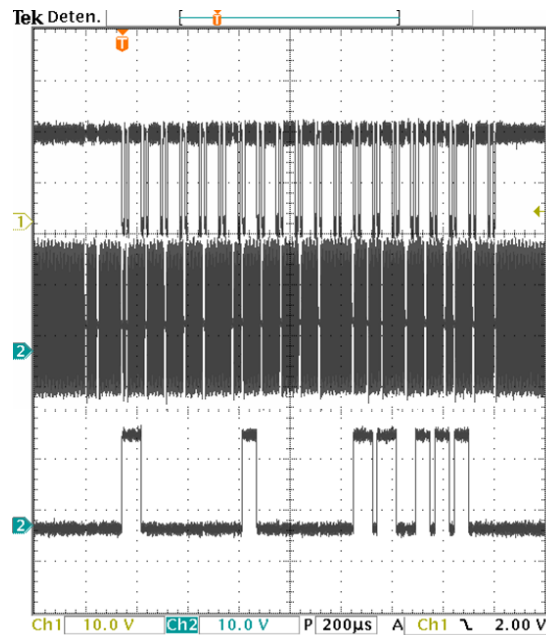


Figura 21: Señales correspondientes a la decodificación de una trama enviada por el lector en modulación PPM.

En la Figura 21 la primera señal corresponde al reloj SPI, la segunda corresponde al reloj RFID y la tercera a los datos SPI.

4.2.3.2.2.- Proceso de transmisión.

El proceso de transmisión empieza cuando el microcontrolador procesa un comando, enviado por el lector, y envía la respuesta. La CPLD va recibiendo los datos de la respuesta y los va codificando utilizando codificación Manchester y modulación FSK, ver apéndice. La Figura 22 muestra la simulación del envío de una trama desde la tarjeta al lector.

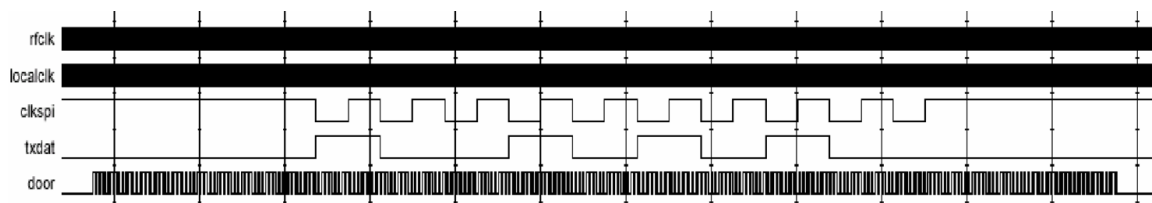


Figura 22: Simulación del envío de una trama desde la tarjeta al lector.

En la Figura 22 los nombres de las señales se corresponden con: *rfclk* al reloj RFID, *localclk* al reloj de la CPLD, *clkspi* al reloj del SPI, *txdat* a los datos del SPI enviados desde el microcontrolador y *door* a la señal de control de los transistores de modulación de carga.

La Figura 23 muestra parte de las señales de respuesta obtenidas con el osciloscopio de la compañía Textronix TDS2022B:

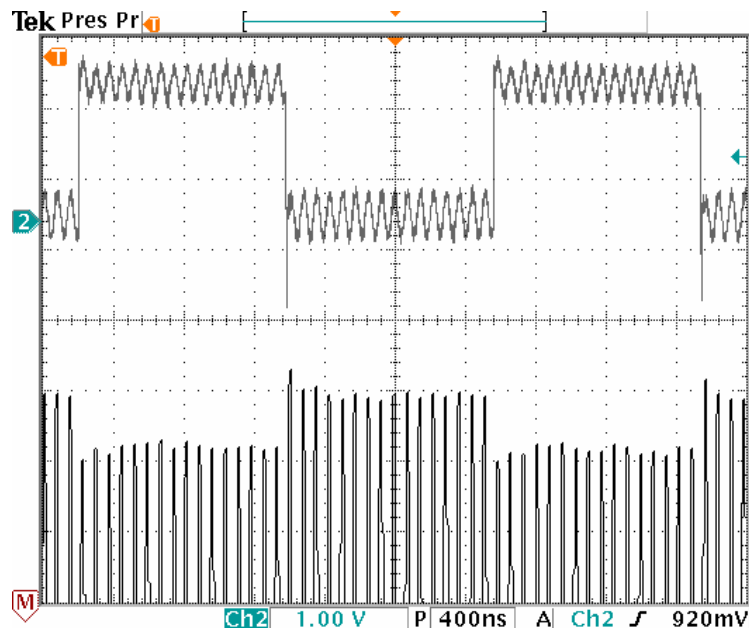


Figura 23: Cómo afecta la modulación de carga sobre la señal enviada por el lector. La señal superior corresponde al control de la modulación de carga y la inferior a la señal en el tanque resonante.

En la Figura 23 se observa como la señal de campo enviada por el lector, parte inferior, disminuye cuando los transistores de modulación de carga se activan, parte superior. Esta disminución de campo es debida a que la impedancia de la tarjeta disminuye, por lo que la corriente del tanque resonante aumenta. De esta forma es como el lector detecta la señal transmitida por la tarjeta.

4.2.4.- Sensores.

En esta sección se presentan los sensores implementados en la tarjeta junto con su descripción y acondicionamiento electrónico. Los sensores son los siguientes:

- Sensor de temperatura y humedad.
- Sensor de luz.

En el capítulo 7 se detalla exhaustivamente todo lo concerniente a la matriz de sensores de gas.

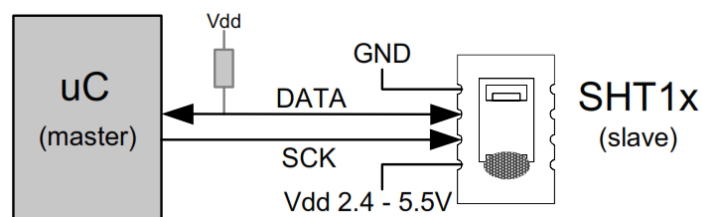
4.2.4.1.- Sensor de temperatura y humedad.

El sensor de temperatura y humedad tiene como cometido medir estos parámetros para comprobar si ha roto la cadena de frío, en el caso de temperatura, y como ha variado la humedad en el ambiente.

Como sensor de temperatura y humedad se escogió el SHT15, de la compañía Sensirion, por las siguientes características:

- Dispositivo autocalibrado.
- Multisensor, integrando temperatura y humedad en un solo dispositivo.
- Interfaz digital de dos hilos que utiliza un protocolo similar al I²C para conectarse a un microcontrolador.
- Rango de operación en temperatura de -40 a 123.8°C y de 0 a 100% RH en humedad.
- Precisión de 0.4°C de temperatura y ±2%RH de humedad.
- Resolución de hasta 0.01°C y 0.03%RH dependiendo de su configuración.
- Consumo en modo dormido de 0.3µA.

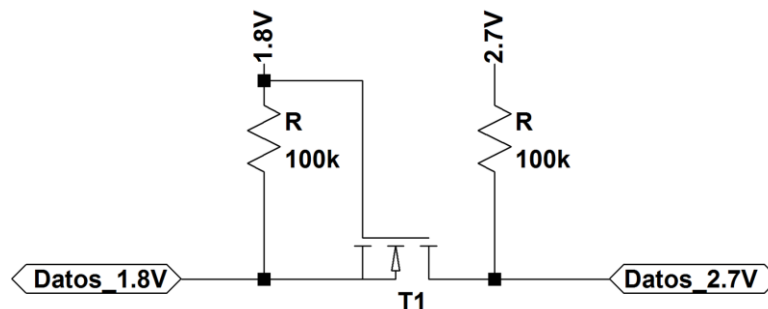
Para su correcto funcionamiento, el SHT15 necesita de 2.4V a 5.5V de alimentación. En el Esquemático 4 se muestra el interfaz de conexión entre el SHT15 y el microcontrolador:



Esquemático 4: Conexiones de alimentación y del interfaz con el microcontrolador obtenidas de la hoja de especificaciones del SHT15.

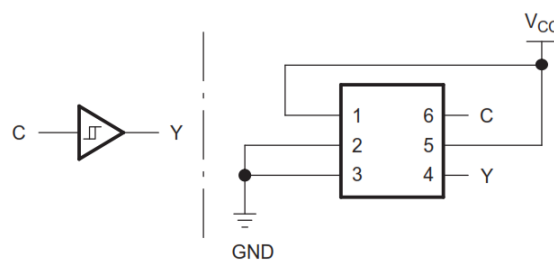
En el interfaz de comunicación el SHT15 es el esclavo y el microcontrolador es el maestro.

El problema principal fue debido a que la parte digital del microcontrolador funcionaba a 1.8V y para poder comunicarse con el SHT15 se necesitaban adaptar los niveles de tensión. Para realizar esta adaptación en la línea bidireccional de datos, se utilizó un transistor MOSFET tipo N, el FDN359AN de la compañía Fairchild Semiconductor junto con dos resistencias de 100kΩ configuradas como muestra el Esquemático 5 [4]:



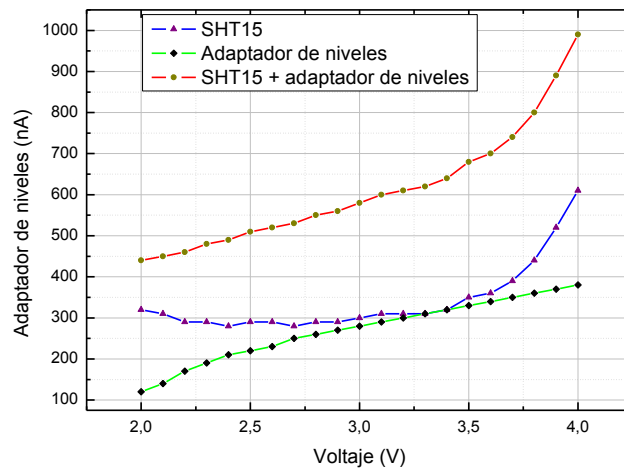
Esquemático 5: Adaptación niveles de tensión mediante el transistor MOSFET tipo n FDN359AN.

Para adaptar el nivel de tensión en la línea de reloj se utilizó el SN74AUP1T98 de la compañía Texas Instruments, que permite adaptar los 1.8V de la parte digital del microcontrolador al voltaje de alimentación del SHT15. El SN74AUP1T98 permite 9 configuraciones de puertas digitales diferentes, por lo que el montaje se tuvo que realizar con la configuración de no inversor que muestra el esquemático:



Esquemático 6: Configuración del SN74AUP1T98 en modo no inversor según la hoja de especificaciones.

Para comprobar el consumo del SHT15 se realizó el mismo experimento que con el microcontrolador. Se montó el SHT15 solo y después se añadió el adaptador de niveles en la PCB de la tarjeta. La prueba consistió en variar el voltaje de alimentación, de 2V a 4V con pasos de 0.1V y comprobar su consumo. Para realizar la medida se utilizó la fuente de alimentación de la compañía Keithley, modelo 2400 como fuente de alimentación de la PCB de la tarjeta, en serie con una resistencia de 1MΩ y 0.5% de tolerancia. Midiendo la caída de tensión en la resistencia con un multímetro Fluke modelo 177, se obtuvieron los resultados que muestra la Gráfica 6:



Gráfica 6: Consumo del sensor SHT15 junto con el adaptador de tensión.

En la Gráfica 6 se aprecia como el consumo en estático de los componentes que componen el sensor de temperatura y humedad no supera los 550nA.

4.2.4.2.- Sensor de luz.

El cometido del sensor es detectar la presencia de luz cuando se produce la abertura de puertas del contenedor en cualquier momento del trayecto y generar una alarma. Por este motivo se optó por no cuantificar el nivel de luz y simplemente generar una alarma si se superaba un cierto umbral.

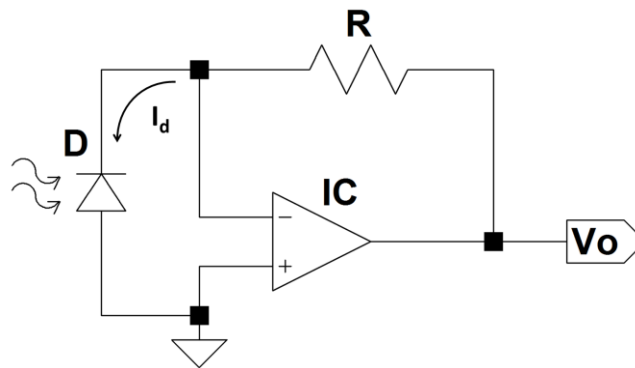
El sensor de luz elegido fue el fotodiodo SLCD-61N1 de la compañía Silonex Inc. Este sensor ofrece las siguientes características:

- Rango desde el visible hasta el infrarrojo cercano, 400nm-1100nm, ya que es de silicio.
- Gran precisión y estabilidad en la detección.
- Baja capacidad, 0.4nF, y frecuencia de trabajo superior a 1MHz.
- Corriente de cortocircuito lineal, 1.5 μ A @ $V_{inversa}= 5V$.
- Encapsulado SMD con medidas 5.08x2.54mm.

El sensor de luz convierte variaciones de luz en variaciones de corriente. El microcontrolador solo puede detectar variaciones de tensión, por este motivo se implementó una etapa de transimpedancia, que convierte la corriente en tensión utilizando un operacional y una resistencia. El voltaje de salida de la etapa de transimpedancia viene dado por la Ecuación 10:

$$V_o = R * I_d \quad \text{Ecuación 10}$$

El Esquemático 7 muestra la conexión de los componentes utilizados para la etapa de transimpedancia:



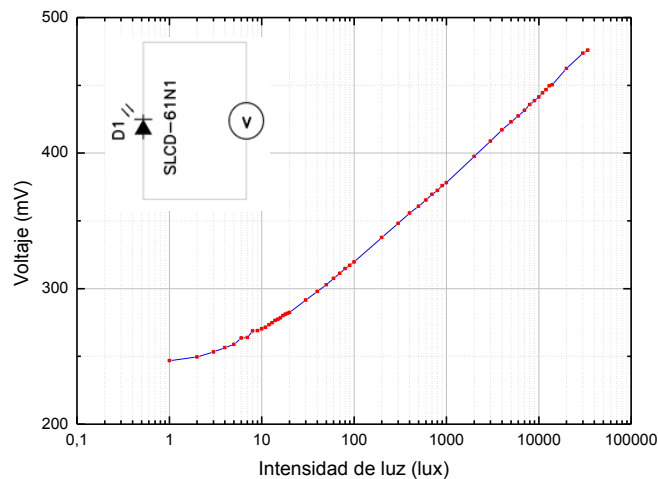
Esquemático 7: Conexión del sensor de luz con el amplificador operacional de transimpedancia.

Se escogió el OPA349 de la compañía Texas Instruments como el amplificador operacional de la etapa de transimpedancia. El OPA349 ofrecía un consumo de $1\mu\text{A}$ y un encapsulado con medidas de $2.15 \times 2.30 \text{mm}$ ocupando el mínimo espacio en el PCB de la tarjeta.

Se realizó la caracterización del fotodiodo, para ello se utilizó una bombilla halógena de 12V de alimentación y 20W de consumo de la compañía Osram y una fuente de alimentación de la compañía Keithley, modelo 2400, dicha fuente se utilizó para variar la potencia suministrada a la bombilla y con ello la potencia de luz emitida.

Para caracterizar el fotodiodo se necesitaba conocer el voltaje en circuito abierto y la corriente en circuito cerrado, además, comprobar la funcionalidad de la etapa de transimpedancia. Para ello se llevaron a cabo tres pruebas de laboratorio.

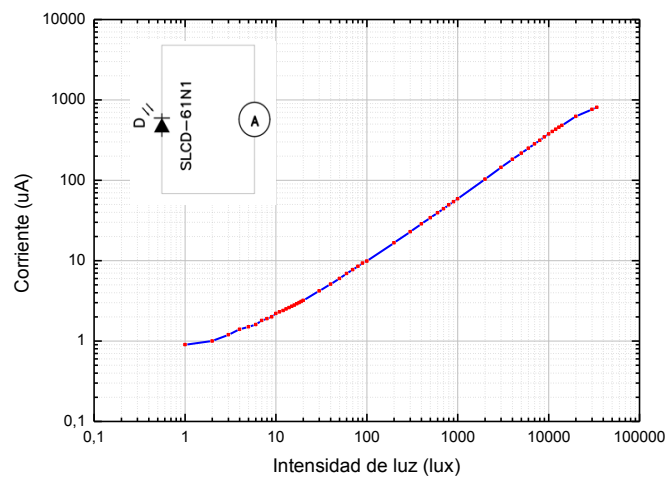
La primera prueba fue la medición del voltaje del fotodiodo en circuito abierto en función de la intensidad de luz incidente. Para esta prueba se conectó el multímetro Fluke, modelo 177, en paralelo con el fotodiodo midiendo voltaje, tal y como indica el Gráfica 7. Para conocer la luz que emitía la bombilla se utilizó un luxómetro de la compañía LT Lutron, modelo LX-102, cuya medición venía dada en lux, lúmenes por cm^2 .



Gráfica 7: Configuración para medir el voltaje en abierto del fotodiodo SLCD-61N1 en función de la intensidad de luz incidente, junto con los resultados obtenidos experimentalmente.

En la Gráfica 7 se puede apreciar la dependencia del fotovoltaje generado en función de la intensidad de luz incidente, que coincide con el comportamiento esperado, tres décadas de linealidad sin superar los 0.5V.

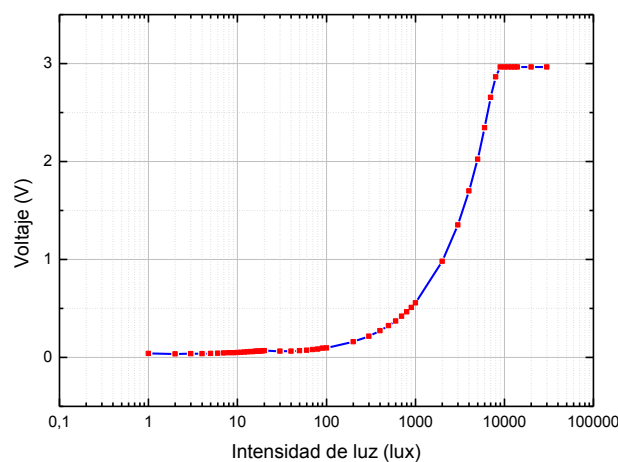
La segunda prueba fue la medición de la corriente de cortocircuito en función de la intensidad de luz incidente. Para esta prueba se conectó el multímetro Fluke, modelo 177, en serie con el fotodiodo midiendo corriente, tal y como indica la Gráfica 8. Para conocer la luz que emitía la bombilla se utilizó el LX-102 de LT Lutron.



Gráfica 8: Configuración para medir la corriente de cortocircuito del fotodiodo SLCD-61N1 en función de la intensidad de luz incidente, junto con los resultados obtenidos experimentalmente.

En la Gráfica 8 se puede apreciar la dependencia de la fotocorriente generada en función de la intensidad de luz incidente, que coincide con el comportamiento esperado, tres décadas de linealidad hasta la saturación.

Para la tercera prueba se realizó un PCB con los componentes que muestra el Esquemático 7, donde el IC era el OPA349 y la R una resistencia de $10k\Omega$ que generara una alarma sobre los 3000lux . Se utilizó una fuente de alimentación de la compañía Promax, modelo FAC-662B para alimentar el módulo de transimpedancia a 3V . Para conocer la luz que emitía la bombilla se utilizó el LX-102 de LT Lutron y se utilizó el multímetro Fluke, modelo 177, para medir el voltaje a la salida del módulo de transimpedancia. La Gráfica 9 muestra los resultados obtenidos:



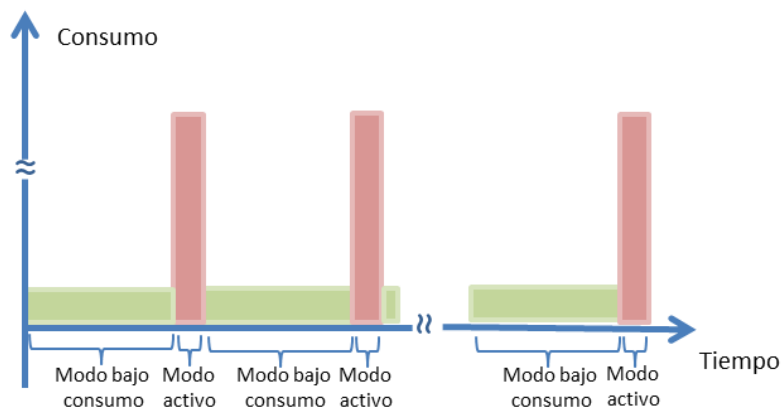
Gráfica 9: Voltaje a la salida del módulo de transimpedancia en función de la intensidad de luz incidente.

De la Gráfica 9 se concluye que, sabiendo que el MSP430F1611 cambia de estado a 0.8 veces el valor de la alimentación y que la alimentación es de 1.8V , la alarma se activará aproximadamente sobre el valor de iluminación de $\approx 3000\text{lux}$, nivel equivalente a la iluminación ambiente de una oficina en un día soleado. Con dicho nivel de iluminación, el voltaje de salida del módulo de transimpedancia es aproximadamente de $\approx 1.44\text{V}$, que a su vez concuerda con el valor de fotocorriente generada por el fotodiodo según la Gráfica 8, aproximadamente $110\mu\text{A}$.

Como se ha comprobado, estos valores se han obtenido utilizando una resistencia de $10k\Omega$ en el módulo de transimpedancia. Variando el valor de esta resistencia, se varía el punto de activación de la alarma, valores más altos de resistencia darán lugar a alarmas más sensibles a la intensidad lumínica y, a su vez, valores más bajos de resistencia se darán lugar a alarmas mucho menos sensibles.

4.2.5.- Consumos totales de la tarjeta RFID.

Una vez elegidos todos los componentes y conocidos los consumos que los caracterizan, según sus hojas de especificaciones, era necesaria la realización de un análisis de cuánto tiempo, dependiendo de la frecuencia de sensado, tardaría una tarjeta RFID en dejar de funcionar si se utilizaba la batería LPF25 de 25mAh. Como se ha comentado, la tarjeta RFID puede estar en varios modos de funcionamiento, este análisis compara los modos activo y de bajo consumo que afectan al uno de la batería. La Gráfica 10 muestra en un diagrama temporal como la tarjeta cambia de estado, variando su consumo:



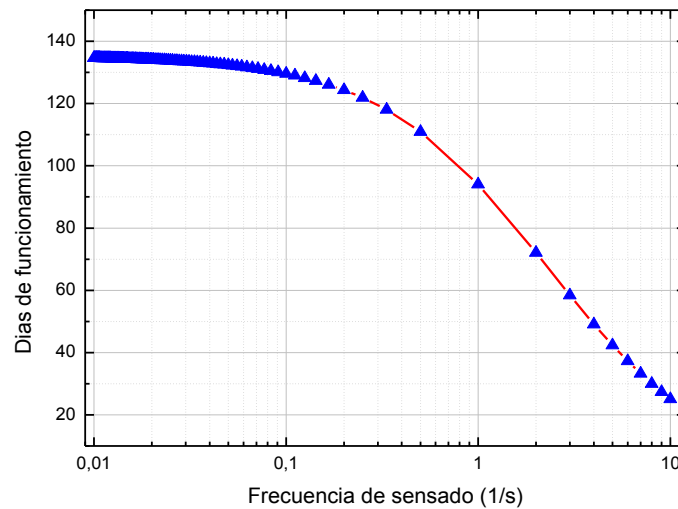
Gráfica 10: Modos de funcionamiento de la tarjeta RFID con el consumo asociado a cada uno de ellos.

La primera simulación se realizó sin tener en cuenta los sensores de gas debido a que no estaban disponibles para las primeras pruebas de campo. Para esta primera simulación se utilizaron los datos que aparecen en la Tabla 7:

Dispositivo	Modo activo	Modo bajo consumo	Tiempo activo
MSP430f1611	330 μ A	1.3 μ A	15ms
OPA349	1 μ A	1 μ A	Siempre
EEPROM (escritura)	5000 μ A	5 μ A	0.5ms
SHT15	550 μ A	1 μ A	11ms
SN74AUP1T98	0.1 μ A	0.1 μ A	Siempre
Buses	30 μ A	0	1ms

Tabla 7: Consumos de los diferentes dispositivos en activo, durmiendo y el tiempo en activo.

Con los datos de la Tabla 7 se calcula el tiempo de vida de la tarjeta, la Gráfica 11 indica los tiempos de vida máximos en función de la frecuencia de sensado.



Gráfica 11: Días de funcionamiento de la tarjeta RFID en función de la frecuencia de sensado.

De la Gráfica 11 se obtuvo que el número máximo de días de funcionamiento era de 135 días, independientemente del periodo de sensado. Esto se debe al consumo quiescente de los componentes que van descargando la batería. Para frecuencias de sensado más altas, el consumo aumentaba y, por ejemplo, si se realizaban 10 medidas cada segundo, la batería se descargaría en unos 20 días.

El consumo debido a la introducción de los sensores de gas se analiza en el capítulo 7 en base a la caracterización realizada.

4.3.- Versiones de las tarjetas RFID.

A lo largo del proyecto GoodFood se realizaron diferentes versiones de la tarjeta RFID, mejorando sus prestaciones a cada nueva versión. Se realizaron cuatro versiones funcionales con sus características propias. En esta sección se presenta y enumera cada una de ellas.

4.3.1.- Primera versión de la tarjeta RFID.

En esta primera versión de la tarjeta, el objetivo principal era mostrar un prototipo conceptual, sin cumplir todavía con todos los requerimientos del proyecto, pero implementando algunas de las funcionalidades finales de la tarjeta RFID. La Figura 24 muestra una imagen del prototipo realizado y la localización de sus componentes:

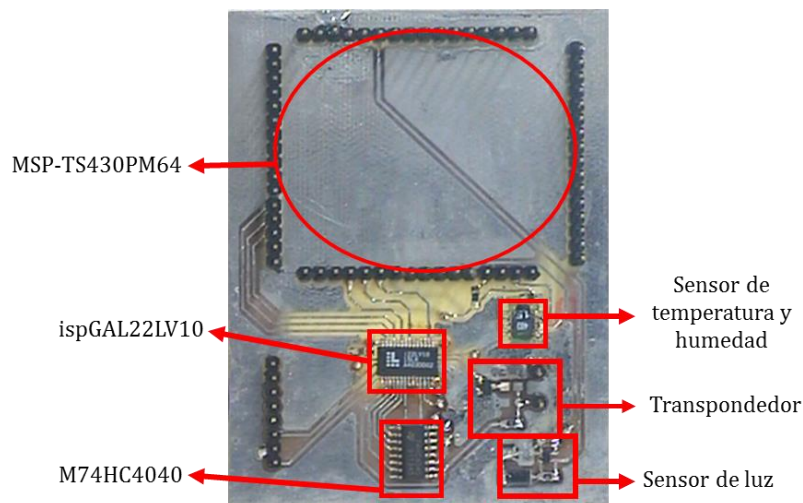


Figura 24: Primera versión de la tarjeta RFID con la localización de sus componentes.

Las características de esta primera versión eran:

- Integración de los sensores de luz, SLDC-61N1, y temperatura y humedad, SHT15.
- Integración del microcontrolador mediante la herramienta MSPTS430PM64, un zócalo que permite la extracción de microcontroladores MSP430 con encapsulado de 64 pines de la compañía Texas Instruments.
- Transpondedor analógico basado en diodo y capacidad.
- Transpondedor digital basado en contadores, mediante el M74HC4040 de la compañía Philips Corporation, y lógica simple, mediante el ispGAL22LV10 de la compañía Laticce Corporation.

Las funcionalidades de este primer prototipo se basaron en el control de los sensores ya comentados mediante el MSP430 y una primera versión del control de las comunicaciones. En este prototipo la antena RFID era externa y sólo se implementó en formato rígido.

4.3.2.- Segunda versión de la tarjeta RFID.

Una vez comprobado el funcionamiento conceptual de la tarjeta RFID se realiza la segunda versión de la tarjeta RFID. En esta versión se tienen en cuenta los requerimientos de comunicaciones RFID junto con los sensores implementados en el primer prototipo. Se realizan dos versiones, una en formato rígido, Figura 25, y otra en formato flexible, Figura 26.

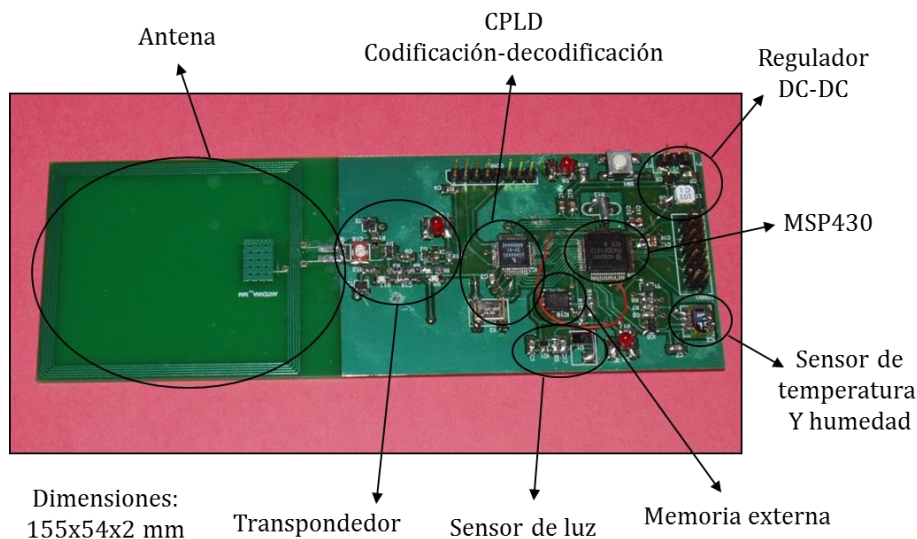


Figura 25: Segunda versión de la tarjeta en formato rígido y emplazamiento de sus componentes.

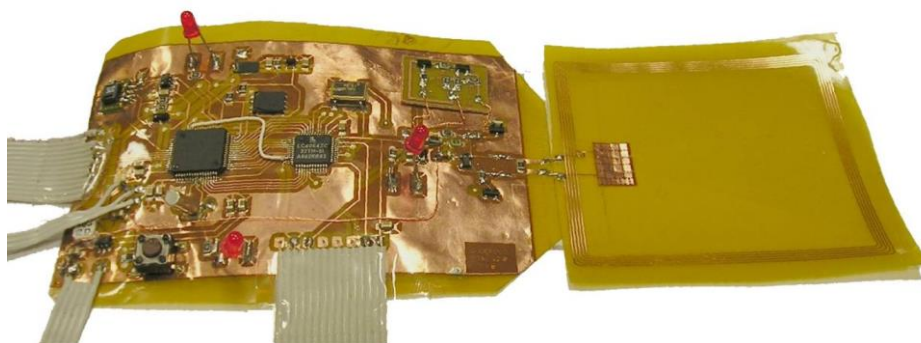


Figura 26: Segunda versión de la tarjeta en formato flexible.

Las características de esta segunda versión eran:

- Integración de la antena RFID en el PCB de la tarjeta.
- Integración de los sensores de luz, SLDC-61N1, y temperatura y humedad, SHT15.
- Integración del microcontrolador MSP430F1611 directamente en PCB.
- Implementación de la memoria FLASH externa 24AA1025 de la compañía Microchip Corporation.
- Transpondedor analógico basado en puente de diodos y diodo zener para regular la tensión.
- Transpondedor digital basado en la CPLD ispMATCH 4064Z, de la compañía Lattice Semiconductors Corporation.
- Integración de un regulador no lineal de 1.8V, TPS62202 de Texas Instruments.

Además de las funcionalidades comentadas del primer prototipo, se integró la antena RFID en la PCB, se implementaron las comunicaciones RFID según la norma ISO/IEC 15693, se implementó la grabación de datos en la memoria externa y la regulación de tensión para la parte digital.

4.3.3.- Tercera versión de la tarjeta RFID.

En la tercera versión de la tarjeta RFID se implementó una matriz de sensores de gas, explicado en capítulos posteriores, en formato TO-8 junto con su electrónica de control. Se redujo sensiblemente el tamaño de la tarjeta en un 37%, de 155x54x2 a 97x54x2mm, y se compactaron todos los conectores, tanto de alimentación como de programación en un solo conector de muy pequeñas dimensiones del tipo DF17 de la compañía Hirose (HRS) Electric Corporation. La Figura 27 muestra el aspecto final de la tercera versión de la tarjeta:

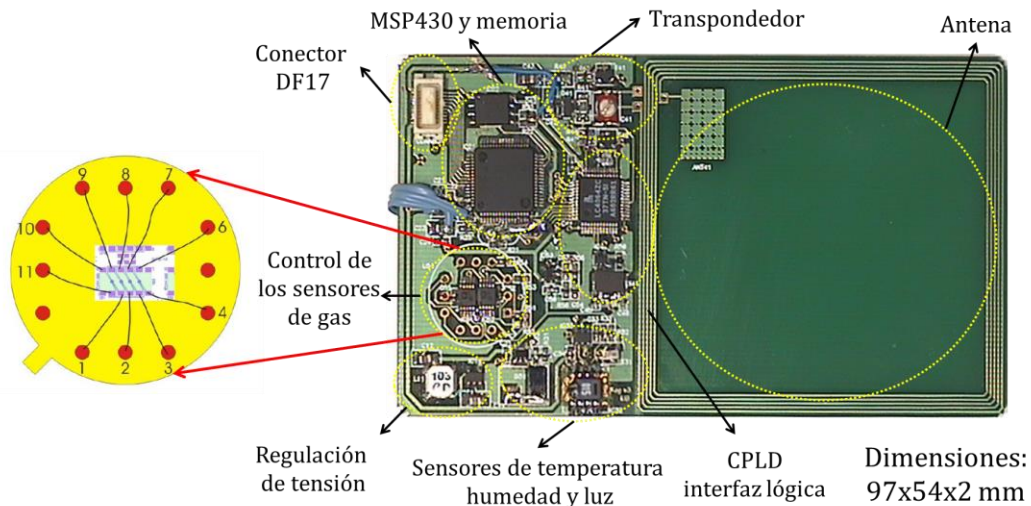


Figura 27: Tercera versión de la tarjeta RFID en formato rígido junto con los sensores de gas en encapsulado TO-8.

La característica principal es la implementación de los sensores de gas junto con todas las funcionalidades de las versiones anteriores. Esta versión sólo se realizó en formato rígido y es con la que se realizaron la mayoría de los tests.

4.3.4.- Cuarta versión de la tarjeta RFID.

Esta cuarta versión de la tarjeta es idéntica a la anterior en cuanto a funcionalidad se refiere. Las diferencias son la integración los sensores de gas en la propia tarjeta y la reducción del tamaño de la antena en un 17,5%, pasando ésta de 5 a 7 espiras, para cumplir con lo especificado en la norma ISO/IEC 15693. Estas diferencias pueden apreciarse tanto en la Figura 28 como en la Figura 29:

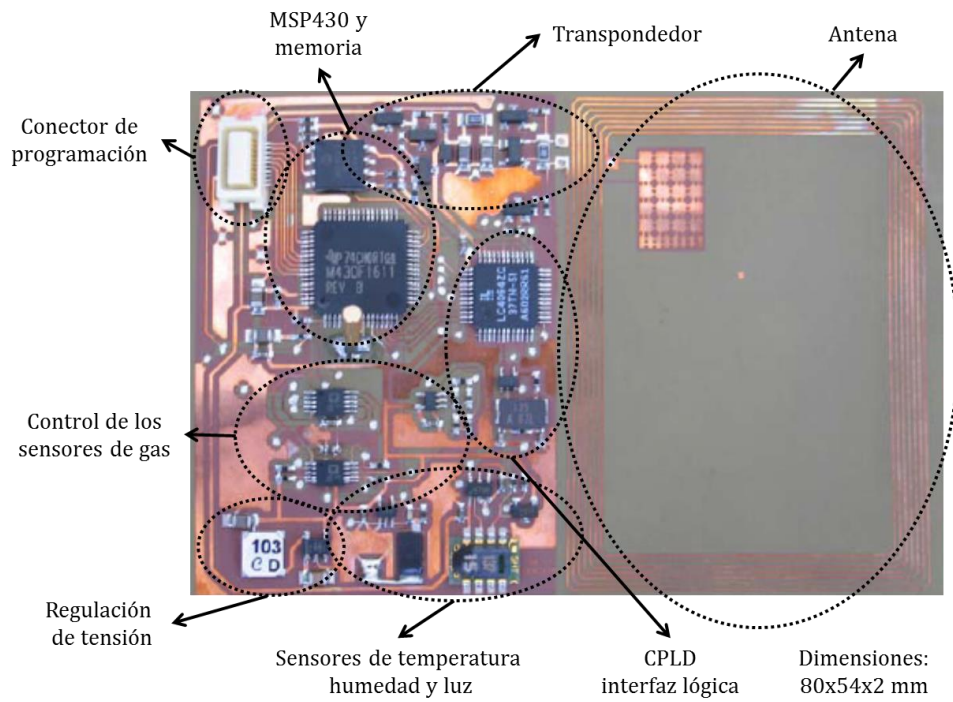


Figura 28: Cuarta y última versión de la tarjeta RFID en formato flexible.

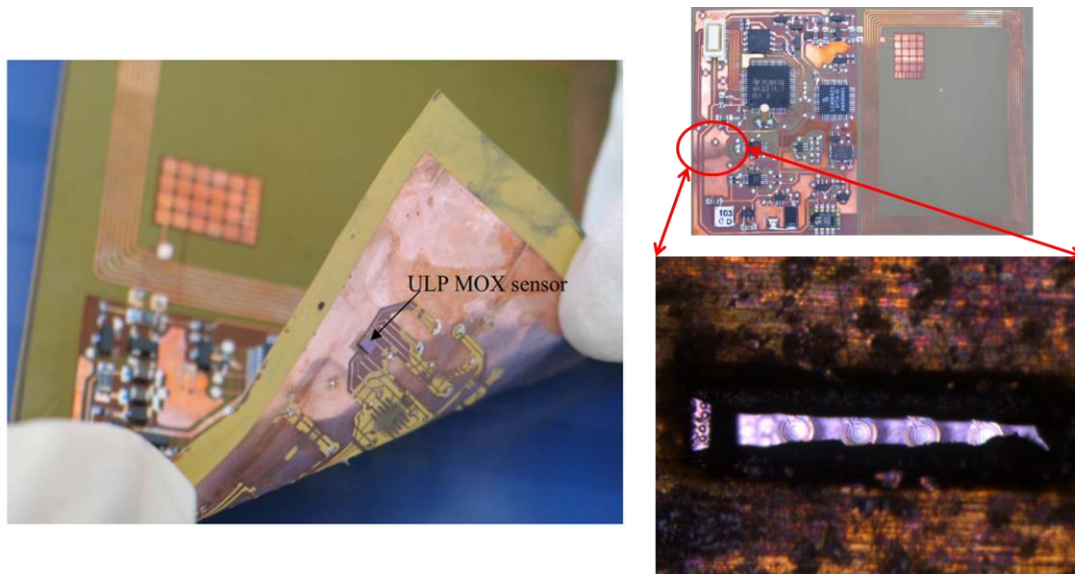


Figura 29: Ubicación de los sensores *ulp* MOX en la tarjeta RFID.

Para esta tarjeta RFID sólo se realizó la versión en formato flexible. Se diseñó específicamente para implementar la matriz de sensores en *flip chip*, Figura 29 izquierda, con una ventana de 1.14x0.53mm, Figura 29 abajo derecha.

4.4.- Referencias.

[1] A. Seppälä, E. Ristolainen, “Study of adhesive flip chip bonding process and failure mechanisms of ACA joints”, *Microelectronics Reliability*, Volume 44, Issue 4, April 2004, Pages 639–648.

[2] 3M, Z-Axis Adhesive Films - Film Product Selection Guide. <http://multimedia.3m.com/mws/media/519690/z-axis-tapes-70-0709-3772-0-pdf.pdf?&fn=Z-Axis%20Tapes%2070-0709-3772-0.pdf> (25/11/2016).

[3] 3M. Z-Axis Adhesive Film 5552R. Technical Data http://monitor.espec.ws/files/3m-5552r_176.pdf (25/11/2016).

[4] Philips Application Note AN97055, “Bi-directional level shifter for I²C-bus and other systems”, Philips Semiconductors.

5.- Diseño de los lectores RFID.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

En este capítulo se describen el diseño conceptual y el diseño en detalle de los lectores RFID, necesarios para obtener los datos y dar energía a las tarjetas RFID diseñadas en esta tesis doctoral.

Sin estos dispositivos lectores el diseño de las tarjetas RFID carecería de sentido, ya que los posibles datos obtenidos por éstas serían inaccesibles.

5.1.- Diseño conceptual.

En esta sección se describen, de manera conceptual, los dos lectores utilizados en el proyecto GoodFood para, entre otras funcionalidades, llevar a cabo la comunicación con la tarjeta RFID, el envío de energía, la grabación y la extracción de los datos almacenados en su memoria.

Para obtener el máximo rendimiento de la tarjeta en todas sus posibles implementaciones, se utilizarán dos lectores diferentes. El primer lector RFID diseñado dentro del proyecto GoodFood que basado en el transceptor de RFID R1-R6C-001A (S6700) de Texas Instruments y llevará implementados sensores para poder ser utilizado en algunos de los escenarios de trabajo en la cadena de distribución, en concreto en el caso de la fruta. El segundo lector será comercial y utilizará la evolución del transceptor anterior, el TRF7960, también de Texas Instruments, que será utilizado únicamente como herramienta de extracción rápida y presentación de datos de las tarjetas gracias a las herramientas de comunicación que ofrece el fabricante.

5.1.1.- Lector RFID con sensores implementados.

Este lector se ha de diseñar para realizar tres funcionalidades distintas:

- Monitorización de productos perecederos (de aquí en adelante nos centraremos en el almacenaje de fruta) en cualquiera de los métodos en los que se encuentren almacenadas, ya sea bajo atmosfera controlada aplicando el método de bajo oxígeno (LO) o muy bajo oxígeno (ULO) o bajo el método de almacenaje en frío (CS).
- Realización de las comunicaciones RFID con las tarjetas diseñadas en el proyecto GoodFood y recepción de los datos para su posterior monitorización.
- Realización de las comunicaciones con el nodo AmI diseñado en el proyecto GoodFood y envío de las medidas realizadas por todos los componentes del sistema.

Como se ha comentado en los requerimientos de la aplicación y para cualquiera de los métodos de almacenaje, no existe un control de las concentraciones de algunos de los componentes que indiquen el estado de calidad de la fruta. Por este motivo el lector ha de ser capaz de medir las concentraciones de los componentes indicados en la Tabla 8:

Nivel	Normal (ppm)	Alarma (ppm)	Máximo (ppm)
Etileno	1 - 100	400	-
Etanol	-	2	7
Acetaldehído	-	10	200

Tabla 8: Intervalos de concentración para los diferentes componentes en la etapa de conservación de las manzanas que indican su estado de calidad.

Uno de los objetivos del lector RFID del proyecto GoodFood es, aparte de las comunicaciones RFID y con la puerta de enlace, la implementación de la electrónica necesaria para el control y medida de sensores, incluidos los sensores de gas que midan las concentraciones de los componentes indicados en la Tabla 8. Esta implementación permite la realización de pruebas de funcionamiento de los sensores de gas antes de ser implementados en la tarjeta RFID.

También debe ser desarrollado basado en una arquitectura en la que todos sus elementos sean de bajo consumo. De esta manera, se obtiene una plataforma donde realizar fácilmente las pruebas necesarias para comprobar la funcionalidad de algunos de los sensores que posteriormente se implementaron en la tarjeta RFID, principalmente los sensores de gas fabricados por otros socios del proyecto, como el Centro Nacional de Microelectrónica (CNM, España), el *European Aeronautic Defence and Space* (EADS, Alemania) y el Istituto per la Microelettronica e Microsistemi (IMM, Italia).

Cabe recordar que en algunos de los escenarios de trabajo en la cadena de distribución de la fruta, el almacenamiento podía llegar a ser de varios meses. Teniendo en cuenta que la tarjeta está concebida para trabajar únicamente en la fase de transporte, es necesaria la utilización del lector con sensores para tener una trazabilidad completa de todas las etapas de la cadena de distribución. Por otro lado y aprovechando la capacidad de sensado del lector, en la fase de transporte también adquirirá los datos de los sensores de gas, por lo que los datos obtenidos por las tarjetas podrán ser verificados con los datos del lector, evitando así falsas alarmas.

Seguidamente se detallan las principales premisas que el lector RFID del proyecto GoodFood debía cumplir:

- Adquisición de datos y acondicionamiento de la señal de sensores químicos.
- Selección individual de la resistencia calefactora de la matriz, o en inglés, *array*, de sensores químicos.
- Modulación de la potencia entregada a las resistencias calefactoras con el fin de ajustar la temperatura de los sensores químicos.
- Adquisición secuencial de datos de una matriz de sensores.
- Alta resolución en las medidas.
- Utilización de un microprocesador capaz de realizar procesado de señal simple.
- Gran capacidad de almacenamiento de datos.

- Compatibilidad de las comunicaciones RFID, siguiendo la norma ISO/IEC 15693.
- Compatibilidad con protocolos de comunicación por radio frecuencia.
- Diseño abierto a la conectividad de nuevos sensores.
- Posibilidad de transferencia de los datos adquiridos, para su procesamiento y estudio, o eventos simples generados a PC.

5.1.2.- Lector RFID comercial.

Para facilitar el uso y simplificar la determinación de la fuente de posibles errores de comunicación, se hace uso de un lector comercial, concretamente al TRF7960 EVM de Texas Instruments.

Basado en el transceptor TRF7960 de Texas Instruments, el TRF7960 EVM es dispositivo que lleva integrados todos los componentes necesarios para realizar las funciones de lector en una placa de circuito impreso, por este motivo ofrece ciertas ventajas respecto al lector RFID con sensores.

Estas ventajas pueden ser resumidas de la forma siguiente, (i) tamaño pequeño y de fácil manejo, (ii) fácil programación y (iii) fácil conectividad mediante el uso de un puerto serie virtual, o en inglés *Virtual Comm Port (VCP)*, utilizando el interfaz USB.

De este modo se simplifica la lectura de las tarjetas RFID del proyecto GoodFood en cualquier lugar, permitiendo obtener las medidas de los sensores de las tarjetas en cualquier ordenador portátil, simplificando la labor de recolección de datos.

Según su hoja de especificaciones, el TRF7960 es un *front-end* analógico y un secuenciador de tramas para lectores RFID a 13,56 MHz. Su programación interna lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones con tarjetas RFID, tanto de vecindad como de proximidad. El lector se configura seleccionando el protocolo deseado en los registros de control.

Las características más importantes de la TRF7963 EVM son las siguientes:

- Compatibilidad con la norma ISO/IEC 15693.
- Compatibilidad con las normas ISO/IEC 14443A y 14443B (hasta la capa 4).
- Compatibilidad con la norma de Texas Instruments Tag-it™.
- Integra en el PCB la antena y su red de adaptación a 13,56 MHz.
- Se comunica con un PC con sistema operativo *Windows* a través de un cable USB estándar.
- LEDs de indicación de protocolo.

- Potencia máxima en una antena de 50Ω de 200mW.

La Figura 30 muestra la TRF7960 EVM con sus diferentes componentes:

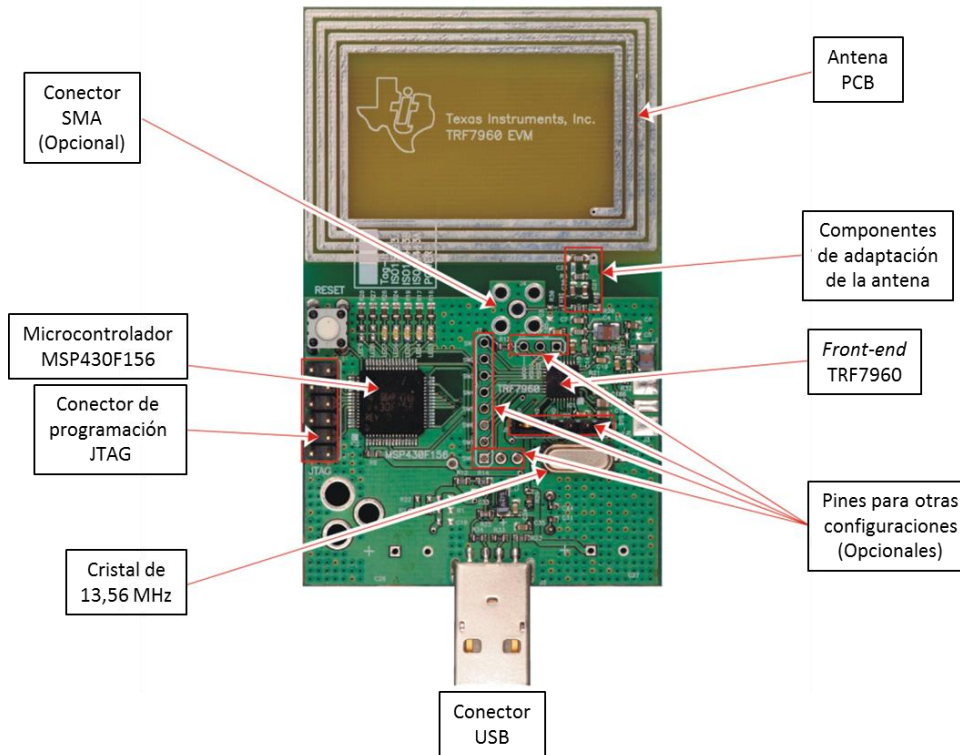


Figura 30: Vista de la TRF7960 EVM con la descripción de sus componentes.

La programación/configuración del TRF7960, al igual que el S6700, se realiza mediante un enlace serie de tres hilos SPI, pero también tiene la opción de utilizar el puerto paralelo. En este caso, el microcontrolador MSP430F156 se encarga de enviar las tramas de programación del TRF7960. En la TRF7960 EVM el microcontrolador ya está programado de fábrica para establecer comunicación con el TRF7960, esto facilita el envío de comandos desde cualquier ordenador a través de un puerto serie virtual VCP.

La TRF7960 EVM incluye un software basado en una interfaz gráfica de usuario, o en inglés *Graphical User Interface* (GUI), que permite el envío rápido y sencillo de comandos siguiendo la norma ISO/IEC 15693.

5.2.- Diseño en detalle.

Seguidamente se describe con detalle tanto el hardware, si se precisa, como el software, si es necesario, que se ha implementado en los dos lectores utilizados en junto con la tarjeta RFID. Este hardware y software permite llevar a cabo la comunicación con la tarjeta RFID, la grabación y la extracción de los datos almacenados en su memoria, para conseguir, de esta forma, un sistema viable.

5.2.1.- Lector RFID con sensores implementados.

La línea de trabajo para realizar el diseño del lector RFID con sensores implementados a seguir es la siguiente:

- La discusión sobre el diseño y el diagrama de bloques se ha realizado conjuntamente entre la Universitat de Barcelona, EADS, el CNM y el IMM.
- El diseño y la comprobación de las funcionalidades se realizarán por los socios alemanes de EADS.
- El diseño del protocolo de comunicaciones y la programación de los módulos se realizarán en la Universitat de Barcelona.
- El desarrollo de los sensores se realizará en el CNM, EADS y el IMM.

Seguidamente se comentan las principales características y componentes del lector RFID. El Diagrama 7 muestra el diagrama de bloques del sistema lector RFID:

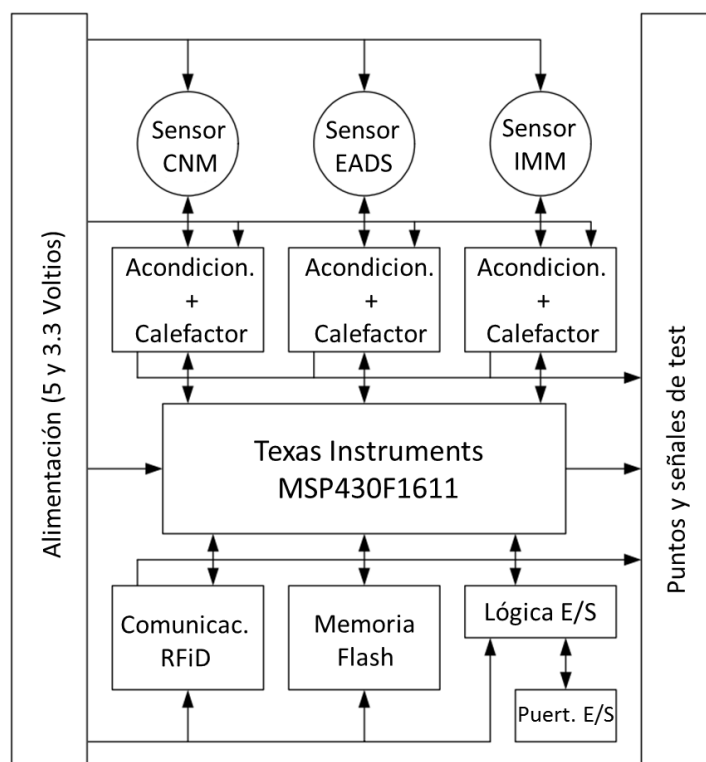


Diagrama 7: Diagrama de bloques del lector RFID con sensores implementados.

Como puede apreciarse en el Diagrama 7, el sistema lector RFID está basado en el microcontrolador MSP430F1611 de Texas Instruments, cuyas principales características se han explicado en el capítulo de la tarjeta RFID, para el control de las comunicaciones y los sensores.

Se alimenta mediante una conexión a batería e implementa reguladores de tensión de 5 y 3.3 Voltios para alimentar a todos los circuitos.

Dispone de 3 conectores para encapsulado TO-8, en los que se conectan los sensores para realizar pruebas de funcionamiento. También implementa la electrónica de control individual para los calefactores y la adquisición, tanto individual como secuencial de las matrices de sensores de gas. Esto se consigue mediante la utilización de multiplexores y demultiplexores analógicos que permiten seleccionar el sensor a medir. La Figura 31 muestra una vista del lector RFID:

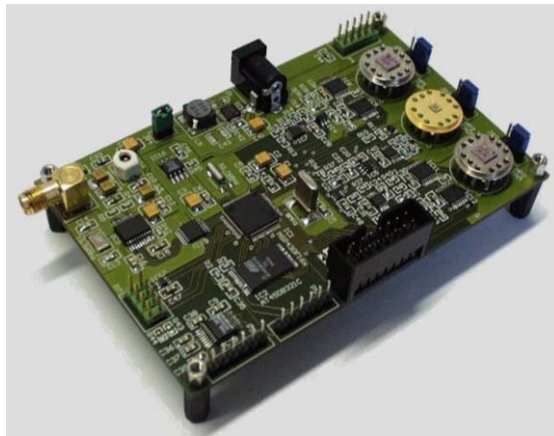


Figura 31: Vista del lector RFID del proyecto GoodFood con todos los sensores conectados.

Implementa también una gran variedad de entradas y salidas (E/S) digitales y analógicas para diversas funciones como pueden ser la conexión con la puerta de enlace del nodo Aml, la posibilidad de conexión de otros sensores digitales o analógicos, etc.

Para almacenar los datos, tanto de los sensores del lector como de las tarjetas, se ha incluido la memoria Flash de 32 Mbits AT45DB321C de Atmel Corporation. Esto permite almacenar datos en el caso de que el lector no se encuentre conectado al nodo Aml.

Como la mayor parte de las funcionalidades del lector se han desarrollado y comprobado por EADS, no se profundizará en ellas. La funcionalidad desarrollada por el equipo de la Universidad de Barcelona, y que forma parte de esta tesis doctoral, es la concerniente a las comunicaciones RFID, tanto el diseño del hardware, como la programación del microcontrolador para poderlas llevar a cabo.

5.2.1.1.- Transpondedor Texas Instruments R1-R6C-001A (S6700).

El chip de RFID o transceptor, o en inglés *front-end o transceiver*, R1-R6C-001A (S6700) de Texas Instruments es el dispositivo transmisor y receptor que permite conectarse mediante un enlace RFID con las diferentes tarjetas. Está conectado mediante una conexión serie con el microcontrolador, siendo éste el encargado de gestionar el funcionamiento de dicho transceptor.

Según su hoja de especificaciones, El circuito integrado transceptor Multi Protocolo S6700 facilita el desarrollo de una amplia gama de lectores RFID a 13,56 MHz.

Proporciona las funciones de envío y de recepción requeridas para comunicarse con una gran variedad de tarjetas o transpondedores, también conocidos por *front-end* RFID, que operan en la banda ISM de 13,56 MHz. El concepto de transpondedor se corresponde al dispositivo que recibe en una frecuencia y responde por otra distinta.

Un codificador convierte el flujo de datos transmitidos por el microcontrolador al protocolo seleccionado de RFID. La selección de protocolo se realiza en la cabecera de los datos transmitidos por el microcontrolador. Por otra parte, el decodificador de recepción convierte las señales RF de respuesta de las tarjetas en una cadena de datos que envía al microcontrolador.

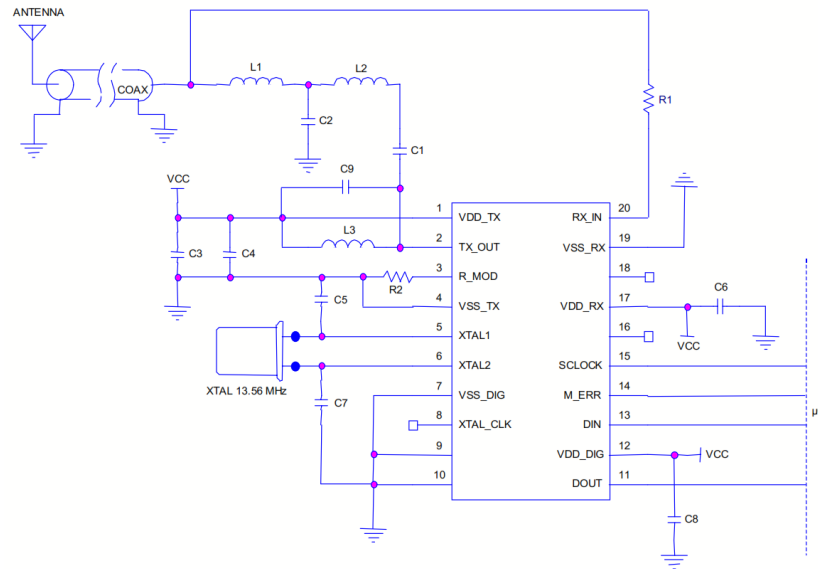
El S6700 puede proporcionar hasta 200mW de potencia de RF a una carga de 50 Ω utilizando una fuente de alimentación de 5 V.

El interfaz digital proporciona en el mismo chip, codificación y recepción de datos, minimizando el diseño de hardware y software. La comunicación con el S6700 se realiza por medio de un enlace serie de tres hilos, utilizando el interfaz serie para periféricos, o en inglés *Serial Peripheral Interface* (SPI).

El transceptor S6700 es compatible con los siguientes protocolos de RFID:

- Protocolo Tag-it.
- ISO/IEC 15693-2.
- ISO/IEC 14443-2 (tipo A)
- Modo directo, se pueden transmitir los datos directamente a través de un transpondedor utilizando la modulación, los tiempos y la estructura de comandos correcta.

En el Esquemático 8 se muestra la red de adaptación para el S6700, recomendado por Texas Instruments, para adaptar la salida a 50 Ω , y obtener así la máxima potencia de salida que ofrece el S6700 en la antena:



Esquemático 8: Red de adaptación para obtener la máxima potencia en antenas de 50Ω.

En el Esquemático 8 se localizan los pines 11, 13, 14 y 15 correspondientes al SPI, que se utilizan para realizar la programación y por donde circula el flujo de datos de la comunicación RFID. Mediante la correcta programación del S6700, no exenta de dificultad debido a la gran variedad de protocolos soportados, se consigue la comunicación con las tarjetas RFID utilizando los comandos que proporciona la norma ISO/IEC 15693-2, ver apéndice. Con esto se obtienen los datos de los sensores que se han ido almacenando a lo largo de la cadena de distribución.

El flujo de datos cuando el lector quiere comunicarse con la tarjeta queda reflejado según el Diagrama 8:

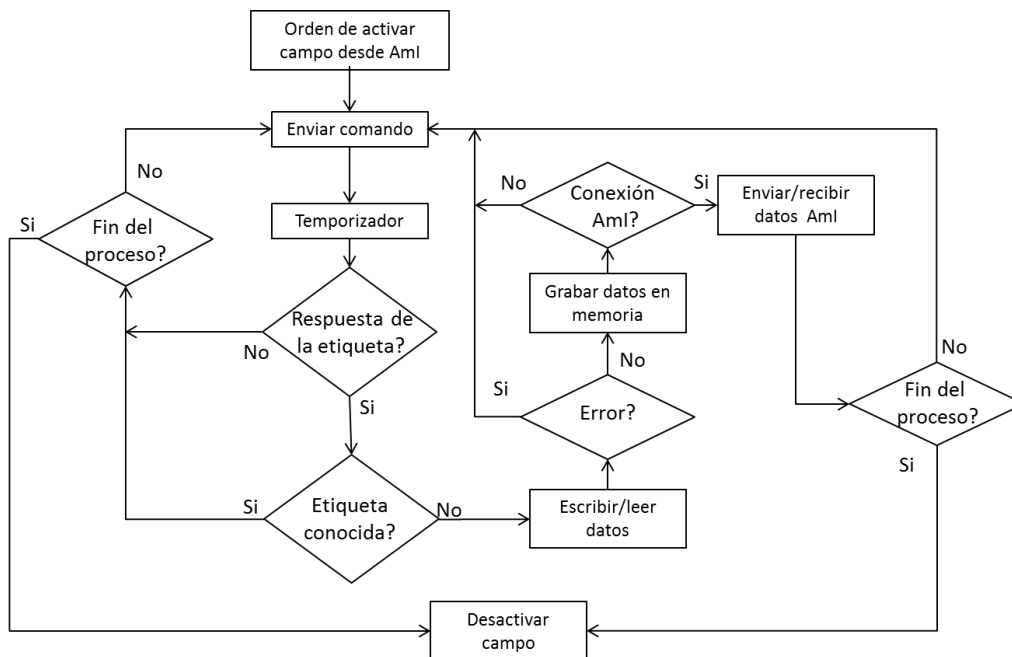


Diagrama 8: Flujo de datos del programa implementado en el lector para comunicaciones con las tarjetas.

El proceso para la comunicación lector-tarjetas, utilizado tanto en el estado de carga como en el de descarga y que muestra el Diagrama 8, empieza con una orden desde el nodo AmI para activar el campo magnético. Una vez activado, empieza el proceso de comunicación con la búsqueda de tarjetas, basado en el envío del comando de identificación (ver apéndice) periódicamente hasta que una tarjeta responde.

Cuando se obtiene respuesta, el lector comprueba si la tarjeta es nueva mediante el reconocimiento del identificador. Si el identificador no es nuevo, se descarta la tarjeta y empieza el proceso de nuevo. Si es una tarjeta nueva, se lee o se graba mediante los comandos específicos, ver apéndice. Después de comprobar que no ha habido error en la comunicación, se graban los datos en memoria y se comprueba si existe conexión con el nodo AmI. Si hay conexión se mandan los datos obtenidos o se obtienen nuevos datos, dependiendo del estado y vuelve a comenzar el proceso. En cualquier momento del proceso el lector puede recibir la orden de finalización del proceso desde el nodo AmI.

5.2.2.- Lector RFID comercial.

Para el proyecto GoodFood se ha realizado una GUI diferente a la propuesta por el fabricante. Esta nueva interfaz está basada en *MathWorks® Matlab® 7 release 14* permite también enviar comandos de la norma ISO/IEC 15693. Pero además, mostrar los resultados por pantalla y, lo que es más importante, grabar los resultados en un archivo, que permite el posterior análisis de los datos en cualquier programa basado en hoja de cálculo, simplificando así el acceso de otros usuarios de GoodFood.

La Figura 32 muestra una captura de pantalla de la GUI realizada para el proyecto GoodFood:

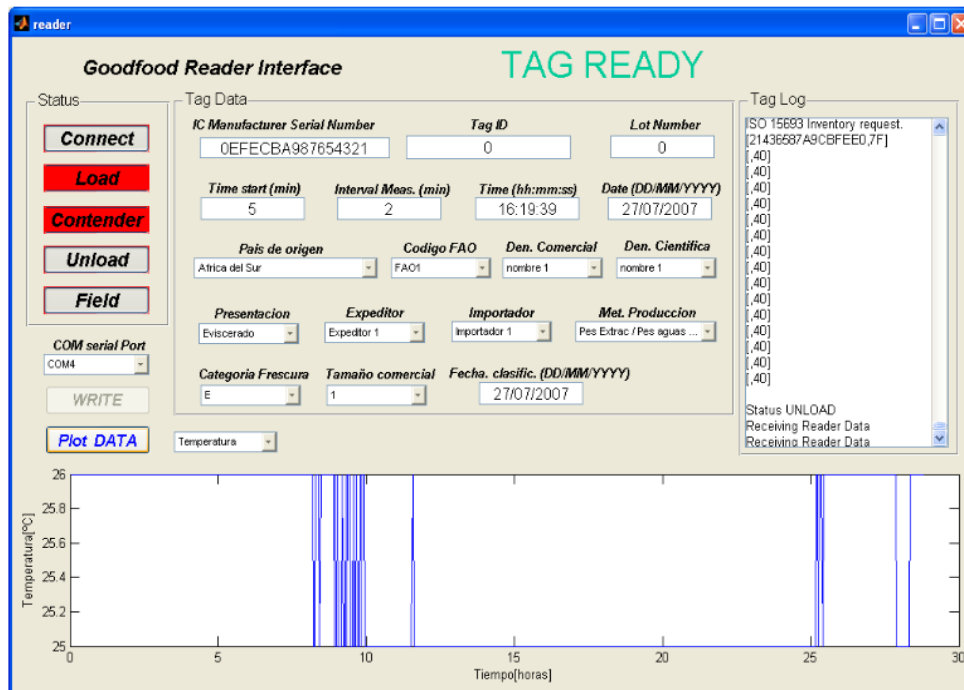


Figura 32: Captura de pantalla de la GUI realizada para el proyecto GoodFood.

Mediante esta aplicación se puede tanto escribir como leer las tarjetas RFID del proyecto GoodFood de un modo fácil e intuitivo. En ella se simulan cuantos escenarios donde la tarjeta se puede encontrar, en concreto, carga, descarga y dentro del contenedor.

En el escenario *load* o de carga, se graban los datos identificativos del producto que se carga en la memoria de la tarjeta. Estos datos se han introducido, previamente y respetando el formato indicado, en las casillas correspondientes. Los datos identificativos que han sido definidos por los usuarios de GoodFood son los siguientes:

- Número de lote.
- Time to Start: es el tiempo que la tarjeta deja transcurrir hasta que empieza a leer los sensores. No se tiene en cuenta si la tarjeta entra en modo *Container*.
- Interval of meas: el intervalo de tiempo o periodo entre medida.
- Time: hora de la grabación de datos.
- Date: día, mes y año de la grabación de datos.
- País de origen.
- Código FAO del producto.

- Denominación comercial del producto.
- Denominación científica del producto.
- Presentación del producto.
- Expedidor del producto.
- Método de producción.
- Categoría de frescura.
- Tamaño comercial.
- Fecha de clasificación.

En el escenario de *Container*, la tarjeta interpreta que está dentro del contenedor y empieza obtener y grabar en memoria los datos de los sensores.

Y finalmente en el escenario de *unload* o descarga, se reciben todos los datos enviados por la tarjeta, tanto los identificativos del producto como los correspondientes a los sensores. En este escenario se activa la opción de dibujar la gráfica de los datos mediante el botón *Plot Data* y seleccionando el tipo de datos a mostrar.

El Diagrama 9 muestra el proceso que sigue el programa de la GUI para los escenarios de carga y descarga:

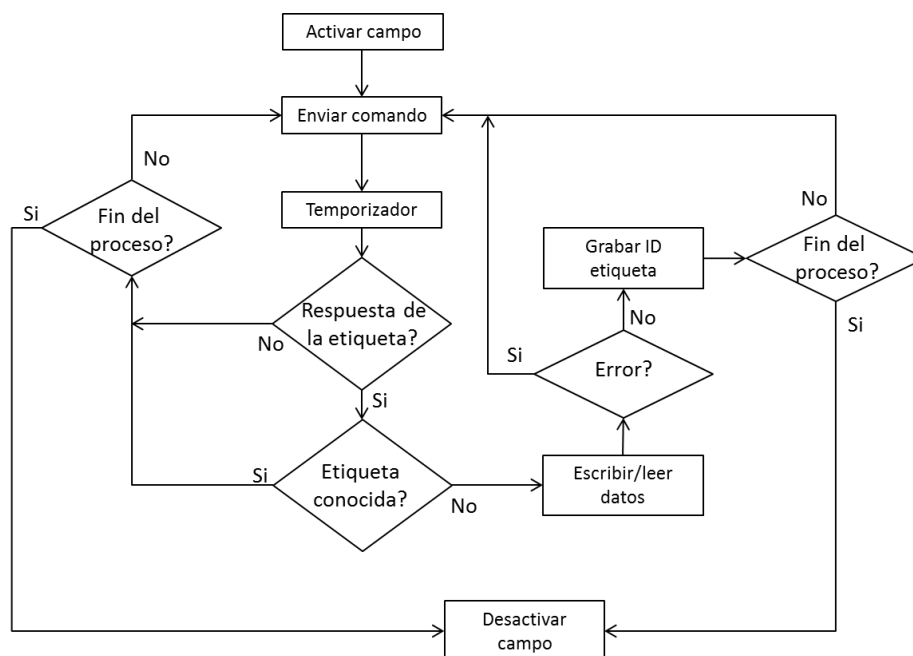


Diagrama 9: Proceso que sigue el programa de la GUI para el funcionamiento en los escenarios de carga y descarga.

Los resultados obtenidos y presentados en capítulos posteriores avalan la funcionalidad y facilidad de uso que representa la utilización de esta herramienta de trabajo.

5.3.- Conclusión.

En este capítulo se ha explicado el diseño, tanto conceptual como en detalle, de los lectores RFID utilizados para que la tarjeta RFID pueda realizar todas sus funciones.

En los siguientes capítulos, dedicados a los resultados obtenidos, no se volverán a mencionar los lectores, pero seguirán siendo un elemento clave en la obtención y representación de los datos allí expuestos.

6.- Tarjeta RFID en la cadena logística de pescado.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

En éste capítulo se explica la validación de todos los componentes de la tarjeta RFID, con la excepción de los sensores químicos, una vez diseñada y realizados los prototipos. Para dicha validación se realizan diversos ensayos y comparativas con otros dispositivos comerciales. Estos test abarcan desde medidas de laboratorio hasta medidas de campo en la cadena logística de distribución de pescado fresco.

6.1.- Plan de test.

Como primeros test se realizarán ensayos de funcionamiento de la tarjeta RFiD en funcionamiento simple, esto es, sólo utilizando los sensores de temperatura y humedad. Más adelante, se realizarán test de funcionamiento utilizando los sensores de gas. Estos ensayos se llevarán a cabo en los laboratorios del Departamento de Electrónica de la Facultad de Física de la Universidad de Barcelona.

6.1.1.- Test de la tarjeta RFiD en la cadena logística de distribución de pescado fresco.

Una vez confirmado el correcto funcionamiento del sistema y como medida de validación, se realizarán pruebas de campo en varios medios de transporte. Estos medios de transporte formarán parte de la cadena de distribución del pescado que realizarán trayectos entre los almacenes de la empresa Decoexa (País Vasco), socio del proyecto y dedicada a la distribución del pescado. La Figura 33 muestra todas las posibles etapas de la cadena de distribución del pescado:



Figura 33: Etapas de la cadena logística de distribución del pescado.

Todas las etapas de la cadena logística de distribución necesitan de sistemas de transporte para llegar a la siguiente etapa, hasta finalizar el proceso en el consumidor final. Es durante el proceso de transporte de los materiales perecederos donde es necesario el control de la cadena de frío, es decir, que la temperatura no aumente o disminuya de ciertos márgenes, con el fin de mantener en óptimas condiciones el producto transportado. En este sentido se utilizarán las tarjetas RFiD del proyecto GoodFood como medio de control de dicha cadena de frío.

Se realizarán dos pruebas de campo durante un trayecto en camión, comparando los resultados con dispositivos comerciales que realicen la misma función. Finalmente se realizará una prueba de campo transcontinental, de África a Europa, que incluía todas las etapas de la cadena logística de distribución hasta llegar a la venta al por mayor.

A modo de resumen, se realizarán los siguientes ensayos:

- Comprobación del correcto funcionamiento del sistema.
 - Primer experimento funcional.
 - Primera comparativa en cámara climática.
- Comparativa y pruebas de campo, viaje en camión refrigerado, en la cadena de distribución del pescado.
 - Primera comparativa y prueba de campo: trayecto de Frankfurt (Alemania) a Vitoria (España).
 - Segunda comparativa y prueba de campo: trayecto de Paris (Francia) a Vitoria (España).
- Prueba de campo internacional en la cadena logística de distribución del pescado.
 - Trayecto de Mossel Bay (Sudáfrica) a Vitoria (España).

6.1.1.1.- Comprobación del correcto funcionamiento del sistema.

Una vez terminado el proceso de diseño de la tarjeta RFiD, tras la comprobación de la funcionalidad de cada elemento por separado como las comunicaciones con el lector o las respuestas de los sensores a requerimiento del microcontrolador, se iniciarán los test de funcionamiento de todo el sistema en conjunto, tanto en formato rígido, como en el flexible.

Estos test se dividirán en dos partes, el primero será el test de funcionamiento en sí misma y el segundo será una comparación con un sistema de medida de temperatura comercial.

Para el primer test se dejará a la tarjeta funcionando durante 19 horas en diferentes ubicaciones donde se irá variando la temperatura y la humedad.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de la tarjeta RFiD se realizará un test de validación. Esta validación consistirá en comparar los resultados de la tarjeta RFiD, con los resultados de un dispositivo comercial, realizando mediciones de temperatura dentro de una cámara climática.

Para el segundo test, el dispositivo comercial utilizado para la comparación será el Tinytag Ultra 2 de la compañía Gemini Data Loggers (Reino Unido), programado para tomar datos cada 2 minutos y con una resolución de 0.01°C.

Se utilizarán dos tarjetas RFID, una en formato rígido y la otra en formato flexible, programadas para tomar datos de temperatura cada 2 minutos y con precisión de 1°C, se adopta baja resolución, tanto en temperatura como en humedad, como protección para no ocupar toda la memoria de la tarjeta debido a que no se conocen el calendario exacto de los ensayos.

La cámara climática donde se realizará el ensayo será el modelo minitest CCK 2.5/100 de la compañía Dycometal (España), que permitía programar su temperatura interior en el rango comprendido entre 2.5°C to 100°C.

Una vez validadas las tarjetas RFID en ambos formatos, se prepararán pruebas de campo para comprobar el comportamiento del sistema en los escenarios para los cuales fue diseñada.

6.1.1.2.- Comparativa y pruebas de campo, viaje en camión refrigerado, en la cadena de distribución del pescado.

Para realizar pruebas de campo en cualquier método de transporte, los prototipos se tienen que proteger debido, principalmente, a las condiciones extremas existentes en toda la cadena de distribución del pescado, encontrándose elementos como agua, sal o hielo.

Para dicha protección se han escogido unas cajas herméticas que soportan dichas condiciones extremas, en concreto, las que ofrece la compañía alemana Bopla, realizadas en Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), con índice de protección IP-65 y con dimensiones 120x80x55mm.

El índice de protección se describe en la norma IEC 60529 y en la norma alemana DIN 40050-9, según la Tabla 9 :

Primer dígito	Protección contra cuerpos extraños o polvo	Segundo dígito	Protección contra entradas de agua
0	Sin Protección	0	Sin Protección
1	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 50mm	1	Protegido contra la caída vertical de gotas de Agua. (Goteo)
2	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 12mm	2	Protección contra la caída de gotas de agua hasta 15° de la vertical
3	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 2.5mm	3	Protegido contra la caída de agua de lluvia de hasta 60° de la vertical
4	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 1mm	4	Protegido contra las proyecciones de agua en todas las direcciones
5	Protección contra el polvo	5	Protegido contra el lanzamiento de agua desde todas direcciones
6	Totalmente protegido contra el polvo	6	Protegido contra el lanzamiento de agua, sumado los golpes de mar
		7	Protegido contra los efectos dañinos de la inmersión
		8	Protegido contra efectos de larga inmersión bajo presión

Tabla 9: Codificación de los índices de protección según la norma internacional IEC60529 y la norma alemana DIN 40050-9.

En dichas cajas se implementa el filtro SF1 de la compañía Sensirion, para que la propia protección de la caja no interfiriera en la media de temperatura y humedad y, a su vez, proteger el sensor SHT15 implementado en las tarjetas. Este filtro cuenta con una protección IP-67 y está basado en una membrana porosa de polipropileno, la cual no deja pasar el 99.99% de todas las partículas mayores que 0.1µm, de esta forma protege al SHT15 de agua, polvo y otros contaminantes.

Para las pruebas de campo se utilizará una batería recargable, la EZPack S-3.7V de la compañía Varta, con una capacidad de 610mAh. La elección de una batería recargable se debe a que el stock limitado de baterías LPF25 de Varta que no son recargables, lo que reduce el número de posibles ensayos a realizar.

Se ha tenido en cuenta que el voltaje nominal de la parte analógica de la tarjeta aumenta de 2.7V a 3.7V, provocando así un ligero aumento en el consumo de la tarjeta. Este aumento del consumo se compensa con el aumento de la capacidad de la batería.

En la Figura 34 se observa la colocación de los diferentes componentes en la caja de protección. La posición de la tarjeta RFID se fija con tornillos y la batería con tiras de velcro.

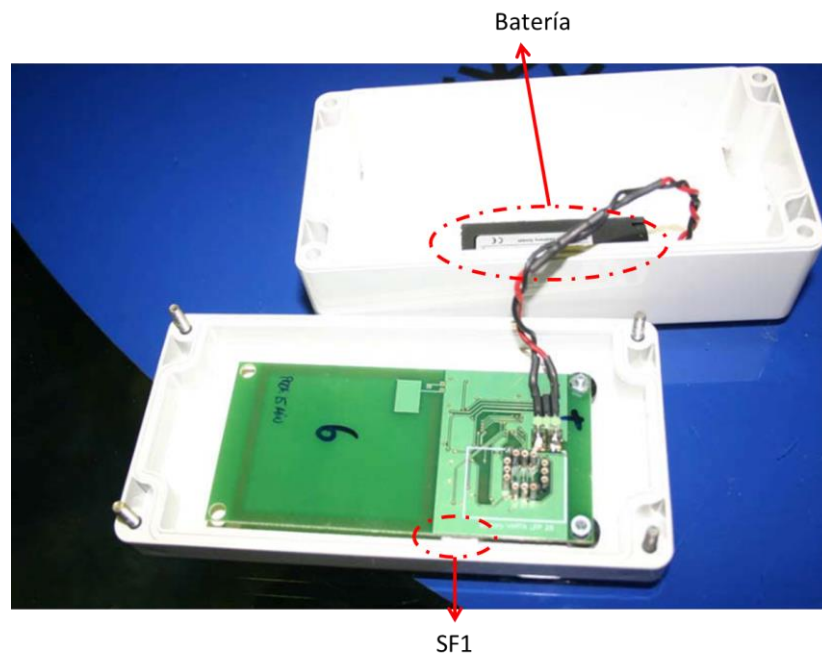


Figura 34: Situación de los diferentes componentes dentro de la caja de protección para la realización de las pruebas de campo.

Cabe comentar en este punto que la colocación de las tarjetas RFID en formato flexible dentro de la caja de protección es diferente a la que muestra la Figura 34 debido, principalmente, a que este tipo de tarjetas no dispone de un sistema de fijación basado en tornillos.

6.1.1.2.1.-Primera comparativa y prueba de campo: trayecto de Frankfurt (Alemania) a Vitoria (España).

La primera prueba de campo se realizará utilizando dos tarjetas RFID rígidas y una flexible, programadas para tomar datos de temperatura cada 2 segundos con una precisión de 1°C en temperatura.

Para la comparativa se ha escogido el dispositivo comercial *Smart TXi Label* de la compañía Paksense (Estados Unidos), programado para tomar datos de temperatura cada 2 segundos, con una precisión de 0.1°C en temperatura y con protección IP-67.

El trayecto de la prueba de campo será entre el centro de percederos del aeropuerto de Frankfurt, Alemania, y la central de distribución de la empresa Decoexa en Vitoria, España. Este trayecto forma parte del transporte de merluzas desde Sudáfrica, que viajaban a Alemania por avión, para llegar a España por carretera.

6.1.1.2.2.-Segunda comparativa y prueba de campo: trayecto de Paris (Francia) a Vitoria (España).

Esta segunda prueba de campo comparativa se encargará de realizarla el centro tecnológico AZTI-Tecnalia del País Vasco y socio del proyecto, para cubrir las actividades previstas en el proyecto "CHIPS-Nuevos sistemas electrónicos de monitorización de la cadena alimentaria on-line para productos percederos" encargado por el gobierno Vasco.

Para este ensayo se utilizarán 3 dispositivos diferentes que graban temperatura, además de dos tarjetas RFID que graban temperatura y humedad.

Uno de los dispositivos comerciales será una tarjeta semipasiva HF RFID, modelo TurboTag de la compañía Sealed Air, que utiliza la banda de 13.56MHz y que estará programada para obtener datos de temperatura cada 3 minutos con una resolución de 0.1°C y protección IP-65.

Otro de los dispositivos comerciales será una tarjeta semipasiva UHF RFID, modelo A927ZET, de la compañía CAENRFID, con sonda de temperatura externa, programada para tomar datos cada 3 minutos y con una resolución de 0.1°C y protección IP-67.

Del tercer dispositivo se desconocen los datos por motivos de confidencialidad, la única información que se dispone es que la adquisición de datos es cada 3 minutos con una resolución de 0.1°C.

Respecto a las tarjetas RFID del proyecto GoodFood se programarán para adquirir datos cada minuto con una resolución de 1°C y 1%RH. Se escogió esta resolución para no saturar la memoria de la tarjeta con datos que no fueran los propios del ensayo, cabe recordar que la tarjeta se pondrá en marcha en los laboratorios de la

Universidad de Barcelona y no se conoce, a priori, la fecha exacta en la que se realizará el ensayo

6.1.1.3.- Prueba de campo en toda la cadena logística de distribución del pescado.

La última validación de la tarjeta RFiD del proyecto GoodFood se realizará mediante una prueba de campo que englobaba toda la cadena logística de distribución del pescado.

Esta prueba de campo consistirá en realizar todo el viaje que realiza el pescado, en este caso merluza de Sudáfrica, desde que sale del barco pesquero, hasta que llega a los canales de distribución, en este caso, a los almacenes del socio del proyecto, Decoexa, en Vitoria.

Para la prueba de campo se prepararán 3 tarjetas RFiD, dos rígidas y una flexible. Se programarán para adquirir datos cada 15 minutos, este tiempo tan largo es debido a que se sabe en concreto cuándo se realizará la prueba de campo. En este caso no habrá ningún dispositivo comercial para comparar los resultados.

6.2.- Resultados.

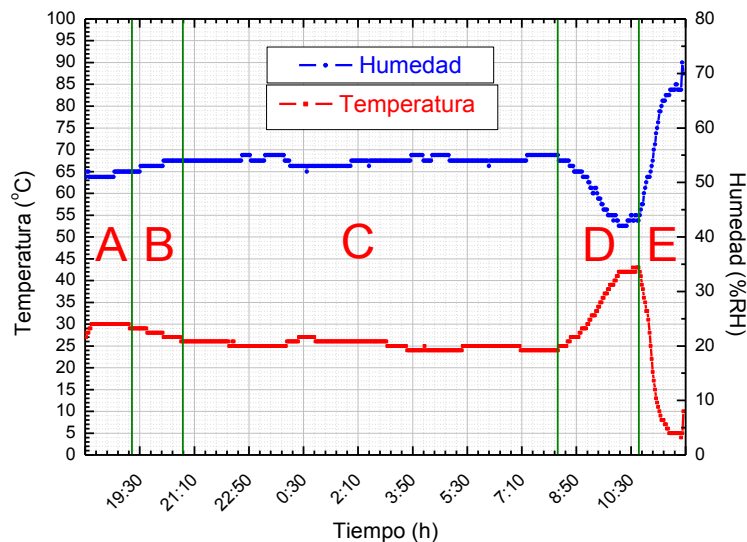
En este apartado se mostrarán los resultados experimentales obtenidos según las especificaciones del plan de test del apartado anterior utilizando la tarjeta RFID del proyecto GoodFood.

6.2.1.- Comprobación del correcto funcionamiento del sistema.

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos en las test de comprobación del correcto funcionamiento del sistema.

6.2.1.1.- Primer experimento funcional.

Para este primer ensayo, se programó la tarjeta RFID para que tomara datos de temperatura y humedad cada 2 minutos con una precisión de 1°C y 1%RH. Una vez programada la tarjeta, se depositó en la repisa exterior de la ventana del laboratorio, de este modo permitía medir los cambios de temperatura y humedad entre el atardecer, la noche, la madrugada y la mañana. Al final se introduce la tarjeta en una nevera. El laboratorio está situado en la Facultad de Física de la Universidad de Barcelona y durante la mañana el sol incide directamente en la ventana. La Gráfica 12 muestra los resultados obtenidos:



Gráfica 12: Evolución de la temperatura en función de la hora del día.

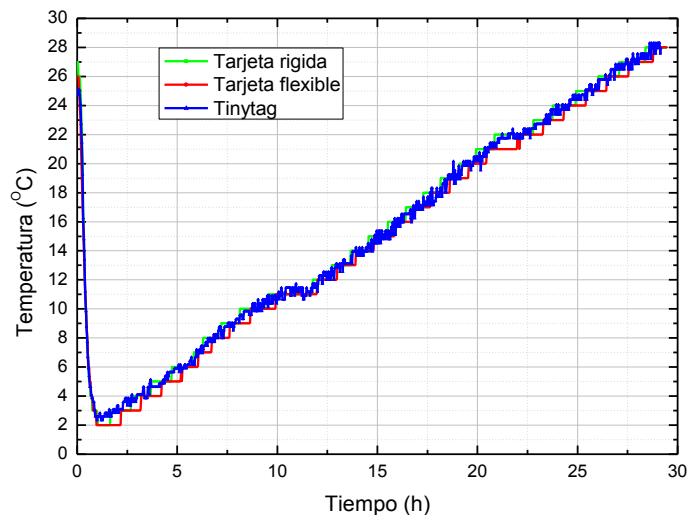
La tarjeta RFID se puso en funcionamiento a las 17:52 horas del día 28 de Agosto del 2007 y dejó de funcionar a las 12:06 del 29 de Agosto del 2007.

De la Gráfica 12 se aprecia como la tarjeta tarda unos 10 minutos en estabilizar su temperatura y humedad a 30°C y 52%RH. A partir de las 19 la temperatura empieza a disminuir y la humedad a aumentar debido a la puesta de sol. De madrugada la temperatura y la humedad se estabilizan sobre los 25°C y 53%RH respectivamente hasta que amanece. Una vez empieza a salir el sol y tal y como se espera, la temperatura va aumentando hasta llegar a los 43°C y la humedad disminuye hasta los 42%RH. A las 10:48 se retira la tarjeta de la ventana y pasados unos minutos, se introduce en una nevera con una temperatura conocida de 4°C. Se aprecia en la Gráfica 12 el descenso abrupto de la temperatura hasta los 4~5°C y el aumento significativo de la humedad hasta los 68%RH debido a las condiciones internas de la nevera.

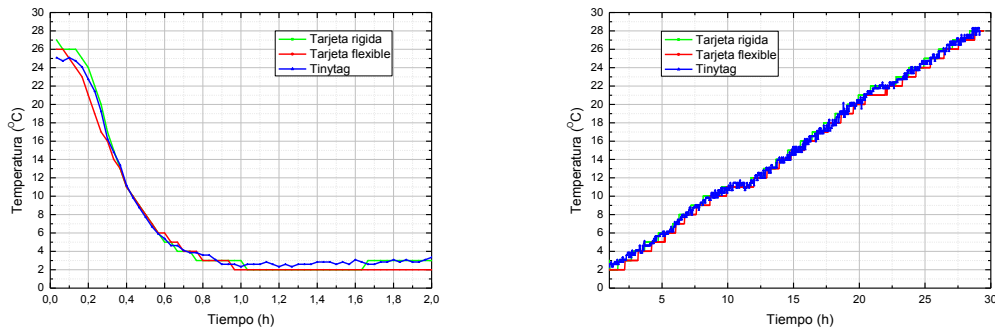
Este ensayo confirmó el buen funcionamiento que la tarjeta RfiD tenía ante los cambios de temperatura y humedad, con un consumo aproximado de 7.78µAh, por lo que el consumo total del experimento fue de aproximadamente 257µAh.

6.2.1.2.- Primera comparativa en cámara climática.

Para este ensayo se programaron dos rampas de temperatura, como se aprecia en la Gráfica 13, la primera rampa era un descenso desde los 25°C hasta los 2.5°C en 1 hora. Esta rampa puede apreciarse con más detalle la parte izquierda de la Gráfica 14. La segunda rampa consistió en incrementar la temperatura desde los 2.5°C hasta los 28°C en las siguientes 28 horas. Esta rampa puede apreciarse en la parte derecha de la Gráfica 14:



Gráfica 13: Resultados de los ensayos de validación de las tarjetas RfiD, tanto en formato rígido como en formato flexible.



Gráfica 14: Detalle de los ensayos realizados en la cámara climática. La gráfica de la izquierda corresponde al descenso controlado de temperatura hasta los 2°C y la gráfica de la derecha corresponde al incremento controlado de temperatura hasta los 28°C.

Los datos obtenidos, tanto de la tarjeta RFID en formato rígido, como en formato flexible, seguían las mismas dinámicas que el dispositivo comercial, tanto en los cambios rápidos de temperatura, correspondientes a la primera rampa, como en los lentos, correspondientes a la segunda rampa. Tal y como puede apreciarse tanto en la Gráfica 13, como en la Gráfica 14.

Como en el anterior experimento, la tarjeta consumía 7.78 μ Ah, por lo que el consumo total de este experimento fue de 216 μ Ah. No existen datos de consumo del Tinytag Ultra 2, por lo que no es posible comparar las tarjetas RFID con estos dispositivos.

6.2.2.- Comparativa y pruebas de campo en la cadena de distribución del pescado.

En esta sección se detallan los resultados obtenidos por la tarjeta RFID durante los diferentes transportes realizados dentro de la cadena logística de distribución del pescado. También se detallan las comparativas realizadas durante estos transportes con otros equipos comerciales.

6.2.2.1.- Primera comparativa y prueba de campo: trayecto de Frankfurt (Alemania) a Vitoria (España).

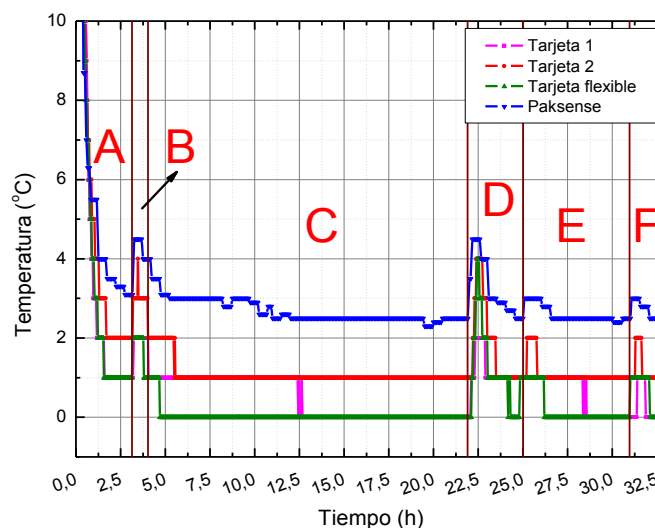
Una vez el pescado llega a la Unión Europea tiene que pasar un control veterinario obligatorio. Después del control, se introdujeron los dispositivos que componían la prueba dentro de las cajas de poliestireno expandido (EPS o porexpan) donde se transportaban las merluzas, como muestran las imágenes de la Figura 35:



Figura 35: Posición de la tarjeta RFiD dentro de la caja de merluza.

La planificación del trayecto de la carga de pescado desde Frankfurt hasta Vitoria consta de un viaje de aproximadamente 20 horas, incluyendo una descarga parcial, aproximadamente a 17 horas de la salida, en la localidad francesa de Saint Jean de Luz y finalmente llegada a Vitoria.

Todos los dispositivos se pusieron a adquirir datos al mismo tiempo, en concreto a las 13:30 del sábado 8/9/2007 y dejaron de tomar datos 33 horas más tarde, cuando se desactivaron en el centro de distribución de Decoexa. Los datos obtenidos por los dispositivos durante esta prueba se muestran en la Gráfica 15:



Gráfica 15: Datos de temperatura obtenidos en la primera prueba de campo.

En la Gráfica 15-A, se observa el descenso de la temperatura en el momento de pasar de las oficinas, a las instalaciones con temperatura controlada que Decoexa utilizaba el aeropuerto de Frankfurt. Una vez en dichas instalaciones se introdujeron los dispositivos en sus respectivas cajas de merluza.

El siguiente paso es cargar el camión que llevará las cajas de merluza desde las instalaciones de Decoexa en Frankfurt hasta Vitoria. Durante este periodo, que ocurre sobre a las 16:45, unas 3 horas más tarde de activar nuestros dispositivos, Gráfica 15-B, se detecta un aumento de la temperatura de casi 2°C. En los periodos de carga y descarga es donde existe más riesgo de romper la cadena de frío, siendo los puntos más críticos de toda la cadena logística de distribución.

Una vez acabada la carga y cuando el camión ya está el viaje, en la Gráfica 15-C se aprecia como la temperatura se estabiliza. Los pequeños cambios en la temperatura pueden ser debidos a las diversas paradas de descanso que los conductores deben realizar. También pueden ser debidos a los posibles cambios climatológicos durante el trayecto.

Después de 17 horas de viaje, sobre las 11:00 de la mañana del día siguiente, el camión llega a Saint Jean de Luz, donde tiene programada una descarga parcial para distribuir la carga en otros camiones. Esta descarga puede apreciarse en la Gráfica 15-D como un aumento de más de 2°C, como ya sucediera en el periodo de carga anterior. El trayecto desde Saint Jean de Luz hasta Vitoria se realiza en 2:15 y se corresponde al descenso de temperatura después de la carga.

Una vez en Vitoria, se realiza la descarga de las cajas y estas permanecen en las instalaciones de Decoexa, tal y como se refleja en la Gráfica 15-E.

Por error, las cajas de merluza se cargaron de nuevo para enviarlas a los distribuidores de Zaragoza, en España. Este hecho se refleja en la Gráfica 15-F.

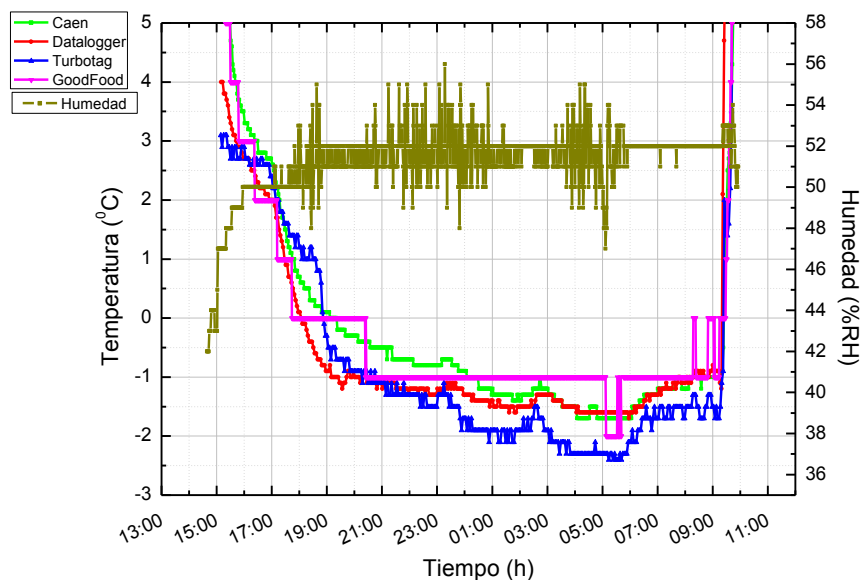
Comparando los datos obtenidos de todos los dispositivos, se observa que las tarjetas RFID tienen un comportamiento muy similar y que las prestaciones de estas en comparación con la tarjeta *Smart TXi Label* son también semejantes. Las diferencias en temperatura pueden ser debidas a la posición de los dispositivos en la caja, ya que estas incluyen bolsas de hielo, y si están cerca de las tarjetas, pueden perturbar las medidas de temperatura.

A falta de una medida de referencia de temperaturas del camión, que no fue suministrada por Decoexa, se puede concluir que las tarjetas RFID del proyecto GoodFood pasaron la primera prueba de campo satisfactoriamente.

En este caso, al igual que los anteriores, el consumo aproximado de la tarjetas era de 7.78µAh, por lo que la energía consumida en este experimento fue de aproximadamente 257µAh.

6.2.2.2.- Segunda comparativa y prueba de campo: trayecto de Paris (Francia) a Vitoria (España)

Los datos obtenidos en la prueba de campo se muestran en la Gráfica 16:



Gráfica 16: Resultados de temperatura y humedad obtenidos en la segunda prueba de campo.

De esta prueba de campo se desconocen los tiempos de trayecto, cargas y descargas. Únicamente conocemos que era un trayecto entre el centro de productos perecederos del aeropuerto de Paris, Francia y las instalaciones de Decoexa en Vitoria, España. Por este motivo la Gráfica 16 muestra, además de los datos de temperatura, los datos de humedad relativa, que se correlacionan con ciertos periodos de inestabilidad que no se aprecian en la gráfica de la temperatura. Estos periodos son debidos tanto a fenómenos atmosféricos del viaje, como a paradas de descanso y a los periodos de carga y descarga.

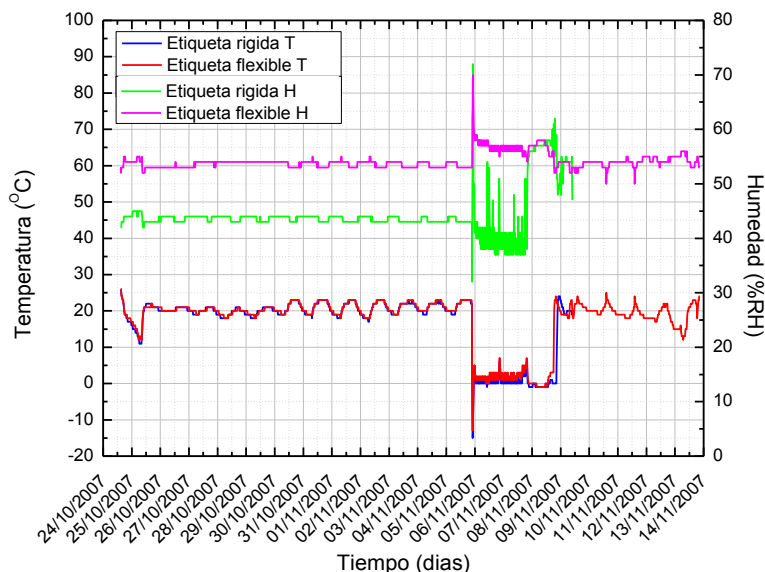
De la Gráfica 16 se confirma que las tarjetas RFID se comportan de una forma similar a las tarjetas comerciales, salvo la diferencia en su resolución, siguiendo su misma dinámica y evolución.

Para este experimento el consumo aproximado de las tarjetas $7.74\mu\text{Ah}$, por lo que el consumo total del experimento fue de $139\mu\text{Ah}$.

Por todo lo expuesto anteriormente se puede afirmar que las tarjetas RFID del proyecto GoodFood han pasado favorablemente las pruebas de campo y comparativas a las que se les ha sometido.

6.2.3.- Prueba de campo en toda la cadena logística de distribución del pescado.

Las tarjetas RFID se activaron y enviaron por mensajería el día 24/10/2007 a las 14:40 y el introdujeron en la cadena logística de distribución el día 5/11/2007 sobre las 21:25. Estuvieron tomando datos cada 15 minutos durante más de 22 días seguidos, hasta el 13/11/2007, momento en el que fueron extraídos los datos por el lector. De las tres tarjetas RFID enviadas, solamente se recuperaron dos de ellas, los datos registrados se muestran en la Gráfica 17:



Gráfica 17: Datos de temperatura y humedad registrados por las tarjetas RFID durante los 22 días de funcionamiento.

Las oscilaciones previas y posteriores a la introducción de las tarjetas RFID en la cadena logística de distribución que muestra la Gráfica 17, en los 14 días primeros, son debidas a los viajes mediante paquetería y estancias en oficinas a la espera de ser enviadas a su destino, estas oscilaciones corresponden a los cambios de temperatura y humedad. Las diferencias en los datos de humedad entre las tarjetas son debidas al montaje de las tarjetas dentro de la caja de protección, tal y como se explica anteriormente. La tarjeta flexible no se puede fijar a la caja mediante tornillos, por lo que existe un espacio entre el sensor y el filtro que hace que los datos obtenidos por las tarjetas estén desplazados y sean ligeramente diferentes entre ellos.

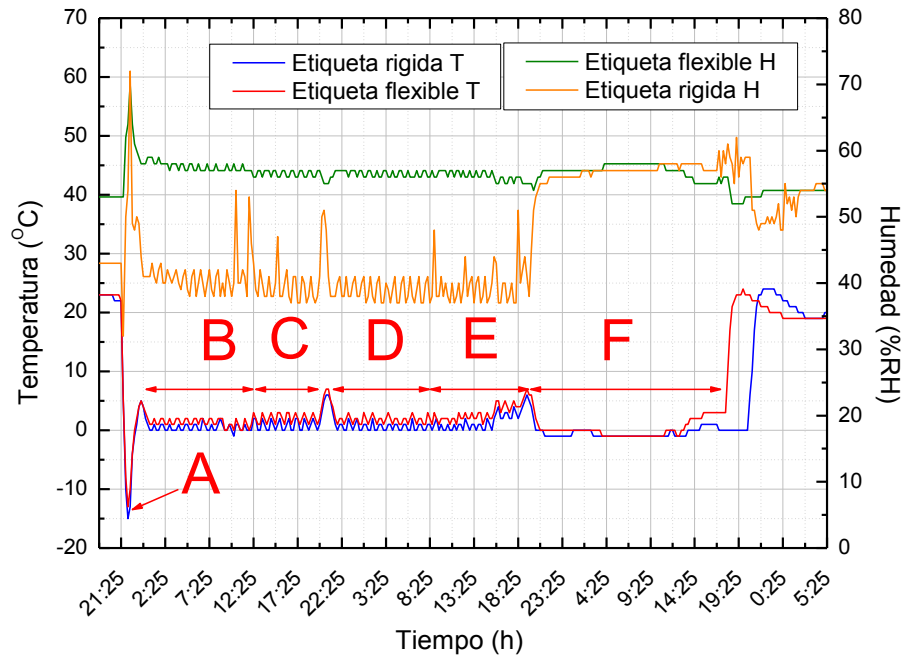
Puede observarse también que una de ellas, la tarjeta flexible, estuvo 5 días más adquiriendo datos, esto fue debido a que, como en la prueba de campo anterior, se perdió la caja que contenía la tarjeta durante este periodo de tiempo y la tarjeta continuó adquiriendo datos.

En este caso el consumo de las tarjetas fue de $7.73\mu\text{Ah}$, por lo que el consumo durante los 22 días fue de aproximadamente 4.1mAh .

Seguidamente se comentan más en detalle los datos adquiridos durante más de 3 días en la cadena logística de distribución.

6.2.3.1.- Trayecto de Mossel Bay (Sudáfrica) a Vitoria (España).

El 5/11/2007 sobre las 21:25 se introdujeron las tarjetas RfiD, una rígida y una flexible en la cadena logística de distribución de pescado, merluza en este caso. Los datos adquiridos de temperatura y humedad se muestran en la Gráfica 18:



Gráfica 18: Datos de temperatura y humedad de toda la cadena logística de distribución de pescado, desde el procesado, hasta la plataforma de distribución, obtenidos por las tarjetas RfiD del proyecto GoodFood.

El pescado, en este caso las merluzas, llegan de alta mar en barcos de pesca a las instalaciones procesadoras de Mosel Bay, Sudáfrica, donde se procesan, clasifican y empaquetan en cajas de porexpan. Una vez empaquetadas, se introducen las tarjetas RFID en las cajas de merluza, como muestra la Figura 36. Seguidamente se somete al pescado a un golpe de frío de -15°C durante 1 hora, Gráfica 18-A, antes de cargarlo en camiones refrigerados. Carga en los camiones y trayecto de aproximadamente 10 horas de viaje, Gráfica 18-B, hasta las instalaciones de productos perecederos del aeropuerto de Ciudad del Cabo, Sudáfrica.



Figura 36: Apilamiento de cajas de merluza ya procesadas y clasificadas y colocación de los sensores dentro de las cajas de merluza.

Una vez descargadas las cajas de merluza, y tras pasar control veterinario obligatorio, Gráfica 18-C, esperan a poder ser cargadas en el avión con destino a Vitoria, España.

El viaje en avión desde Ciudad del Cabo, Sudáfrica, a Vitoria, España se realizó en aproximadamente 12h, como se aprecia en la Gráfica 18-D. Un incremento en la humedad relata la descarga del avión hacia las instalaciones de productor perecederos del aeropuerto de Vitoria.

Las cajas de merluza permanecen en las instalaciones del aeropuerto hasta que pasan de nuevo el control veterinario para poder entrar en la Unión Europea, como muestra la Gráfica 18-E.

Una vez pasado el control veterinario, las cajas de merluza se cargan en camiones y se envían a las plataformas distribuidoras, como muestra la Gráfica 18-E, que la empresa Decoexa utiliza para su distribución final a los mercados.

De la Gráfica 18 se puede apreciar también que los datos obtenidos de humedad relativa nos proporcionan mucha información sobre los cambios ocurridos durante el viaje, sobre todo los datos obtenidos por la tarjeta rígida. Las diferencias que se observan entre las tarjetas son debidas al posicionamiento de éstas en las cajas de protección. Como se aprecia en la Figura 34, la tarjeta rígida se ancla mediante tornillos a la tapa de la caja, mientras que la tarjeta flexible está situada en el fondo de la caja, su anclaje se realiza mediante el conector de la batería. Esta disposición en la caja se traduce en que para la tarjeta flexible sea mucho más difícil detectar los cambios de humedad, debido a que el volumen de la caja hace de filtro ante dichos cambios. Así pues, la utilización de los datos de humedad relativa parecen más sensibles a los cambios que los datos de temperatura, por este motivo podría ser muy interesante integrar estos datos en los sistemas de control de la cadena de frío.

El consumo referente sólo al viaje de la merluza fue de aproximadamente $372\mu\text{Ah}$, tomando 48 horas como duración del viaje completo.

6.3.- Conclusión.

Con la realización de este ensayo de campo, se validan las tarjetas para su uso en prácticamente toda la cadena logística de distribución del pescado, desde el empaquetamiento el pescado fresco una vez procesado, hasta las plataformas de distribución, incluso se podrían utilizar hasta llegar a los puntos de venta, donde aportarían una información útil de la calidad y procedencia del pescado.

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados demuestran las ventajas de disponer de la información referente a la humedad, al ser este un parámetro menos controlado que la temperatura durante la cadena logística de distribución. De esta forma se puede complementar la información obtenida de los datos de temperatura.

Tras el desarrollo de la tarjeta RFID con sensores de temperatura y humedad, mediante las pruebas de campo presentadas en este capítulo, se ha demostrado y validado su funcionamiento a lo largo de la intercontinental cadena logística de distribución de pescado fresco.

Esta tarjeta RFID presenta importantes ventajas en comparación con las herramientas utilizadas habitualmente. La principal es la autonomía del sistema, que permite la consulta de datos de trazabilidad en línea, así como la monitorización de las condiciones en que se encuentra la cadena de frío. Uno de los aspectos clave de este sistema RFID es el hecho de que los datos pueden ser leídos en cualquier lugar y momento de la cadena logística sin tener que abrir las cajas de porexpan, preservando la calidad del pescado que hay en ellas. Hay que tener en cuenta también, que las tarjetas se pueden leer de una manera automatizada a medida que pasan por un lector, sin interferir en ningún momento en la cadena de frío. Asimismo, el precio de las tarjetas en productos de alto valor añadido, como es el caso que aquí se presenta, es asequible, principalmente porque solo es necesaria una tarjeta por pallet. Por otro lado, estas tarjetas han sido diseñadas para poder trabajar en entornos con temperaturas por debajo de los 0°C, por lo que se podrían utilizar en otros tipos de cadenas logísticas de alimentación, como lo es la de productos congelados. Además, la integración de un sensor de humedad hace que al sistema especialmente sensible a los cambios de las condiciones de almacenamiento.

En resumen, el innovador sistema aquí presentado:

1. permitió monitorizar si el rango de temperatura se mantuvo en todo momento durante el viaje desde el productor hasta el consumidor,
2. proporcionó información de trazabilidad del producto a los diferentes eslabones de la cadena de distribución del pescado fresco,
3. permitió obtener un mejor control de la seguridad y calidad a lo largo de toda la cadena logística de pescado.

Por lo tanto, el desarrollo de esta tarjeta puede ayudar a mejorar la competitividad de las empresas importadoras y exportadoras de pescado fresco, o comida en general, mejorar la gestión logística y reforzar la confianza de los consumidores en la cadena logística de pescado.

7.- Tarjeta RFID en la cadena logística de la fruta: Optimización del consumo de los sensores de gas.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

En este capítulo se detalla la implementación de sensores de gas tipo MOX en la tarjeta RFID. Se explica la electrónica asociada a estos sensores, el control de estos para disminuir su consumo y como afecta dicho control a sus características metrológicas.

En la literatura podemos encontrar información referente al control de los sensores de óxido de estaño SnO_2 , la mayor parte de esta literatura está basada en técnicas de modulación de temperatura, entre 100 y 450°C para mejorar la selectividad de los sensores a diferentes gases. Es conocido que la sensibilidad a un determinado gas depende de la temperatura de trabajo y de los materiales que componen la capa activa del sensor [1]. El uso de esta técnica es conocido como el método de Modulación por Pulsos de Temperatura, o en inglés *Pulse Temperature Modulation* (PTM), que consiste en activar y desactivar los calefactores de los sensores periódicamente. Lee [1] diferencia el PTM en dos grupos, el primer grupo son los que modulan la temperatura a través de la oscilación periódica del voltaje de alimentación de los calefactores, cuyo objetivo principal es el de mejorar la selectividad de los sensores para diferentes compuestos. El segundo grupo son los que controlan el transitorio de temperatura utilizando técnicas de pulsado, basados en encender y apagar la alimentación de los calefactores, cuyo objetivo principal es el de reducir el consumo de los sensores.

Como ejemplos del primer grupo, Cavicchi et al. [2] comenta que la miniaturización de los sensores de gas mediante tecnologías de depósito de capa fina promete producir microsensores de bajo coste, pero además una de sus principales características es que tienen una constante térmica extremadamente pequeña, con esto se consigue poder variar la temperatura del calefactor sin cambiar las características del sensor. Para demostrarlo aplica un tren de pulsos a los calefactores durante la etapa de medida, de 100ms desde 20°C a 450°C con 5°C de incremento, para medir acetona, formaldehído, etanol y metanol y comprueba como la sensibilidad varía dependiendo del gas y la temperatura de funcionamiento. Por otro lado, Heiling et al. [3] describen un experimento basado en variar sinusoidalmente y a 50mHz la temperatura del sensor de capa gruesa entre 200 y 420°C para detectar dos gases CO y NO_2 obteniendo muy buenos resultados.

Así mismo, Ortega et al. [4] utiliza señales triangulares a diferentes frecuencias para obtener temperaturas entre 220 y 420°C para la detección de CO y CH_4 , las respuestas obtenidas dinámicamente junto con las obtenidas estáticamente maximizan la información extraída de un solo sensor, demostrando una mejora con respecto a la ofrecida por el fabricante del sensor.

Otro caso de utilización de diversos tipos de señales es el que reporta Huang et al. [5] que utiliza señales rectangulares, de diente de sierra, triangulares, sinusoidales y técnicas de pulsado, a diferentes frecuencias y a diferentes temperaturas de trabajo para encontrar la mejor sensibilidad a diversos gases.

Llobet et al. [6] utiliza señales multisinusoidales, con frecuencias de 12.8, 25.6, 38.5, 92.9, 339.7 and 682.7mHz, para la detección de amoníaco, acetaldehído, etileno y etanol, utilizando herramientas matemáticas como la *Fast Fourier Transform* (FFT) para el análisis de los datos.

Jaegle et al. [7] consigue consumos de 6mW a 100°C, 25mW a 225°C y 47mW a 340°C mediante el uso de PTM, encendiendo el calefactor 5 segundos y apagándolo 10 segundos, para medir CO y NO₂.

Por otra parte, Ilker et al. [8] concluye que, después de varios experimentos, el mejor PTM para la detección de amoníaco es el de 30 segundos encendido y 270 segundos apagado.

Para la viabilidad de sensores de gas en una tarjeta de muy bajo consumo es necesaria la utilización de algún tipo de PTM que reduzca su consumo. El PTM a utilizar ha de ser más drástico que los presentados en este pequeño estado del arte para poder alcanzar tiempos de funcionamiento acordes con las condiciones del transporte en aplicaciones logísticas.

Todos los ejemplos citados reportan experimentos realizados en laboratorio, con equipamiento de laboratorio y sofisticadas técnicas de análisis. En el caso que se presenta en este capítulo todo el material de laboratorio se resume en la tarjeta RFID, únicamente es necesaria la estación de gases donde se llevarán a cabo los experimentos.

También cabe destacar que en la literatura no existe un exhaustivo estudio del comportamiento de sensores de gas ante tipos de PTM donde se consuma muy poca energía, lo habitual es preocuparse solo de la sensibilidad, dejando a un lado otros parámetros importantes para el funcionamiento de los sensores, como pueden ser el tiempo de estabilización, la variación de la línea de base o el ruido del sensor ante diferentes modos de funcionamiento. En este capítulo se realiza un estudio de estos parámetros.

7.1.- Introducción a la matriz de sensores y al control de temperatura por pulsos.

Uno de los mayores retos en el desarrollo de tarjeta fue la implementación de sensores de gas para la detección de ciertos compuestos de interés en la logística de la fruta. Estos compuestos son etileno, acetaldehído y amoníaco.

Finalmente, la solución adoptada en el proyecto Good-Food fue implementar una matriz de cuatro sensores MOX, uno de ellos basado en óxido de estaño (SnO₂) y los otros tres basados en óxido de estaño dopado con plata (SnO₂ + Ag) y muy bajo consumo como principal característica, denominados en inglés *ultra low power* MOX (*ulp* MOX), implementan calefactores micromecanizados integrados y de tamaño micrométrico, cada sensor tiene un diámetro de 120µm de ancho por 6 µm de alto, la matriz de sensores tiene una ventana activa de 1.140 x 400µm²)[9].

Por su diseño, estos sensores ya tienen un consumo excepcionalmente bajo. A nivel histórico los primeros sensores MOX consumían del orden de 1W. En la actualidad lo habitual es encontrar consumos entre 100 ~ 200 mW. Los sensores utilizados en este prototipo fueron desarrollados por el socio del proyecto IMM. La Figura 37 muestra la matriz de sensores *ulp* MOX utilizados como sensores de gas en la tarjeta RFID:

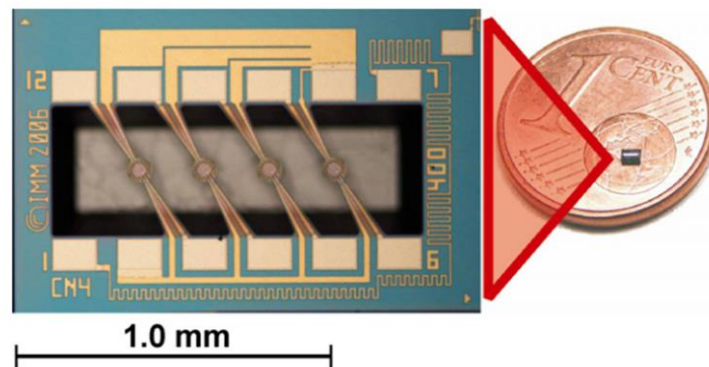


Figura 37: Matriz de sensores de gas *ulp MOX* implementados en la tarjeta RFID [44].

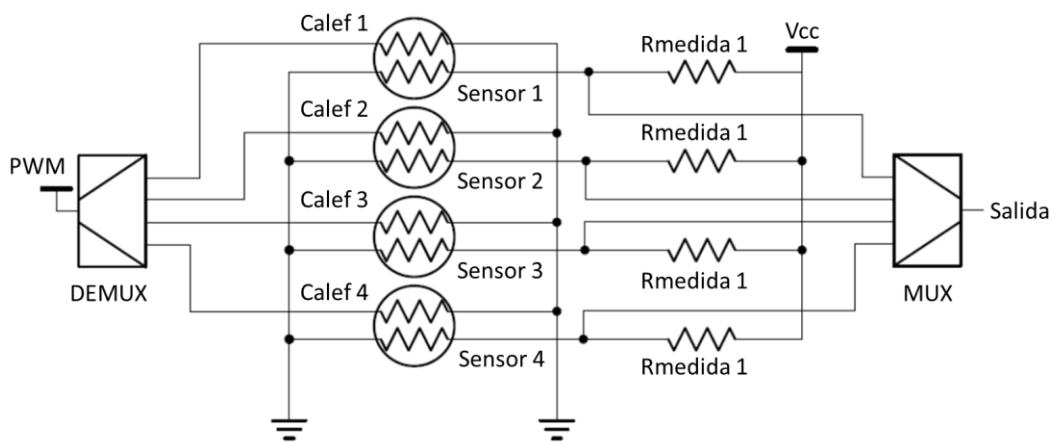
Según las especificaciones del sensor *ulp MOX*, la temperatura de trabajo es de 400°C y la constante de tiempo térmica para estos sensores se sitúa sobre los 1.5ms. La resistencia del sensor es aproximadamente de 1.5MΩ para medidas de aire sintético al 30%RH y valores cercanos a 100kΩ para medidas de aire sintético al 30%RH + 0.1 ppm de benceno (C₆H₆).

Para conseguir alcanzar la temperatura de trabajo deseada de 400°C, cada sensor *MOX* de la matriz tiene un calefactor que consume 14.5mW trabajando a 1.61V, lo que supone una corriente de 9mA y una resistencia de 179Ω. Aun siendo un consumo muy bajo en comparación con cualquier sensor *MOX*, es demasiado elevado para trabajar en modo continuo en la tarjeta, puesto que, en este caso, la batería de 25mAh tardaría 2.7 horas en agotarse sólo alimentando los calefactores.

Para reducir el consumo de energía en los calefactores en la tarjeta RFID se implementó el PTM que controla el transitorio de temperatura utilizando técnicas de pulsado, encendiendo y apagando la alimentación de los calefactores.

7.2.- Implementación de los sensores en la tarjeta RFID.

Una vez conocida la matriz de sensores de gas a utilizar, y para minimizar el espacio del sistema de control y adquisición de datos, se diseñó un sistema basado en multiplexor y demultiplexor que controlara secuencialmente cada uno de los sensores de la matriz, encendiendo los calefactores mediante el PTM y obteniendo los datos. De esta forma sólo era necesaria la implementación de un control y una etapa de adquisición. Todo el sistema digital de multiplexión y demultiplexión estaba controlado por el microcontrolador. El Esquemático 9 muestra el conexionado de los elementos del sistema:



Esquemático 9: Sistema de control secuencial de los calefactores y del sensor a medir.

Para obtener los 14.5mW que necesitan los calefactores para alcanzar la temperatura de 400°C, se utiliza la tensión de alimentación regulada de 1.8V y se reduce la potencia mediante la utilización de una modulación por ancho de pulso, o en inglés, *Pulse Width Modulation* (PWM) generada por el microcontrolador. En este caso el ciclo de trabajo del PWM es del 80% a una frecuencia de 30kHz, a esta frecuencia la dinámica térmica del sensor actúa como un filtro pasa bajos y la temperatura corresponde a la potencia entregada, obteniendo así una temperatura constante en el sensor. En el Esquemático 9 el DEMUX se corresponde al demultiplexor encargado de activar el encendido del calefactor del sensor donde se realiza la medida mediante el PWM. La señal obtenida en la medida es seleccionada por el multiplexor MUX.

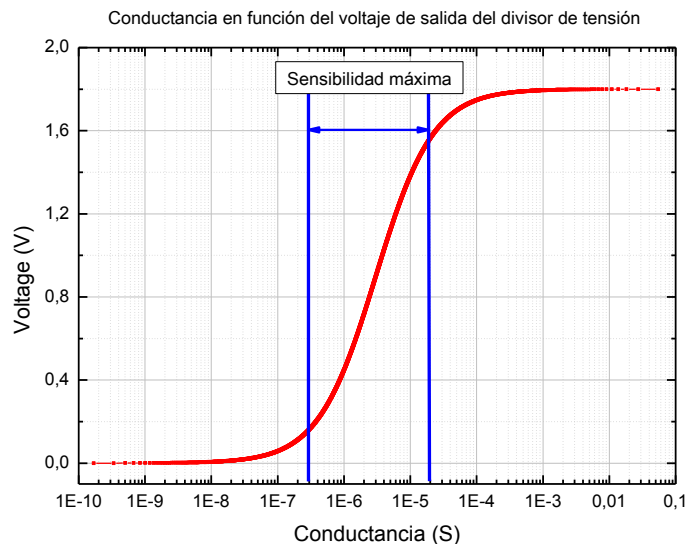
Para implementar este sistema se eligió el multiplexor de 4 canales ADG704 de la compañía Analog Devices tanto para el DEMUX como para el MUX. Sus principales características son:

- Entradas y salidas bidireccionales, pudiendo actuar como multiplexor o demultiplexor.

- Muy baja resistencia de ON. Entre 4.5Ω y 8Ω dependiendo de la fuente de alimentación, teniendo en cuenta que la resistencia del calefactor es aproximadamente 179Ω a temperatura de trabajo de 400°C .
- Muy bajo consumo, menor de $0.01\mu\text{W}$.
- Encapsulado de reducidas dimensiones, $5\times 3.1\text{mm}$.

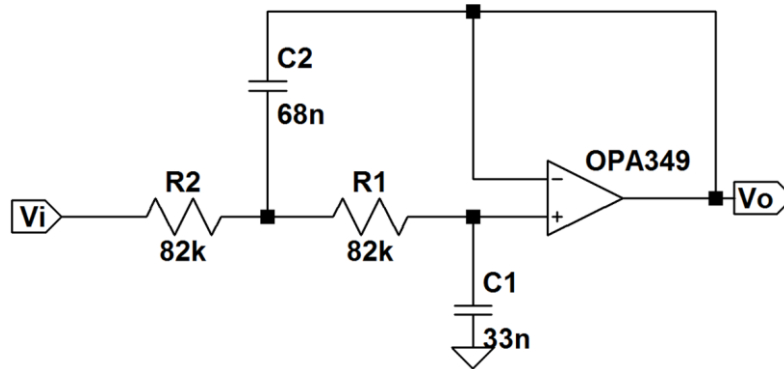
Para la lectura del sensor se optó por un simple divisor de tensión con el voltaje adecuado a la resistencia de carga. Mediante este divisor es posible conocer las variaciones de la resistencia del sensor. Se escogió $330\text{k}\Omega$ como valor de la resistencia de medida para tener mayor sensibilidad en la zona de interés. De esta forma, la sensibilidad máxima se sitúa entre $8\text{M}\Omega$ y $90\text{k}\Omega$, que cubre el rango entre $1.5\text{M}\Omega$ y $100\text{k}\Omega$ descrito en los requisitos de las especificaciones.

A partir de este momento, todos los resultados estarán indicados en conductancia, por lo que el rango especificado se sitúa entre 667nS ($1/1.5\text{M}\Omega$) y $10\mu\text{S}$ ($1/100\text{k}\Omega$). La Gráfica 19 muestra todos los valores posibles del divisor de tensión utilizando una resistencia de medida de $330\text{k}\Omega$ y donde está situada su sensibilidad máxima, entre 125nS y $11\mu\text{S}$:



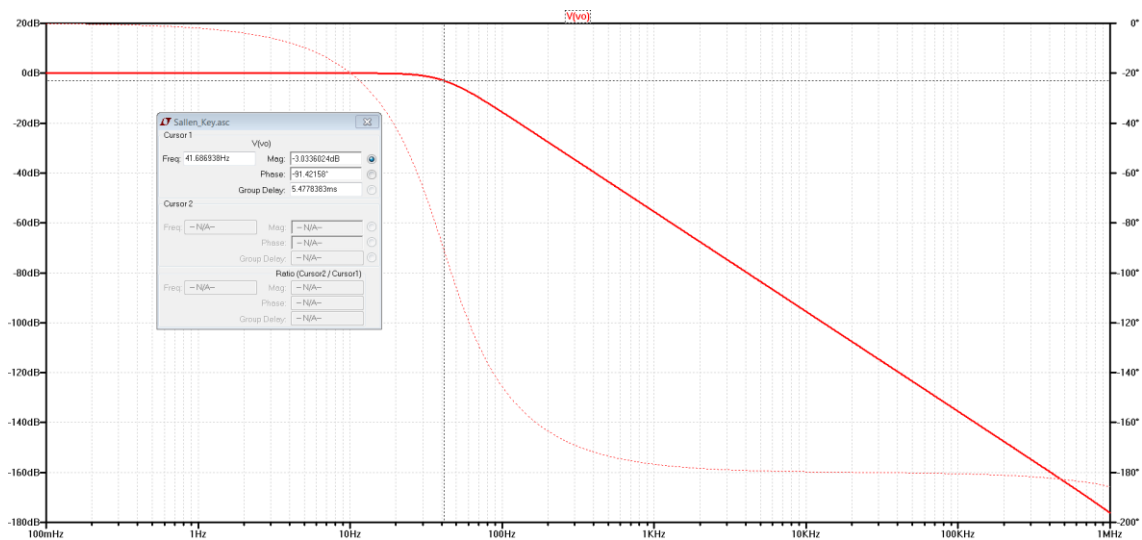
Gráfica 19: Conductancia en función del voltaje de salida del divisor de tensión utilizando una resistencia de medida de $330\text{k}\Omega$.

Una vez adquirida la señal de sensor deseado, ésta pasa por un filtro activo pasa bajos con ganancia unidad tipo *Sallen-Key* [10]. Este elimina el posible ruido provocado, tanto por el microcontrolador del sistema como por el PWM de los calefactores que puede acoplarse capacitivamente a la resistencia sensora. Además evita distorsiones provocadas por la impedancia de entrada del ADC del microcontrolador. El Esquemático 10 muestra la configuración del filtro *Sallen-Key*:



Esquemático 10: Componentes utilizados en la configuración del filtro tipo *Sallen-Key*.

Las frecuencias que se desean eliminar son la del PWM, 30kHz y la del microcontrolador, 4MHz. Para conseguir una atenuación de más de -100dB se calcula el filtro para que su frecuencia de corte esté sobre los 40Hz. De este modo, se obtienen los valores de los componentes pasivos que aparecen en el Esquemático 10. El amplificador operacional escogido para implementar el filtro fue el OPA349, el mismo que el utilizado en el sensor de luz. La Gráfica 20 muestra el diagrama de bode de la respuesta en frecuencia del filtro:



Gráfica 20: Diagrama de bode de la simulación del filtro *Sallen Key*.

La Gráfica 20, realizada con el programa de simulación LTspice de la compañía Linear Technology Corporation, muestra como la frecuencia de corte del filtro activo se sitúa en 41,61Hz y como las frecuencias que se desean eliminar son atenuadas, en el caso del PWM unos -120dB y en el caso del reloj del microcontrolador más de -180dB.

7.3.- Materiales y métodos.

En esta sección se detallan los modos de funcionamiento que se aplican a los sensores, como se realiza la adquisición de la señal de los sensores, como se realizan los experimentos y los tipos de gases utilizados.

7.3.1.- Modos de funcionamiento.

Los modos de funcionamiento consisten en controlar los calefactores de los sensores, variando los tiempos de encendido (T_{on}), entre 31.5ms y 2s, y de apagado (T_{off}), entre 20s y 120s, durante una fracción de un determinado periodo, asegurando que el sensor llegaba a los 400°C. La Figura 38 muestra gráficamente el funcionamiento del PTM:

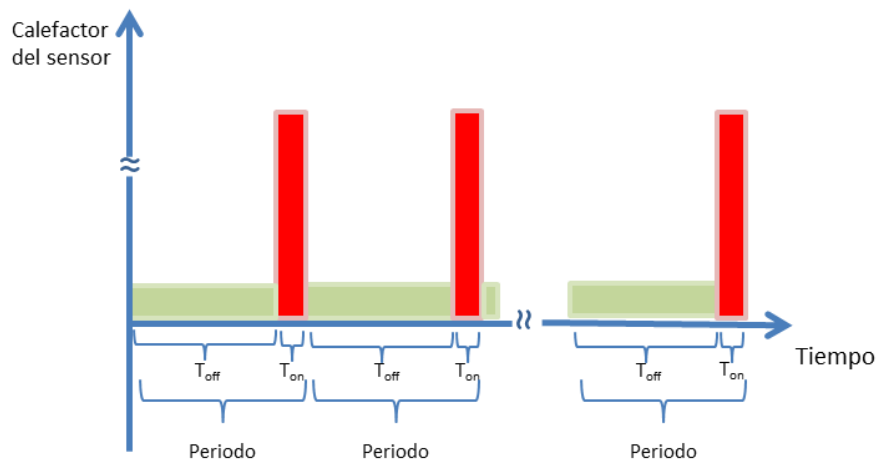


Figura 38: Representación gráfica del funcionamiento del PTM.

Los tiempos T_{on} y T_{off} representados en la Figura 38 se controlan mediante el microcontrolador. El funcionamiento de los calefactores es secuencial para los cuatro sensores de la matriz, solamente se encenderá un sensor a la vez, esto se consigue mediante el demultiplexor. La Figura 39 muestra el funcionamiento secuencial de los calefactores de los diferentes sensores de la matriz en el modo de funcionamiento PTM:

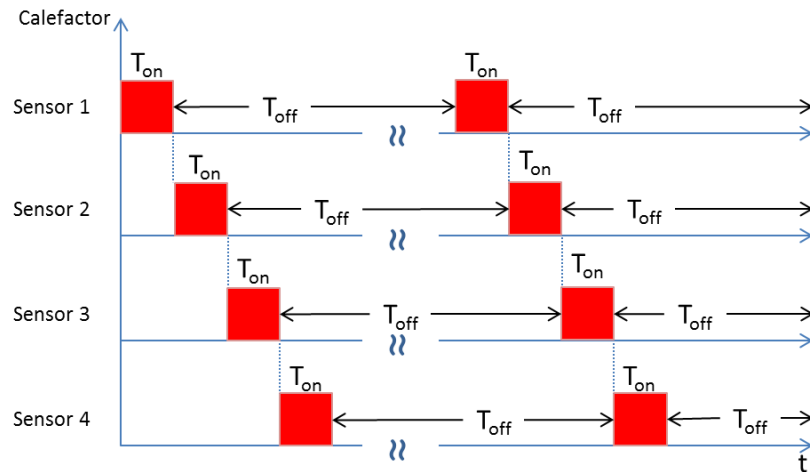


Figura 39: Funcionamiento secuencial de los calefactores de la matriz de sensores.

7.3.2.- Adquisición de datos.

Para la adquisición de datos utiliza el ADC interno del microcontrolador, del tipo Sample and Hold (S/H) y arquitectura de registro de aproximaciones sucesivas (SAR), con 12 bits de resolución. El rango de entrada está configurado entre 0 y 1,8V y la frecuencia de muestreo es de 330kHz. Se toman 8 muestras para cada tiempo de T_{on} equidistantes en el tiempo, es decir, cada $T_{on}/8$. Para cada muestra se tomarán 16 conversiones y se realizará la media aritmética de ellas. La Figura 40 muestra gráficamente el proceso de adquisición de datos:

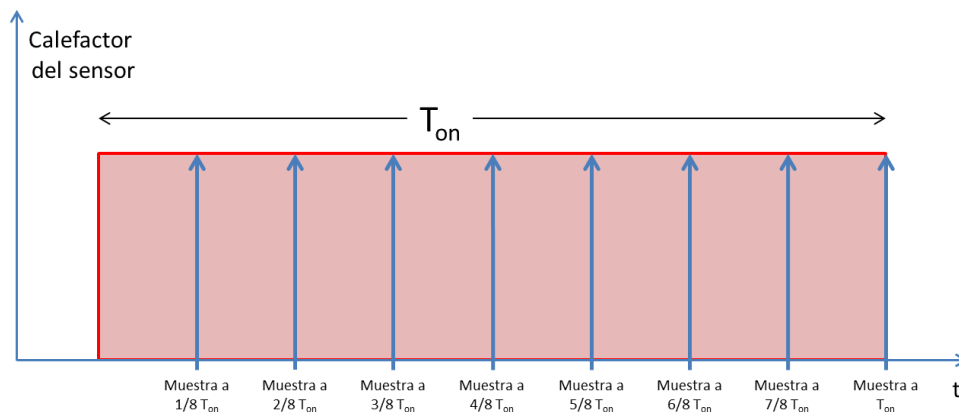


Figura 40: Proceso de adquisición de datos para un sensor *ulp* MOX.

El proceso que muestra la Figura 40 se realizará para cada uno de los sensores de la matriz y se guardarán los resultados en la memoria externa de la tarjeta RFID. Una vez acabado el experimento se extraerían los datos mediante la utilización del reader comercial y la GUI de MATLAB.

7.3.3.- Montaje experimental.

Todos los experimentos se realizarán utilizando la tercera versión de la tarjeta RFID. Ésta versión está adaptada al encapsulado TO-8. La matriz de sensores estará montada en un encapsulado TO-8 para facilitar los ensayos.

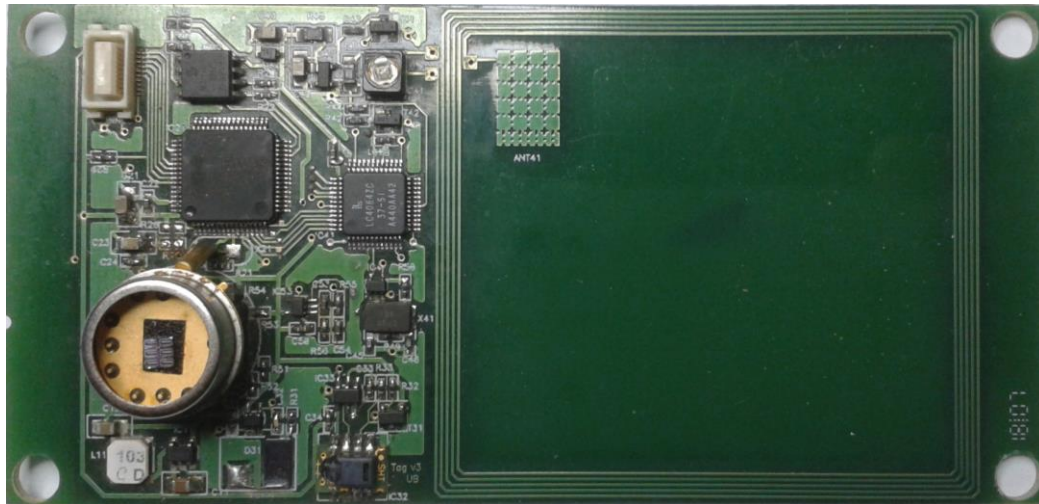


Figura 41: Tercera versión de la tarjeta RFID implementando la matriz de sensores.

En la Figura 41 se puede apreciar la posición del encapsulado TO-8 donde se encuentra la matriz de sensores.

Para la obtención de los datos de los datos guardados en la memoria de la tarjeta se utilizará el lector RFID comercial TRF7960 EVM, el cual nos permitirá acceder a toda la memoria de la tarjeta, además de una conexión directa a ordenador mediante el puerto USB, la Figura 42 muestra el lector utilizado.

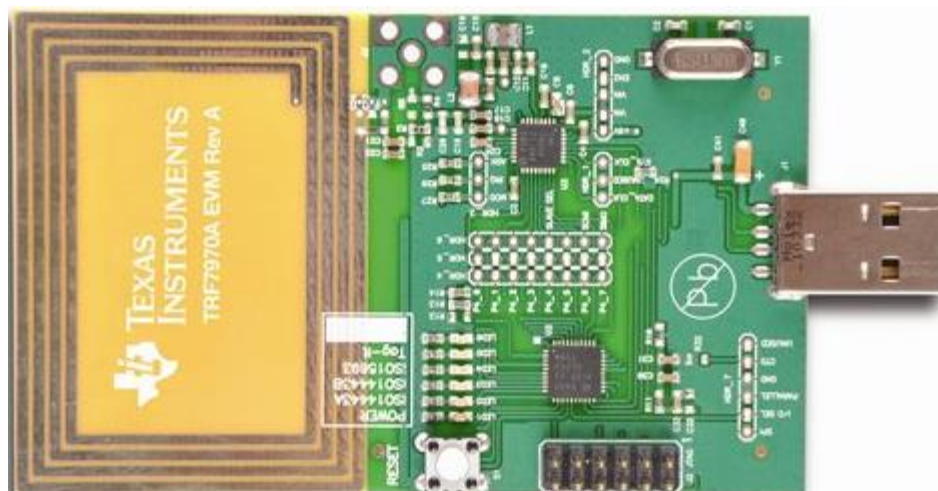


Figura 42: Lector RFID TRF7960 EVM utilizado para obtener los datos guardados en la tarjeta RFID.

Una vez conectado al ordenador, se utilizará la interfaz gráfica diseñada para obtener los datos almacenados en la memoria de la tarjeta RFID y generar los diferentes archivos asociados a cada uno de los experimentos para su posterior análisis, la Figura 43 muestra la visualización de dicho interfaz.

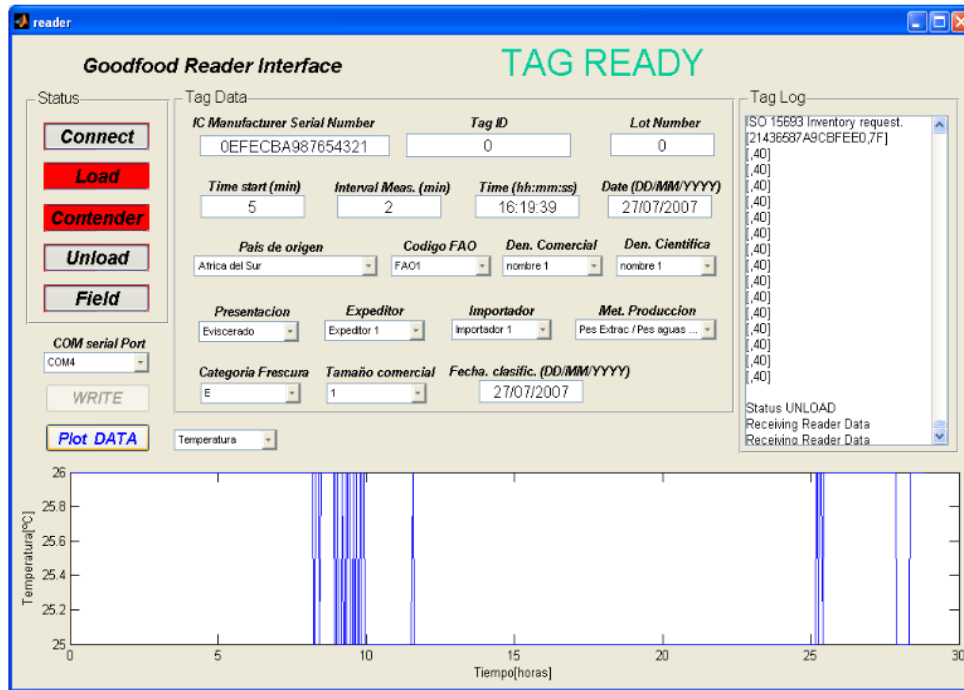


Figura 43: Interfaz de utilizada para obtener los datos en el ordenador.

Una vez obtenidos los datos de todos los experimentos se analizarán para observar el comportamiento de la matriz de sensores en diferentes modos de funcionamiento.

7.3.4.- Objetivos y evaluación de los experimentos.

El objetivo de estos experimentos es estudiar el comportamiento de la matriz de sensores en cada uno de los diferentes PTM aplicados. Se estudiarán los parámetros de tiempo de estabilización, variación de la línea de base, ruido, límite de detección de los gases y sensibilidad a los gases.

Con el estudio de estos parámetros se podrá concluir si es viable implementar en la tarjeta RFID sensores de gas, o en qué condiciones han de ser utilizados dichos sensores.

Los resultados obtenidos de los experimentos se evaluarán fuera de la tarjeta, de manera remota en un PC. Una vez sean recopilados todos los datos se analizarán todos los tipos de PTM aplicados para cada uno de los gases y se podrá llegar a las conclusiones oportunas.

7.3.5.- Experimentos.

Se realizarán 3 tipos de PTM, el primero consistirá en variar T_{off} manteniendo T_{on} constante, el segundo variará T_{on} manteniendo T_{off} constante y el tercero variará T_{on} y T_{off} al mismo tiempo. La Tabla 10 indica todos los tipos de PTM junto al ahorro de energía asociado a cada uno de ellos:

T_{on} / T_{off} (seg.)	Consumo de energía (%)	Consumo de energía (μW)
1/0	100	14500
2/20	9	1.450
2/40	4.7	725
2/80	2.44	362,5
2/120	1.64	241,67
1/120	0.82	120,83
0.5/120	0.41	60,42
0.25/120	0.208	30,21
0.125/120	0.104	15,1
0.065/75	0.052	12,57
0.0325/69	0.026	6,83

Tabla 10: Tipos de PTM utilizados junto al consumo de energía asociado a cada uno.

Un experimento consistirá en realizar 16 ciclos de 40 minutos, 8 de aire y 8 de gas. A cada ciclo de aire le seguirá un ciclo de gas. La duración total de cada experimento será de 640 minutos o aproximadamente 11.6 horas. En la Figura 44 está representado el diagrama temporal de todo el experimento.

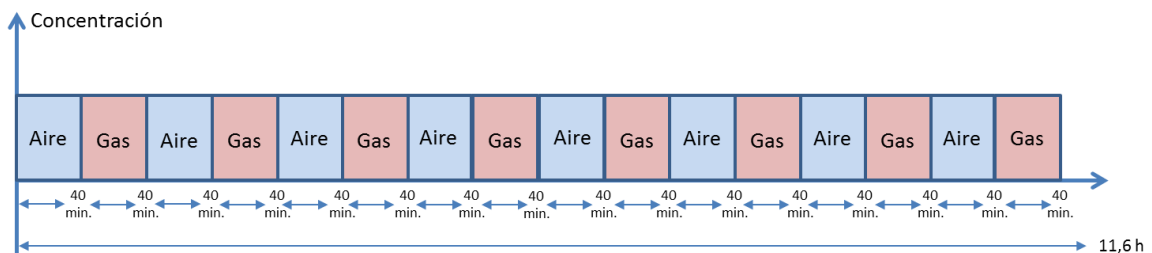


Figura 44: Diagrama temporal del experimento consistente en 16 entradas de gas de 40 minutos cada una.

Se utilizarán 4 tipos de gases para realizar todos los experimentos, aire sintético con botellas de Air premier O_2 20.9% +/-1% con una pureza del 99.995%, la botella de acetaldehído contendrá CH_3CHO 1% + O_2 20.9% + N_2 78.1%, la botella de amoníaco contendrá NH_3 1% balanceado con aire sintético y finalmente, la botella de etileno contendrá C_2H_4 1% + O_2 20.9% + N_2 78.1%.

7.3.6.- Concentraciones de gases.

En cada experimento individual se utilizarán 8 concentraciones diferentes de gas, separadas logarítmicamente entre ellas, en las que se engloban las diferentes especificaciones de detección de cada gas indicadas en capítulos anteriores. La Tabla 11 indica las concentraciones utilizadas para cada tipo de gas:

Numero de concentración	Acetaldehído (ppm)	Etileno (ppm)	Amoníaco (ppm)
1	2	8	60
2	3	14	37
3	5	24	23
4	9	43	14
5	14	75	9
6	23	131	5
7	37	229	3
8	60	400	2

Tabla 11: Concentraciones utilizadas en el experimento para cada tipo de gas.

El control de las concentraciones de cada gas se realiza mediante una estación de gases ubicada en uno de los laboratorios del departamento de electrónica de la Universidad de Barcelona [11, 12]. Esta estación de gases está basada en una interfaz de usuario realizado con el programa LabView de la compañía National Instruments Corporation, que controla los dispositivos de caudal másico, o en inglés *mass flow*, para conseguir las concentraciones de gas requeridas. La Figura 45 muestra el interfaz de usuario del programa realizado con Labview.

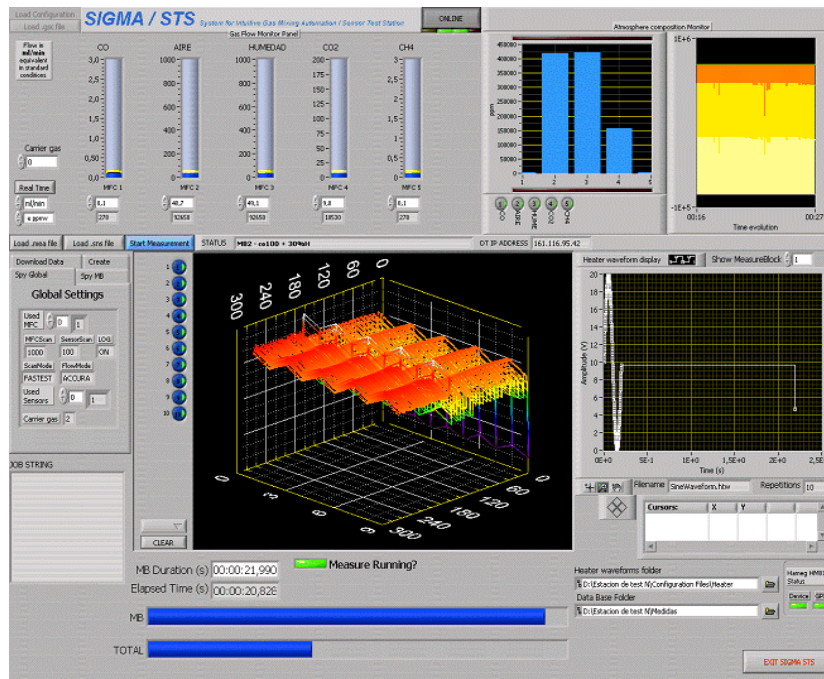


Figura 45: Interfaz de usuario del programa de control de los *mass flow* para conseguir las concentraciones requeridas.

Para cada tipo de PTM se realizarán 3 repeticiones de experimentos utilizando el mismo gas, a cada cambio de gas se realizará un experimento con aire sintético como medida de limpieza de la cámara de gas. En total se realizarán 120 experimentos correspondientes a los tres diferentes gases (acetaldehído, etileno y amoníaco) con sus correspondientes limpiezas con aire sintético. Todo ello para los diez diferentes modos de funcionamiento y con tres repeticiones correctamente ejecutadas, de 11.6 horas cada una. Teniendo en cuenta que aproximadamente uno de cada cuatro experimentos no llegará a ejecutarse correctamente a causa de problemas de software y/o hardware, el tiempo total transcurrido de manera ininterrumpida realizando experimentos se aproximará a los 3 meses.

7.4.- Resultados experimentales.

Seguidamente se analizan los resultados obtenidos tras la realización de los experimentos comentados anteriormente y que se corresponden con:

- Tiempo de estabilización de los sensores en función del tipo de PTM aplicado.
- Conductancia y ruido en la línea de base de los sensores en función del modo de funcionamiento.
- Sensibilidad de los sensores en función del tipo de PTM aplicado y el tipo de gas.
- Tiempo de funcionamiento de los sensores en función del consumo asociado al tipo de PTM aplicado.

7.4.1.- Tiempo de estabilización de los sensores en función del modo de funcionamiento.

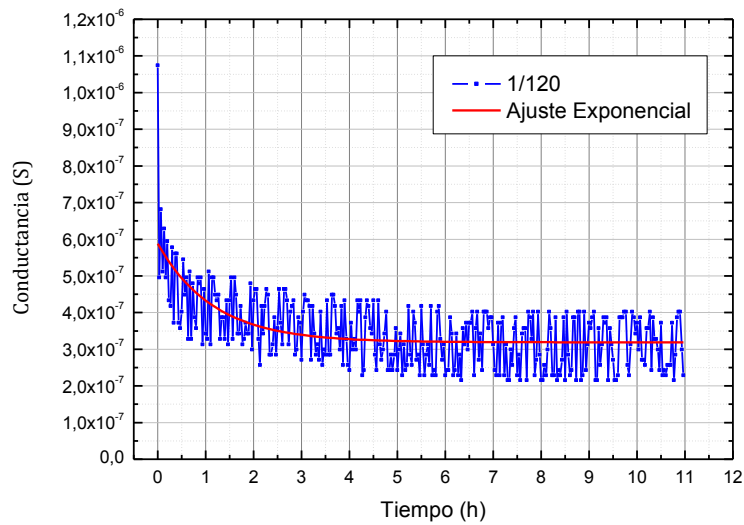
Los sensores MOX se caracterizan por necesitar un cierto tiempo para adaptarse a un cierto modo de operación. A este tiempo se le conoce como tiempo de estabilización, representada con la letra griega τ .

Suponiendo que en primera aproximación el comportamiento del sistema puede describirse por una dinámica de primer orden, se define la constante de tiempo τ como el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63,2% del valor final, se considera 5τ como el tiempo de estabilización, correspondiente al tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 99.3% del valor final.

Para conocer las constantes de tiempo de los sensores *ulp* MOX para cada uno de los consumos asociados a los diferentes PTM aplicados, se realizó un ajuste exponencial a cada una de las medidas realizadas durante la fase de limpieza de la cámara de gas, donde solamente se utilizaba aire sintético. Se realizó el ajuste utilizando la Ecuación 11:

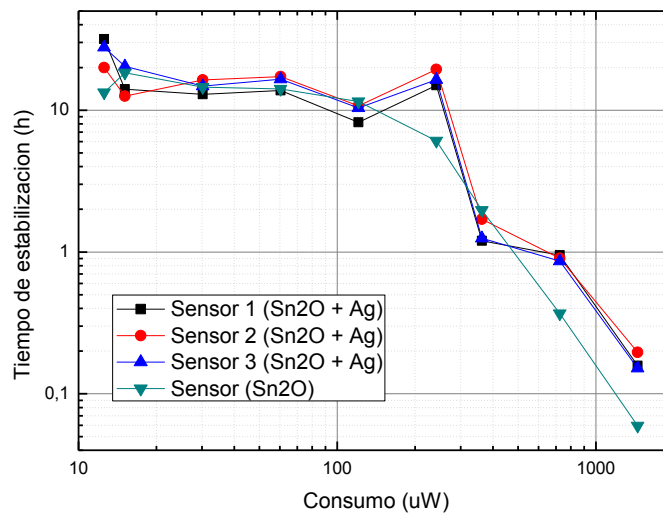
$$y = Ae^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} + y_0 \quad \text{Ecuación 11}$$

El ajuste exponencial se realizó con la herramienta de ajustes del programa OriginPro, versión 8 SRO v8. La Gráfica 21 muestra un ejemplo de un ajuste exponencial, en este caso el PTM aplicado corresponde al 1/120:



Gráfica 21: Ejemplo de ajuste exponencial, en este caso el PTM del tipo 1/120.

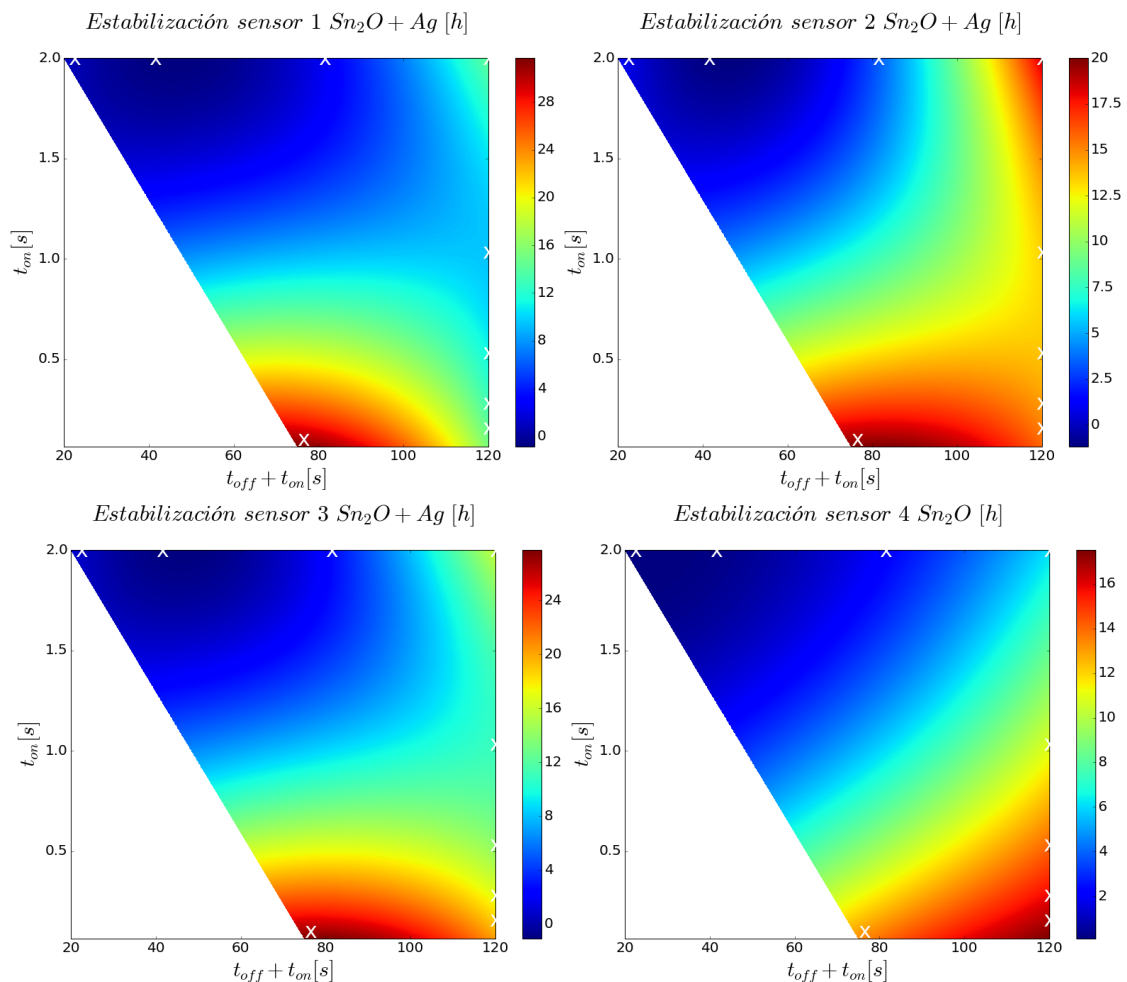
Para realizar la comparativa de tiempos de estabilización de los sensores en función del consumo asociado al PTM aplicado, se representan en la Gráfica 22 los valores obtenidos del ajuste exponencial para todos los modos de funcionamiento:



Gráfica 22: Comparativa de tiempo de estabilización entre sensores y sus modos de funcionamiento.

Como se aprecia en la Gráfica 22 a medida que disminuye el consumo asociado al PTM aplicado el tiempo de estabilización aumenta drásticamente dos órdenes de magnitud, pasando de tiempos de estabilización de pocos minutos, en el caso de PTM con mayor consumo asociado, a tiempos de estabilización de decenas de horas, en el caso de PTM con menor consumo asociado.

Sin embargo, en la Gráfica 22 no se aprecian todas las diferentes combinaciones de tiempos de *on* y *off*, por este motivo se realizó una interpolación con los datos existentes donde se pueda apreciar mejor los tiempos de estabilización de los sensores. Esta interpolación se realizó utilizando el lenguaje de programación *Python* mediante la función *SmoothBivariateSpline* de la librería *scipy.interpolate*. Para representar cada uno de los sensores se utilizó de la librería *matplotlib* la función *plt* y la opción de *colorbar*. La Gráfica 23 muestra los valores obtenidos de la interpolación de los datos del ajuste exponencial.



Gráfica 23: Interpolación de los tiempos de estabilización de los diferentes sensores en función del modo de funcionamiento de los sensores.

Las conclusiones que se obtienen a partir de la Gráfica 23 son varias. En primer lugar se aprecia que el tiempo de estabilización aumenta significativamente a medida que aumentaba T_{off} para los tipos de PTM donde T_{on} era constante y T_{off} variable, casos 2/20, 2/40, 2/80 y 2/120, llegando a aumentar dos órdenes de magnitud la diferencia entre el PTM de 2/20 y el PTM de 2/120.

También se aprecia en la Gráfica 22 y Gráfica 23 que el tiempo de estabilización permanece relativamente estable para los tipos de PTM donde T_{on} es variable y T_{off} constante, casos 1/120, 0.5/120, 0.25/120 y 0.125/120.

Los valores representados para tiempos de funcionamiento de T_{on} respecto al total inferiores al 0.1%, casos 0.065/75 y 0.0325/69, son poco fiables debido a que las señales obtenidas en esos tipos de PTM estaban deterioradas y son muy inestables.

También cabe destacar de la Gráfica 22 y Gráfica 23 que las respuestas obtenidas del único sensor basado en SnO_2 son mucho más lentas, tomando como referencia la octava muestra, que las respuestas obtenidas de los sensores de SnO_2+Ag para la mayoría de tipos de PTM aplicados. Sin embargo, tomando como referencia la primera muestra, el sensor de SnO_2 mantiene la tendencia de los sensores de SnO_2+Ag , mejorando los tiempos de estabilización en algunos tipos de PTM.

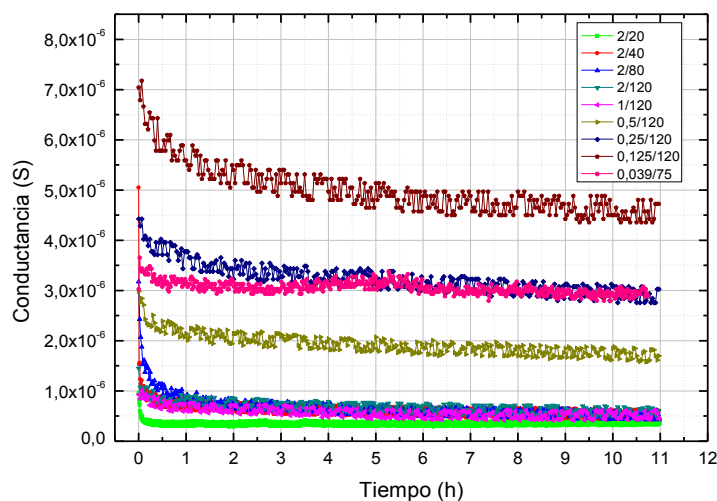
Como conclusión general queda reflejado en ambas gráficas, Gráfica 22 y Gráfica 23, que los modos de funcionamiento que suponen un mayor ahorro de energía, conllevan a su vez, un mayor tiempo de estabilización.

7.4.2.- Conductancia y ruido en la línea de base de los sensores en función del modo de funcionamiento.

Conocer el valor de la conductancia en la línea de base de la matriz de sensores nos indica, entre otros parámetros, si la medida está dentro de la sensibilidad máxima del sistema de adquisición, confirmando así, la correcta elección de la resistencia de medida. Por otro lado, conocer el valor de ruido en la línea de base nos permite conocer el límite de detección (LOD) de cada uno de los sensores de nuestra matriz.

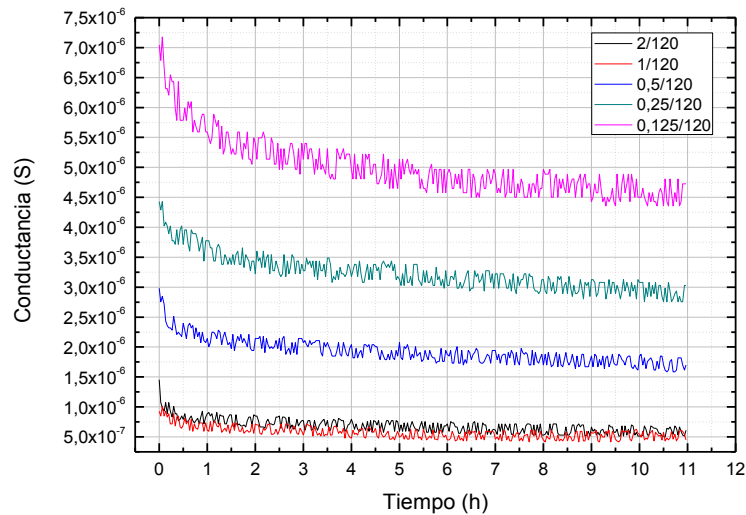
Para conocer la conductancia y el ruido en la línea de base de los sensores *ulp* MOX se analizaron los resultados obtenidos con las medidas realizadas durante la fase de limpieza de la cámara de gas. En ésta fase, únicamente se utilizaba aire sintético, por lo que no afectaba cualquier otro ruido provocado por los gases utilizados en el experimento.

La Gráfica 24 muestra los resultados obtenidos en uno de los sensores de SnO_2+Ag para todos los tipos de PTM aplicados:



Gráfica 24: Respuesta de un sensor de SnO_2+Ag para todos los tipos de PTM.

En la Gráfica 24 se aprecia como la conductancia de la línea de base del sensor varía dependiendo del consumo asociado al tipo de PTM aplicado. Se observa que conforme el consumo disminuye, aumentan la conductancia y el ruido. Para poder apreciar mejor dicha variación de la conductancia y el ruido, la Gráfica 25 muestra la respuesta del sensor de SnO₂+Ag para los tipos de PTM donde T_{on} es variable y T_{off} constante, casos 2/120, 1/120, 0.5/120, 0.25/120 y 0.125/120.

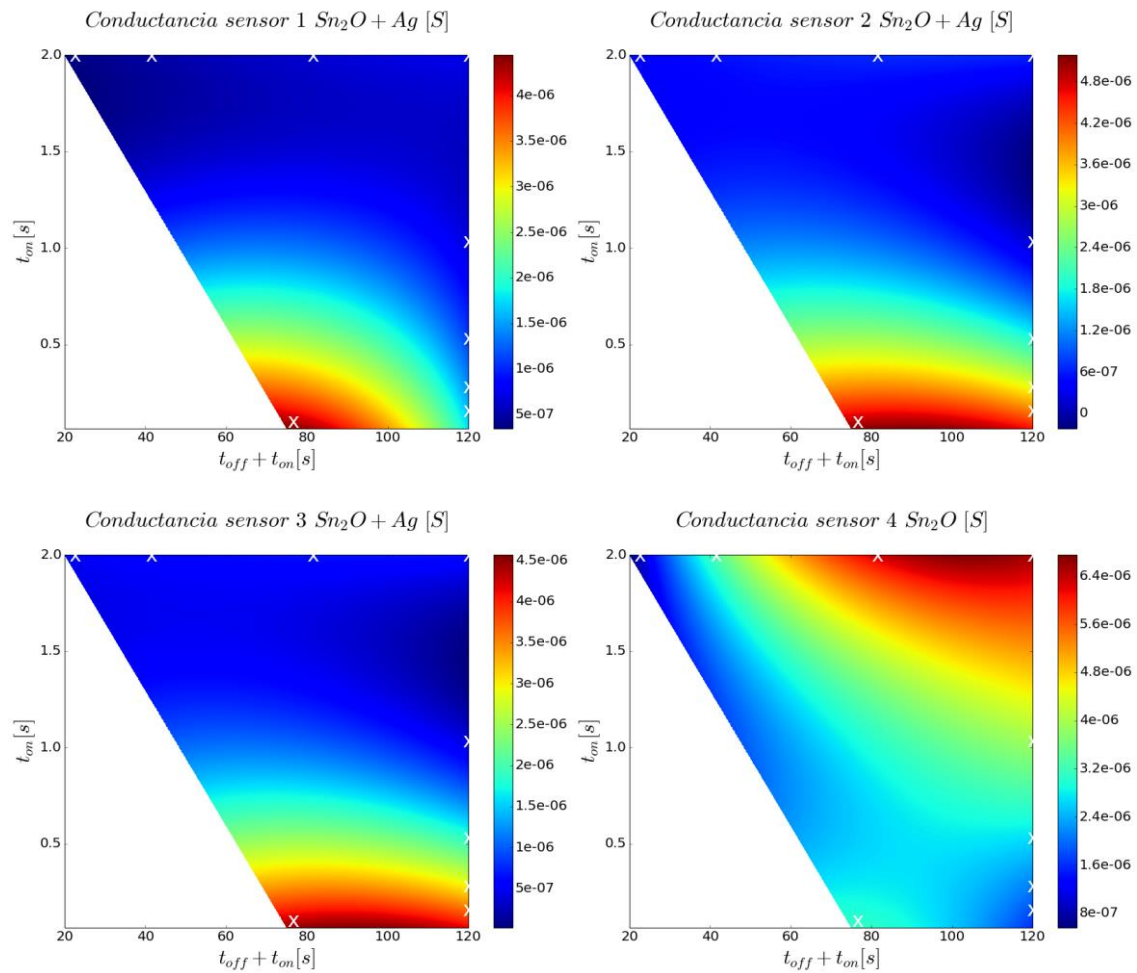


Gráfica 25: Respuesta de un sensor para T_{on} variable y T_{off} constante.

En la Gráfica 25 se aprecia claramente como para los tiempos de T_{on} por encima del segundo, se obtienen resultados similares de conductancia, pero cuando T_{on} disminuye por debajo del segundo, la conductancia y el valor de ruido aumentan.

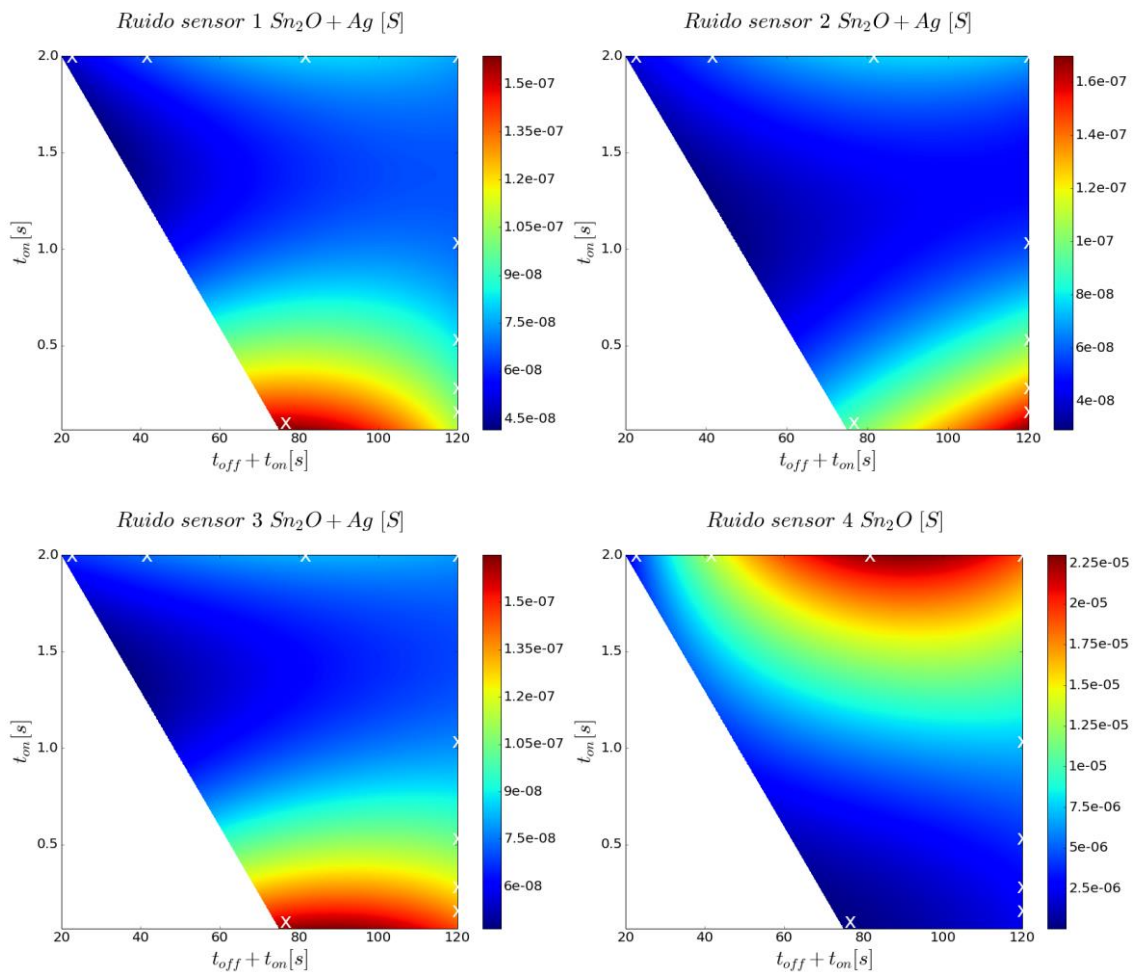
Para obtener el valor de conductancia se aprovechó el ajuste exponencial realizado en el apartado anterior, de la Ecuación 11 el término y_0 nos indica directamente el valor de la conductancia de la línea de base. Para conocer el valor de ruido, también se utiliza el mismo ajuste exponencial, en este caso se resta el resultado del ajuste exponencial a la señal, obteniendo así la variación de la señal.

Como en el apartado anterior, se realizó una interpolación con los valores obtenidos de conductancia de la línea de base, esta interpolación, que muestra la Gráfica 26, nos permite observar cómo evoluciona la conductancia en función del modo de funcionamiento para todos los sensores.



Gráfica 26: Conductancia de la línea de base de los diferentes sensores en función del modo de funcionamiento.

El mismo procedimiento de interpolación se utiliza para los valores obtenidos del ruido en todos los sensores, estos resultados se muestran en la Gráfica 27:



Gráfica 27: Comparativa del ruido generado por los diferentes sensores en función del modo de funcionamiento.

Del conjunto de gráficas mostradas por la Gráfica 26 y la Gráfica 27 podemos extraer varias conclusiones, (i) que la conductancia y el ruido de la línea de base siguen el mismo patrón para cada uno de los sensores. (ii) Se observa también que la conductancia y el ruido en la línea de base tienen un comportamiento similar al tiempo de estabilización, analizado en el apartado anterior, que aumentan a medida que los modos de funcionamiento aplican menos energía, variando la conductancia, en la mayoría de los casos un orden de magnitud, de 500nS a 5 μ S y en el caso del ruido se triplica el valor, de aproximadamente 45nS a 160nS. Este incremento de conductancia implica un desplazamiento de la posición idónea donde se encuentra la sensibilidad máxima del sistema de adquisición, implicando un mayor error en la por el aumento del error de cuantización

La solución a este problema implicaría la implementación de un sistema automático de selección de resistencia de medida en función de la conductancia del sensor, pero fue descartado por el aumento de componentes que implicaría, no por la complejidad de su control, si no por el espacio físico que supondría.

7.4.3.- Sensibilidad de los sensores en función del modo de funcionamiento y el tipo de gas.

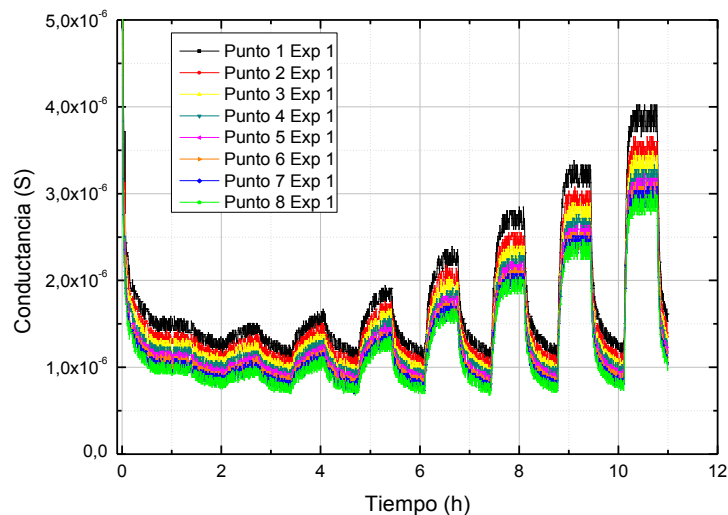
En las siguientes secciones se muestran los resultados obtenidos en referencia a la sensibilidad de los sensores en presencia de los diferentes gases utilizados en los experimentos.

7.4.3.1.- Sensibilidad al gas acetaldehído.

Las especificaciones iniciales indicaban que la concentración de acetaldehído necesaria para generar una alarma era de 10ppm. Por este motivo se escogió un rango de niveles de concentración de gas, logarítmicamente separadas, de 2ppm a 60ppm, como indican los requerimientos.

7.4.3.1.1.- Respuesta de los sensores al gas acetaldehído.

La Gráfica 28 muestra la respuesta de los ocho puntos de la secuencia de adquisición en un sensor de SnO₂+Ag a las concentraciones de acetaldehído 2, 3 5, 9, 14, 23, 37 y 60ppm aplicando el tipo de PTM de 2/20:



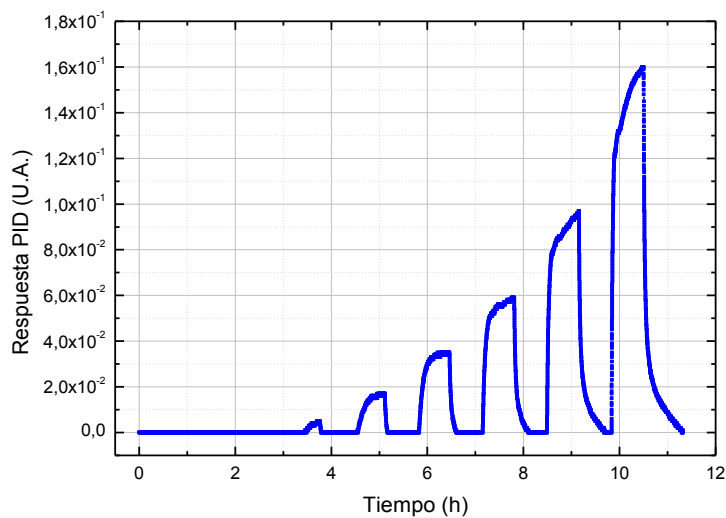
Gráfica 28: Respuesta de los ocho puntos de la secuencia de adquisición en un sensor de SnO₂+Ag a las concentraciones de acetaldehído 2, 3 5, 9, 14, 23, 37 y 60ppm aplicando el tipo de PTM 2/20.

En la Gráfica 28 se observa la respuesta del sensor a diferentes concentraciones. Ésta respuesta es un ejemplo de lo que ocurre para todos los demás tipos de PTM, se observa así la misma evolución que la comentada en secciones anteriores,

cuanto mayor es el consumo asociado al tipo de PTM, se obtiene una señal más estable. El caso de PTM de 2/20 es el único en que todos los sensores se comportan de la misma forma, tanto los de SnO₂+Ag como el de SnO₂.

También se observa que se detectan los 10ppm de acetaldehído y valores incluso inferiores a dicha cantidad, cumpliendo así, para este tipo de PTM, con los requisitos especificados.

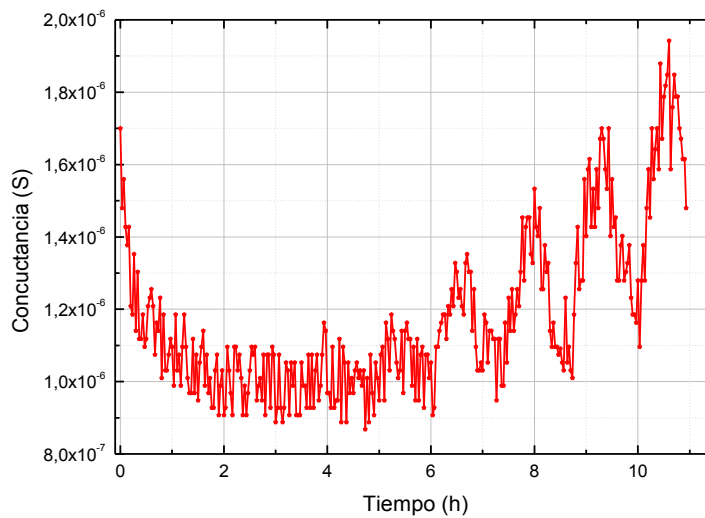
Para comprobar el correcto funcionamiento de la estación de gas se realizó una medida de control mediante un detector por fotoionización, o en inglés, *Photoionization detector* (PID), concretamente el ppbRAE 3000 de la compañía RAE systems. La Gráfica 29 muestra los resultados obtenidos:



Gráfica 29: Respuesta del PID a las concentraciones de acetaldehído 2, 3 5, 9, 14, 23, 37 y 60ppm. Medidas de control realizadas para asegurar el funcionamiento correcto de la estación de gases.

Observando la Gráfica 28 y la Gráfica 29 se comprueba cómo los sensores de SnO₂ + Ag se comportan de la misma forma que lo hace el PID ante los cambios en las concentraciones de acetaldehído, incluso los sensores de SnO₂ + Ag detectan menores niveles de acetaldehído (2 y 3ppm) que los detectados por el PID.

A medida que disminuía el consumo asociado al tipo de PTM aplicado, se degradaban cada vez más las señales obtenidas. Este efecto era debido principalmente a dos causas, la primera, y como se ha explicado anteriormente, a que el ruido aumentaba al disminuir el consumo y la segunda fue que también disminuían los datos adquiridos. Un ejemplo de este efecto puede observarse en la Gráfica 30:



Gráfica 30: Respuesta de un sensor de SnO₂+Ag a las concentraciones de acetaldehído 2, 3 5, 9, 14, 23, 37 y 60ppm aplicando el tipo de PTM 0.25/120.

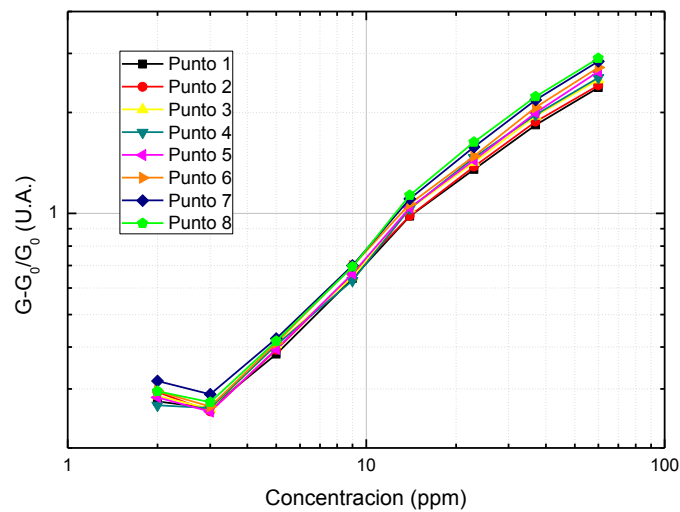
Para el gas acetaldehído, aun siendo ruidosos los datos de la Gráfica 30, todavía se podían detectar los 10ppm de gas acetaldehído requeridos por las especificaciones, aplicando el tipo de PTM 0.25/120.

7.4.3.1.2.-Sensibilidad de los sensores al gas acetaldehído.

Para poder comparar la sensibilidad entre puntos de un mismo tipo de PTM y entre los PTM aplicados, en primer lugar se calculó la variación relativa de la señal respecto al nivel mínimo de ésta mediante la Ecuación 12:

$$\Delta G = \frac{G - G_0}{G_0} \quad \text{Ecuación 12}$$

donde G es el valor de la señal a una concentración dada y G₀ es el conductancia en el nivel de base de la señal. La Gráfica 31 muestra los resultados de esta operación para un sensor de SnO₂+Ag aplicando el tipo de PTM 2/20:



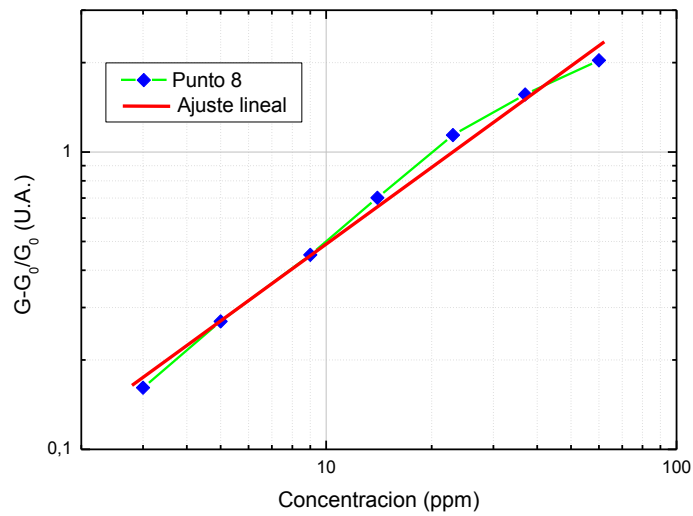
Gráfica 31: Representación de $G-G_0/G_0$ en todos los puntos de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag en utilizando el tipo de PTM 2/20 para el gas acetaldehído.

De la Gráfica 31 se comprueba que el tiempo de estabilización afecta a la medida de concentraciones bajas, en este caso la primera concentración correspondiente a 2ppm de acetaldehído, debido a que el sensor no está estabilizado cuando se introduce dicha concentración en la cámara. Por este motivo se elimina dicha concentración en el estudio posterior.

Una vez obtenidas las gráficas de todos los tipos de PTM aplicados se realiza una regresión lineal a todas ellas para obtener el valor de la sensibilidad, que se realizó con la herramienta de ajustes del programa OriginPro. En nuestro caso, el resultado de la regresión lineal viene dado por la Ecuación 13:

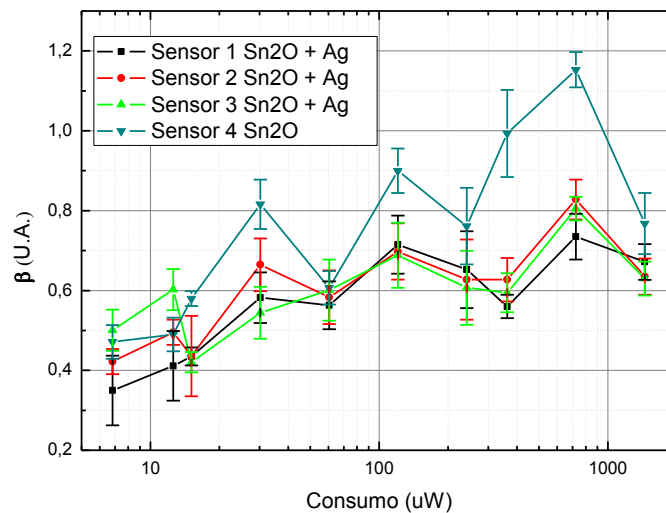
$$G = G_0(1 + Sc^\beta) \quad \text{Ecuación 13}$$

donde el parámetro β representa la sensibilidad del sensor respecto a las variaciones de la concentración de un determinado gas, Clifford-Tuma [13, 14]. Esta definición poco estándar tiene su origen en que normalmente se trabaja con el logaritmo de G respecto a logaritmo de c . De esa manera, para concentraciones grandes, β es la pendiente de la recta. La Gráfica 32 muestra un ejemplo de regresión lineal, en este caso en el octavo punto de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag en el PTM aplicado de 2/20:



Gráfica 32: Ejemplo de regresión para obtener la sensibilidad del sensor, en este caso en el octavo punto de adquisición en un sensor de SnO₂+Ag en el PTM aplicado de 2/20 para el gas acetaldehído.

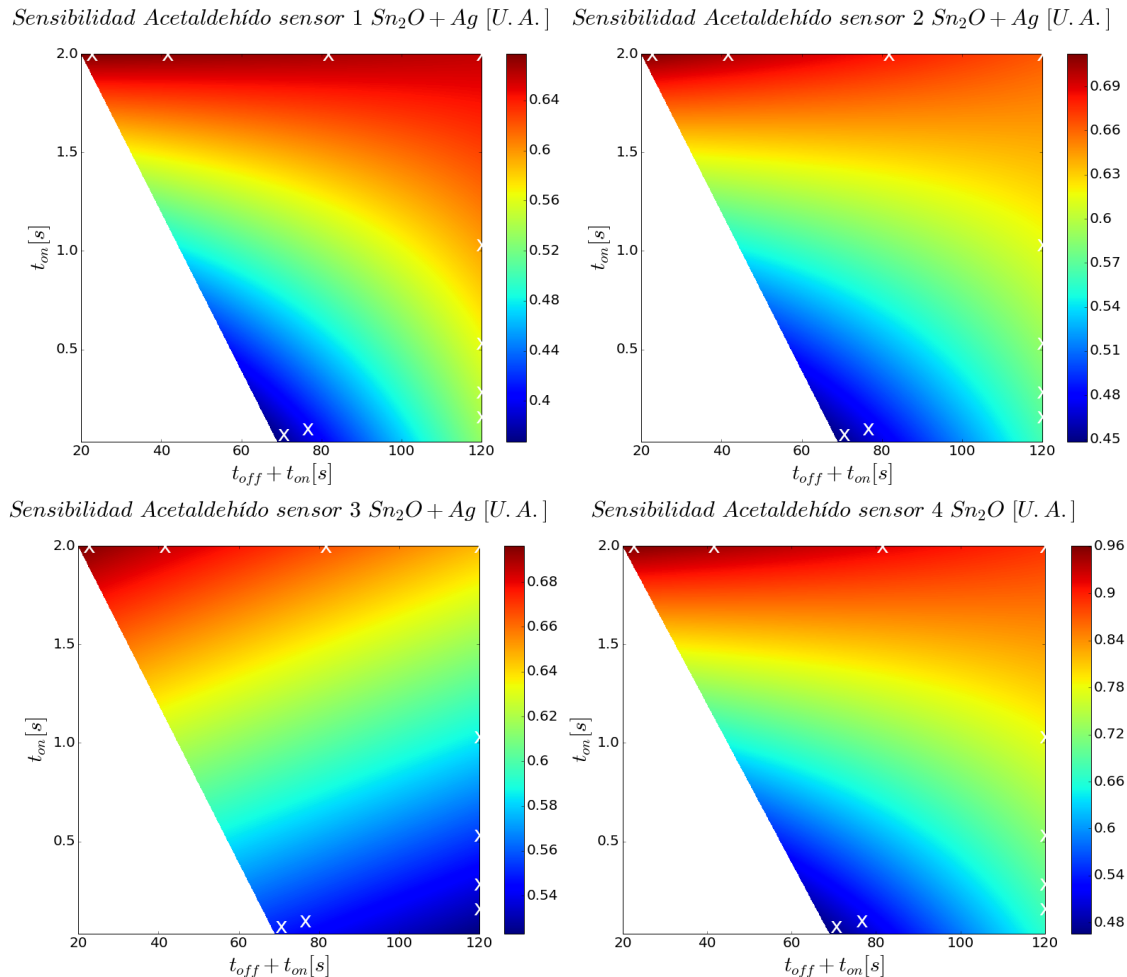
Se puede comparar la sensibilidad de los sensores en función del consumo asociado a cada tipo de PTM una vez obtenidos todos los datos de las regresiones. La Gráfica 33 muestra la evolución de la sensibilidad al gas acetaldehído en función del consumo asociado a cada tipo de PTM para cada sensor:



Gráfica 33: Sensibilidad de todos los sensores al acetaldehído en función del consumo asociado a cada tipo de PTM.

En la Gráfica 33 se puede observar como en todos los sensores la sensibilidad tiende a disminuir a medida que se aplican tipos de PTM con menor consumo de energía.

Para poder observar la evolución de la sensibilidad en las diferentes combinaciones de tiempos de *on* y *off*, utilizando el mismo procedimiento que en apartados anteriores, se realiza una interpolación de los datos para cada uno de los sensores. Los resultados se muestran en la Gráfica 34:



Gráfica 34: Sensibilidad de cada uno de los sensores al gas acetaldehído.

Las imágenes que muestran la Gráfica 33 y la Gráfica 34 indican claramente que la sensibilidad de los sensores al gas acetaldehído disminuye a medida que los modos de funcionamiento aplican menos energía. Esta evolución se cumple para todos los sensores, variando el dato de sensibilidad en el caso del sensor de Sn_2O , que parece ser mayor que los sensores de $\text{Sn}_2\text{O} + \text{Ag}$. Esto puede ser debido a que la conductancia de la línea de base del sensor de Sn_2O en todos los modos de funcionamiento es mayor que la de los sensores de $\text{Sn}_2\text{O} + \text{Ag}$, cosa que implica un mayor error en la medida.

7.4.3.1.3.- Límite de detección de los sensores al gas acetaldehído.

El cálculo del LOD de los sensores viene dado por la formula estadística representada en la Ecuación 14[15, 16]:

$$y = y_0 + (3.29 * \sigma) \quad \text{Ecuación 14}$$

donde y es el LOD, y_0 es el valor de la conductancia en la línea de base y σ la desviación estándar del ruido en la línea de base.

En el caso del acetaldehído, así como el del etileno más adelante, es bastante difícil determinar el LOD debido a que las concentraciones más pequeñas de gas se introducen al principio del experimento. Como se ha visto en los apartados anteriores, el tiempo de estabilización de los sensores depende el modo de funcionamiento, llegando a ser este bastante grande, por lo que la respuesta de los sensores a concentraciones pequeñas de gas tiene lugar cuando el sensor todavía no está estabilizado, confundiendo así las dos señales, la de estabilización y la asociada al gas.

Por este motivo, el LOD de los sensores respecto al gas acetaldehído se realiza de manera visual, teniendo en cuenta el resultado de la Ecuación 14, en cada una de las gráficas, obteniéndose los valores que muestran la Tabla 12:

PTM	Consumo de energía (μW)	LOD acetaldehído (ppm)
2/20	1.450	3
2/40	725	3
2/80	362,5	5
2/120	241,67	5
1/120	120,83	5
0,5/120	60,42	9
0,25/120	30,21	9
0,125/120	15,1	9
0,065/75	12,57	14
0,0325/69	6,83	14

Tabla 12: LOD del gas acetaldehído en función del modo de funcionamiento.

De los valores de la Tabla 12 se comprueba como el LOD para el gas acetaldehído aumenta a medida que los modos de funcionamiento consumen menos energía, pasando de 3ppm de acetaldehído para los modos con mayor consumo de energía a 14ppm de acetaldehído para los de menor consumo de energía. Este aumento del LOD es debido a varias causas, (i) la primera es la disminución de la sensibilidad al reducir el consumo tal y como se ha demostrado en esta sección, (ii) otra causa es el aumento del ruido de la señal junto con la disminución del número de puntos adquiridos por experimento y finalmente (iii) el aumento de la conductividad, que provoca que disminuya la sensibilidad en el sistema de adquisición.

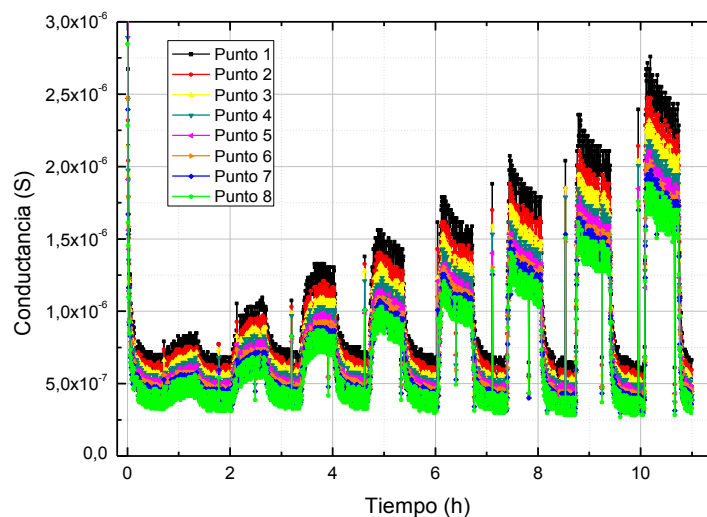
El LOD que indican los requerimientos para el gas acetaldehído es de 10ppm, así pues, a partir del modo de funcionamiento 1/120 los sensores no cumplen por muy poco con requerimientos pero se sitúan muy cerca del valor requerido.

7.4.3.2.- Resultados obtenidos utilizando gas etileno.

Las especificaciones iniciales indicaban que la concentración de etileno necesaria para generar una alarma era de 400ppm. Por este motivo se escogió un rango de niveles de concentración de gas, logarítmicamente separadas, de 8ppm a 400ppm, como indican los requerimientos.

7.4.3.2.1.- Respuesta de los sensores al gas etileno.

La Gráfica 35 muestra la respuesta de los ocho puntos de la secuencia de adquisición de uno de los sensores de SnO₂+Ag a las concentraciones de etileno 8, 14 24, 43, 75, 131, 229 y 400ppm aplicando el tipo de PTM 2/20:



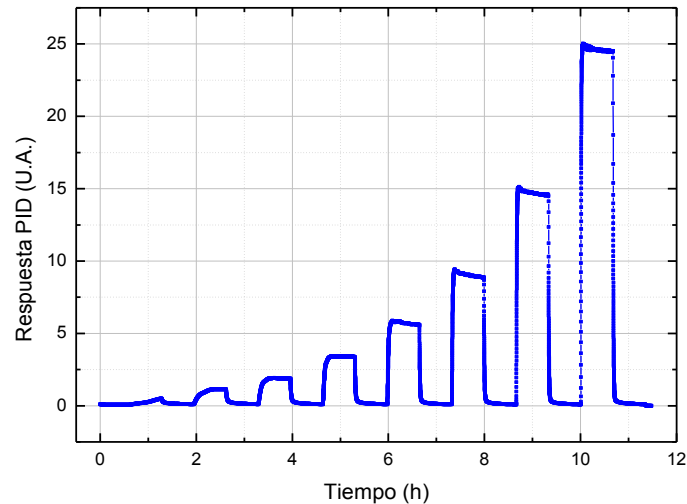
Gráfica 35: Respuesta de los ocho puntos de la secuencia de adquisición en un sensor de SnO₂+Ag a las concentraciones de etileno 8, 14 24, 43, 75, 131, 229 y 400ppm aplicando el tipo de PTM 2/20.

Se aprecia en la Gráfica 35, que el sensor tiene un comportamiento diferente a partir de los 43ppm de etileno, este efecto puede ser debido a la saturación del sensor ante cantidades elevadas de este gas. Por otro lado, la respuesta del sensor ante el etileno parece mucho más rápida que la misma respecto al acetaldehído.

Como en el caso del acetaldehído, se observa la misma evolución que la comentada en las secciones anteriores, a más consumo de energía, se obtiene una señal más estable. También ocurre que en el caso de PTM 2/20 es el único que todos los sensores se comportan de la misma forma, tanto los de SnO₂+Ag como el de SnO₂.

También cabe resaltar que se detectan valores muy por debajo de los 400ppm de gas etileno, cumpliendo así, para este tipo de PTM, con los requisitos especificados.

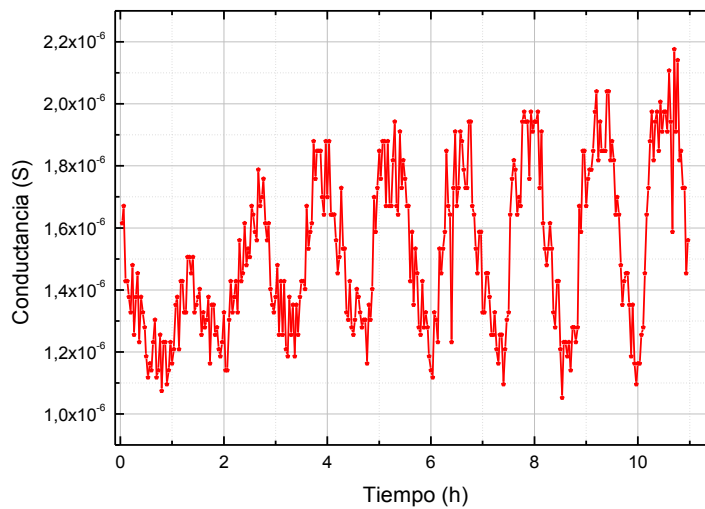
Para comprobar el correcto funcionamiento de la estación de gas con las concentraciones indicadas de gas etileno, se realizó una medida de control mediante el mismo PID utilizado anteriormente. La Gráfica 36 muestra los resultados obtenidos:



Gráfica 36: Respuesta del PID a las concentraciones de etileno 8, 14 24, 43, 75, 131, 229 y 400ppm. Medidas de control realizadas para asegurar el funcionamiento correcto de la estación de gases.

Observando la Gráfica 35 y la Gráfica 36 se comprueba cómo los sensores se comportan de la misma forma que lo hace en el PID ante los cambios en las concentraciones de etileno.

De igual forma que en el caso del acetaldehído, a medida que se reducía consumo asociado al tipo de PTM aplicado, se degradaban cada vez más las señales obtenidas. La Gráfica 37 muestra un ejemplo de este efecto en un sensor de SnO₂+Ag aplicando el tipo de PTM 0.250/120:

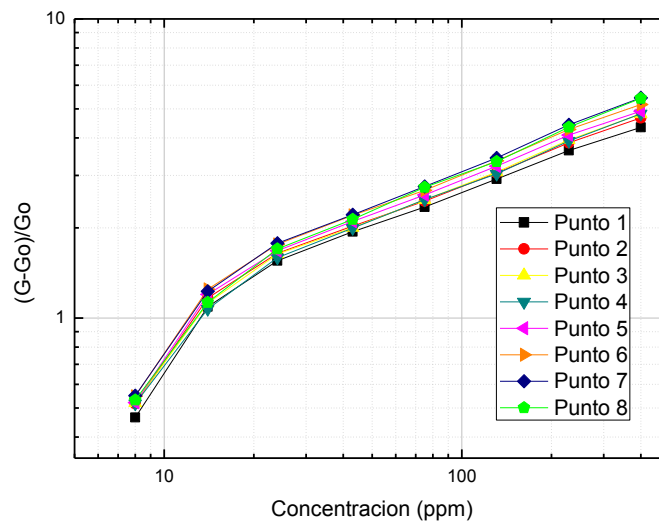


Gráfica 37: Respuesta de un sensor de SnO_2+Ag a las concentraciones de etileno 8, 14, 24, 43, 75, 131, 229 y 400ppm aplicando el tipo de PTM 0.25/120.

Para el etileno, y como muestra la Gráfica 37, sin la aplicación de un filtro u otro tipo de tratamiento de señal, resultaba difícil reconocer los 400ppm de etileno que requieren las especificaciones, dado que para 24, 43, 75 y 131ppm la señal del sensor era prácticamente de la misma magnitud.

7.4.3.2.2.- Sensibilidad de los sensores al gas etileno.

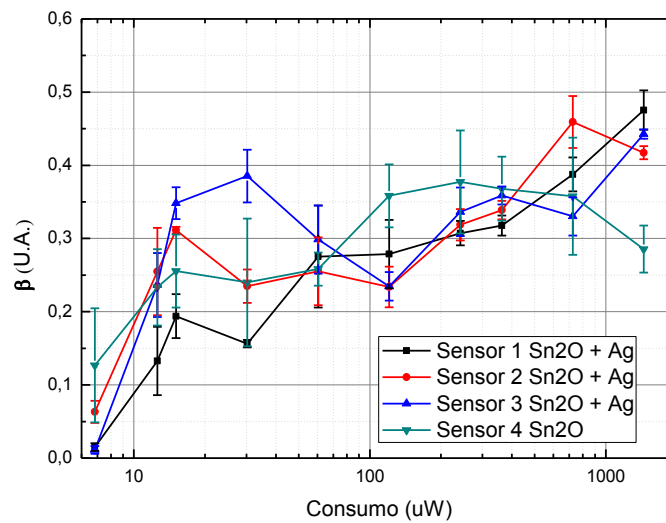
De igual forma que se realizó para el acetaldehído, para poder comparar la sensibilidad entre puntos de un mismo tipo de PTM y entre los diferentes tipos de PTM aplicados respecto al gas etileno, se calculó la variación relativa de la señal en presencia de gas etileno respecto al su nivel mínimo. Los resultados que se muestran en la Gráfica 38 son los obtenidos al realizar esta operación en uno de los sensores de SnO_2+Ag aplicado el tipo de PTM 2/20:



Gráfica 38: Representación de $G-G_0/G_0$ en todos los puntos de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag en el modo de funcionamiento 2/20 para el gas etileno.

De la Gráfica 38 se comprueba, como anteriormente con el acetaldehído, que el tiempo de estabilización afecta a la medida de concentraciones bajas, en este caso la primera concentración correspondiente a 8ppm de etileno, debido a que el sensor no está estabilizado cuando se introduce dicha concentración en la cámara. Por este motivo se elimina dicha concentración en el estudio posterior.

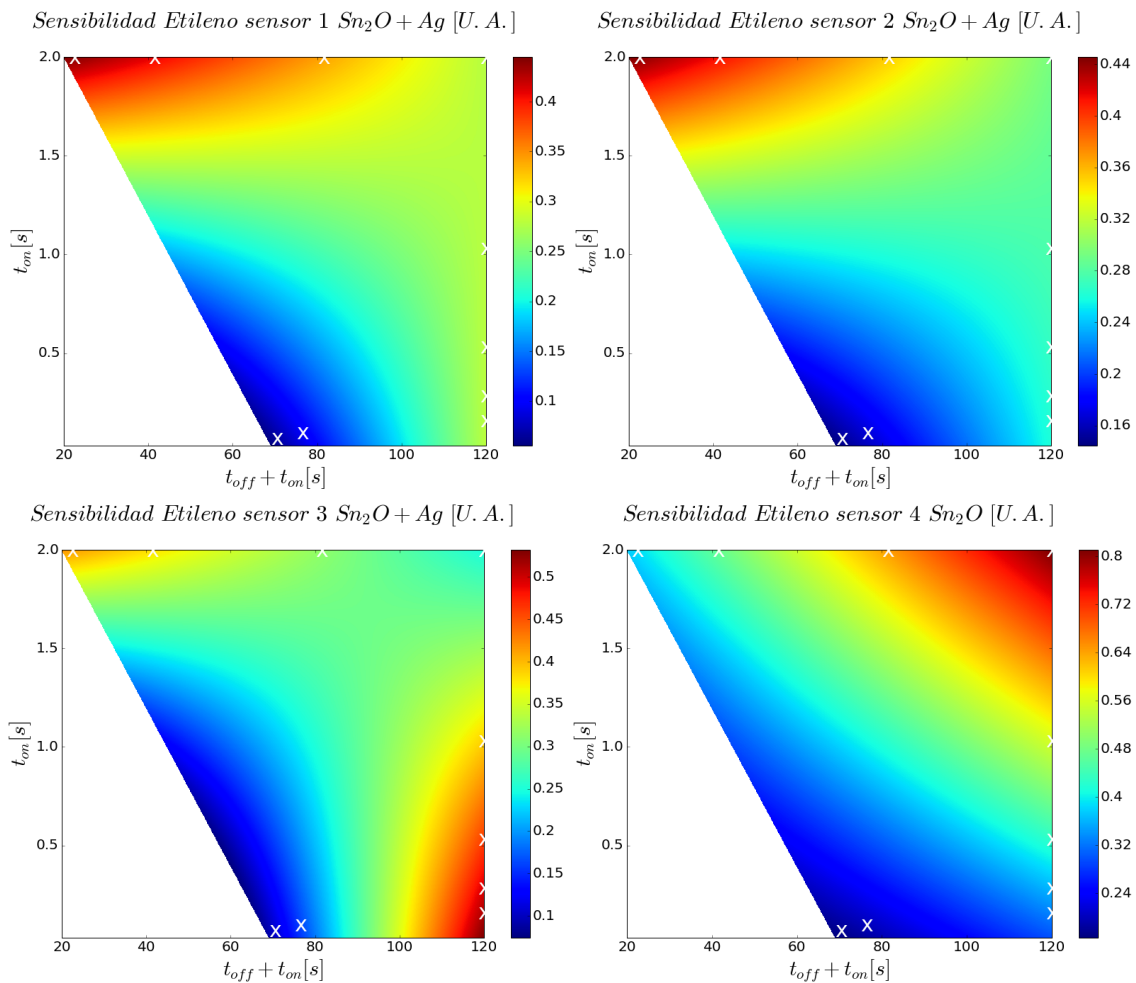
Como en el caso del acetaldehído, para comparar la sensibilidad de los sensores en función de los diferentes tipos de PTM se realiza una regresión lineal. Los resultados de ésta se representan en la Gráfica 39 una vez obtenidos todos los datos de las regresiones, donde se observa la evolución de la sensibilidad al gas etileno en función del modo de funcionamiento para cada sensor:



Gráfica 39: Sensibilidad de todos los sensores al etileno en función del modo de funcionamiento aplicado.

En la Gráfica 39 se puede observar como en todos los sensores la sensibilidad al gas etileno tiende a disminuir a medida que se aplican tipos de PTM con menor consumo de energía, tal y como sucede para la sensibilidad del gas acetaldehído.

Por otro lado y de igual forma que para el gas acetaldehído, para poder observar la evolución de la sensibilidad al gas etileno en las diferentes combinaciones de tiempos de *on* y *off*, se realizó una interpolación de los datos para cada uno de los sensores. Los resultados se muestran en la Gráfica 40:



Gráfica 40: Sensibilidad de cada uno de los sensores al gas etileno.

Las imágenes que muestran la Gráfica 39 y la Gráfica 40 indican claramente que la sensibilidad de los sensores al gas etileno disminuye a medida que los modos de funcionamiento aplican menos energía.

Tal y como sucede con el acetaldehído, la disminución de la sensibilidad se cumple para todos los sensores, exceptuando el caso del sensor de Sn_2O , que parece ser mayor que los sensores de $\text{Sn}_2\text{O} + \text{Ag}$. De la misma forma que en el acetaldehído esto puede ser debido a que la conductancia de la línea de base del sensor de Sn_2O en todos los modos de funcionamiento es mayor que la de los sensores de $\text{Sn}_2\text{O} + \text{Ag}$, implicando un mayor error en la medida.

Cabe destacar también el comportamiento anómalo de uno de los sensores de $\text{Sn}_2\text{O} + \text{Ag}$, teniendo la misma tendencia que los otros sensores de $\text{Sn}_2\text{O} + \text{Ag}$ en todos los modos exceptuando dos de ellos, concretamente los correspondientes a 0.25/120 y 0.125/120.

7.4.3.2.3.- Límite de detección de los sensores al gas etileno.

Igual que para el gas acetaldehído El cálculo del LOD de los sensores viene dado por la fórmula de la Ecuación 14. Por este motivo, el LOD de los sensores respecto al gas etileno se realiza de manera visual en cada una de las gráficas, obteniéndose los valores que muestran la Tabla 13:

PTM	Consumo de energía (μW)	LOD etileno (ppm)
2/20	1.450	8
2/40	725	8
2/80	362,5	8
2/120	241,67	8
1/120	120,83	8
0,5/120	60,42	8
0,25/120	30,21	8
0,125/120	15,1	14
0,065/75	12,57	24
0,0325/69	6,83	24

Tabla 13: LOD del gas etileno en función del modo de funcionamiento.

De los valores de la Tabla 13 se comprueba como el LOD para el gas etileno, tal y como ocurre con el gas acetaldehído, aumenta a medida que los modos de funcionamiento consumen menos energía, el LOD para los modos con más consumo de energía se mantiene en 8ppm y aumenta hasta los 24ppm para los tipos de PTM que menos energía consumen. Este aumento del LOD es debido a las mismas causas explicadas para el gas acetaldehído.

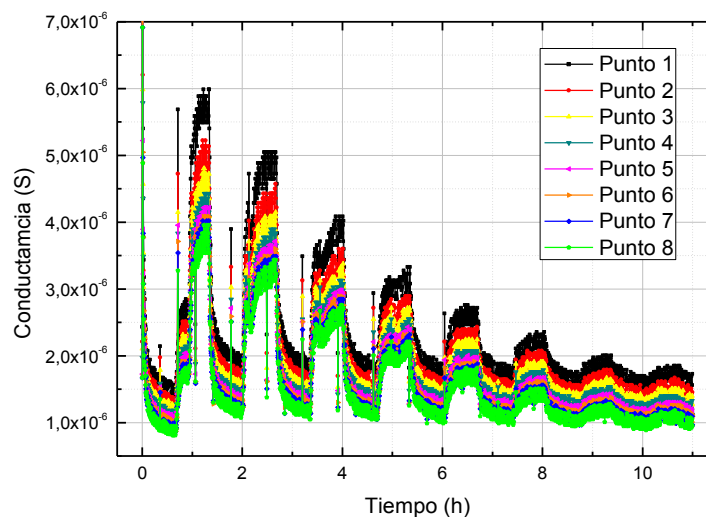
En el caso del etileno el límite de detección que indican los requerimientos iniciales es de 400ppm, se comprueba así que, independientemente del modo de funcionamiento, los sensores cumplen con dicho requerimiento.

7.4.3.3.- Resultados obtenidos utilizando Amoníaco.

Las especificaciones iniciales indicaban que la concentración de amoníaco necesaria para generar una alarma era de 50ppm. Por este motivo se escogió un rango de niveles de concentración de gas, logarítmicamente separadas, de 60ppm a 2ppm.

7.4.3.3.1.- Respuesta de los sensores al gas amoníaco.

La Gráfica 41 muestra la respuesta de los ocho puntos de la secuencia de adquisición en un sensor de SnO₂+Ag a las concentraciones de amoníaco 60, 37, 23, 14, 9, 5, 3 y 2ppm aplicando el tipo de PTM 2/20:



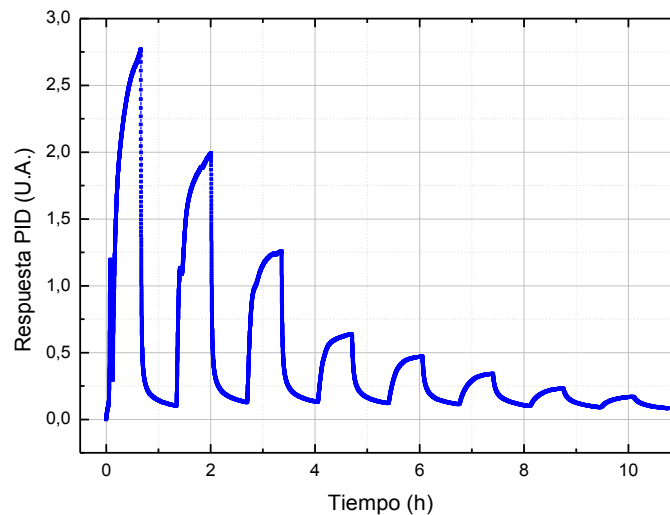
Gráfica 41: Respuesta de los ocho puntos de la secuencia de adquisición en un sensor de SnO₂+Ag a las concentraciones de amoníaco 60, 37, 23, 14, 9, 5, 3 y 2ppm aplicando el modo de funcionamiento 2/20.

Se aprecia en la Gráfica 41, que la respuesta del sensor ante el amoníaco es mucho más lenta que la misma respecto al acetaldehído y al etileno. Debido a este efecto el sensor no es capaz de alcanzar la línea de base en los 40 minutos de aire tras los 40 minutos de amoníaco, para ninguna de las concentraciones aplicadas.

Como en el caso del acetaldehído y del etileno, se observa la misma evolución que la comentada en secciones anteriores, cuanto más consumo de energía tiene asociado el tipo de PTM aplicado, se obtiene una señal más estable. También cabe destacar, como anteriormente, que el caso de PTM 2/20 es el único que todos los sensores se comportan de la misma forma, tanto los de SnO₂+Ag como el de SnO₂.

También se observa que se detectaban valores muy inferiores a los 50ppm de amoníaco, cumpliendo así, para este tipo de PTM, con los requisitos especificados.

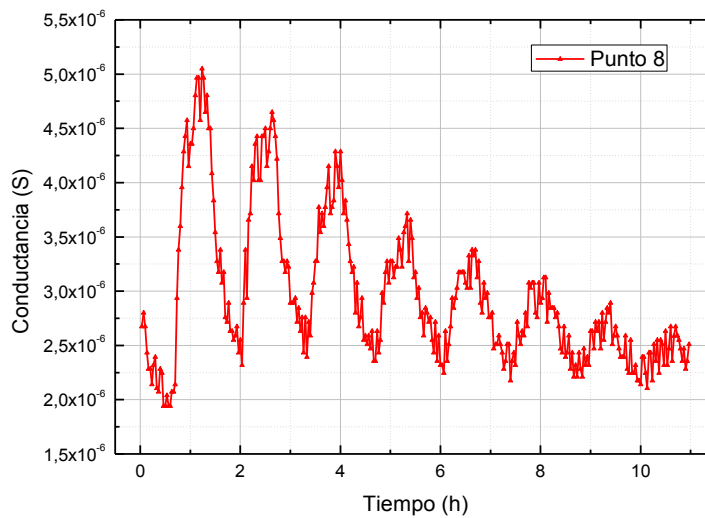
Para comprobar el correcto funcionamiento de la estación de gas con las concentraciones indicadas de amoníaco, se realizó una medida de control mediante el PID utilizado anteriormente. La Gráfica 42 muestra los resultados obtenidos:



Gráfica 42: Respuesta del PID a las concentraciones de amoníaco 60, 37, 23, 14, 9, 5, 3 y 2ppm. Medidas de control realizadas para asegurar el funcionamiento correcto de la estación de gases.

Observando la Gráfica 41 y la Gráfica 42 se comprueba cómo los sensores se comportaban de la misma forma que lo hace el PID, e igual que en el caso del acetaldehído y el etileno, ante los cambios en las concentraciones de gas amoníaco.

Remarcar que, como en el caso del acetaldehído y el etileno, a medida que se reduce el consumo asociado al tipo de PTM aplicado, se degradan cada vez más las señales obtenidas. La Gráfica 43 muestra un ejemplo de este efecto en un sensor de SnO₂+Ag aplicando un PTM de 0.250/120:

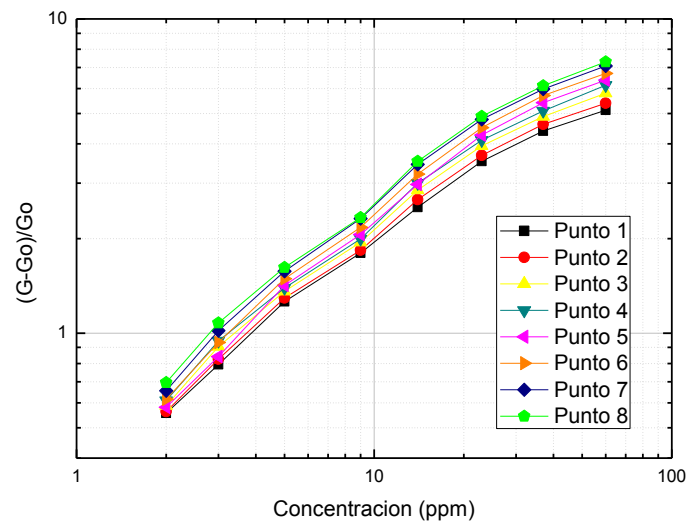


Gráfica 43: Respuesta del octavo punto adquirido en un sensor de SnO₂+Ag a las concentraciones de amoníaco 60, 37, 23, 14, 9, 5, 3 y 2ppm aplicando el modo de funcionamiento 0.25/120.

Para el amoníaco, igual que ocurría con el acetaldehído y el etileno, aun siendo ruidosos los datos de la Gráfica 43, todavía se poden detectar los 50ppm de amoníaco requeridos por las especificaciones aplicando el tipo se PTM 0.25/120.

7.4.3.3.2.-Sensibilidad de los sensores al gas amoníaco.

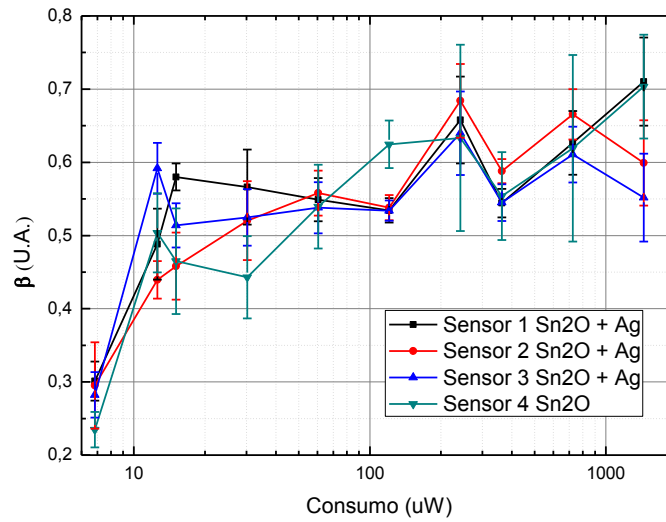
De igual forma que se realizó para el acetaldehído y el etileno, para poder comparar la sensibilidad al gas amoníaco entre puntos de un mismo tipo de PTM y entre los diferentes PTM aplicados, se calculó la variación relativa de la señal en presencia de amoníaco respecto al su nivel mínimo. Los resultados que se muestran en la Gráfica 44 son los obtenidos al realizar esta operación en uno de los sensores de SnO₂+Ag aplicado el tipo de PTM 2/20:



Gráfica 44: Representación de $G-G_0/G_0$ en todos los puntos de adquisición en un sensor de SnO_2+Ag en el modo de funcionamiento 2/20 para el gas amoníaco.

En el caso de los datos de la Gráfica 44, se aprecia perfectamente como el tiempo de estabilización del sensor no afecta a las concentraciones más bajas, debido principalmente a que estas se introducen en la cámara cuando el sensor ya está estabilizado.

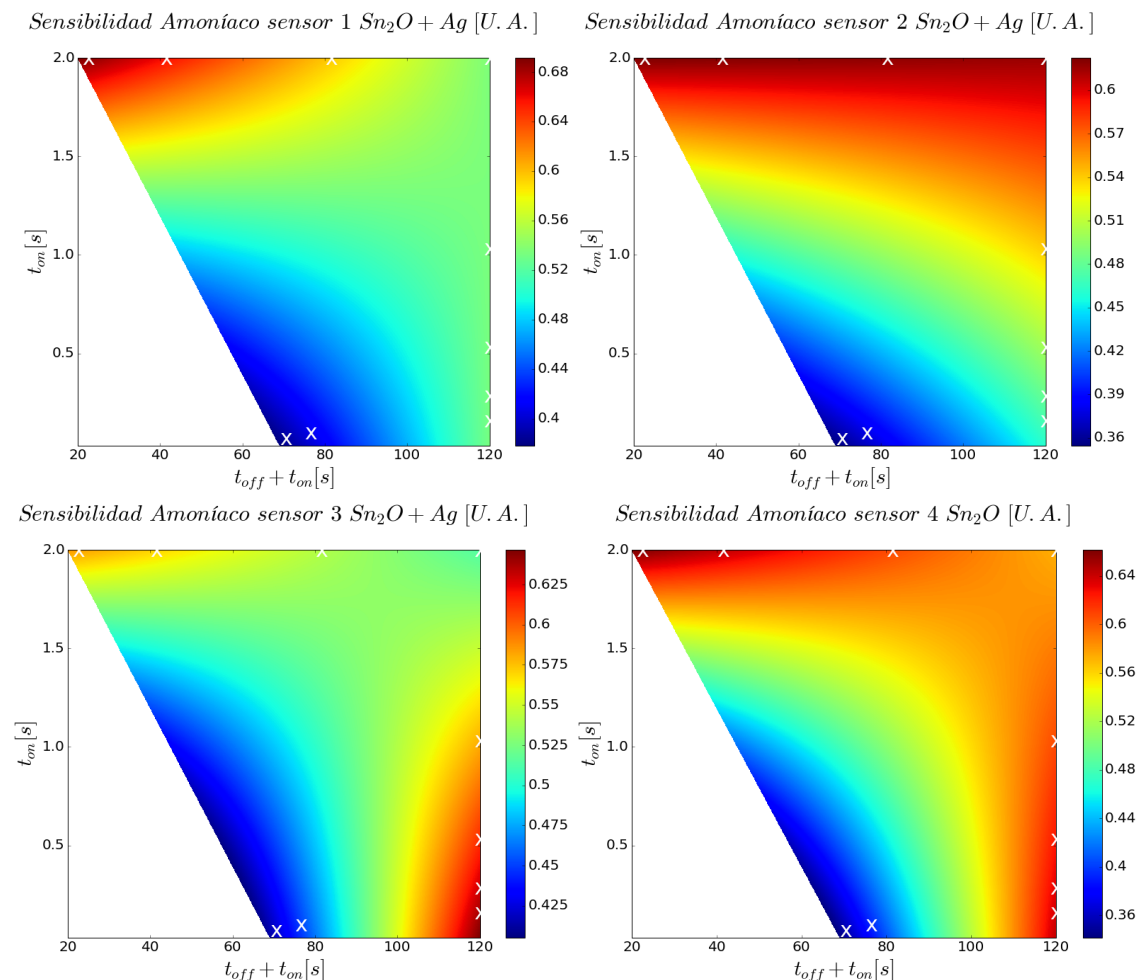
Como en el caso del acetaldehído y del etileno, para comparar la sensibilidad de los sensores en función de los diferentes modos de funcionamiento se realiza una regresión lineal. Los resultados de ésta se representan en la Gráfica 45 una vez obtenidos todos los datos de las regresiones, donde se observa la evolución de la sensibilidad al gas amoníaco en función del modo de funcionamiento para cada sensor:



Gráfica 45: Sensibilidad de todos los sensores al amoníaco en función del tipo de funcionamiento.

Tal y como ocurre para el acetaldehído y para el etileno, y como se aprecia en la Gráfica 45, donde se observa como en todos los sensores la sensibilidad tiende a disminuir a medida que se aplican tipos de PTM con menor consumo de energía.

De igual forma que para el acetaldehído y el etileno, para poder observar la evolución de la sensibilidad al gas etileno en las diferentes combinaciones de tiempos de *on* y *off*, se realizó una interpolación de los datos para cada uno de los sensores. Los resultados se muestran en la Gráfica 46:



Gráfica 46: Sensibilidad de cada uno de los sensores al gas amoníaco.

Las imágenes que muestran la Gráfica 45 y la Gráfica 46 indican que la sensibilidad de los sensores al amoníaco tiene una tendencia a disminuir a medida que los modos de funcionamiento aplican menos energía.

Tal y como sucede con el acetaldehído y el etileno, la disminución de la sensibilidad se cumple para todos los sensores, tanto para el de Sn_2O como para los sensores de $Sn_2O + Ag$.

Cabe destacar también el comportamiento anómalo de uno de los sensores de $Sn_2O + Ag$ y el de Sn_2O , teniendo la misma tendencia que los otros sensores de $Sn_2O + Ag$ en todos los modos exceptuando uno de ellos, concretamente el correspondiente a 0.125/120.

7.4.3.3.- Límite de detección de los sensores al gas amoníaco.

Para el gas amoníaco, en todos los modos de funcionamiento y aplicando la fórmula de la Ecuación 14, se aprecia que los sensores siguen siendo capaces de detectar la mínima concentración introducida en la cámara, correspondiente a 2ppm de amoníaco.

7.4.4.- Tiempo de funcionamiento de los sensores en función del consumo asociado al tipo de PTM aplicado.

Para concluir con la sección referente a los sensores *ulp* MOX, se realizó un estudio del tiempo de funcionamiento de los sensores en función del consumo asociado al tipo de PTM aplicado, tomando como referencia la batería utilizada en la tarjeta RFID, la LPF25 de Varta de 25mAh de capacidad.

Al consumo asociado a cada tipo de PTM se le añadió el consumo asociado al número de medidas por minuto de la tarjeta RFID, la Tabla 14 muestra el resultado obtenido y los LOD de los diferentes gases:

PTM	Consumo de energía (μW)	Tiempo de funcionamiento (días)	LOD acetaldehído (ppm)	LOD etileno (ppm)	LOD amoníaco (ppm)
1/1	14.500	0,12	-	-	-
2/20	1.450	1,27	3	8	2
2/40	725	2,42	3	8	2
2/80	362,5	4,58	5	8	2
2/120	241,67	6,71	5	8	2
1/120	120,83	12,78	5	8	2
0,5/120	60,42	23,34	9	8	2
0,25/120	30,21	39,38	9	8	2
0,125/120	15,1	60,94	9	14	2
0,065/75	12,57	83,84	14	24	2
0,0325/69	6,83	103,25	14	24	2

Tabla 14: Tiempos de funcionamiento de la tarjeta RFID con los sensores *ulp* MOX integrados en función del modo de funcionamiento.

A partir de los datos mostrados en la Tabla 14, se puede confirmar la viabilidad de la implementación de los sensores *ulp* MOX en las tarjetas RFID del proyecto GoodFood utilizando la batería LPF 25 de Varta. El sistema es capaz de funcionar más de 100 días dependiendo del tipo de PTM aplicado, si bien con un comportamiento degradado.

7.5.- Conclusión.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que, para los sensores de Sn₂O+Ag, el tipo de PTM óptimo para obtener una mejor sensibilidad es aquel el que más consumo energético necesita, en nuestro caso el tipo de PTM 2/20, a medida que el consumo energético disminuye, empieza a disminuir la sensibilidad en el sensor y, a su vez, empieza a aumentar la conductancia de la línea de base y su ruido, llevando todo ello a una disminución del límite de detección (LOD). Otra consecuencia de la disminución de energía es el aumento drástico del tiempo de estabilización del sensor.

Seguidamente se muestran en forma de tablas y como resumen las diferencias entre máximos y mínimos de los parámetros estudiados en este capítulo:

La Tabla 15 muestra las diferencias de tiempos de funcionamiento y tiempos de estabilización en función del consumo de los sensores:

	Consumo (μW) Max/Min	Tiempo de funcionamiento (días)	Tiempo de estabilización (horas)
Sensor 1 (SnO ₂ +Ag)	1.450 / 6.83	1.27 / 103.25	0.15 / 31.7
Sensor 2 (SnO ₂ +Ag)	1.450 / 6.83	1.27 / 103.25	0.19 / 19.95
Sensor 3 (SnO ₂ +Ag)	1.450 / 6.83	1.27 / 103.25	0.15 / 27.74
Sensor 4 (SnO ₂)	1.450 / 6.83	1.27 / 103.25	0.05 / 13.32

Tabla 15: Comparativa de los parámetros tiempo de funcionamiento y tiempo de estabilización entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.

De los datos de la Tabla 15 se resume en que una reducción del 99.5% del consumo implica un aumento drástico en el tiempo de funcionamiento, pasando a ser éste de más de 100 días, pero, a su vez, un mayor tiempo de estabilización, pasando de minutos a horas.

En el caso de la Tabla 16 se muestran las diferencias de conductancia de la línea de base y del ruido en la línea de base en función del consumo de los sensores:

	Consumo (μW) Max/Min	Conductancia (μS)	Ruido (nS)
Sensor 1 (SnO ₂ +Ag)	1.450 / 6.83	0.32 / 4.44	43.77 / 158.79
Sensor 2 (SnO ₂ +Ag)	1.450 / 6.83	0.35 / 5.09	32.9 / 175.8
Sensor 3 (SnO ₂ +Ag)	1.450 / 6.83	0.47 / 4.45	62.96 / 162.29
Sensor 4 (SnO ₂)	1.450 / 6.83	0.24 / 3.13	20.29 / 854.43

Tabla 16: Comparativa de los parámetros conductancia de la línea de base y ruido entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.

Así pues, en la Tabla 16 se observa como a menor consumo la conductancia en la línea de base aumenta más de un orden de magnitud en todos los sensores. Por otro lado, el aumento del ruido en la línea de base es diferente para todos los sensores, para el sensor 1 es más del triple, para el sensor 2 se multiplica por 5, para el sensor 3 más del doble y para el sensor 4 es 40 veces mayor.

En las siguientes tablas se muestran los datos de LOD y sensibilidad a los diferentes gases utilizados, de la Tabla 17 correspondiente al acetaldehído,

	LOD (ppm)	Sensibilidad (U.A.)
	Acetaldehído	
Sensor 1 (SnO ₂ +Ag)	3 / 14	0.67 / 0.34
Sensor 2 (SnO ₂ +Ag)	3 / 14	0.63 / 0.42
Sensor 3 (SnO ₂ +Ag)	3 / 14	0.62 / 0.50
Sensor 4 (SnO ₂)	3 / 14	0.76 / 0.47

Tabla 17: Comparativa de los parámetros LOD y sensibilidad al gas acetaldehído entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.

se puede resumir que el LOD de todos los sensores aumenta casi 5 veces más, mientras que la disminución de la sensibilidad depende de cada sensor, siendo del más de la mitad para el sensor 1, de 1.5 para el sensor 2, de 1.2 para el sensor 3 y de 1.6 para el sensor 4.

De la Tabla 18, correspondiente al etileno,

	LOD (ppm)	Sensibilidad (U.A.)
	Etileno	
Sensor 1 (SnO ₂ +Ag)	8 / 24	0.47 / 0.01
Sensor 2 (SnO ₂ +Ag)	8 / 24	0.41 / 0.06
Sensor 3 (SnO ₂ +Ag)	8 / 24	0.44 / 0.01
Sensor 4 (SnO ₂)	8 / 24	0.28 / 0.12

Tabla 18: Comparativa de los parámetros LOD y sensibilidad al gas etileno entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.

se puede resumir, igual que en el caso anterior, que el LOD de todos los sensores aumenta 3 veces más, mientras que la disminución de la sensibilidad depende de cada sensor, siendo de 47 veces menor para el sensor 1, de 7 veces menor para el sensor 2, de 44 veces menor para el sensor 3 y de más del doble para el sensor 4.

Y finalmente de la Tabla 19, correspondiente al amoníaco,

	LOD (ppm)	Sensibilidad (U.A.)
Amoníaco		
Sensor 1 (SnO ₂ +Ag)	2 / 2	0.71 / 0.30
Sensor 2 (SnO ₂ +Ag)	2 / 2	0.59 / 0.29
Sensor 3 (SnO ₂ +Ag)	2 / 2	0.55 / 0.28
Sensor 4 (SnO ₂)	2 / 2	0.70 / 0.23

Tabla 19: Comparativa de los parámetros LOD y sensibilidad al gas amoníaco entre el tipo de PTM con mayor (Max) y con menor (Min) consumo energético.

se puede resumir que no se ha alcanzado el LOD de los sensores con las concentraciones utilizadas, mientras que la disminución de la sensibilidad es más de la mitad para todos los sensores.

Después del análisis de los resultados obtenidos de la respuesta de los sensores a los diferentes gases, se demuestra que para obtener un funcionamiento óptimo del sistema, es necesario un compromiso entre qué nivel de concentración se quiere detectar y el tiempo del transporte. Por lo tanto, los tiempos de encendido y apagado han de ir relacionados con el tipo de transporte, es decir, se pueden utilizar los PTM óptimos en función de la batería seleccionada y del tiempo de transporte.

Como ejemplo, para cumplir con las especificaciones que indican los requerimientos del proyecto, 10ppm de acetaldehído, 400ppm de etileno y 50ppm de amoníaco, el tiempo de funcionamiento debería ser menor que 61 días, correspondiente al tipo de PTM 0.125/120, con un consumo de energía de 15.1 μ W y unos LOD de 9ppm para el gas acetaldehído, 14ppm para el gas etileno y 2ppm para el gas amoníaco. En este caso el factor limitante es el LOD del gas acetaldehído.

Si por el contrario, las especificaciones fueran más flexibles con el gas acetaldehído y permitieran aumentar el LOD en tan solo 5ppm, el tiempo de funcionamiento podría llegar más allá de los 100 días.

Por último, y no por ello menos importante, hay que tener en cuenta que la tarjeta está diseñada para trabajar en modo de alarma, esto quiere decir que creará un evento cuando se pase de una determinada concentración de un gas. Así pues, se puede afirmar que en este caso es más importante el parámetro de LOD que el de sensibilidad, debido a que lo importante no es conocer exactamente la cantidad de concentración gas detectada, si no detectar una cierta concentración. El estudio del comportamiento de los sensores nos ha confirmado que es posible detectar concentraciones bajas de los compuestos elegidos minimizando el consumo energético de nuestros sensores, haciendo posible la implementación de sensores de gas en tarjetas RFID.

Por otro lado, los resultados obtenidos con el sensor de Sn₂O hacen necesario otro tipo de medidas, caracterizar mejor su comportamiento en modos de trabajo donde se consume menos energía es uno de los trabajos que pueden dar continuidad a esta tesis doctoral.

7.6.- Referencias.

- [1] Lee, A. P. et al., "Temperature modulation in semiconductor gas sensing". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Volume 60, Issue 1, 2 November 1999, Pages 35-42.
- [2] Civicchi, R.E. et al., "Optimized temperature-pulse sequences for the enhancement of chemically specific response patterns from micro-hotplate gas sensors". *Sensors and Actuators B* 33 (1996) 142-146.
- [3] Heilig, A. et al, "Gas identification by modulating temperatures of SnO₂-based thick film sensors". *Sensors and Actuators B* 43 (1997) 45-51
- [4] Ortega, A. et al, "An intelligent detector based on temperature modulation of a gas sensor with a digital signal processor". *Sensors and Actuators B: Chemical*. Volume 78, Issues 1-3, 30 August 2001, Pages 32-39.
- [5] Huang, X., et al. "Gas sensing behavior of a single tin dioxide sensor under dynamic temperature modulation". *Sensors and Actuators B* 99 (2004) 444-450.
- [6] Llobet, E. et al., "Reducing power consumption via a discontinuous operation of temperature-modulated micro-hotplate gas sensors: Application to the logistics chain of fruit." *Sensors and Actuators B: Chemical*. Volume 129, Issue 1, 29 January 2008, Pages 311-318.
- [7] Jaegle, M. et al., "Micromachined thin film SnO₂ gas sensors in temperature-pulsed operation mode". *Sensors and Actuators B* 57 1999. 130-134
- [8] Sayhan, I. et al., "Discontinuously Operated Metal Oxide Gas Sensors for Flexible Tag Microlab Applications." *Sensors Journal, IEEE*. Feb. 2008. Volume: 8 Issue: 2, page(s): 176 - 181.
- [9] Elmi, I. et al., "Development of ultra-low-power consumption MOX sensors with ppb-level VOC detection capabilities for emerging applications." *Sensors and Actuators B: Chemical*. Volume 135, Issue 1, 10 December 2008, Pages 342-351.
- [10] Sallen, R. P., & Key, E. L. "A practical method of designing RC active filters". *Circuit Theory, IRE Transactions on*, 2(1), 74-85. (1955).
- [11] Udina, S. ,"Smart Chemical Sensors: Concepts and Application", tesis doctoral, Universidad de Barcelona, Mayo 2012.
- [12] Fonollosa, J. ," Development of a compact NDIR spectrometer based on MOEMS components for fruit ripening monitoring.", tesis doctoral, Universidad de Barcelona, Junio 2009.
- [13] Clifford, P.K. and Tuma D.T., "Characteristics of Semiconductor gas sensors I. Steady state gas response", *Sensors and Actuators*, 3 (1982a) 233-254.
- [14] Clifford, P.K. and Tuma D.T., "Characteristics of Semiconductor gas sensors II. Transient response to temperature change", *Sensors and Actuators*, 3 (1982b) 255-281.

[15] Lloyd A. Currie, "Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry", Analytical chemistry, 1968 - ACS Publications

[16] Lloyd A. Currie, "Detection and quantification limits: origins and historical overview", Analytica Chimica Acta 391 (1999) 127-134

8.- Conclusiones.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas tras el desarrollo de esta tesis doctoral y se proponen posibles líneas futuras a realizar.

Tras lo expuesto en los capítulos anteriores la principal conclusión que se puede alcanzar es que es viable la implementación de diversos tipos de sensores, como de temperatura y humedad, de luz y de gas dentro de sistemas de muy bajo consumo energético, como tarjetas RFID semipasivas, orientados a ser utilizados en ciertos puntos de la cadena logística de distribución de productos perecederos ayudando a aumentar control de calidad del producto final ofrecido al consumidor.

Así mismo, se ha demostrado la funcionalidad de las tarjetas RFID implementadas en sustrato flexible, obteniendo iguales resultados que las tarjetas implementadas en formato rígido.

De los resultados obtenidos, se ha demostrado que se pueden utilizar estos sistemas funcionando durante varios días, más de 130 días sin utilizar sensores de gas y más de 100 días utilizando sensores de gas, utilizando una batería de 25mAh.

Por otro lado, se ha demostrado la viabilidad de la utilización de técnicas de ahorro de energía, como el PTM, en sensores de gas tipo MOX, llegando a detectar diferentes concentraciones de gases, 14ppm de acetaldehído, 24ppm de etileno o 2ppm de amoníaco, reduciendo el consumo hasta los $6.83\mu\text{W}$. De esta forma se ha demostrado que estas técnicas de ahorro de energía pueden ser utilizadas para muchas otras aplicaciones, siendo de gran interés para la comunidad científica.

Del estudio realizado del comportamiento de los sensores MOX ante la reducción drástica de energía se ha comprobado que a medida que los modos de funcionamiento suponen un menor consumo energético, empeoran tanto la sensibilidad del sensor, que decrece, como el límite de detección (LOD), que aumenta, para todos los gases estudiados. A su vez, aumenta la conductancia de la línea de base y su ruido. También se ha comprobado como el tiempo de estabilización aumenta significativamente a medida que el consumo energético disminuye.

En relación a la cadena logística de transporte de pescado fresco, mediante la realización de las diferentes medidas de campo se han validado las tarjetas RFID para su uso en prácticamente toda la cadena logística de distribución del pescado, desde el empaquetamiento el pescado fresco una vez procesado, hasta las plataformas de distribución, incluso se podrían utilizar hasta llegar a los puntos de venta, donde aportarían una información útil de la calidad y procedencia del pescado.

Además, los resultados obtenidos en los ensayos realizados demuestran las ventajas de disponer de la información referente a la humedad, al ser este un parámetro menos controlado que la temperatura durante la cadena logística de distribución. De esta forma se puede complementar la información obtenida de los datos de temperatura.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

9.- Apéndice I – Norma ISO/IEC 15693.

Desarrollo de una tarjeta RFID flexible con capacidades sensoras para aplicaciones en logística de alimentación.

En este apéndice se detallan las especificaciones del funcionamiento de la norma ISO/IEC 15693. Es necesario el estricto cumplimiento en su aplicación para conseguir un sistema totalmente estandarizado.

Cabe destacar que aumentando la estandarización, se incrementa la posibilidad de interconexión de los dispositivos diseñados en el proyecto GoodFood con otros dispositivos comerciales, tanto la conexión lector (GoodFood) - tarjeta (comercial) como la conexión tarjeta (GoodFood) - lector (comercial). Esto nos ofrece una mayor versatilidad de nuestro sistema, como podremos comprobar en secciones posteriores.

Como se menciona en primer capítulo de esta tesis, el estándar ISO/IEC 15693 se divide en 4 partes:

- ISO/IEC 15693: Parte 1, características físicas.
- ISO/IEC 15693: Parte 2, interfaz inalámbrico e inicialización.
- ISO/IEC 15693: Parte 3, protocolos de transmisión y anticolidión.
- ISO/IEC 15693: Parte 4, conjunto de comandos extendidos y funciones de seguridad (No definido actualmente).

Seguidamente se profundiza en cada una de ellas:

9.1.- ISO/IEC 15693: Parte 1.

Esta parte del ISO/IEC 15693 describe cuales son las características físicas que han de cumplir las tarjetas denominadas con el término de vecindad. Seguidamente mencionaremos las que más relevancia tienen para la realización de los prototipos.

La norma ISO/IEC 15693-1 define como tarjeta de vecindad, o en inglés **Vinicity Integrated Circuit Card** (VICC), a aquellas tarjetas del tipo ID-1 que lleven implementado uno o varios circuitos integrados y un sistema de acoplamiento, donde la comunicación del circuito integrado se realice mediante acoplamiento inductivo con otro dispositivo acoplador a distancia de vecindad. También define como dispositivo acoplador por vecindad, o en inglés **Vinicity Coupling Device** (VCD), al dispositivo lector-grabador que usa el acoplamiento inductivo para proveer de energía a la VICC y controlar el intercambio de información con la VICC.

Otra de las definiciones de la norma ISO/IEC 15693-1 es que las tarjetas tipo VICC deben tener las características físicas de acuerdo con los requerimientos de las tarjetas del tipo ID-1 recogidos en la norma ISO/IEC 7810, donde, entre otras características, se describen las dimensiones de varios tipos de tarjetas. La Tabla 20 corresponde a estas dimensiones y uso de los diferentes tipos de tarjetas:

Formato	Dimensiones (mm)	Uso
ID-1	85,60 x 53,98	Tarjetas bancarias
ID-2	105 x 74	Tarjetas de identificación francesas
ID-3	125 x 88	Pasaportes y visados
ID-000	25 x 15	Tarjetas de telefonía móvil (SIM)

Tabla 20: Dimensiones de los diferentes tipos de tarjetas según la norma ISO/IEC 7810.

Las demás definiciones de características físicas, como la exposición a la luz ultravioleta, a los rayos X, la resistencia de las tarjetas a fuerzas de torsión y flexión, así como su inmunidad a campos magnéticos o eléctricos no se toman en consideración para esta fase de prototipaje.

9.2.- ISO/IEC 15693: Parte 2.

La parte 2 del ISO/IEC 15693 describe las características eléctricas de la interfaz sin hilos, o **contactless** en inglés, entre la VICC y el VCD. Esta interfaz incluye tanto el envío de energía como la comunicación bidireccional.

9.2.1.- Dialogo inicial para las VICC.

El dialogo entre las VICC (teniendo en cuenta que puede haber una o más VICC al mismo tiempo) y el VCD se realiza mediante las operaciones siguientes:

- Activación de la VICC mediante el campo magnético del VCD.
- La VICC espera en silencio algún comando de la VCD.
- Transmisión de comando por parte de la VCD.
- Transmisión de respuesta de la VICC.

En los siguientes puntos, se especifica cómo estas operaciones utilizan el envío de energía y la interfaz de comunicaciones. Por otra parte, la norma ISO/IEC 15693-3 define el protocolo a utilizar el cual se aborda más adelante.

9.2.2.- Transferencia de energía.

La transferencia de energía hacia la VICC se realiza utilizando radio frecuencia y mediante el acoplamiento de las antenas de la VICC y el VCD.

Tal y como se describe más adelante, además de la transferencia de energía, el campo generado por la radio frecuencia que transfiere energía a la VICC desde el VCD, se modula para realizar las comunicaciones entre la VICC y la VCD.

La frecuencia f_c del campo está definida a $13,560\text{MHz} \pm 7\text{kHz}$. Una VICC debe tener una operación continuada entre un campo H_{min} y H_{max} . El mínimo campo H_{min} se define en el valor de 150mA/m rms y el máximo H_{max} se define en el valor de 5A/m rms . El VCD debe generar un campo de por lo menos H_{min} y que no exceda H_{max} .

9.2.3.- Interfaz de comunicaciones entre el VCD y la VICC.

La norma ISO/IEC 15693-2 define diferentes modos de funcionamiento de la interfaz de comunicaciones para poder ser compatible con otras normas, en esta tesis nos centraremos en los modos implementados en nuestros prototipos.

9.2.3.1.- Modulación de la portadora.

Las comunicaciones entre el VCD y la VICC se realizan mediante el principio de modulación de la amplitud de la señal portadora o en inglés **Amplitud Shift Keying** (ASK). La norma ISO/IEC 15693-2 define dos índices de modulación de la amplitud, el 10% y el 100%. En nuestro caso, solo se implementó una modulación de la amplitud del 100%. La Figura 46 muestra las especificaciones temporales para una modulación 100% ASK. También se aprecia como el nivel alto corresponde con pulsos de amplitud que presentan, como mínimo, un valor de tensión superior al 95% de la señal, mientras el nivel bajo correspondería idealmente con la ausencia de pulsos, aunque en la práctica tenemos pulsos con una amplitud inferior al 5%.

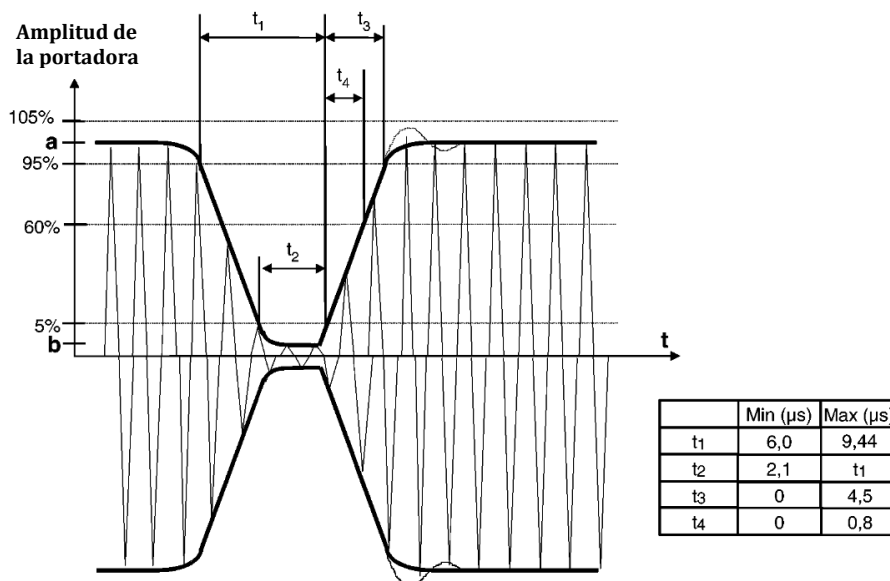


Figura 46: Modulación de la portadora para 100% ASK.

9.2.3.2.- Velocidad de datos y codificación.

La codificación de los datos debe realizarse mediante el método de modulación por posición del pulso, o en inglés **Pulse Position Modulation** (PPM). En esta modulación la posición del pulso dentro de un intervalo de tiempo, indica el valor codificado. Así, si transmitimos una palabra de M bits, la longitud temporal del pulso será $2M = T$ segundos, con una tasa de transferencia de M/T bits/segundos, y en donde en función de la posición temporal del pulso dentro de la ventana temporal, tendremos el valor de la palabra de M bits. La norma ISO/IEC 15693-2 define dos modos diferentes, el 1 de 4, donde se transmite un pulso en una trama

de longitud temporal 4, con lo que se transmiten 2 bits, y el 1 de 256, donde se transmite un pulso en una trama de longitud temporal 256, con lo que se pueden transmitir 8 bits. Para los prototipos realizados solo se ha implementado el método 1 de 4.

El método de modulación por pulso 1 de 4 se utiliza para determinar dos bits en un intervalo de tiempo, por lo tanto, para obtener un byte en cualquier comunicación, son necesarios cuatro intervalos de tiempo. En el caso de la norma ISO/IEC 15693-2, se especifica que los bits de menos significativos, o en inglés **Least Significant Bits** (LSB), se transmiten primero.

Teniendo en cuenta la frecuencia de la portadora y que el intervalo de tiempo se define en $75,52 \mu\text{s}$, obtenemos que la velocidad de transmisión de los datos será de $26,48 \text{ kbits/s}$ que es lo mismo que $f_c/512$. En la Figura 47 se muestran los valores de los dos bits codificados en función de la posición del pulso.

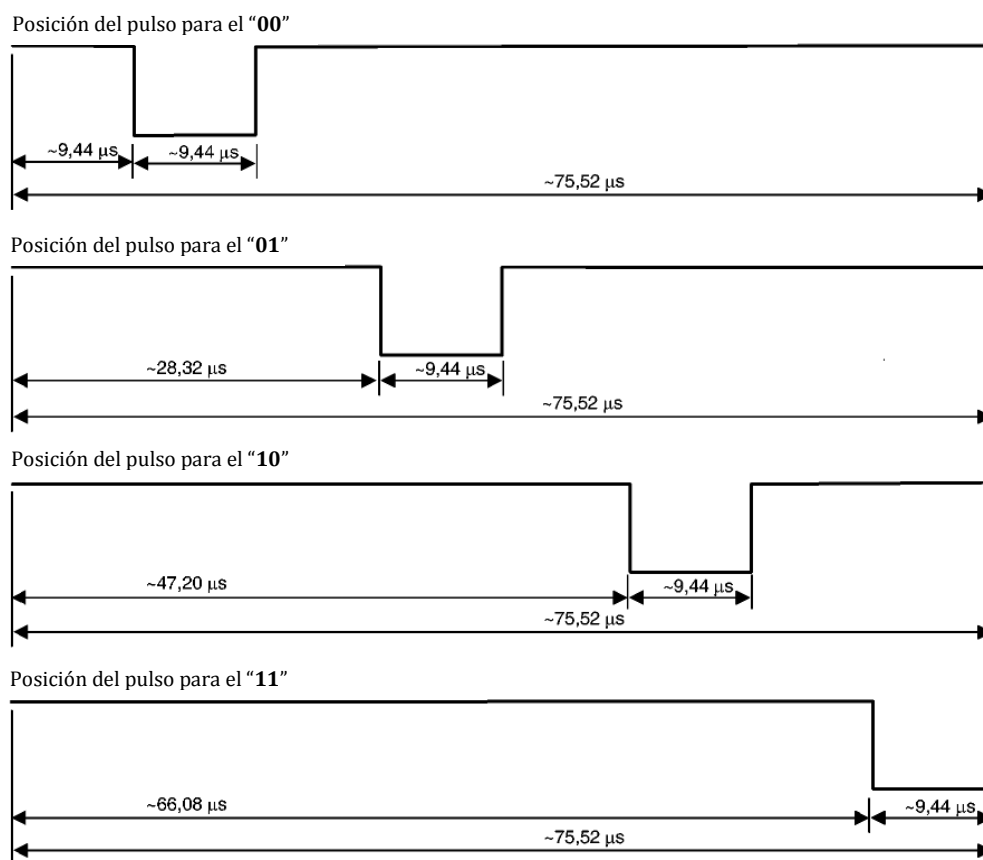


Figura 47: Codificación mediante modulación por posición de pulso en el modo 1 a 4.

9.2.3.3.- Envío de tramas del VCD al VICC.

En la norma ISO/IEC 15693-2 se utiliza el entramado de los datos añadiendo un símbolo de inicio de trama y otro de fin de trama para evitar la sincronización y obtener así un protocolo independiente.

Por lo tanto, aparte la codificación de los bits que muestra la Figura 47, se establecen los delimitadores correspondientes al inicio de trama, o en inglés Start Of Frame (SOF) y al final de trama, o en inglés End Of Frame (EOF). Además, estos delimitadores se implementan mediante el método de violación de código, llamado así porque la posición del pulso en el intervalo de tiempo determinado, no pertenece a ninguna de las posiciones de la codificación de la Figura 47.

Así pues, en la norma ISO/IEC 15693-2 se define el símbolo SOF, para el modo de codificación 1 a 4, con las características temporales de la Figura 48:

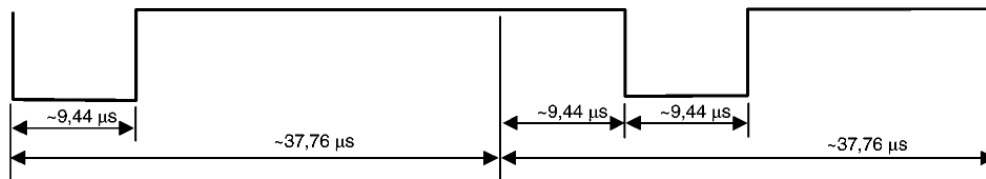


Figura 48: SOF correspondiente a la codificación 1 a 4.

Asimismo para el modo de codificación 1 a 4 se define el símbolo EOF con las características temporales de la Figura 49:

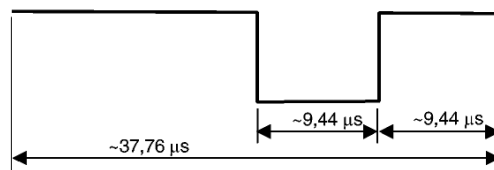


Figura 49: EOF correspondiente a la codificación 1 a 4.

9.2.4.- Interfaz de comunicaciones entre la VICC y el VCD.

Para que la VICC se comunique con el VCD se define que la comunicación ha de ser mediante la modulación de carga en la VICC. Esta modulación ha de ser a una frecuencia menor que la portadora denominada f_s o subportadora.

9.2.4.1.- Subportadora.

En la norma ISO/IEC 15693-2 se define también que puede utilizarse una o dos subportadoras.

En el caso de la utilización de una única subportadora, la frecuencia de ésta debe ser $f_{s1} = f_c/32 = \sim 423,75$ kHz.

Cuando se utilizan dos subportadoras, la primera frecuencia debe ser $f_{s1} = f_c/32 = \sim 423,75$ kHz y la segunda frecuencia debe ser $f_{s2} = f_c/28 = \sim 484,28$ kHz.

Además, se define en el caso de utilización de dos subportadoras, la relación de fase entre ellas ha de ser continua.

9.2.4.2.- Velocidad de transmisión.

Respecto a la velocidad de transmisión de datos se definen dos tipos, velocidad alta y velocidad baja. En la Tabla 21 se muestran las diferentes velocidades de transmisión en función del tipo y el número de subportadoras elegidos:

Velocidad de transmisión	Subportadora única	Subportadora doble
Baja	6,62 kbits/s ($f_c/2048$)	6,67 kbits/s ($f_c/2032$)
Alta	26,48 kbits/s ($f_c/512$)	26,69 kbits/s ($f_c/508$)

Tabla 21: Diferentes velocidades de transmisión de datos.

Para el prototipo diseñado se implementa la opción de alta velocidad de transmisión de datos con doble subportadora, por lo tanto la velocidad de transmisión entre la VICC y el VCD es de 26,69 kbits/s.

9.2.4.3.- Representación y codificación de bit.

La norma ISO/IEC 15693-2 define que en la transmisión entre la VICC y el VCD los datos deben ser codificados mediante codificación Manchester. Teniendo en cuenta nuestro prototipo utiliza dos subportadoras, la representación del valor de los bits deberá cumplir con los tiempos que muestran la Figura 50 y la Figura 51:

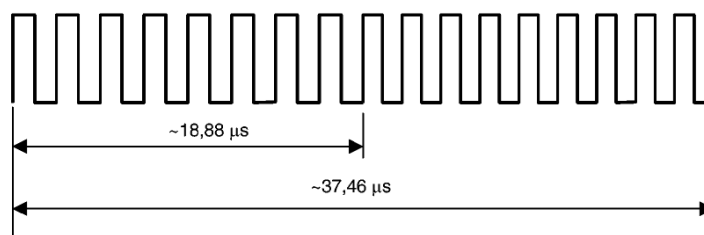


Figura 50: Representación del valor lógico '0'.

Como se puede apreciar en la Figura 50, un '0' lógico empieza con 8 pulsos de frecuencia $f_c/32$ ($\sim 423,75$ kHz) seguidos por 9 pulsos de $f_c/28$ ($\sim 484,28$ kHz).

Para la representación del '1' lógico, se utilizan las mismas frecuencias, pero esta vez se empieza por 9 pulsos de $f_c/28$ ($\sim 484,28$ kHz) seguidos de 8 pulsos de $f_c/32$ ($\sim 423,75$ kHz). La Figura 51 muestra la representación del '1' lógico:

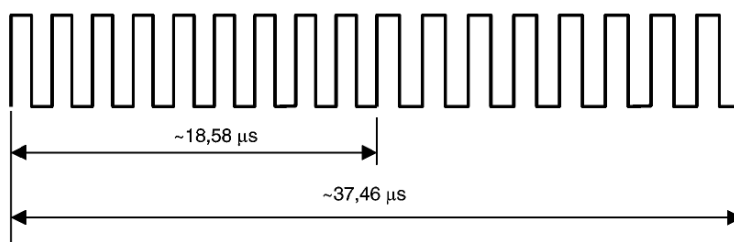


Figura 51: Representación del valor lógico '1'.

9.2.4.4.- Envío de tramas de la VICC al VCD.

En la comunicación VICC a VCD los datos se entraman para evitar la sincronización, del mismo modo que ocurría anteriormente con la comunicación VCD a VICC. Por lo tanto, toda trama de datos empieza con un SOF y acaba con un EOF, que también se definen utilizando violación de código.

Así pues, el SOF de la comunicación VICC a VCD, en la norma ISO/IEC 15693-2 para dos subportadoras, se define mediante el envío de tres partes bien diferenciadas que comprenden:

- En primer lugar se envían 27 pulsos de $f_c/28$ (~484,28 kHz).
- Seguidamente, se envían 24 pulsos de $f_c/32$ (~423,75 kHz).
- Y finalmente, se envía un '1' lógico (9 pulsos de $f_c/28$ (~484,28 kHz) seguidos de 8 pulsos de $f_c/32$ (~423,75 kHz)).

En la Figura 52 se muestra el SOF de la comunicación VICC a VCD que define la norma ISO/IEC 15693-2:

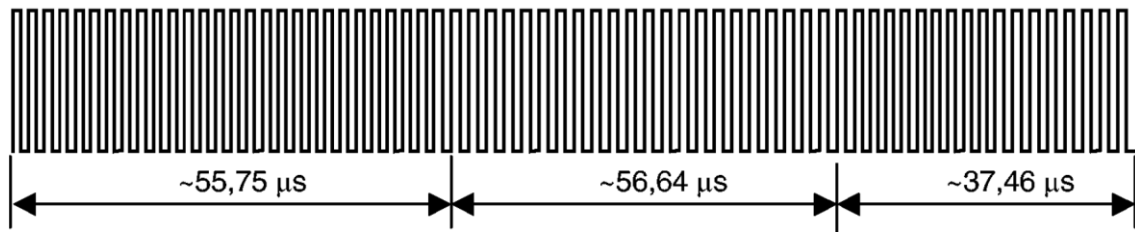


Figura 52: SOF de la comunicación VICC a VCD cuando se utilizan dos subportadoras.

Así mismo, la norma ISO/IEC 15693-2 define el EOF de la comunicación VICC a VCD de forma similar al SOF, pero cambiando las posiciones de la siguiente forma:

- En primer lugar, se envía un '0' lógico (8 pulsos de $f_c/32$ (~423,75 kHz) seguidos de 9 pulsos de $f_c/28$ (~484,28 kHz)).
- Seguidamente, se envían 24 pulsos de $f_c/32$ (~423,75 kHz).
- Y finalmente, se envían 27 pulsos de $f_c/28$ (~484,28 kHz).

El EOF de la comunicación VICC a VCD definido en la norma ISO/IEC 15693-2 tiene como resultado la secuencia de pulsos que muestra la Figura 53:



Figura 53: EOF de la comunicación VICC a VCD cuando se utilizan dos subportadoras.

Hasta este punto se ha definido la interfaz de comunicaciones que deberán implementar tanto los dispositivos VICC, como los VCD para obtener un flujo de datos coherente. En el siguiente punto se describirá la construcción de los comandos y sus respuestas.

9.3.- ISO/IEC 15693: Parte 3.

En la norma ISO/IEC 15693-3 se describe el protocolo y los comandos necesarios para su aplicación. También se define otros parámetros necesarios para inicializar la comunicación entre la VICC y el VCD, así como los métodos anticolidión para la detección y comunicación con una sola VICC entre diversas VICC.

9.3.1.- Identificador único.

Las VICC incorporan un identificador único, o en inglés *Unique Identifier* (UID), compuesto por 64 bits. Este identificador es utilizado para direccionar cada VICC única e individualmente, consiguiendo así, durante el protocolo de anti colisión una comunicación entre el VCD y la VICC con la que se quiere comunicar.

El UID debe ser grabado permanentemente por el fabricante de acuerdo con la Figura 54 :

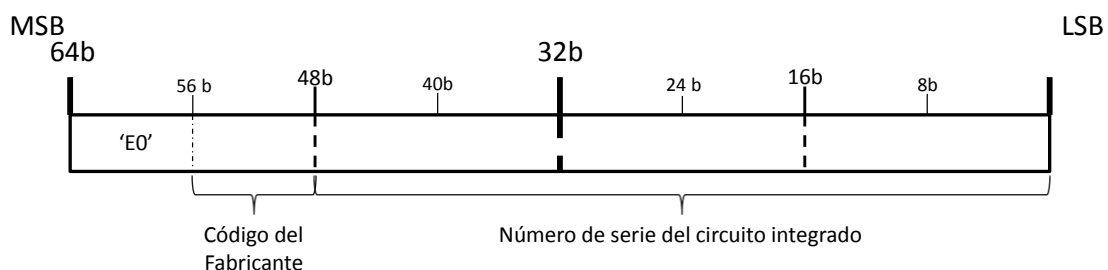


Figura 54: Formato del identificador único (UID).

Así pues, el UID está compuesto por:

- Los 8 bits correspondientes a los más significativos, o en inglés **Most Significant Bits** (MSB), deben tener el valor hexadecimal 'E0'.
- Los siguientes 8 bits han de contener el código del fabricante de acuerdo con la norma ISO/IEC 7816-6, según muestra la Tabla 22.
- Y finalmente un número de serie único de 48 bits asignado por el fabricante.

Identificador	Fabricante	País
'01'	Motorola	UK
'02'	STMicroelectronics SA	Francia
'03'	Hitachi, Ltd	Japón
'04'	Philips Semiconductors	Alemania
'05'	Infineon Technologies AG	Alemania
'06'	Cylink	USA
'07'	Texas Instrument	France
'08'	Fujitsu Limited	Japón
'09'	Matsushita Electronics Corporation, Semiconductor Co.	Japón
'0A'	NEC	Japón
'0B'	Oki Electric Industry Co. Ltd	Japón
'0C'	Toshiba Corp.	Japón
'0D'	Mitsubishi Electric Corp.	Japón
'0E'	Samsung Electronics Co. Ltd	Corea
'0F'	Hynix	Corea
'10'	LG-Semiconductors Co. Ltd	Corea
'11'	Emosyn-EM Microelectronics	USA
'12'	INSIDE Technology	Francia
'13'	ORGA Kartensysteme GmbH	Alemania
'14'	SHARP Corporation	Japón
'15'	ATMEL	France
'16'	EM Microelectronic-Marin SA	Suiza
'17'	KSW Microtec GmbH	Alemania
'18'	ZMD AG	Alemania
'19'	XICOR, Inc.	USA
'1A'	Sony Corporation	Japón
'1B'	Malaysia Microelectronic Solutions Sdn. Bhd	Malaysia
'1C'	Emosyn	USA
'1D'	Shanghai Fudan Microelectronics Co. Ltd.	P.R. China
'1E'	Magellan Technology Pty Limited	Australia
'1F'	Melexis NV BO	Suiza
'20'	Renesas Technology Corp.	Japón
'21'	TAGSYS	France
'22'	Transcore	USA
'23'	Shanghai belling corp., ltd.	China
'24'	Masktech Germany GmbH	Alemania
'25'	Innovision Research and Technology Plc	UK
'26'	Hitachi ULSI Systems Co., Ltd.	Japón
'27'	Cypak AB	Suecia
'28'	Ricoh	Japón
'29'	ASK	Francia
'2A'	Unicore Microsystems, LLC	Federación Rusa
'2B'	Dallas Semiconductor/Maxim	USA
'2C'	Impinj, Inc.	USA
'2D'	RightPlug Alliance	USA
'2E'	Broadcom Corporation	USA
'2F'	MStar Semiconductor, Inc	Taiwán, ROC
'30'	eeDar Technology Inc.	USA
'31'	RFIDsec	Dinamarca
'32'	Schweizer Electronic AG	Alemania
'33'	AMIC Technology Corp	Taiwán

Tabla 22: Códigos de fabricante ISO/IEC 7816-6 (28-09-2007).

9.3.2.- Identificador de familia de aplicación.

La norma ISO/IEC 15693 define también un identificador de familia de aplicación, o en inglés **Application Family Identifier** (AFI), que representa el tipo de aplicación a la que está destinada la VICC en cada caso. Puede ser utilizado por el VCD para seleccionar solo aquellas VICC que cumplan con un AFI en concreto.

El AFI debe ser escrito por los comandos respectivos que se verán más adelante. Está codificado en 8 bits, los cuales constituyen 2 partes de 4 bits cada una.

El MSB del AFI, se utiliza para codificar una familia de aplicación en concreto o todas las aplicaciones de familias, como se define en la Tabla 23.

El LSB del AFI se utiliza para codificar una sub-familia de aplicación o todas las sub-familias de aplicación como se define en la Tabla 23. Códigos de sub-familia diferentes de '0' son propietarios.

AFI MSB	AFI LSB	Familia donde se aplica	Ejemplo
'0'	'0'	Todas las familias y sub-familias	No se puede aplicar a ninguna preselección
X	'0'	Todas las sub-familias de la familia X	Aplicable a una amplia preselección
X	Y	Solo la sub-familia Y de la familia X	
'0'	Y	Sub-familia Y propietarios	
'1'	'0', Y	Transporte	Tráfico, Autobuses, aerolíneas ...
'2'	'0', Y	Finanzas	IEP, Bancos, ventas ...
'3'	'0', Y	Identificación	Control de acceso ...
'4'	'0', Y	Telecomunicaciones	Telefonía pública, GSM ...
'5'	'0', Y	Medicina	
'6'	'0', Y	Multimedia	Servicios de internet
'7'	'0', Y	Juegos	
'8'	'0', Y	Almacenamiento de datos	Archivos portables
'9'	'0', Y	Gestión de artículos	
'A'	'0', Y	Paquetería exprés	
'B'	'0', Y	Servicios postales	
'C'	'0', Y	Bolsas de avión	
'D'	'0', Y	Reservado a futuros usos (RFU)	
'E'	'0', Y	RFU	
'F'	'0', Y	RFU	

Tabla 23: Codificación AFI de las familias de aplicación.

Nota a la tabla: X = '1' a 'F', Y='1' a 'F'.

La implementación por parte de la VICC de la codificación AFI es opcional. Si no está implementada, en una comunicación VCD-VICC, si el bit de AFI está activo en

los *flags*, que se verán más adelante, e independientemente del valor de la AFI, la VICC no debe responder.

Si la VICC tiene implementada la codificación AFI, debe responder de acuerdo con lo definido en la Tabla 23.

9.3.3.- Identificador del formato del almacenamiento de los datos.

El identificador del formato del almacenamiento de datos, o en inglés **Data Storage Format Identifier** (DSFID), indica cómo se estructuran los datos en la memoria de la VICC.

Debe ser programado por los comandos respectivos, que se verán más adelante. Se codifica en un byte y permite, por ejemplo, conocer la organización lógica de los datos.

Si su programación no está implementada por la VICC, ésta debe responder con el valor '00'.

9.3.4.- Comprobación de redundancia cíclica.

La comprobación de redundancia cíclica (CRC) debe ser calculado en concordancia con el ISO/IEC 13239. El contenido inicial del registro ha de ser todo unos: 'FFFF'.

Los dos bytes de CRC se añaden a cada petición y a cada respuesta, dentro de cada trama, antes del símbolo del EOF. El CRC se calcula sobre todos los bytes comprendidos desde el siguiente al símbolo del SOF hasta el anterior al correspondiente al CRC.

Después de la recepción de una trama del VCD, la VICC verificará que el valor del campo correspondiente al CRC es válido. Si no es válido, la VICC deberá descartar la trama y no responder.

Tras la recepción de una trama de respuesta de la VICC, la comprobación del CRC es opcional, y por lo tanto, tras validar éste símbolo, las acciones a llevar a cabo quedan bajo la responsabilidad del diseñador del VCD.

Es muy importante destacar que en el envío del CRC, primero se transmite el byte menos significativo y, que por cada byte se transmite primero el bit menos significativo, como se muestra en la Figura 55:

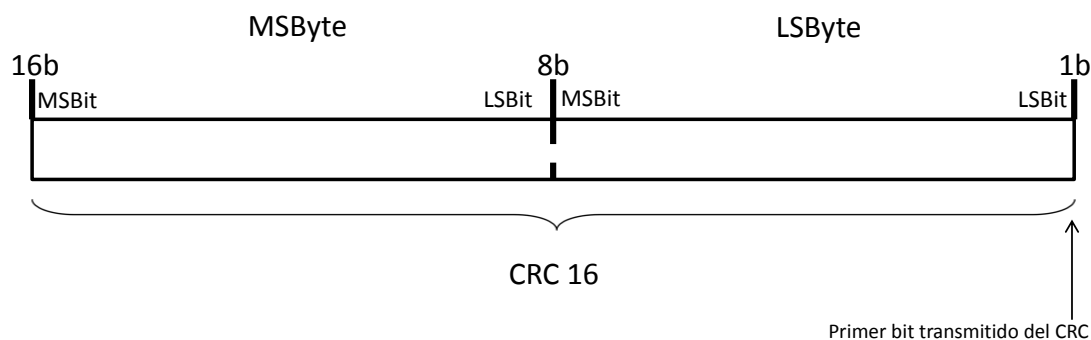


Figura 55: Reglas de transmisión de los bytes y bits del CRC según la norma ISO/IEC 15693.

9.3.5.- Organización de la memoria de la VICC.

Los comandos respectivos a operaciones con la memoria descritos en la norma IOS/IEC 15693 asumen que la memoria física está organizada en bloques, o páginas, de tamaño fijo.

La norma IOS/IEC 15693 especifica que se pueden direccionar hasta 256 bloques. Y que cada bloque puede tener un tamaño máximo de 256 bits. Por lo tanto la capacidad de memoria máxima en una VICC ha de ser de 8 kBytes, o 64kBits.

Los comandos descritos en esta norma permiten el acceso, tanto para leer como para escribir, por bloques. No existe ninguna restricción implícita o explícita respecto a otros modos de acceso a memoria.

9.3.6.- Descripción general del protocolo.

En la norma IOS/IEC 15693 el protocolo de transmisión define los mecanismos de intercambio de instrucciones y datos entre el VCD y la VICC en ambos sentidos. Este protocolo está basado en el concepto Maestro-Esclavo, en el que el VCD es el maestro y por lo tanto es el que siempre inicia la comunicación.

Esto quiere decir que cualquier VICC no debe empezar a transmitir a no ser que haya recibido y decodificado una instrucción enviada por el VCD.

En la Diagrama 10 podemos ver una comunicación normal entre VCD y VICC.

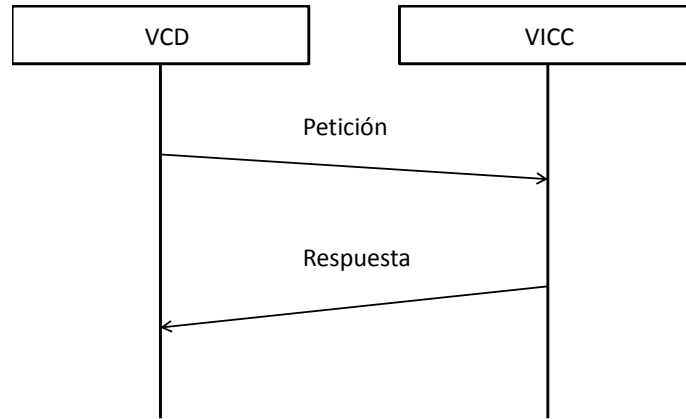


Diagrama 10: Comunicación Maestro - Esclavo entre la VCD y la VICC.

Los mensajes de petición y de respuesta se componen de una trama de datos delimitada por los símbolos ya conocidos SOF y EOF.

En la Figura 56 podemos ver el formato de un mensaje de petición:

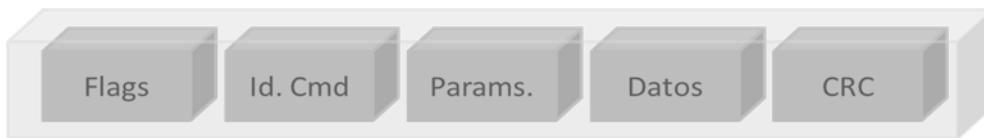


Figura 56: Formato de un mensaje de petición según la norma ISO/IEC 15693.

Cada mensaje de petición está compuesto por los siguientes campos:

- Banderas o en inglés *Flags*: Campo que contiene 8 bits de información. Estos bits indican ciertos parámetros de la trama que se verán más adelante.
- Id. Cmd: Código de comando del mensaje de Petición.
- Params.: Dependiendo del código de comando se añadirán una serie de campos obligatorios y campos opcionales.
- Datos: datos de la aplicación.
- CRC: Campo de 16 bits.

En la siguiente Figura 57 podemos ver el formato de un mensaje de respuesta:



Figura 57: Formato de un mensaje de respuesta según la norma ISO/IEC 15693.

Cada mensaje de respuesta está compuesto por los siguientes campos:

- *Flags*: Igual que en el mensaje de Petición, éste campo que contiene 8 bits de información. En el caso de la respuesta, contiene la verificación de la petición, como veremos más adelante.
- *Params.*: En función del mensaje de petición, el mensaje de respuesta puede variar añadiendo una serie de campos obligatorios y/o campos opcionales.
- *Datos*: datos de la aplicación.
- *CRC*: campo de CRC de 16 bits.

Este protocolo está orientado a bit y el número de bits transmitidos en una trama es un múltiplo de 8, es decir, un número entero de bytes.

La transmisión de un mensaje empieza por el byte de menos significativo (LSByte). Además, cada byte empieza a transmitirse empezando por el bit menos significativo (LSBit).

Una trama de bytes se transmite empezando por el byte menos significativo (LSByte), donde cada byte se transmite empezando por el bit menos significativo (LSBit).

La activación de los *flags* indica la presencia de campos opcionales. Cuando el *flag* está activado, a nivel alto '1', el campo en concreto está presente. Cuando el *flag* está desactivado, a nivel bajo '0', el campo en concreto está ausente.

Los *flags* Reservados para Futuros Usos (RFU) han de estar desactivados.

9.3.6.1.- Modos de funcionamiento.

En la norma IOS/IEC 15693 los modos de funcionamiento están referidos a los mecanismos existentes para especificar en una petición el conjunto de VICC que deben responder a la petición. Estos modos están definidos por tres clases:

- Modo direccionado.
- Modo no direccionado.
- Modo seleccionado.

9.3.6.1.1.- Modo direccionado.

Cuando el bit de modo direccionado en los *flags* está activado, a '1', la petición debe contener el identificador único (UID) de la dirección de la VICC a la cual va dirigida la petición.

Cualquier VICC que reciba el bit de modo direccionado en los *flags* activado debe comparar el UID recibido con el suyo propio. Si concuerda, debe ejecutar la petición y responder al VCD como especifica la descripción del comando. Si no concuerda, la VICC debe mantenerse en silencio.

9.3.6.1.2.- Modo no direccionado.

Cuando el bit de modo direccionado en los *flags* está desactivado, a '0', correspondiente al modo no direccionado, la petición no debe contener un identificador único.

Cualquier VICC que reciba una petición con el bit de modo direccionado en los *flags* desactivado, debe ejecutar la petición y debe responder al VCD como especifica la descripción del comando.

9.3.6.1.3.- Modo seleccionado.

Cuando el bit de modo seleccionado en los *flags* está activado, a '1', la petición no debe contener un identificador único.

Si la VICC está en el estado seleccionado y recibe una petición con el bit de modo seleccionado activo, debe ejecutar la petición y responder al VCD como especifica la descripción del comando.

Sólo la VICC en el estado seleccionado deberá responder a una petición que el bit de modo seleccionada activo.

9.3.6.2.- Formato de la trama de petición.

Como se ha indicado anteriormente, la norma IOS/IEC 15693 define que el formato de la trama de petición debe contener los siguientes campos:

- *Flags*.
- Id. Cmd.
- Params.
- Datos.
- CRC.

De este modo, el formato de la trama de petición estará configurado como se muestra en la Figura 58:



Figura 58: Formato de una trama de petición según la norma ISO/IEC 15693.

9.3.6.3.- Significado de los Flags en la trama de petición.

En una trama de petición, el campo *flags* especifica las acciones a realizar por la VICC y si los campos correspondientes están presentes o no. Este campo consiste en 8 bits distribuidos según las siguientes tablas:

Bit	Nombre del <i>flag</i>	Valor	Descripción
b1	Subportadora	0	Uso de una única subportadora
		1	Uso de dos subportadoras
b2	Velocidad de transmisión	0	Velocidad baja de transmisión
		1	Velocidad alta de transmisión
b3	Identificación o inventario	0	Los bits del 5 al 8 se especifican en la Tabla 25
		1	Los bits del 5 al 8 se especifican en la Tabla 26
b4	Extensión de protocolo	0	Sin extensión de protocolo
		1	El formato del protocolo se ha extendido (RFU)

Tabla 24: Definición de los bits del 1 al 4 del campo *flags*.

Bit	Nombre del <i>flag</i>	Valor	Descripción
b5	Seleccionado	0	La petición debe ser ejecutada por todas las VICC según el valor del <i>flag</i> de direccionamiento
		1	La petición debe ser ejecutada solo por la VICC que se encuentre en el estado de seleccionada
b6	Direccionado	0	Petición no direccionada, el UID no está incluido en la trama, debe ser ejecutada por toda VICC
		1	Petición direccionada, el UID está incluido en la trama, solo contestará la VICC con el mismo UID
b7	Opcional	0	El significado está definido por la descripción del comando. Debe ser '0' si no está definido.
		1	El significado está definido por la descripción del comando
b8	RFU	0	

Tabla 25: Definición de los bits del 5 al 8 del campo *flags*, cuando el bit de inventario está desactivado.

Bit	Nombre del <i>flag</i>	Valor	Descripción
b5	AFI	0	El campo correspondiente al AFI no está presente
		1	El campo correspondiente al AFI está presente
b6	Intervalos en anticollisión	0	16
		1	1
b7	Opcional	0	El significado está definido por la descripción del comando. Debe ser '0' si no está definido.
		1	El significado está definido por la descripción del comando
b8	RFU	0	

Tabla 26: Definición de los bits del 5 al 8 del campo *flags*, cuando el bit de inventario está activado.

9.3.6.4.- Formato de la trama de respuesta.

Como se ha indicado anteriormente, la norma IOS/IEC 15693 define que el formato de la trama de respuesta debe contener los siguientes campos:

- *Flags*.
- Params.
- Datos.
- CRC.

De este modo, el formato de la trama de respuesta estará configurado como se muestra en la Figura 59:



Figura 59: Formato de una trama de respuesta según la norma ISO/IEC 15693.

9.3.6.5.- Significado de los *Flags* en la trama de respuesta.

En la respuesta los *flags* indican al VCD como se han realizado, por parte de la VICC, las acciones definidas en la petición y si los campos correspondientes están activos o no. Al igual que los *flags* en la trama de petición, éste campo consiste en 8 bits distribuidos según la siguiente tabla:

Bit	Nombre del flag	Valor	Descripción
b1	Error	0	Sin error, trama correcta
		1	Error detectado, el código de error está en el campo 'error'
b2	RFU	0	
b3	RFU	0	
b4	Extensión	0	Sin formato de extensión de protocolo
		1	Con formato de protocolo extendido, RFU
b5	RFU	0	
b6	RFU	0	
b7	RFU	0	
b8	RFU	0	

Tabla 27: Definición de los bits del 1 al 4 del campo *flags* en la trama de respuesta.

9.3.6.6.- Códigos de error en la trama de respuesta.

Cuando la VICC activa el *flag* de error en su respuesta, debe ser incluido un nuevo campo donde se codifique el tipo de error, el cual informará del error ocurrido según la codificación definida en la Tabla 28.

Si la VICC no soporta un código de error específico listado en la Tabla 28, debe contestar con el código de error '0F', correspondiente al tipo de error sin información determinada.

Código de error	Significado
'01'	Comando no soportado, no se reconoce el código de petición
'02'	Comando no reconocido, por ejemplo: error de formato
'03'	Opción de comando no compatible
'0F'	Error sin información determinada
'10'	Bloque especificado no disponible o no existente
'11'	Bloque especificado ya bloqueado
'12'	Bloque especificado bloqueado. No se puede cambiar su contenido
'13'	Bloque especificado no ha sido programado correctamente
'14'	Bloque especificado no ha sido bloqueado correctamente
'A0' - 'DF'	Códigos de error personalizados
Todos los demás	RFU

Tabla 28: Definición de los códigos de error en la trama de respuesta según la norma ISO/IEC 15693.

9.3.7.- Protocolo de Anticolisión.

La norma ISO/IEC 15693 define un protocolo específico para prevenir el envío de tramas al mismo tiempo por parte de varias VICCs. En el prototipo de VICC correspondiente al proyecto GoodFood no se ha implementado el protocolo anticolidión debido, básicamente, a la imposibilidad física de que se produzca más de una comunicación por parte de las VICCs a la vez, ya que la distancia de lectura del VCD es de aproximadamente 10 cm y la colocación de las VICCs en los pallets impide que cualquier VICC tenga a menos de 10 cm cualquier otra VICC.

9.3.8.- Comandos.

La norma ISO/IEC 15693 define una gran variedad de comandos que permiten controlar, programar y obtener datos de las VICC.

9.3.8.1.- Tipos de comandos.

Los comandos se dividen en cuatro grupos, obligatorios, opcionales, a medida y propietarios. Todas las VICCs del mismo fabricante han de comportarse de la misma forma ante cualquier comando. La Tabla 29 nos muestra la codificación de los diferentes comandos junto con el tipo y su función:

Código de comando	Tipo	Función
'01'	Obligatorio	Identificación o inventario
'02'	Obligatorio	Mantenerse en silencio
'03' – '1F'	Obligatorio	RFU
'20'	Opcional	Lectura de un solo bloque de memoria
'21'	Opcional	Escritura de un solo bloque de memoria
'22'	Opcional	Bloqueo de un bloque de memoria
'23'	Opcional	Lectura de múltiples bloques de memoria
'24'	Opcional	Escritura de múltiples bloques de memoria
'25'	Opcional	Seleccionado
'26'	Opcional	Ir al estado "listo"
'27'	Opcional	Escritura del AFI
'28'	Opcional	Bloqueo del AFI
'29'	Opcional	Escritura del DSFID
'2A'	Opcional	Bloqueo del DSFID
'2B'	Opcional	Obtención de información del sistema
'2C'	Opcional	Obtención de información de los bloques
'2D' – '9D'	Opcional	RFU
'A0' – 'DF'	A medida	Depende del fabricante
'E0' – 'FF'	Propietario	Depende del fabricante

Tabla 29: Codificación de comandos según la norma ISO/IEC 15693.

En el prototipo de VICC correspondiente al proyecto GoodFood se implementan los comandos obligatorios y opcionales debido a que los otros tipos de comandos dependen sólo del fabricante de VICC.

9.3.8.2.- Comandos más frecuentemente utilizados en el proyecto GoodFood.

En esta sección se describen los comandos definidos por la norma ISO/IEC 15693 más utilizados por el prototipo de VICC de GoodFood, básicamente se utilizan los comandos de identificación o inventario y los referentes a la lectura y escritura de memoria. Hay que recordar que este prototipo está diseñado para guardar los datos de los sensores en memoria para, finalmente, enviarlos al VCD por lo que los demás comandos no tienen demasiada relevancia en la operación final.

9.3.8.2.1.-Comando de identificación o inventario.

Como se define en la Tabla 29, el código del comando de identificación o inventario es el '01'. La trama utilizada para el envío de este comando está compuesta por los siguientes campos:

- Los *flags*.
- El comando de identificación o inventario.
- El campo correspondiente al AFI, solo en el caso que el *flag* de AFI esté activado.
- La longitud de la máscara (relativo al protocolo de anticolisión, en este caso la longitud es 8 bytes, la correspondientes a la longitud del UID del VICC).
- El valor de la máscara (relativo al protocolo de anticolisión, en este caso es el valor del UID del VICC).
- Los 16 bits de CRC.

Además de los campos indicados, el *flag* correspondiente a identificación o inventario ha de estar activado. La Figura 60 muestra el formato de la trama de identificación o inventario definido en la norma ISO/IEC 15693:

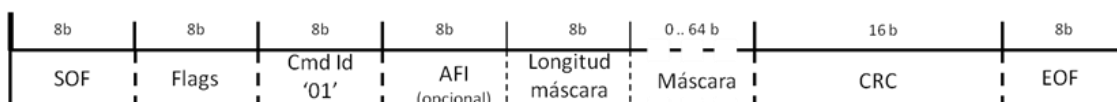


Figura 60: Formato de la trama de identificación o inventario definido en la norma ISO/IEC 15693.

La respuesta por parte de la VICC definida por la norma ISO/IEC 15693 debe contener los campos siguientes:

- El campo de DSFID.
- El valor de la UID.

Si la VICC detecta un error en la trama no debe contestar, manteniéndose en silencio.

En la Figura 61 se muestra el formato de la trama de respuesta al comando de identificación o inventario definido en la norma ISO/IEC 15693:



Figura 61: Formato de la trama de respuesta al comando de identificación o inventario definido en la norma ISO/IEC 15693.

9.3.8.2.2.- Comando de lectura de un solo bloque de memoria.

El código del comando de lectura de un solo bloque es el '20', como puede consultarse en la Tabla 29.

Si una VICC recibe este comando, la VICC debe leer el bloque indicado y enviar su valor en la respuesta. Si el *flag* de opción está activado, la VICC debe enviar también el estado del bit de seguridad del bloque, seguido por el valor del bloque. La Figura 62 muestra el formato de trama que ha de enviar el VCD para el comando de lectura de un solo bloque de memoria:

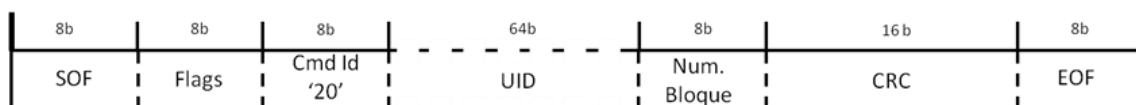


Figura 62: Formato de trama del comando de lectura de un solo bloque de memoria.

Los parámetros de esta trama de petición son dos:

- Primer parámetro: UID. Es opcional en el caso de ser una trama direccionada.
- Segundo parámetro: número de bloque de memoria que se quiere leer.

Por su parte la VICC puede responder al comando de lectura de un solo bloque de memoria de dos formas distintas, si ha habido error, la respuesta será como muestra la Figura 63 y si no existe error la respuesta será como indica la Figura 64:

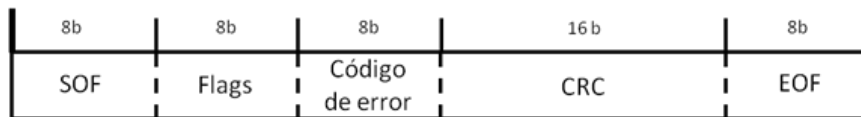


Figura 63: Trama de respuesta al comando de lectura de un solo bloque cuando el flag de error está activado.

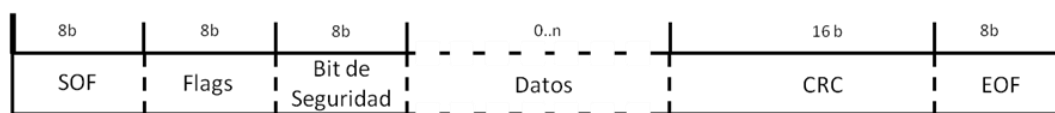


Figura 64: Trama de respuesta al comando de lectura de un solo bloque cuando el flag de error está desactivado.

Los parámetros de estas tramas dependen del tipo de respuesta. En el caso de error, la trama enviada como respuesta contiene el flag de error activado y en el campo de datos el código del error correspondiente, según la Tabla 28.

En el caso de no haber error, en la trama de respuesta se incluye los datos contenidos en el bloque de memoria, cuya longitud depende del formato de dicha memoria. En el caso de que en la trama de petición estuviera activado el bit de opción, también se incluye el estado del bit de seguridad.

9.3.8.2.3.-Comando de escritura de un solo bloque de memoria.

En este caso, el código del comando de escritura de un solo bloque es el '21', como puede consultarse en la Tabla 29.

Cuando una VICC recibe este comando, debe escribir en el bloque de memoria indicado los datos contenidos en la petición y enviar en la respuesta si la operación ha tenido éxito o no.

La Figura 65 muestra el formato de trama que ha de enviar el VCD para el comando de escritura de un solo bloque de memoria:

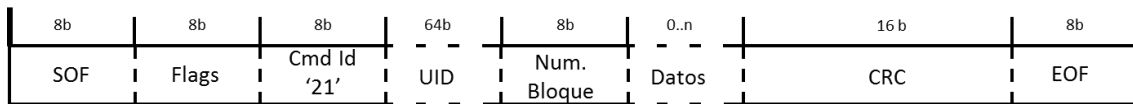


Figura 65: Formato de trama del comando de escritura de un solo bloque de memoria.

Los parámetros de la trama de petición son tres:

- Primer parámetro: UID, es opcional en el caso de ser una trama direccionada.
- Segundo parámetro: número de bloque de memoria a escribir.
- Tercer parámetro: datos a escribir en el bloque de memoria.

Por su parte la VICC puede responder al comando de escritura de un solo bloque de memoria de dos formas distintas. Si ha habido error, la respuesta será como muestra la Figura 66 y si no existe error la respuesta será como indica la Figura 67:

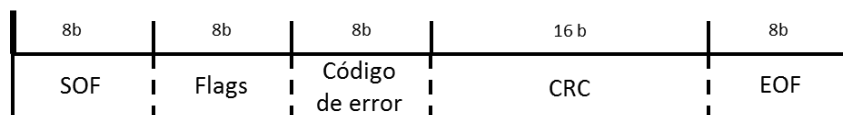


Figura 66: Trama de respuesta al comando de escritura de un solo bloque cuando el flag de error está activado.

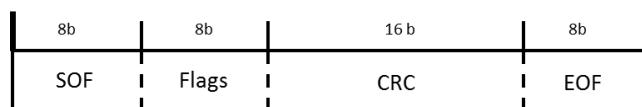


Figura 67: Trama de respuesta al comando de escritura de un solo bloque cuando el flag de error está desactivado.

Los parámetros de estas tramas dependen del tipo de respuesta. En el caso de la trama con el *flag* de error activado, se envía el código de error especificado en la Tabla 28. Si el *flag* de error no está activado, solo se envía el campo de *flags*.

9.3.8.2.4.-Comando de lectura de múltiples bloques de memoria.

La norma ISO/IEC 15693 define la opción de poder leer más de un bloque de memoria en una sola petición. El código del comando de lectura de múltiples bloques de memoria corresponde al '23', como puede consultarse en la Tabla 29.

Si una VICC recibe este comando, la VICC debe leer los bloques indicados y enviar sus valores en la respuesta. Si el *flag* de opción está activado, la VICC debe enviar también el estado del bit de seguridad del bloque, seguido de todos los valores de los bloques. Los bloques de memoria están numerados desde el '00' hasta el 'FF', es decir, desde 0 a 255. El número de bloques de la petición es uno menos de los que la VICC debe enviar como respuesta, formato n-1, ya que para leer un solo bloque se utiliza el valor '00'.

La Figura 68 muestra el formato de trama que ha de enviar el VCD para el comando de lectura de múltiples bloques de memoria:

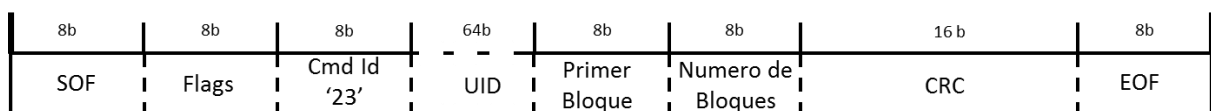


Figura 68: Formato de trama del comando de lectura de múltiples bloques de memoria.

Los parámetros de esta trama de petición son tres:

- El primero, que es opcional: en el caso de ser una trama direccionada, es el UID.
- El segundo: bloque por el cual se quiere empezar la lectura de memoria.
- El tercero: número de bloques de memoria que se quiere leer.

Por su parte la VICC puede responder al comando de lectura de múltiples bloques de memoria de dos formas distintas, si ha habido error, la respuesta será como muestra la Figura 69 y si no existe error la respuesta será como indica la Figura 70:



Figura 69: Trama de respuesta al comando de lectura de múltiples bloques cuando el *flag* de error está activado.

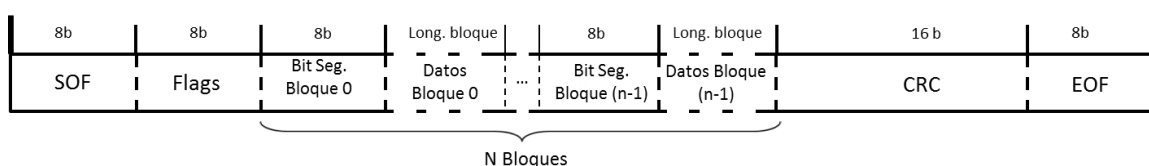


Figura 70: Trama de respuesta al comando de lectura de múltiples bloques cuando el *flag* de error está desactivado.

Los parámetros de estas tramas dependen del tipo de respuesta. En el caso de la trama con el *flag* de error activado, se envía el código de error especificado en la Tabla 28. Si el *flag* de error no está activado, se envía el estado del bit de seguridad del bloque en el caso de que el *flag* de opción esté activo, seguido de los datos contenidos en el bloque de memoria, cuya longitud depende del formato de la memoria. Esta operación se repetirá cuantas veces sea necesario hasta llegar al número de lecturas contenido en la petición.

9.3.8.2.5.-Comando de escritura de múltiples bloques de memoria.

La norma ISO/IEC 15693 define también la opción de poder escribir más de un bloque de memoria en una sola petición. El código del comando de escritura de múltiples bloques de memoria corresponde al '24', como puede consultarse en la Tabla 29.

Cuando una VICC recibe este comando, debe escribir en los bloques de memoria indicados los datos contenidos en la petición y enviar en la respuesta si la operación ha tenido éxito o no. El número de bloques de la petición es uno menos de los que la VICC debe enviar como respuesta, formato n-1, ya que para leer un solo bloque se utiliza el valor '00'.

La Figura 71 muestra el formato de trama que ha de enviar el VCD para el comando de escritura de múltiples bloques de memoria:

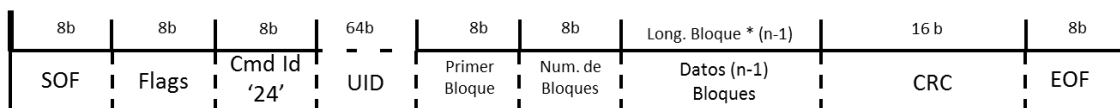


Figura 71: Formato de trama del comando de escritura de múltiples bloques de memoria.

Los parámetros de la trama de petición son cuatro, como en el comando de lectura:

- El primero, que es opcional: en el caso de ser una trama direccionada, es el UID.
- El segundo: primer bloque de memoria a escribir.
- El tercero: número de bloques a escribir.
- El cuarto: datos a escribir en los bloques de memoria.

Por su parte la VICC puede responder al comando de escritura de un solo bloque de memoria de dos formas distintas, si ha habido error, la respuesta será como muestra la Figura 72 y si no existe error la respuesta será como indica la Figura 73:

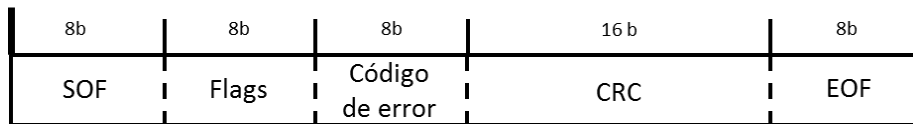


Figura 72: Trama de respuesta al comando de escritura de múltiples bloques cuando el flag de error está activado.

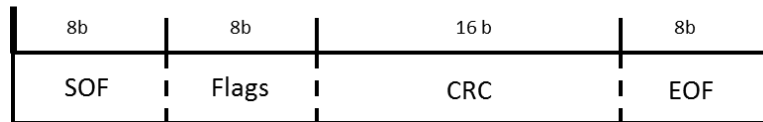


Figura 73: Trama de respuesta al comando de escritura de múltiples bloques cuando el flag de error está desactivado.

Los parámetros de estas tramas dependen del tipo de respuesta. En el caso de la trama con el *flag* de error activado, se envía el código de error especificado en la Tabla 28. Si el *flag* de error no está activado, solo se envía el campo de *flags*.

9.4.- ISO/IEC 15693-1: Parte 4.

En el momento de realización de esta tesis doctoral el conjunto de comandos extendidos y funciones de seguridad no estaba definido.