

# Mejora de la interfaz táctil de la tecla dimmer AUREA mediante la tecnología PTC QTouch de Atmel

Author: **Lluís Borràs Andrés**

Project Advisors: **Miguel Gragera Gil**  
**Ferran Silva Martínez**

**Departamento I+D+i del grupo SIMON**

SIMONTech

C/Diputació 390-392, 08013 Barcelona (Spain)



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Barcelona, 29 Junio 2017

## Abstract

This project is focused on the improvement of the Dimmer's touch interface of the intelligent mechanisms collection SIMON100, which allows to certify its immunity to conducted noise up to 10 V, according to the IEC 61000-4-6 Level 3 Standard that requires the Specific Standard IEC 60669-2-5: 2013 through the design and implementation of a new sensor based on the new capacitive technology developed by Atmel: PTC QTouch.

This Degree Thesis has been proposed by the R&D Manager of SIMON Jorge Dapena and the R&D Hardware Development Engineer Miguel Gragera. It has been performed at the R&D Department of the SIMON group, SimonTech.

Along this manuscript, the basic principles of capacitive touch sensing are introduced as well as a review of the effect of noise on the touch sensors and work areas for the achievement of Conducted Immunity with the PTC peripheral. From there on, the current SIMON100 dimmer key is analyzed; the hardware design proposal is developed at the level of sensors and PCBs, as well as the tactile application code. Finally, the tests in the laboratory are explained with the final validation of Immunity Conducted up to 10 V for the new dimmer developed.

## Resumen

El proyecto tiene como objetivo mejorar la interfaz táctil de la Tecla Dimmer de la colección de mecanismos inteligentes SIMON100, que permita certificar su inmunidad al ruido conducido de hasta 10 V, de acuerdo a la normativa IEC 61000-4-6 Level 3 que exige la norma específica IEC 60669-2-5:2013 mediante el diseño e implementación de un nuevo slider táctil con la nueva tecnología capacitiva desarrollada por Atmel: PTC QTouch.

Este trabajo de fin de grado (TFG) ha sido propuesto por el responsable del dept. Electrónico de SIMONTech Jorge Dapena y el ingeniero Hardware de I+D Miguel Gragera de SIMONTech. Ha sido desarrollado en en el Departamento I+D+i del grupo SIMON, SimonTech.

A lo largo de esta memoria, los principios básicos de sensado táctil capacitivo serán introducidos así como una explicación de la afectación del ruido en los sensores táctiles y las áreas de trabajo para la consecución de Inmunidad Conducida con el periférico PTC. A partir de entonces, se analizará la actual tecla dimmer SIMON100, se desarrollará la propuesta de diseño Hardware a nivel de sensores y PCB, así como del código de la aplicación táctil. Finalmente se detallarán los ensayos en el laboratorio con la validación final de Inmunidad Conducida a 10 V del nuevo dimmer desarrollado.

## Resum

Aquest treball de final de grau (TFG) ha estat proposat pel responsable del dept. Electrònic de SIMONTech Jorge Dapena i l'enginyer Hardware de R+D Miguel Gragera de SIMONTech. Ha estat desenvolupat en el Departament R+D+i del grup SIMON, SimonTech.

El projecte té com a objectiu millorar la interfície tàctil de la Tecla Dimmer de la col·lecció de mecanismes intel·ligents SIMON100, que permeti certificar la seva immunitat al soroll conduït de fins a 10 V, d'acord a la normativa IEC 61000-4-6 Level 3 que exigeix la norma específica IEC 60669-2-5:2013 mitjançant el disseny i implementació d'un nou slider tàctil amb la nova tecnologia capacitiva desenvolupada per Atmel: PTC QTouch.

Al llarg d'aquesta memòria, els principis bàsics de sensat tàctil capacitiu seran introduïts així com una explicació de l'afectació del soroll en els sensors tàctils i les àrees de treball per a la consecució d'Immunitat Conduïda amb el perifèric PTC. A partir de llavors, s'analitzarà l'actual tecla dimmer SIMON100, es desenvoluparà la proposta de disseny Hardware a nivell de sensors i PCB, així com del codi de l'aplicació tàctil. Finalment es detallaran els assajos en el laboratori amb la validació final d'Immunitat Conduïda a 10 V del nou dimmer desenvolupat.

## Agradecimientos

Mi agradecimiento al Sr.Miquel Gragera, Ingeniero Hardware I+D de SIMON Tech y tutor de mi proyecto por su apoyo, consejos, sugerencias, dedicación y acompañamiento en cada paso del mismo. Así como también mi gratitud al resto del departamento electrónico por su disponibilidad y ayuda en el desarrollo y ensamblado del proyecto.

Mi agradecimiento al Dr.Ferran Silva, profesor y tutor académico por su disposición, consejos y sugerencias.

Y a mi familia por brindarme la oportunidad de estudiar Ingeniería de Telecomunicaciones, por su confianza y apoyo incondicional.

## Índice

Abstract .....	1
Resumen.....	2
Resum.....	3
Agradecimientos .....	4
1. Introducción .....	8
1.1. Contexto Tecla Dimmer AUREA .....	8
1.2. Sensado táctil capacitivo .....	10
1.2.1. Tipos de capacidad .....	11
1.2.2. Métodos medición capacidad .....	13
1.3. Normativa Inmunidad Conducida 61000-4-6.....	14
1.3.1. Características de la norma IEC 60669-2-5:2013 respecto a Inmunidad Conducida.....	14
1.3.2. Implementación de Inmunidad Conducida con periférico PTC de ATMEL .....	15
2. Diseño del proyecto .....	16
2.1. Diseño electrodos.....	16
3.1.1. Versión Self-Capacitance.....	20
3.1.2. Versión Mutual-Capacitance .....	21
3.2. Diseño tecla PCB.....	27
3.3. Ensamblado de las teclas Self y Mutual .....	30
3.4. Diseño Software .....	32
4. Test y validación .....	35
5. Estudio de costes.....	37
6. Conclusiones.....	37
7. ANEXOS .....	39
Anexo 1.....	39
1.1 Métodos de medición capacitiva .....	39
Frequency Change.....	39
Tiempo de carga de la capacitancia .....	41
Charge Transfer .....	42
1.2 Análisis interferencias RF conducidas en entornos táctiles .....	45
Self-Capacitance .....	45
Mutual Capacitance .....	46
Ensayo de ruido RF conducido .....	47

Técnicas mejora robustez RF.....	47
1.3 CARACTERÍSTICAS DISEÑO TÁCTIL ROBUSTO AL RUIDO BASADO EN SOLUCIÓN PTC.....	48
1.3.1 Diseño táctil PCB .....	48
1.3.2 Características del PTC para robustez al ruido.....	53
1.3.3 Algoritmos procesado señal del PTC.....	56
Anexo 2.....	59
ANÁLISIS TECLA DIMMER AUREA ACTUAL.....	59
2.1 ANÁLISIS SLIDER AUREA .....	59
2.2 ANÁLISIS TECLA .....	61
ANNEXO 3.....	68
CÁLCULOS DISEÑO SLIDER SELF-CAPACITANCE .....	68
CÁLCULOS DISEÑO SLIDER MUTUAL-CAPACITANCE .....	75
MODIFICACIONES PLACA PCB .....	79
Anexo 5.....	89
ANÁLISIS PARÁMETROS TÁCTILES IMPLEMENTADOS.....	89
Anexo 6.....	92
ENSAYOS INMUNIDAD CONDUCTIDA 3 V y 10 V .....	92
Anexo 7.....	96
COSTES TECLAS DIMMER AUREA .....	96
8. Bibliografía .....	98
9. Glosario.....	99

## 0. Histórico Versiones

Revisión	Fecha	Purpose
0	22/05/2017	Creación del documento
1	2/06/2017	Revisión documento
2	12/06/2017	Revisión documento
3	20/06/2017	Revisión documento
4	27/06/2017	Revisión documento
5	29/06/2017	Revisión final documento

Nombre	E-mail
Lluís Borràs Andrés	lluisborand@gmail.com
Ferran Silva Martínez	ferran.silva@upc.edu
Miguel Gragera Gil	mgragera@simontech.es
Jorge Dapena	jdapena@simontech.es

## 1. Introducción

### 1.1. Contexto Tecla Dimmer AUREA

SIMON, fabricante español líder en el Mercado de material eléctrico y electrónica, con ocasión del centenario de su nacimiento en Olot, ha sacado al mercado la nueva gama de productos SIMON100, también conocida como AUREA. Una colección basado en el “Internet of Things”, en el que los interruptores pasan por primera vez de ser analógicos a digitales, permitiendo adaptar los espacios al estilo de vida de usuario. Uno de los productos que conforman la serie es un interruptor regulable, también conocido como dimmer. Este interruptor permite regular el nivel de intensidad lumínica de un espacio mediante el deslizamiento del dedo gracias a la interfaz táctil de la que está dotado.



*Ilustración 1: Vista frontal del dimmer AUREA con acabado oscuro y en blanco, al lado de otro mecanismo inteligente de la colección SIMON100, el SuperSchuko Wifi*

Como para el resto de dispositivos electrónicos, este dimmer debe cumplir con la normativa de compatibilidad electromagnética que garantiza que un producto puede funcionar correctamente sin causar interferencias electromagnéticas a otros equipos y al mismo tiempo, ser insensible a las emisiones de otros sistemas. Señalar que los dispositivos con interacción táctil son vulnerables a las interferencias RF conducidas dado que inyectan ruido en los pines TX/RX de sensado táctil de los microcontroladores.

Actualmente el producto presenta inmunidad al ruido conducido de hasta 3 V.

No obstante, a partir del 2020 entra en vigor la nueva norma para interruptores y accesorios relativos para uso en HEBS, la cual exigirá inmunidad al ruido de 10 V (Level 3). Un nivel sumamente exigente que supone todo un reto de diseño e implementación y que en estos momentos el dimmer desarrollado no lograría.

El proyecto pretende la mejora la interfaz táctil del dimmer de AUREA que permita certificar su inmunidad al ruido conducido de hasta 10 V, de acuerdo a la normativa IEC 61000-4-6 Level 3 que exige la norma específica IEC 60669-2-5:2013 mediante el diseño e implementación de un nuevo slider táctil con la revolucionaria tecnología capacitiva desarrollada por Atmel: PTC QTouch.

Los objetivos del proyecto son:

- Diseñar unos nuevos electrodos para el slider táctil.
- Desarrollar una nueva placa PCB con las modificaciones de hardware y enrutado necesarias para implementar el microcontrolador Atmel SAMD20 dotado con el periférico de sensado táctil Peripheral Touch Controller (PTC QTouch) en sustitución del actual Kinetis MKL05Z32VFK4 del fabricante Freescale, en la actualidad NXP.

- Adaptar el código desarrollado tal que se garantice la idéntica continuidad en la funcionalidad que caracteriza al dimmer actual, pero limitado el desarrollo a la implementación de interacción entre el usuario y el dimmer mediante feedback luminoso (indicación luminosa de la regulación establecida con el slider)
- Realizar los correspondientes ajustes de los parámetros de las distintas funciones de procesamiento de señal que implementa el periférico y que contribuyen a la consecución de la inmunidad al ruido junto a las características de dicha tecnología y las técnicas de diseño de hardware.
- Validación final de la normativa de Compatibilidad Electromagnética IEC 61000-4-6 Level 3 exigida por la norma IEC 60669-2-5:2013.

Inicialmente el objetivo de este proyecto era mejorar la interfaz táctil de la Tecla dimmer AUREA, que permita certificar su inmunidad al ruido conducido de hasta 10V, implementando la nueva tecnología táctil capacitiva de Texas Instruments, CapTIvate, por ser el primer fabricante en ofrecer un microcontrolador con tecnología táctil capacitiva con certificación IEC 61000-4-6 integral (hasta los 10V) y con la mayor resolución del mercado [1].

No obstante los microcontroladores de TI que poseen esta tecnología (MSP430FR253x-MSP430FR263x) presentan una memoria programable muy limitada, hasta 16 kB, mientras que actualmente la aplicación de la tecla dimmer requiere 30 kB. Esto llevó al primer reto: implementar dicho microcontrolador para que se encargara únicamente de la aplicación táctil comunicando los resultados al actual microcontrolador ( $\mu$ C o MCU) de Freescale vía el bus SPI, lo cual se traduciría en que la tecla tendría 3 MCU (el empleado por el ZWAVE, el actual de Freescale y el nuevo de TI), resultando en un diseño poco integral y optimizado o bien, emplear otro microcontrolador con mayor memoria y periférico táctil robusto al ruido.

Este otro microcontrolador pasaba por ser uno de Atmel, al también lanzar Atmel unos microcontroladores que disponen de un periférico de sensado táctil capacitivo, el Peripheral Touch Controller (PTC QTouch), que aun no teniendo la misma resolución que el de TI la robustez al ruido es una de sus señas de identidad. A diferencia de TI, Atmel presenta 3 familias de microcontroladores (D20, D21 y C20) dotados con esta tecnología y con multitud de opciones en cuanto a número de GPIOs y memoria programable (hasta 256KB).

Conforme se validó en el laboratorio del kit de evaluación de la tecnología PTC QTouch [2], el 15 de diciembre de 2016, de acuerdo a la normativa 61000-4-6 Level 3, se decidió saltar a Atmel para desarrollar el proyecto y dejar de avanzar con el diseño basado en el CapTIvate desarrollado hasta ese momento. Tras un análisis de las exigencias de pinout del proyecto y del requerimiento de memoria se decidió implementar el microcontrolador SAMD20G16A para desarrollar toda la aplicación de la tecla dimmer en sustitución del Kinetis MKL05Z32VFK4.

Además para garantizar el éxito del proyecto con la elección del diseño más robusto, se decidió realizar dos diseños de electrodos con su correspondiente placa PCB, implementando cada uno de los dos métodos de sensado capacitivo disponibles: Self y mutual capacitance. Obteniéndose la validación final del diseño de la nueva tecla dimmer a Inmunidad Conducida de 10 V el 15 de junio de 2017, sin necesidad de una 2ª iteración de diseño hardware.

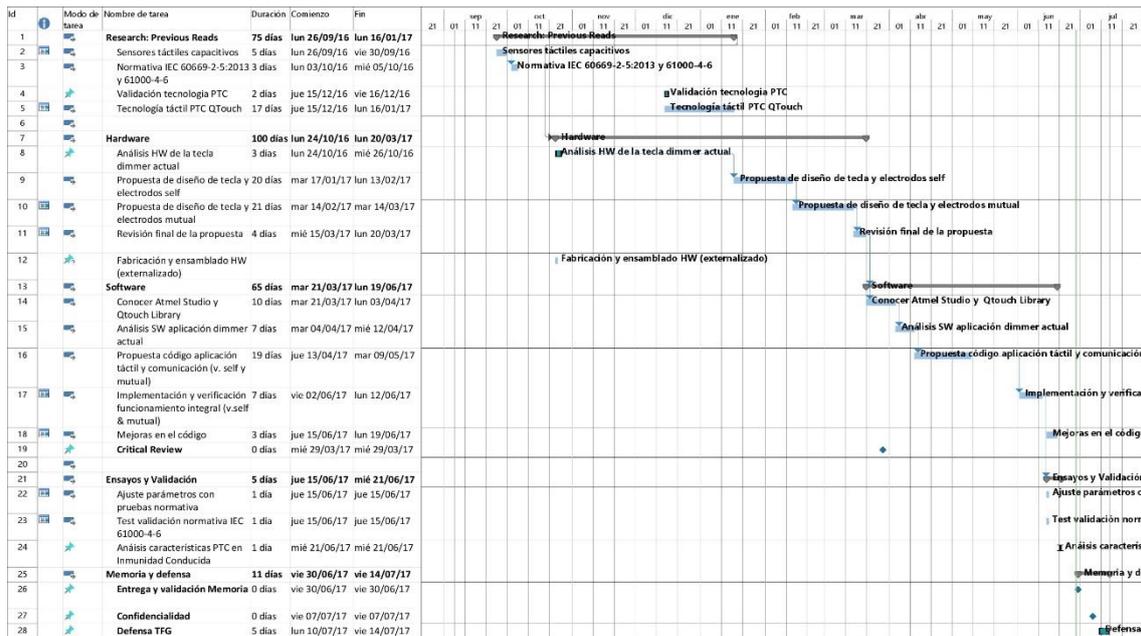


Diagrama 1: Diagrama de Gantt final del desarrollo del proyecto

Este MCU de Atmel además tiene una gran ventaja: la memoria programable, pasando de los 32 kB actuales y máximos del Kinetis a los 64 kB de este modelo de Atmel, eliminándose la gran restricción en el desarrollo de la tecla dimmer que supone el no disponer de suficiente memoria para implementar más funcionalidades, en particular la de la actualización del firmware vía OTA (Over-The-Air programming).

### 1.2. Sensado táctil capacitivo

Los botones capacitivos, sliders, rotores y proximity (BSWP), también conocidos como reemplazos de botón mecánico (Mechanical Button Replacement, MBR) es una tecnología de interfaz hombre-máquina (Human Machine Interface, HMI) que se basa en el sensado capacitivo. Los BSWP capacitivos usan electrodos sensibles al tacto que pueden ser incorporados en una PCB existente permitiendo diferentes formas, tamaños, diseños más delgados y más elegantes sin costo adicional. Como los electrodos no son mecánicos y están montados debajo de revestimientos de plástico, vidrio o metal, son más fiables y fáciles de mantener.

No obstante, aunque la tecnología de sensado táctil capacitivo ofrece a los diseñadores nuevas posibilidades a la hora de diferenciar sus productos a través de la interfaz de usuario, también presenta nuevos desafíos, entre ellos su uso en entornos con un elevado ruido eléctrico que puede mermar la experiencia del usuario por falta de robustez de la solución táctil.

El sensado capacitivo consiste en la medición de la capacidad de un elemento, conocido como sensor, para detectar un cambio capacitivo fruto de una interacción humana. Un sensor puede ser cualquier material conductor (desde un plano de cobre, plata, ITO (Indium Tin Oxide) hasta un Philips Spring), con multitud de formas y tamaños.

La capacitancia es la medida de la capacidad de un objeto para almacenar carga eléctrica. Dos materiales conductores cualquiera que estén separados por un material



No obstante, en el sensor táctil también aparecen capacidades parásitas a tierra que tienen el efecto de desensibilizar el toque de un usuario, dado que como el sensado capacitivo se centra en la variación relativa de la capacidad global del sensor debida a un toque, a mayor capacidad parásita menor variación relativa se produce como consecuencia de un toque.

Los electrodos self-capacitance proyectan líneas de campo eléctrico en 360 grados, por lo que la interacción del electrodo se puede dar tanto a través del overlay como en la parte anterior de la PCB. Esta proyección de 360° limita la densidad de botones que pueden ser colocados uno al lado del otro, dado que si están demasiado cerca, podría ser muy fácil para el usuario la activación por error de los botones adyacentes.

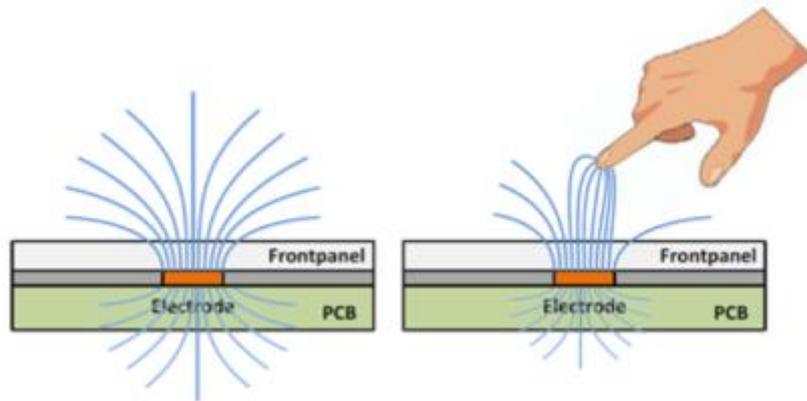


Ilustración 3: Proyección de las líneas de campo eléctrico de los electrodos de tipo Self-capacitance [1]

### Mutual Capacitance

Este tipo de capacidad consiste en la medición de los cambios en la capacitancia entre dos electrodos, de modo que se definen ambas placas del condensador en lugar de utilizar tierra como segunda placa, tal y como sucede en el Self-Capacitance.

La estructura sensorial en una aplicación Mutual Capacitance consiste en dos electrodos separados: un electrodo de transmisión (Tx o Y) y un electrodo de recepción (Rx o X) formando un campo eléctrico. Cuando el usuario toca un área en el panel donde hay interacción entre los dos electrodos, la capacidad mutua entre los electrodos Tx y Rx se reduce. Esto se debe a que la interacción del usuario tiene el efecto de alterar la propagación del campo eléctrico entre los dos electrodos dado que los usuarios están acoplados a tierra, y el cuerpo humano es un conductor, por lo que se reduce el acoplamiento del campo eléctrico entre ellos, reduciéndose la capacitancia. Los cambios típicos en la capacitancia mutua debido a un toque son pequeños, normalmente menores a 3 pF [1].

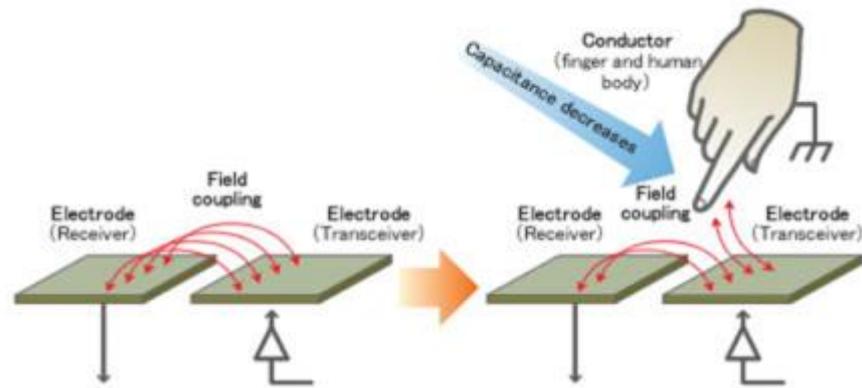


Ilustración 4: Recreación de las líneas de campo eléctrico en un sensor Mutual-Capacitance

En un sistema Mutual-Capacitance hay dos tipos de capacidades parásitas:

Las capacidades parásitas mutuas, que son aquellas que se producen fruto de la interacción entre Tx y Rx fuera de los electrodos como cuando las pistas Tx y Rx en una PCB están cercas. Y las capacidades parasitarias a tierra de cada uno de los electrodos. No obstante a diferencia del sistema Self-Capacitance, éstas últimas no afectan a la medición.

El acoplamiento tan delimitado de los campos eléctricos entre los electrodos Tx y Rx, permite el uso de paneles con una alta densidad de teclas/botones.

En las aplicaciones táctiles mutual capacitance, es necesario que la área de interacción táctil disponga de un Overlay/Capa de recubrimiento, porque proporciona un área para que el campo eléctrico entre el electrodo Rx y Tx pueda propagarse hacia donde se produce la interacción con el usuario. Sin un overlay, cuando se realizase un toque se podrían cortocircuitar los electrodos Tx y Rx y se añadirían significativas capacidades a tierra que dificultarían una medida veloz.

### 1.2.2. Métodos medición capacidad

Los métodos tradicionales de medición de una capacitancia se basan en medir o el tiempo de carga de la capacitancia o la frecuencia de resonancia de un circuito RC (Frequency Change) [4].

En los últimos años distintos fabricantes de semiconductores, como TI y Atmel, han incorporado en sus MCU (Microcontroller Unit) un nuevo método de medición de capacitancia: “Charge Transfer” o Transferencia de carga, en el cual se mide un cambio en la capacitancia basado en la carga de un condensador con capacidad conocida a partir de la carga y descarga de un condensador con capacidad desconocida y menor (el sensor táctil), permitiendo conseguir gran exactitud y precisión en la medición de pequeñas variaciones<sup>[1][5]</sup>. Para más información acerca de estos tres métodos de medición diríjase al anexo 1 “Métodos de medición capacitiva”.

### 1.3. Normativa Inmunidad Conducida 61000-4-6

Los circuitos táctiles capacitivos son vulnerables a las interferencias de RF, ya que éstas pueden inyectar corrientes ruidosas tanto en las líneas de sensado transmisoras (Tx) como en las receptoras (Rx). El problema de la afectación de las interferencias RF en dispositivos táctiles es analizado en el anexo 1 “Análisis interferencias RF conducidas en entornos táctiles”.

Las interferencias de RF se agrupan en dos categorías en función del medio de acoplamiento entre el agresor y la víctima: conducidas y radiadas. Las principales características son:

#### Interferencias conducidas

- Frecuencias comprendidas entre los 150kHz y los 80MHz
- Largas longitudes de onda
- Son interferencias radiadas que se acoplan al sistema a través de los cables y una vez acopladas son conducidas por estos cables.
- Las pistas de las PCB's no son medios de acoplo eficientes (antenas)
- **Son las interferencias que más afectan a los circuitos táctiles capacitivos por solaparse su rango de frecuencias con el rango de frecuencias de carga y transferencia de los sensores** [1].

#### Interferencias radiadas

- Frecuencias a partir de 100MHz hasta los GHz
- Cortas longitudes de onda
- Las pistas de las PCB's son medios de acoplo eficientes (antenas)
- **Al estar comprendidas en un rango frecuencial más allá de la carga y transferencia de los sensores capacitivos, su afectación en ellos es limitada.**

La norma IEC 61000-4-6 especifica cómo se debe testear un producto para inmunidad a perturbaciones conducidas en el rango de frecuencias de 150 kHz a 80 MHz, mientras que la norma IEC 61000-4-3 lo hace para las perturbaciones radiadas, aquellas cuya frecuencia está por encima de los 150 MHz.

#### 1.3.1. Características de la norma IEC 60669-2-5:2013 respecto a Inmunidad Conducida

El dimmer AUREA de SIMON al ser un interruptor HBES (Home and Building Electronic Systems) para el funcionamiento de los circuitos de lámparas y el control de luminosidad de lámparas, con una tensión de trabajo inferior a los 250 Vca y una corriente inferior a 16 A se encuentra sujeto a la norma IEC 60669.

Para este proyecto la versión normativa que se aplica es la Norma Europea EN 60669-2-5:2016 que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 60669-2-5:2013 modificada, la cual será obligatoria a partir del 2020.

La diferencia entre la Norma Internacional IEC 60669-2-5:2013 y la europea EN 60669-2-5:2016, se encuentra en el capítulo 26º “EMC Requirements”, sección 26.1ª “General” en el que la Norma Europea indica que en lugar de aplicarse los requerimientos relevantes de RF y los requerimientos de emisiones específicos del país se aplicarán los establecidos en las normas ETSI EN 300 220-1, ETSI EN 300 220-2, ETSI EN 301 489-3 y EN 50065-1. El resto marco normativo es idéntico.

En esta norma (IEC 60669-2-5:2013 / EN 60669-2-5:2016), las exigencias relativas a inmunidad conducida se indican en el capítulo 26º “EMC Requirements”, sección 26.2ª “Immunity” y apartado 26.2.7º “Radiated Frequency Voltage Test”, en las que se establece que el test se realizará de acuerdo a lo dispuesto en la Norma Internacional IEC 61000-4-6 y se ejecutaran dos test. Uno en el que se aplicará una tensión conducida de radio frecuencia de 3 V r.m.s y durante el cual el dispositivo será operado debiendo funcionar correctamente y sin que se produzcan falsas detecciones por parte del sensor táctil. En el segundo se aplicará una tensión conducida de radio frecuencia de 10 V r.m.s (a excepción de la banda de frecuencias de 47 MHz a 68 MHz en la que se aplicarán 3 V r.m.s.) en el que el dispositivo no será operado y no se deberán producir falsas detecciones. Una vez finalizados ambos tests, el dispositivo deberá operar con normalidad.

### 1.3.2. Implementación de Inmunidad Conducida con periférico PTC de ATMEL

Para lograr un elevado nivel de inmunidad al ruido en un diseño táctil capacitivo, es necesario un diseño enfocado en tres áreas: emplear buenas pautas de diseño táctil PCB, aplicar las características del PTC y utilizar los algoritmos de procesamiento de señal del PTC [6]. Diríjase al anexo 1 “CARACTERÍSTICAS DISEÑO TÁCTIL ROBUSTO AL RUIDO BASADO EN SOLUCIÓN PTC” para conocer cada uno de estos pilares al detalle.

## 2. Diseño del proyecto

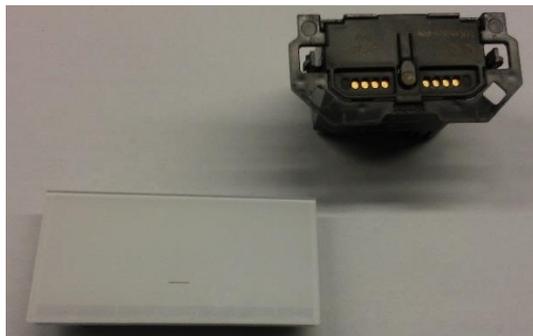
El producto dimmer de AUREA lo constituye dos elementos separables: la tecla y el back. La tecla es la parte de control del dimmer responsable de la regulación vía interfaz HMI táctil de la luminosidad de la carga, el feedback luminoso y acústico para el usuario y de la comunicación inalámbrica con otros dispositivos ya sea de la gama AUREA o de terceros, basada en el protocolo ZWAVE.

La tecla está formada por un conjunto de elementos apilados: la PCA que contiene todos los componentes electrónicos necesarios, el esqueleto plástico que alberga la PCA en su interior, una lámina de poliamida con los electrodos del slider capacitivo colocada encima del esqueleto y el acabado de PMMA. En el anexo 2 se realiza el análisis pormenorizado de la tecla actual dimmer de AUREA.

El back es la parte de potencia, el cual va conectado a la red, suministra la salida para la regulación lumínica de la carga y se encarga de la alimentación 3V3 para la tecla. El back por la parte posterior dispone de una serie de pads que hacen contacto con unos pogo-pines que hay en la parte anterior de la tecla, en los que hay las líneas para la alimentación de la tecla (3V3) y para la comunicación entre ambos que se realiza mediante bus I2C.



*Ilustración 5: Dimmer AUREA actual extraído de la caja empotrada en la que se puede observar la tecla conectada al back con su conexión a la red eléctrica y a la carga a regular*



*Ilustración 6: Vista de la tecla y el back del dimmer AUREA actual desmontado*

### 2.1. Diseño electrodos

El diseño de un slider capacitivo constituye un reto en el que es necesario buscar un equilibrio entre la sensibilidad del sensor, el tiempo de respuesta de la aplicación y su inmunidad al ruido. Sensibilidad del sensor en cuanto que con un suave deslizamiento

sea reconocido por el sistema reportando la correcta posición del usuario en todo momento, tiempo de respuesta tal que el usuario no perciba un retardo en el funcionamiento sino un feedback instantáneo, y robustez al ruido para garantizar que no se producen falsas detecciones ni un deterioro de la interacción usuario-sensor en entornos ruidosos.

Con el objetivo de conseguir un buen funcionamiento en entornos ruidosos de la aplicación táctil, a nivel de diseño del sensor se debe maximizar la variación relativa de la capacidad asociado a una interacción táctil maximizando C\_Touch y minimizando las otras capacidades (parásitas), en especial C\_Electrodo.

Atendiendo a la expresión de la capacitancia:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Dónde:

C: Capacidad

$\epsilon_0$ : Permitividad del vacío

$\epsilon_r$ : Permitividad relativa del material aislante

A: Área de las placas conductoras

d: Distancia de separación entre las placas

Los dos elementos que deben ser analizados/rediseñados son: el tamaño del electrodo, los cuales afectan directamente sobre la capacidad resultante del sensor (A,  $\epsilon_r$  y d)

1. Limitar el tamaño de los electrodos, no sobredimensionándolo más allá de lo necesario, permite tener una adecuada capacitancia asociada al sensor, con lo que se consigue:

- Mejorar la sensibilidad debido a que la variación relativa en la capacidad asociada a una interacción táctil es mayor a menor capacidad del electrodo.
- Reducir la susceptibilidad al ruido, al maximizar la variación relativa debida a un toque, permite aumentar los umbrales de definición de touch del sistema (Touch Threshold) sin comprometer la sensibilidad.
- Reducir el tiempo de respuesta, un tamaño adecuado permite que el electrodo no presente una elevada capacidad, con lo que se reduce el tiempo de respuesta del sistema al ser necesarias menos iteraciones del sistema para llevar a cabo las mediciones.

2. El grosor del material del overlay constituye un parámetro crítico dado que:

- A mayor grosor aumenta la probabilidad de que el toque de un sensor afecte a los de su alrededor y se reduce la sensibilidad al disminuir C\_Touch.

3. A menor grosor los electrodos experimentarían mayor susceptibilidad a descargas electroestáticas.

TI recomienda en la guía de usuario del periférico táctil CapTIvate overlays de PC/ABS/Acrílico con un grosor de entre 1.5 mm y 4 mm [1].

A continuación se muestra la relación entre el grosor del overlay y la sensibilidad del circuito:

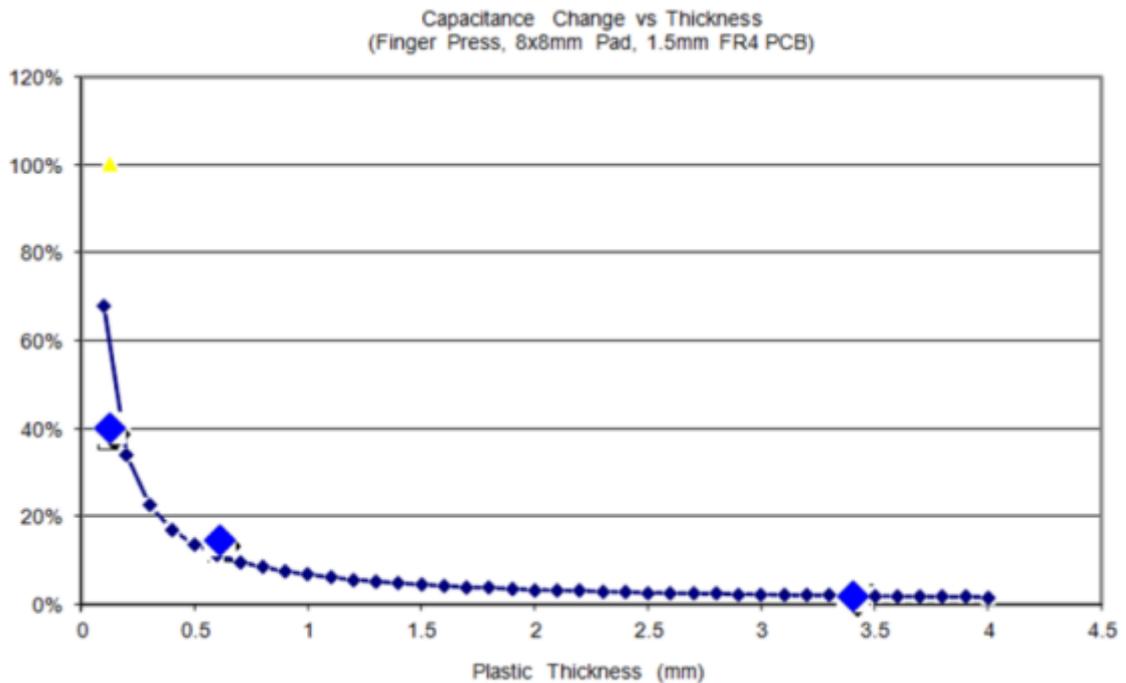


Ilustración 7: Gráfica con la relación entre el cambio de la capacidad y el grosor del overlay [1]

En consecuencia se procede al rediseño de la interfaz táctil de la que está dotada el actual dimmer AUREA, analizada en el anexo 2.

De los posibles parámetros que intervienen se decide modificar el relativo a los electrodos y conservar tanto el grosor como material del overlay. Se mantiene integro el overlay dado que el material escogido es el ideal para la aplicación dimmer por su gran resistencia al impacto y condiciones atmosféricas y rayadas, y en cuanto al grosor lo ideal sería reducirlo hasta los 1.5mm pero los actuales 1.9mm son el mínimo necesario con el que no se produce el efecto visual de aguas, se supera el test contra descargas electroestáticas y permite la aplicación de tratamiento especial contra ralladuras.

A la hora del rediseño de los electrodos hay que tener en cuenta la limitación del periférico PTC de emplear sliders con hasta tres canales para la tecnología Self-capacitance y de hasta 8 canales si se emplea mutual-capacitance.

Si bien es cierto que los sensores Self-capacitance teóricamente permiten un mayor nivel de inmunidad al ruido debido a que presentan mayor sensibilidad pudiendo establecer umbrales de detección más robustos y presentan un diseño más sencillo, se decide diseñar un slider Self-capacitance y otro Mutual-capacitance. La forma de los electrodos en un slider es más elaborada que para los botones para proporcionar un deseado número de puntos para un número dado de electrodos sobre una distancia concreta. Además hay una serie de limitaciones impuestas por el software.

Especificaciones del slider:

- 1- Una superficie activa táctil que comprenda todo el ancho de la tecla y alrededor de  $\frac{3}{4}$  de la altura: 61.5 mm x 20.6 mm.
- 2- Resolución de 100 puntos, dado que la aplicación dimmer permite regular la intensidad lumínica desde 0% (totalmente apagado) hasta el 100% (totalmente encendido).

- 3- Sensible y precisa: que no sea rígida al tacto y que siga con exactitud el desplazamiento del dedo sin producirse saltos.
- 4- Robusto al ruido conducido de hasta 10 V (IEC-61000-4-6 Level 3)

Y las limitaciones:

- 1- El periférico PTC solo permite sliders self-capacitance de hasta 3 canales y de 8 canales para mutual-capacitance.
- 2- Por lo menos dos electrodos deben de ser siempre tocados. El firmware intenta definir el punto medio de cada electrodo y luego usa la información de los electrodos de alrededor para ponderar el cálculo de la posición, en base a la variación de la capacidad de cada uno de ellos. Idealmente, en el centro de un electrodo la influencia los electrodos adyacentes es igual por lo que se “cancela”, dando como resultado una posición calculada que está en el centro del electrodo.

### 3.1.1. Versión Self-Capacitance

El diseño del slider Self-capacitance debido a la naturaleza de la tecnología capacitiva en la que se basa es más sencillo que el del Mutual-capacitance. Teniendo en cuenta por un lado que el área activa del slider debe de ser la misma que la actual, esto es 61.5 mm x 20.6 mm, la restricción del periférico PTC de sólo 3 canales para este tipo de slider, y la necesidad de reducir al máximo la aparición de dead-zones, lo cual requiere que siempre por lo menos se esté tocando la superficie de 2 electrodos, se diseñaran los electrodos de tipo dentado (interdigitated). Si los electrodos de cada canal fueran rectangulares discretos la superficie de cada electrodo sería de 20.5 mm x 20.6 mm, siendo excesiva y en consiguiente la capacidad asociada al sensor produciendo una desensibilización del touch, además de que tendríamos una dead-zone 8 mm o de 13 puntos en cada electrodo (dicho cálculo se analiza más adelante). De modo que el único modo de cumplir con los requisitos y limitaciones es que sean de tipo dentado (interdigitated).

#### Acabados del slider (EndPoints)

El slider es un caso especial de Wheel en el que los extremos (endpoints) deben de estar acabados, no enlazados como en los Wheel. Si el diseño no está adaptado en los extremos, entonces la información de la posición excedería los límites del diseño, tal y como se puede observar en la figura 1. Además la terminación de los extremos debe crear una cobertura de área equivalente alineada con los extremos del slider [3].

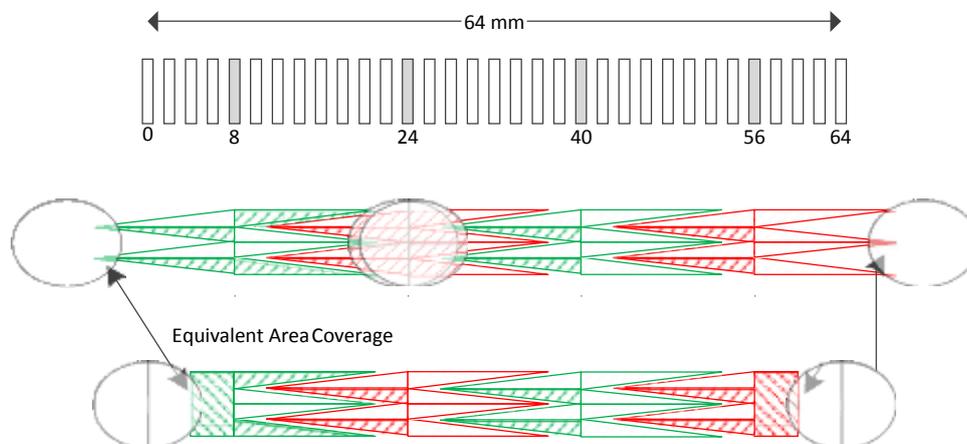


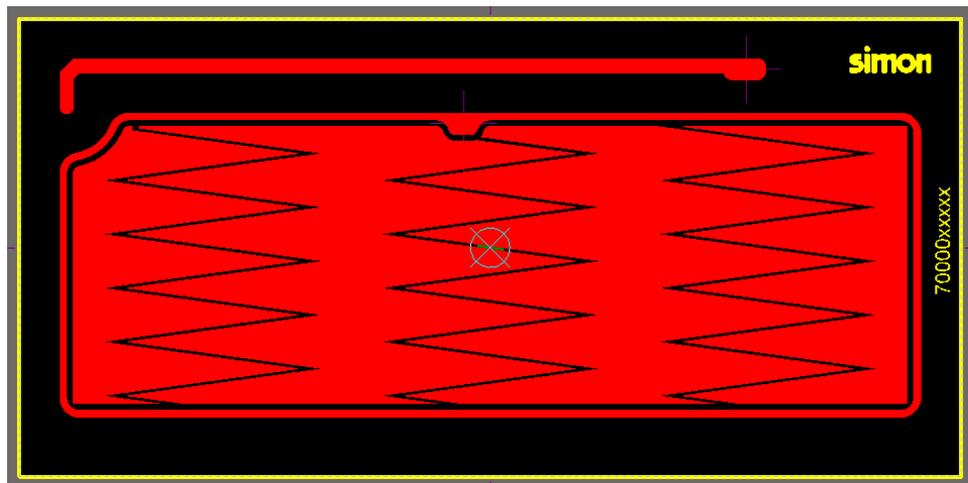
Ilustración 8: Terminación de los extremos del slider sin y con los extremos acabados [3]

De modo que para el diseño del slider Self-capacitance se debe implementar uno de 3 canales pero con 4 electrodos, siendo los dos electrodos laterales (o endpoints) del mismo canal. De este modo la combinación del canal de los extremos junto con la de los dos restantes permite optimizar la superficie activa empleada no dejando zonas sin cubrir y por lo tanto sin reportar posición, así como concretar precisamente el principio y fin del slider.

Por lo tanto, el slider resultante estará formado por dos electrodos endpoints formados por un cuerpo sólido y un dentado lateral y otros dos electrodos con un cuerpo sólido y dos dentados laterales.

#### *Diseño en Altium Designer*

Una vez establecidos todos los parámetros de los electrodos del slider (diríjase al anexo 2 “Cálculos diseño slider Self-Capacitance” para detalle de su estudio y cálculos), se procede al diseño con Altium Designer. Para ello primero se diseña los 4 electrodos tal y como se ha calculado previamente y considerando que la superficie activa es un perfecto rectángulo de 61.5mx 20.6mm. Luego se “inserta” en el anillo que rodea al slider previa realización de las oportunas modificaciones en los bordes tal que se mantiene el mismo diseño de la antena ZWAVE y del “anillo”. Con el siguiente resultado:



*Ilustración 9: Vista final de los electrodos Self diseñados con Altium Designer*

#### 3.1.2. Versión Mutual-Capacitance

El diseño de un slider mutual-capacitance es más complejo dado que se requiere de la combinación de múltiples electrodos de tipo RX con uno de tipo Tx. Debido a que presentan una menor sensibilidad (<3 pF) es necesario emplear un elevado número de electrodos mutual, de este modo la variación capacitiva relativa de cada uno de ellos cuando hay interacción con el usuario es mayor.

Atmel ofrece una guía de diseño con múltiples formatos de sliders en función de la superficie táctil a cubrir. La adopción de alguno de los modelos de diseño ofrecidos está limitada al hecho de que por un lado el slider debe ser ubicado en la lámina de poliamida de 0.2 mm de grosor, porque es el único de modo de dotar a la tecla de interfaz táctil cumpliendo los requerimientos de espacio de la tecla, y por el otro, a la posibilidad de usar para el slider una lámina monocapa o bicapa.

Hay dos tipos de sensores Mutual-Capacitance, los monocapa y los de doble capa [7]:

Los sensores monocapa se caracterizan porque tanto los electrodos Rx (X) como los Tx (Y) están dispuestos en el mismo plano del sustrato aislante (por ejemplo PCB o Flex PCB). Los electrodos X e Y tienen un elevado grado de diseño pero por lo general el electrodo X debe rodear al Y ya que ello ayuda a limitar el campo eléctrico entre los dos. De modo que se optimiza la distribución

del campo eléctrico que se acopla a través del panel/overlay, maximizando la sensibilidad al tacto.

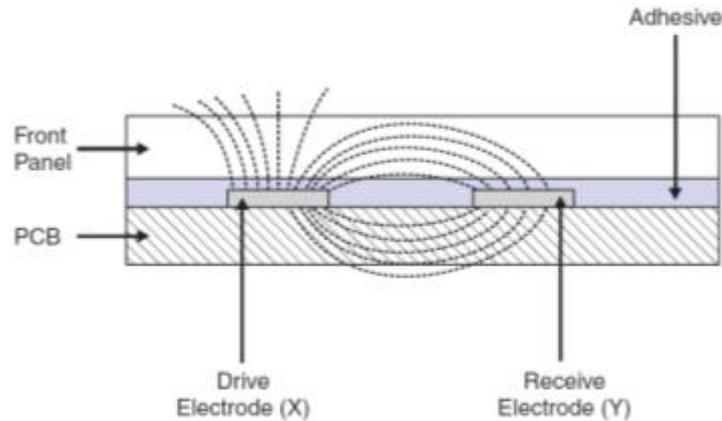


Ilustración 10: Vista sección de un sensor monocapa Mutual Capacitance con las líneas de campo eléctrico [7]

En cambio, en los sliders de doble capa los electrodos X e Y se distribuyen a través de dos capas separadas de un sustrato (PCB, Flex PCB). La gran ventaja es que el electrodo X protege completamente el electrodo Y por la parte de atrás, con lo que el sensor no es sensible al tacto y queda protegido del ruido por esa cara.

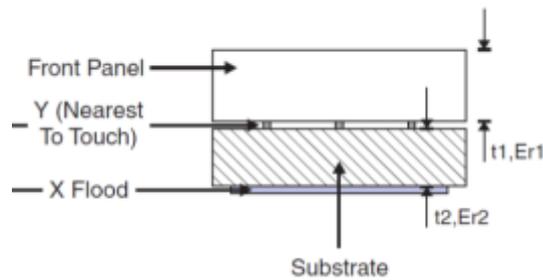


Ilustración 11: Vista sección de un sensor de doble capa Mutual Capacitance [7]

En estos sliders, los electrodos X e Y son diseñados tal que se solapan uno con el otro, colocando el electrodo Y en la cara más cercana al tacto. Éste suele ser tipo línea con entre 0.1 mm y 0.5 mm de ancho mientras que los electrodos X deben ser más grandes, alrededor de 2 mm en todos los lados y de tipo relleno sólido, de modo que se cubra/englobe al Y. Además, la distancia entre ambos electrodos debe ser tal que el campo eléctrico entre el electrodo Rx y Tx pueda propagarse hacia donde se produce la interacción con el usuario.

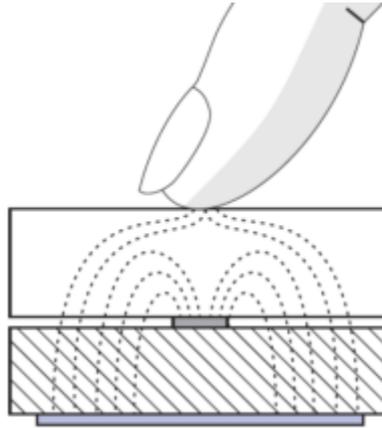


Ilustración 12: Interacción campo eléctrico entre Tx y Rx con un usuario en un sensor doble capa Mutual-Capacitance [7]

La elección de un tipo u otro, en el proyecto se encuentra limitado por:

- En primer lugar, el slider no se encuentra en la misma placa que la del circuito táctil capacitivo, y la conectividad entre ellos se realiza mediante flejes. En el diseño doble capa esto implica la necesidad de colocar una zona de contacto del electrodo Y con el fleje en la capa de los electrodos X mediante una vía, o colocarla en un extremo reduciendo el área activa o bien creando una “isla” en un electrodo Rx, haciendo más complejo el diseño. En cambio en un monocapa el empleo de los flejes no implica ninguna modificación del diseño de los electrodos adicional.
- En segundo lugar, el grosor de la lámina de poliamida de 0.2 mm impediría que se pudiese propagar correctamente el campo entre Rx y Tx.
- En tercer lugar, un sensor doble capa construido en un lámina de poliamida de doble capa es bastante más costoso.

Por lo tanto, la adopción del slider más adecuado e inscrito a estas limitaciones es el monocapa.

Atmel ofrece una guía de diseño con múltiples formatos de sliders monocapa en función de la superficie táctil a cubrir. Su implementación estará limitada a la superficie táctil a cubrir y a la oportunidad de evitar emplear un diseño que requiera lámina poliamida de doble capa.

Se escoge la implementación de un slider interpolado espacialmente, en el que se usa un array de Keys del estilo Interlocking fingers, en que el electrodo X y el Y tienen forma de dedos entrelazados, ayudando a contener el campo eléctrico entre los dos. Nótese que en cada key se emplea un electrodo X conectado a un canal táctil concreto distinto y el mismo canal para el electrodo Y para todas las keys. Este tipo de sliders es idóneo para sensores con una longitud de entre  $n \times 6$  mm y  $n \times 8$  mm siendo  $n$  el número de keys usadas. Su diseño viene dado por el ancho de los dedos de los electrodos tipo X o Rx e Y o Tx ( $W_{Xfinger}$  y  $W_{width}$  respectivamente), el número de dedos ( $X_{fingers}$ ) por key y el ancho de los bordes ( $W_{border}$ ).

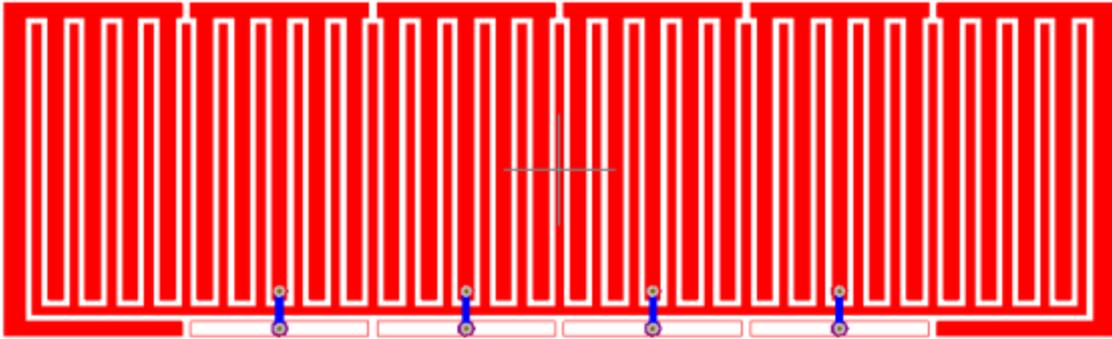


Ilustración 13: Ejemplo de slider interpolado espacialmente de tipo interlocking fingers.

En este diseño hay dos tipos de keys: interiores y laterales. Las interiores, en las que es necesario emplear una vía o jumper para conectar las dos regiones del electrodo X y así rodear efectivamente al electrodo Y, mientras que en las laterales no se necesitan porque el electrodo X no queda separado en dos regiones, ahora bien dispondrá de un dedo menos por que se encuentra fusionado con el borde.

#### Diseño y modificaciones con Altium Designer

Una vez calculados los parámetros de diseño (diríjase al anexo 2 “CÁLCULOS DISEÑO SLIDER MUTUAL-CAPACITANCE” para el detalle de su estudio y cálculos), se procede a realizar manualmente el diseño correspondiente con Altium Designer.

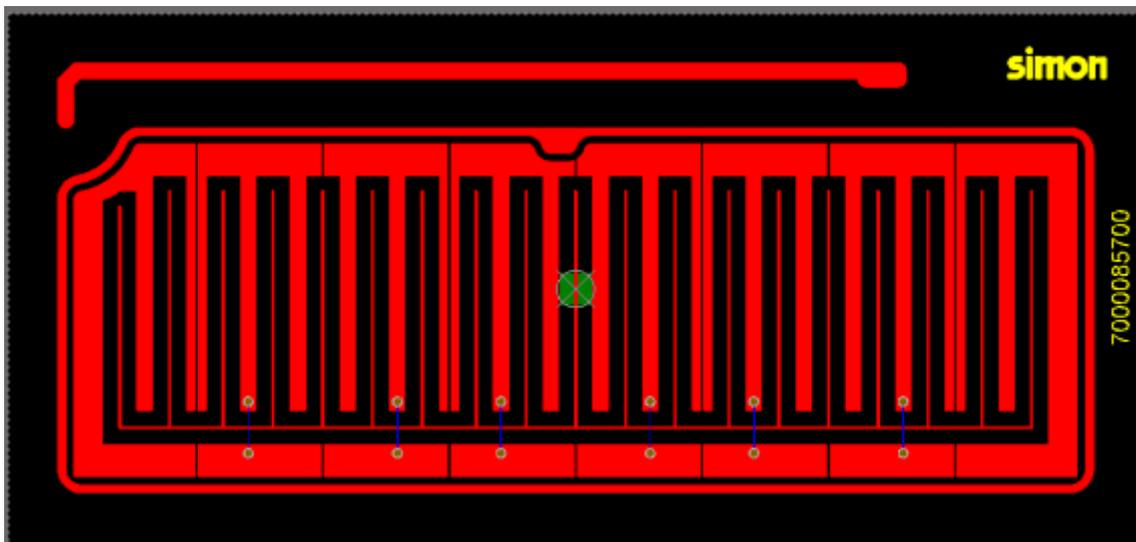


Ilustración 14: Diseño teórico del slider de tipo interlocking fingers para la versión tipo Mutual de la tecla dimmer AUREA

No obstante, este es el diseño teórico siendo necesario considerar una serie de modificaciones con el fin de adaptarlo a las particularidades de diseño de la tecla AUREA:

- 1- Para los electrodos se utiliza una lámina de poliamida de 0.2 mm de grosor dado que es el único modo de dotar a la tecla AUREA de interfaz táctil. Esta

lámina podría ser bicapa o monocapa. Si fuese bicapa sería posible la conexión de las regiones X mediante vías ahora bien en los puntos de intersección entre la vía de la pista X con la pista Y, aunque se encuentran en distintas capas la separación de 0.2 mm generaría en esas intersecciones un acoplamiento muy fuerte que dificultaría la propagación a través del overlay, en cambio con un monocapa no habría intersección de pistas pero su precio se reduce considerablemente. Finalmente se decide emplear un monocapa por su menor coste económico y al tratarse de un prototipo de slider. Esto obliga a:

- I. Suprimir la región X inferior de cada key, por la imposibilidad de unir ambas regiones.
- II. Desplazar la pista Y hacia abajo hasta que se encuentre a  $\frac{T}{2}$  mm del anillo de masa, se escoge 1 mm de distancia porque aunque se recomienda que en aplicaciones que requieran de gran inmunidad al ruido se emplee una distancia de  $\frac{T}{4}$  mm porque blindo y estabiliza el electrodo, pudiendo ser incluso menor dado que en los sensores mutual los efectos de las capacidades parásitas son prácticamente nulas, hay que tener en cuenta que se mantiene una distancia entre X e Y de  $\frac{T}{2} = 0.95$  mm por lo que emplear una separación menor entre Y y GND conllevaría en una desensibilización notable del sensor, en especial en la parte inferior de la tecla. Para evitarlo se establece una distancia algo superior a  $\frac{T}{2}$ , 1 mm.
- III. Se alargan los dedos del electrodo X hasta que se encuentren a  $\frac{T}{2} = 0.95$  mm de la nueva ubicación de la pista Y
- IV. Se eliminan las regiones inferiores de los electrodos X laterales

Esta modificación conduce a la siguiente variación en el diseño:

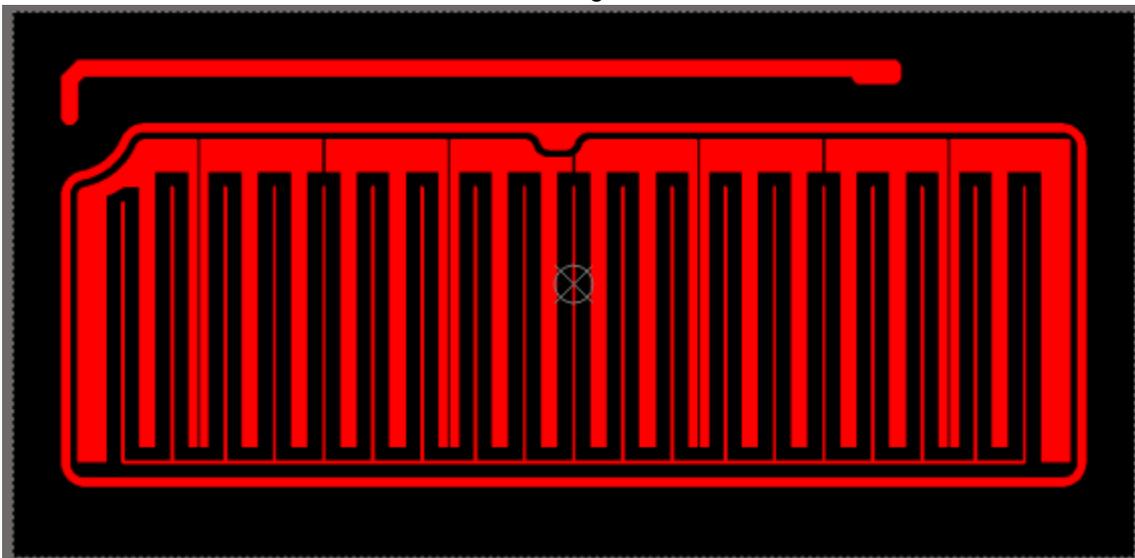


Ilustración 15: Vista del diseño del slider tipo Mutual modificado para implementarlo con lámina de poliamida de una capa

- 2- El contacto en la superficie de cada electrodo con la placa PCB se realiza mediante los flejes 1551572-5 del fabricante TE Connectivity. Estos flejes escogidos por ser los más pequeños disponibles con lo que se reduce la habilidad de que se acople el ruido, presentan una superficie de contacto de 0.3mm de ancho, lo cual no supone un problema a la hora de hacer contacto con los electrodos X pero sí con el Y dado que el grosor de dicha pista es de 0.2mm y se debe considerar el margen de error existente en el ensamblado de los electrodos en la tecla, que puede llevar a que no el fleje haga contacto en una zona donde no hay pista Y. Por lo tanto, a partir de la ubicación del fleje de la pista Y en la placa PCB, y mediante la superposición de las capas referentes a la placa PCB y a la lámina de los electrodos de acuerdo a lo determinado por el encargado de desarrollo mecánico del dimmer de SimonTech, se determina que el dedo de la pista Y donde se producirá el contacto en el fleje es el 2º del 3 electrodos de la izquierda. En este punto se realiza una ampliación de la pista a modo de pad de 0.9mmx2.5mm. A su vez, se modifica los dedos laterales X realizando una muesca que garantice que se mantiene la distancia de  $\frac{T}{2} = 0.95mm$  entre X e Y.

De modo que el diseño final resultante es:

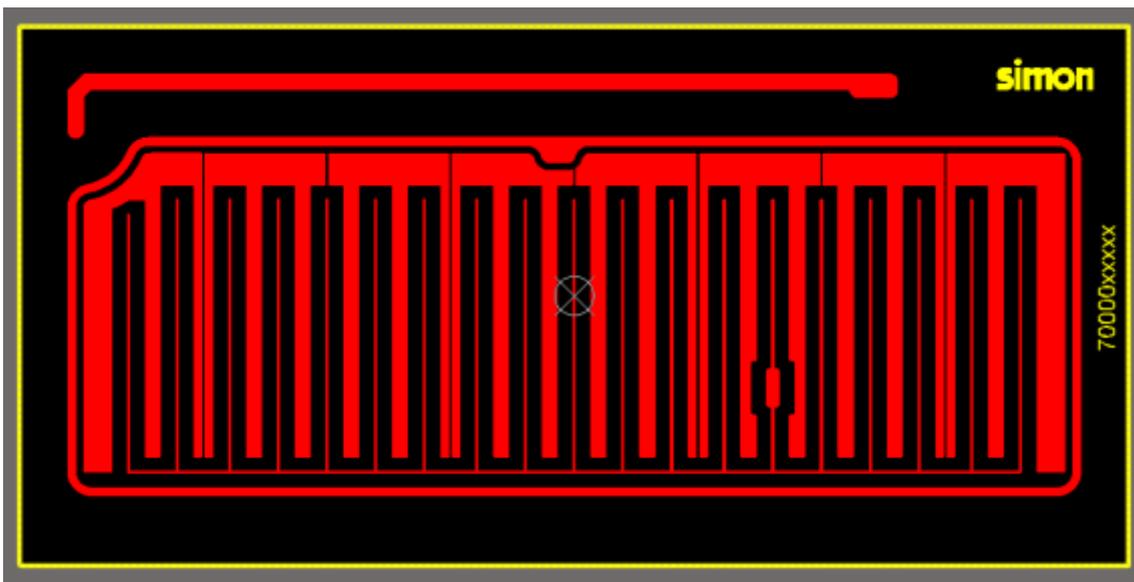


Ilustración 16: Vista del diseño final del slider tipo Mutual con las modificaciones para fabricación en lámina poliamida de una capa y óptimo contacto entre flejes y electrodos

### 3.2. Diseño tecla PCB

Se procede al rediseño de la actual placa PCB de la tecla dimmer realizando una serie de modificaciones con el objetivo de poder implementar el nuevo MCU SAMD20G16A en sustitución del actual Kinetis MKL05Z32VFM4 y aplicando buenas pautas de diseño para reforzar la inmunidad al ruido [1], [5], [6], [8], [9], [10], [11], [12]. Concretamente, se realizan dos diseños, uno para cada tipo de tecnología táctil capacitiva implementada para el slider.

Inicialmente se realiza un profundo análisis para la asignación de los pines de cada una de las funciones y necesidades implementadas en la tecla dimmer AUREA actual teniendo en cuenta el multiplexado de las funciones de los pines en el MCU SAMD20G indicado en el datasheet de Atmel [13], su orientación en la placa que favorezca el mejor y más corto rutado de las pistas, reservando todo un costado del MCU para el sensado táctil de modo que se concentren todos los pines táctiles del MCU y así mantenerlos alejados y no mezclados de otras pistas. Todo ello procurando que entre ambas versiones haya las mínimas diferencias de pines para facilitar el desarrollo de software lo más compatible y similar posible. Y obteniéndose la asignación detallada en la siguiente tabla.

Tabla 1: Asignación final de los pines del SAMD20G16A

SAMD20G16A ATMEL		
Pin nº Uc	Funcions dels ports en el uc	ASIGNACIÓ DE SENYALS
0		
1	PA00/TC[0]	
2	PA01/TC2[1]	LED_FRONT (MUTUAL)_4
3	Y[0]/NO WO/ <b>NO Touch OK</b>	
4	Y[1]	S_TX (SELF) CH1
5	GNDANA	GNDANA
6	VDDANA	VDDANA
7	Y[14]/TC4[0]	LED_FRONT_3
8	Y[15]/TC4[1]	LED_FRONT_2
9	Y[2]/SERCOM0[0]	ZW_WAKE-UP
10	Y[3]/SERCOM0[1]	ZW_RST
11	Y[4]/SERCOM0[2]/TC1[0]	LED_FRONT_1
12	Y[5]/SERCOM0[3]/TC1[1]	LED_FRONT_0
13	PA08/I2C_SDA/SERCOM0[0]/X[0]	I2C_SDA
14	PA09/I2C_SCL/SERCOM0[1]/X[1]	I2C_SCL
15	PA10/SERCOM2[2]/X[2]	UC-TX_ZW-TX
16	PA11/SERCOM2[3]/X[3]	UC-RX_ZW-TX
17	VDDIO	VDDIO
18	GND	GND
19	PB10/TC5[0]	LED_FRONT_6
20	PB11/TC5[1]	LED_FRONT_5
21	PA12/I2C_SDA/SERCOM4[0]-UART-TX	SPI_Qtouch_Analyzer-MOSI
22	PA13/I2C_SCL/SERCOM4[1]-UART-RX	SPI_Qtouch_Analyzer-SCK
23	PA14/SERCOM4[2]-UART-TX	SPI_Qtouch_Analyzer-SS
24	PA15/SERCOM4[3]-UART-RX	SPI_Qtouch_Analyzer-MISO
25	PA16/I2C_SDA/SERCOM1[0]/X[4]	S_RXO(MUTUAL)
26	PA17/I2C_SCL/SERCOM1[1]/X[5]	S_RXO(MUTUAL)
27	PA18/SERCOM1[2]/X[6]	S_RXO(MUTUAL)
28	PA19/SERCOM1[3]/X[7]	S_RXO(MUTUAL)
29	PA20/SERCOM5[2]/X[8]	S_RXO(MUTUAL) /LED_FRONT_4 (SELF)
30	PA21/SERCOM5[3]/X[9]	S_RXO(MUTUAL)
31	PA22/I2C_SDA/SERCOM3[0]/X[10]	S_RXO(MUTUAL)
32	PA23/I2C_SCL/SERCOM3[1]/X[11]	S_RXO(MUTUAL)
33	PA24/SERCOM3[2]	
34	PA25/SERCOM3[3]	
35	GND	GND
36	VDDIO	VDDIO
37	PB22	SOUND
38	PB23	
39	PA27/NO WO	
40	RST	RESET
41	PA28/NO WO	
42	GND	GND
43	VDDCORE	VDDCORE
44	VDDIN	VDDIN
45	PA30/SWCLK	JTAG_CLK
46	PA31/SWDIO	JTAG_DIO
47	Y[8]	S_TX (SELF) CH2
48	Y[9]	S_TX (MUTUAL-SELF) CH0

Básicamente, tal y como se puede observar, ambas versiones difieren en cuanto a los pines de sensado capacitivo y a la colocación del pin GPIO de control del LED nº4 del Feedback luminoso. Esta asignación es validada a nivel de no conflictividad y correcto multiplexado de funciones mediante el aplicativo ATME|START.

### Diseño con Altium

El diseño de ambas versiones de la PCB se realiza con el Altium Designer. En primer lugar se crean dos proyectos PCBs a partir del correspondiente a la tecla AUREA Original. A continuación se diseña el símbolo esquemático del MCU SAMD20G y su footprint de acuerdo a la referencia JEDEC (MO-220) del package indicada [9], dado que el dimensionado del package ofrecido en el datasheet es erróneo. A continuación se realizan las modificaciones en el esquemático eliminando el MCU de Frescale (KL05Z32VFM4), añadiendo el SAMD20G, los flejes necesarios para cada canal capacitivo (4 en la versión self y 9) en la mutual, los condensadores de desacoplo, los núcleos de ferrita y modificación de la distribución de la alimentación, los pads para el monitorización de las señales touch y el filtro RC para el pin de Reset. En el anexo 2 “MODIFICACIONES PLACA PCB” se encuentra el detalle de todas las modificaciones realizadas en la PCB actual de AUREA para la implementación de las versiones Self y Mutual). Finalmente se procede a la colocación de los elementos añadidos con las

implicaciones de reubicación de los elementos ya existentes y el complejo enrutado de las pistas en las tres capas disponibles en la PCB así como de las modificaciones en el plano de masa.

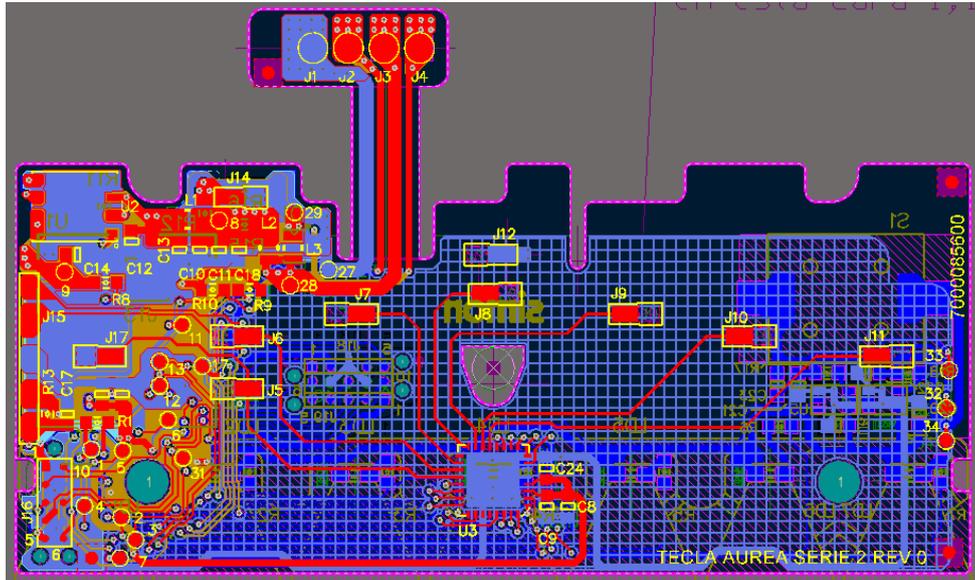


Ilustración 17: Vista de la PCB diseñada en la actual tecla Dimmer AUREA basada en el MCU KL05Z32VFM4

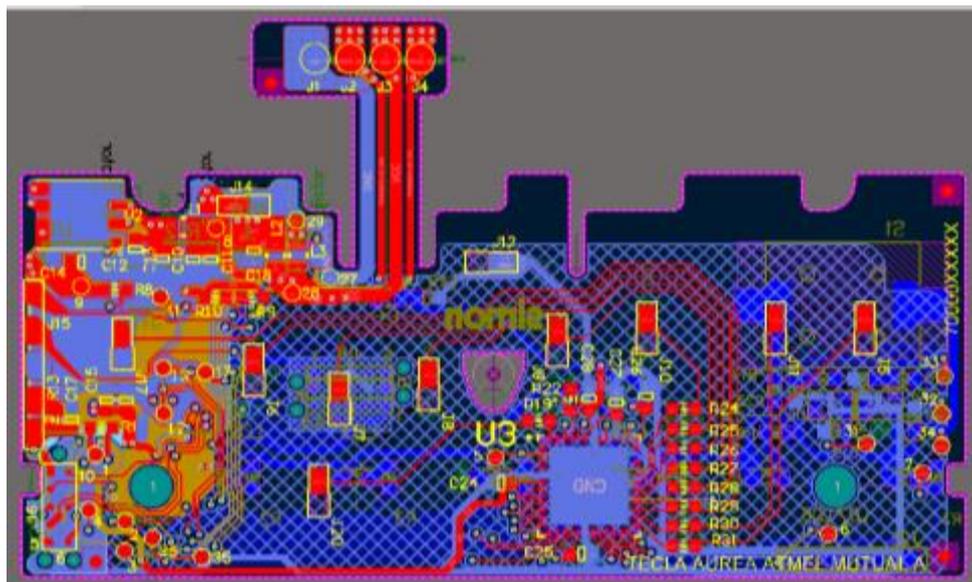


Ilustración 18: PCB versión Mutual final diseñada basada en el MCU SAMD20G16A

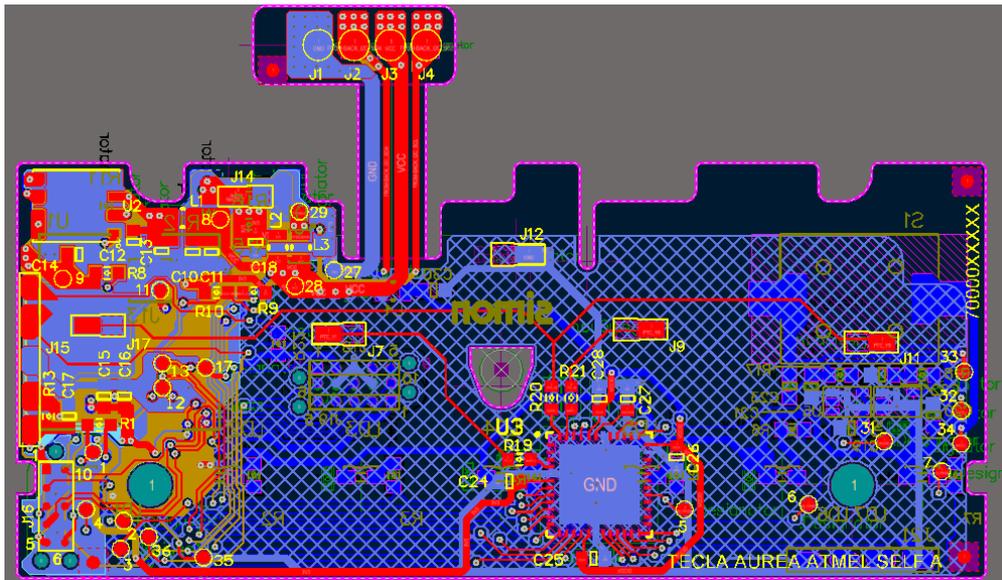


Ilustración 19: PCB versión Self final diseñada basada en el MCU SAMD20G16A

### 3.3. Ensamblado de las teclas Self y Mutua

Una vez diseñados los electrodos y PCBs de ambas versiones, se envían a fabricar a los fabricantes ELATE y a CIRCUIT-LABS, respectivamente.

Finalmente se ensambla cada versión en acabados distintos para facilitar su diferenciación: blanco para la versión Self y negro para la Mutua, realizando manualmente la adaptación de cada esqueleto plástico y el ensamblaje de los electrodos.

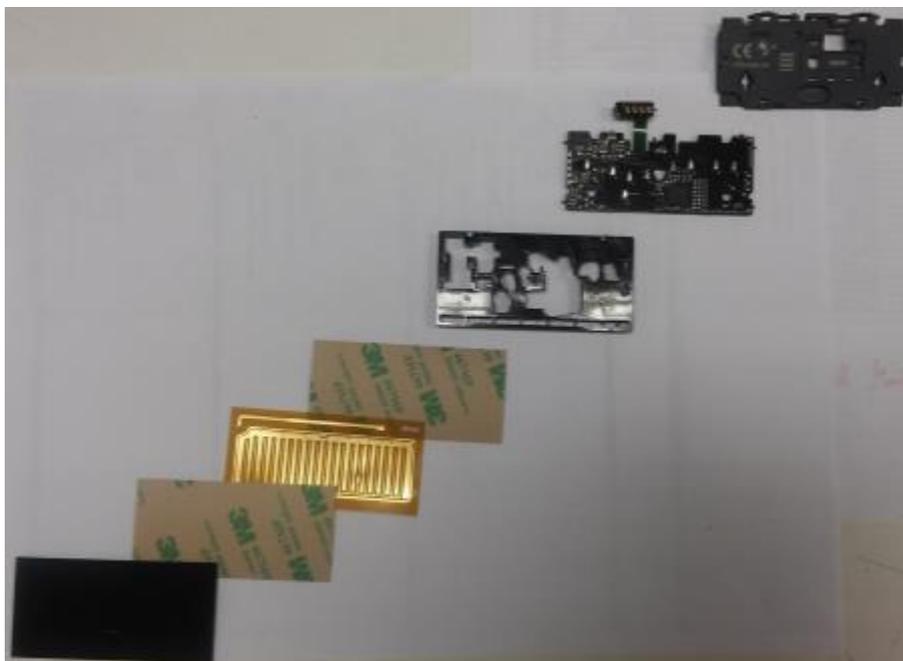


Ilustración 20.a: Despiece de la tecla dimmer AUREA versión Mutua en disposición de ensamblado. En orden ascendente: Acabado oscuro de PMMA, Adhesivo 3M, lámina poliamida con el slider mutua, adhesivo 3M, esqueleto plástico, PCA y tapa de plástico anterior.



Ilustración 21.b: Despiece de la tecla dimmer AUREA versión Self (Izq.) y Mutual (Der.) en disposición de ensamblado. En orden ascendente: Acabado PMMA, Adhesivo 3M, lámina poliamida con el slider correspondiente, adhesivo 3M, esqueleto plástico, PCA y tapa de plástico anterior.

### 3.4. Diseño Software

Actualmente, hay distintos entornos de programación Integrados (IDE) compatible con el desarrollo de las aplicaciones para los MCUs ARM de Atmel, siendo el IAR Workbench de IAR Systems y el Atmel Studio los dos más comunes.

Para el desarrollo de la aplicación de este proyecto se utiliza el Atmel Studio 7. Este programa es un IDE gratuito desarrollado por Atmel que incluye un potente editor, un compilador C/C++, y soporte para la debugación y simulación. Además integra el Atmel Software Framework (ASF), una extensa librería de código abierto de proyectos para Atmel que facilita el desarrollo de proyectos y la configuración y uso de los periféricos de los distintos MCUs Atmel. Pero lo que lo hace especialmente atractivo para este proyecto es la integración del Atmel® QTouch® Composer <sup>[14]</sup>, un completo conjunto de herramientas para el desarrollo (QTouch Project Builder Wizard), ajuste y monitorización (QTouch Analyzer) de botones, sliders y wheels capacitivos, convirtiéndose en el más avanzado IDE para el desarrollo de aplicaciones táctiles para MCUs ARM de Atmel.

El objetivo del desarrollo del código de la aplicación de este proyecto es:

- Implementación y configuración del periférico PTC y del slider con los correspondiente parámetros táctiles que permita la validación de la normativa de Compatibilidad Electromagnética IEC 61000-4-6 Level 3 exigida por la norma IEC 60669-2-5:2013.
- Adaptar el código de la tecla AUREA actual a la del proyecto tal que se garantice la idéntica continuidad en la funcionalidad que caracteriza al dimmer actual, pero limitado el desarrollo a la implementación de interacción entre el usuario y el dimmer mediante feedback luminoso (indicación luminosa de la regulación establecida con el slider).

Todo ello maximizando la compatibilidad entre el código actual de la tecla y la de la nueva mediante el desarrollo de la estructura y sintaxis del código lo más parecida posible, que facilite la posterior adaptación de todo el código que no es realizado en este proyecto.

Dentro del código desarrollado se diferencian dos partes:

- La correspondiente al periférico PTC con la configuración del slider y los parámetros de adquisición. La cual será completamente distinta en cada una de las dos versiones, Self y Mutual.
- Y la del código de la aplicación limitada al Feedback luminoso en base a la regulación establecida con el slider. Esta parte es muy similar para ambas versiones y difieren en uno de los pines GPIO de control del LED y en la función utilizada para reportar touch y la de posición la posición del usuario en el slider.

#### 2.3.1 Desarrollo código sensado táctil

La parte de configuración del periférico PTC y del slider con sus parámetros de adquisición se realiza a partir del esqueleto creado por el asistente de creación de proyectos táctiles del QTouch Composer, el QTouch Project Builder Wizard, y el cual se modifica, ajusta y amplia. Dirijase al anexo 5 “ANÁLISIS PARÁMETROS TÁCTILES IMPLEMENTADOS” para el estudio de los parámetros finalmente implementados después de diversas pruebas y análisis para obtener la mejor robustez posible manteniendo un buen performance del sensor.

### 2.3.2 Desarrollo código de la aplicación

El funcionamiento de la aplicación es:

- 1- El periférico PTC realiza medidas periódicas del slider capacitivo, cada 20 ms
- 2- Cuando se produce touch se encienden los leds de acuerdo a la regulación establecida con el slider la cual irá variando simultáneamente conforme a la regulación del dedo. Los leds permanecerán encendidos durante 5 s, si pasado este tiempo no ha habido un nuevo touch, se apagarán. Además cuando durante el deslizamiento táctil se encienda o se apague un LED ese cambio irá acompañado de una pequeña vibración sonora.
- 3- El encendido y apagado de cada uno de los leds se realiza con una progresión y disminución, respectivamente, en su luminosidad. Este funcionamiento a modo de rampa suaviza el efecto de encendido y apagado ayudando a acompañar más al usuario a lo largo de su interacción. Para su realización se implementa el módulo Timer Counter (TC) con dos canales para generar dos interrupciones, una cada 0.1 ms y otra cada 1 ms.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo simplificado del código desde el encendido del MCU.



## 4. Test y validación

Tal y como se detalla en la sección 1.3.1 el dispositivo deberá someterse con resultado favorable a un test operado de 3 V y a otro de 10 V sin necesidad de ser operado. Una vez finalizados ambos tests, el dispositivo deberá seguir operando con normalidad.

Los ensayos son realizados en el laboratorio del que dispone SIMON en la Plaza San Pol de Mar de Barcelona con toda la instrumentación, debidamente calibrada, exigida por la normativa IEC 61000-4-6. En los ensayos se realiza un barrido de frecuencias comprendido entre los 150 kHz y los 80 MHz tal y como establece la norma y utilizando una red de acoplo y desacoplo (Coupling Decoupling Network, CDN) como medio de acoplo de la señal perturbadora a la alimentación del dispositivo.

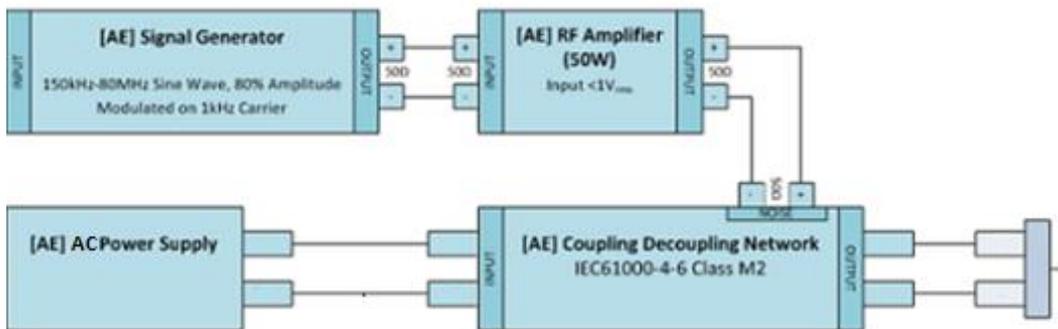


Ilustración 23: Diagrama del instrumental para el ensayo de Inmunidad Conducida en la tecla dimmer AUREA Self y Mutua, con el conexionado del generador de señal, el amplificador, la CDN y el back del dimmer AUREA que suministra alimentación a la tecla

Los ensayos se realizan alimentando el back de la tecla dimmer con alimentación alterna de 230 Vac y 50 Hz y con la señal perturbadora acoplada, siendo el back el encargado de suministrar la tensión de alimentación requerida por la tecla 3V3.



Ilustración 24: Set-up del ensayo de Inmunidad Conducida para la versión self



*Ilustración 25: Set-up del ensayo de Inmunidad Conducida y de la monitorización de la tecla versión self*

**Las dos versiones diseñadas y desarrolladas de la tecla Dimmer AUREA pasaron favorablemente ambos test, el de 3 V operados** funcionando correctamente y detectando la posición sin problemas y **el de 10 V tanto no operados** en los que no se produjo falsas detecciones **como operados** en los que seguía funcionando perfectamente y detectando la posición correctamente.

En el siguiente enlace hay disponible un vídeo con la demostración de la correcta operatividad de la tecla versión Mutual durante el ensayo de Inmunidad Conducida de 10V: [https://drive.google.com/open?id=0B2QgwEKA\\_B-qZGNsR1NaN25QWnc](https://drive.google.com/open?id=0B2QgwEKA_B-qZGNsR1NaN25QWnc)

La plena operatividad del sensor táctil cuando es sometido a ensayo de 10V supone un grandísimo logro que da prueba del nivel de robustez al ruido conseguido mediante la combinación de buenas prácticas de diseño PCB, adecuado empleo de las medidas contra el ruido del periférico PTC y correcta elección de los parámetros de las funciones de procesamiento de señal táctil.

Diríjase al anexo 6 para conocer el detalle de los ensayos realizados y la contribución de las medidas contra el ruido en la consecución de la robustez al ruido.

## 5. Estudio de costes

Este proyecto se realiza procurando minimizar la desviación del coste respecto a la versión actual (original de la tecla AUREA), para ello se realizan modificaciones que impliquen un coste adicional en la fabricación de la PCBs (tales como mayor número de capas, empleo de vías especiales, empleo de pistas de categoría superior a la actual) y de los electrodos (empleo de materiales distintos o doble capa). Las únicas modificaciones realizadas que implican variación en los costes es la de los componentes de la PCA de la tecla desarrollada.

El coste de la tecla original centrada en la parte desarrollada en este proyecto es de 29,68€: 11,01 € para la PCB y 18,67 € de los componentes, tomando como referencia el precio para pedidos de más de 1000u.

El coste de componentes en la tecla self es de 29,55 €: 11,01€ correspondientes a la PCB y los restantes 18,67 €, obteniéndose un ahorro de 0,1 €, debido a que en esta versión se emplean dos flejes menos que en la original (-0.53€) que compensa el sobrecoste del nuevo MCU (0.16 € más caro) así como de la adición de un mayor número de componentes pasivos (condensadores de desacoplo, núcleo de ferrita y resistencias en las pistas táctiles).

El coste de componentes en la tecla mutual es de 30,56€: 11,01€ correspondientes a la PCB y los restantes 19,55€ lo cual implica un coste de 0.88€ respecto al original principalmente debido a la adición de 2 flejes más, el sobrecoste del MCU y el mayor número de componentes pasivos.

De estos costes se desprende que la parte económica no supone un impedimento para la implementación de estas nuevas versiones de Tecla dimmer AUREA dado que la versión Self presenta un coste un poco inferior al actual y la Mutual algo superior, pero compensado plenamente por su robustez al ruido conducido 10 V y la disposición de mayor memoria programable.

En el anexo 7 “COSTES TECLAS DIMMER AUREA” se incluye el listado de los componentes de la PCA para cada versión de la tecla desarrollada (self y mutual) con su coste referenciado a 1000 unidades.

## 6. Conclusiones

Este proyecto ha logrado superar con éxito todos los objetivos establecidos en el plan de trabajo, destacando el principal: El rediseño de una nueva interfaz táctil basada en el periférico de sensado capacitivo PTC de Atmel en lugar del Touch Sensing Input de Freescale (NXP) capaz de superar la inmunidad al ruido conducido de 10 V de acuerdo a la normativa IEC 61000-4-6 Level 3. En particular se ha validado ambos dos diseños basados en dos métodos distintos de capacidad: Self-Capacitance y Mutual-Capacitance.

Además se ha conseguido un reto adicional no contemplado como objetivo: la capacidad de ambos diseños de operar en perfectas condiciones durante los ensayos de IC 10 V, recordar que la norma IEC 60669-2-5:2013 sólo exige la superación del test de 10 V sin ser operado el dispositivo durante el ensayo.

Algunas de las conclusiones que se pueden extraer del análisis de los distintos test realizados son:

- 1- El nivel de robustez al ruido de la nueva interfaz táctil es muy elevado como demuestra el hecho de que sea plenamente operativo cuando es sometido a ensayos de IC.

- 2- Es necesario un diseño integral de la interfaz táctil para lograr certificar inmunidad conducida a 10 V, basado en la combinación de buenas prácticas de diseño PCB, adecuado empleo de las medidas contra el ruido del periférico PTC y correcta elección de los parámetros de las funciones de procesado de señal táctil.

Con la consecución de los objetivos de este proyecto se consigue:

- 1- Disponer de un modelo de tecla dimmer con toda la funcionalidad que caracteriza AUREA, con inmunidad al ruido de 10 V y con mayor memoria programable abriendo la puerta a un amplio abanico de nuevas funcionalidades hasta ahora no introducidas por limitación de memoria. Todo ello con un ahorro de 0.1 € en la versión Self o un pequeño coste adicional de 0.88 € respecto al actual modelo dimmer AUREA.
- 2- Dotar a la tecla Dimmer AUREA de actualización del firmware vía OTA (Over-The-Air programming), actualmente no desarrollada por la limitación de la memoria programable de 32 kB, con los beneficios que conlleva la actualización remota para dotar de mejoras y nuevas funcionalidades a Dimmer.
- 3- Eliminar la incertidumbre acerca de la continuidad/obsolescencia que rodea al actual MCU MKL05Z32VFK4 desde que su fabricante inicial (Freescale) fuese comprado por NXP y recientemente adquirido, este último, por Qualcomm.

Llegados a este punto, los siguientes pasos en la potencial continuidad y mejora del proyecto serían:

- 1- Realizar la migración del código desarrollado en la tecla Dimmer actual tal que se garantice la idéntica continuidad en la funcionalidad en la nueva tecla.
- 2- Rediseñar el modo en que se une el canal capacitivo correspondiente a los end-points del slider Self, dado que es el más sensible e inestable a perturbaciones, aunque no es impedimento para la consecución de la IC a 10 V. Y que consistiría en la unión de ambos en la lámina de poliamida que contiene los electrodos en lugar de en la PCB.
- 3- Implementar la funcionalidad de “proximity” compatible con la certificación de IC a 10 V. Esta característica permite la detección del usuario sin necesidad de que éste deba tocar el dimmer, haciendo posible que pasando la mano hasta cierta distancia se muestre la regulación actual del dimmer mediante el Feedback luminiso. Esta funcionalidad vendría a ser el factor determinante en la elección entre una versión u otra (Self o Mutua) de las diseñadas.

## 7. ANEXOS

### Anexo 1.

#### 1.1 Métodos de medición capacitiva

Los métodos tradicionales de medición de una capacitancia se basan en medir o el tiempo de carga de la capacitancia o la frecuencia de resonancia de un circuito RC (Frequency Change) [4]. Sin embargo estos métodos aparentemente sencillos representan un reto cuando se emplean en la medir el cambio en la capacitancia de los sensores táctiles, por tres motivos:

- 1- Medir una capacitancia tan pequeña (del orden de pF en aplicaciones táctiles) requiere de un reloj de alta frecuencia y / o una precisa y baja corriente para una medición óptima.
- 2- Mientras se mide el tiempo de carga, se dedica la mayor parte del tiempo a medir la capacitancia propia del sensor (que es generalmente del orden de decenas de pF) y la medida requerida del cambio constituye sólo una fracción del tiempo de medición, lo que conduce a un uso excesivo del tiempo y de la potencia del controlador.
- 3- El efecto del ruido es bastante elevado, generando inestabilidad en las medidas y falsas detecciones touch.
- 4- Por su configuración se limitan a medir capacidades del tipo Self-capacitance

En los últimos años se ha desarrollado un nuevo método de medición de capacitancia: "Charge Transfer" o Transferencia de carga, el cual busca realizar mediciones muy precisas en las variaciones de la capacidad, reduciendo las emisiones de RF y siendo mucho menos susceptibles al EMI. Además permite tanto el uso de sensores Self-Capacitance como Mutual-Capacitance. Este es el método implementado por Atmel y TI en algunos de sus microcontroladores con sensado táctil más recientes.

#### Frequency Change

El "Frequency Change" o Cambio frecuencial es la forma más común de realizar una medición de la capacitancia en aplicaciones táctil debido a su facilidad de implementación con un microcontrolador. Su funcionamiento se basa en la frecuencia de resonancia de un oscilador RC.

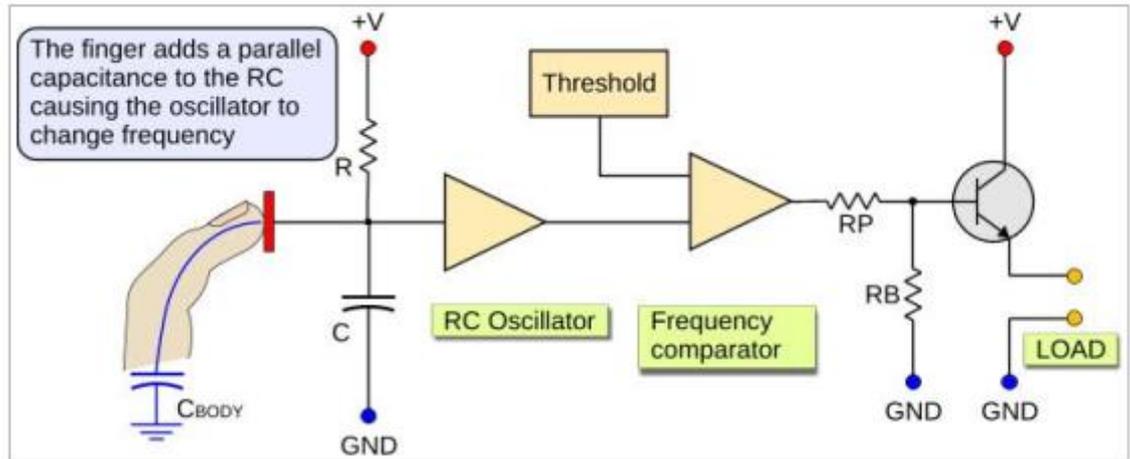


Ilustración 26 Esquema circuito de medición capacitiva basado en Frequency Change[4].

Consiste en un oscilador RC que presenta una frecuencia específica, determinada por una resistencia  $R$  y un condensador  $C$ . El sensor táctil se coloca en paralelo a este condensador, o a veces, el sensor táctil constituye el propio condensador. Cuando el dedo toca el sensor táctil, añade la capacitancia del cuerpo ( $C_{BODY}$ ) al condensador, con lo que se produce un cambio en la constante de tiempo del circuito RC, cambiando así la frecuencia de oscilación.

Como la capacitancia del cuerpo es de unos pocos pFs, para que ésta tenga una gran influencia en la capacitancia global facilitando su medición, el condensador  $C$  debe ser también de unos pocos pF's.

A continuación se emplea un comparador frecuencial para determinar si se ha producido un toque. La implementación de este comparador se puede realizar de varias maneras:

- Un método consiste en convertir la frecuencia en un voltaje DC con un convertidor de frecuencia a voltaje, y compararlo con un voltaje umbral fijo, de modo que si el voltaje medido es superior al umbral se determina touch.
- Otro método consiste en medir la frecuencia y compararla con un valor fijo. Para ello se cuenta el número de pulsos del oscilador RC a lo largo de un intervalo temporal concreto, si el número de pulsos es superior o inferior a un umbral preseleccionado se determina touch o no. Supongamos que en una aplicación táctil tenemos un RC que oscila a 40 kHz cuando NO hay touch, la base de tiempo es de 100ms y el contador de pulsos RC es de 16bits. Esto significa que el contador contará cada vez, hasta  $40000/10 = 4000$ , y luego se restablecerá. Un comparador digital comprueba si el contador está por encima de un umbral preseleccionado. Digamos que comprueba si el contador está por encima del umbral de, por ejemplo, 3950. Mientras el contador (al final de cada intervalo de base de tiempo) se mantenga por encima de este valor, el sistema determinará que no hay touch. Imaginemos que ahora alguien toca el sensor y en consecuencia la capacitancia global se incrementa, reduciéndose la frecuencia del oscilador RC hasta, por ejemplo los 39.2kHz. Ahora el contador llegará en 100ms en lugar de hasta 4000, sólo hasta 3920 ( $39200/10$ ), el cual está por debajo del umbral de 3950. El comparador digital detecta este cambio y el sistema determina touch.

Este método es el empleado por el periférico de sensado táctil del microcontrolador implementando en la gama AUREA, el Kinetis MKL05Z32VFK4 de NXP (antes Freescale).

### Tiempo de carga de la capacitancia

Este otro método basa su funcionamiento en la medición del tiempo de carga de la capacitancia de un circuito RC. Consta de un electrodo conectado al MCU que actúa como un condensador, y una resistencia externa de pull-up que limita la corriente para cargar el electrodo.

La constante de tiempo de carga del circuito RC viene dada por la ecuación:  $T=R \cdot C$ . De acuerdo con ésta, si la resistencia de pull-up permanece constante, un aumento en la capacitancia aumentará el tiempo de carga del circuito. El MCU mide el tiempo de carga y utiliza este valor para determinar si el electrodo se ha tocado o no.

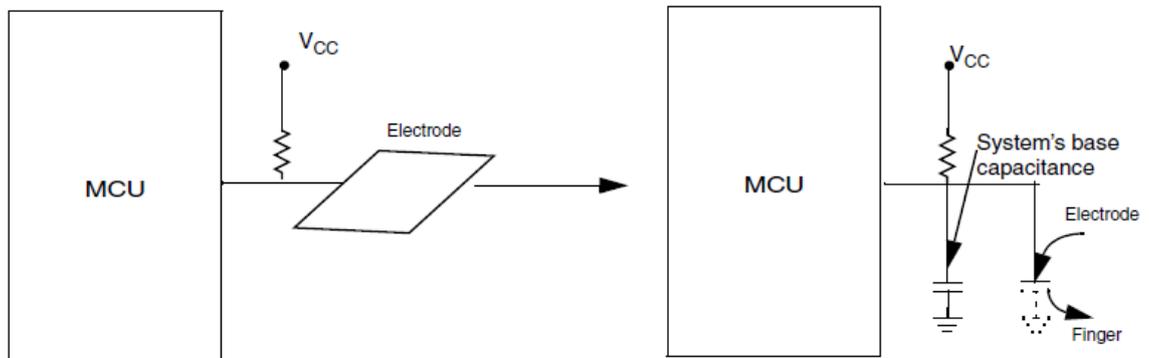


Ilustración 27 Configuración sensorial del método de tiempo de carga de la capacitancia [3]

Por defecto, el electrodo está en estado de salida alto. Cuando comienza la medida, el MCU establece el pin del electrodo como salida baja para descargar el condensador. A continuación, establece el pin del electrodo en alta impedancia, haciendo que el condensador empiece a cargarse a la vez que el MCU habilita un timer que cuenta el tiempo necesario para alcanzar el valor umbral de pin, que es  $0.7 V_{DD}$ . Una vez alcanzado el umbral, el contador se detiene, almacena el valor y descarga el electrodo.

A medida que se toca el electrodo, se añade la capacitancia del dedo a la capacitancia del electrodo, provocando un aumento de la capacitancia del circuito, lo que aumenta el tiempo de carga medido por el timer, tal y como se muestra en la siguiente figura:

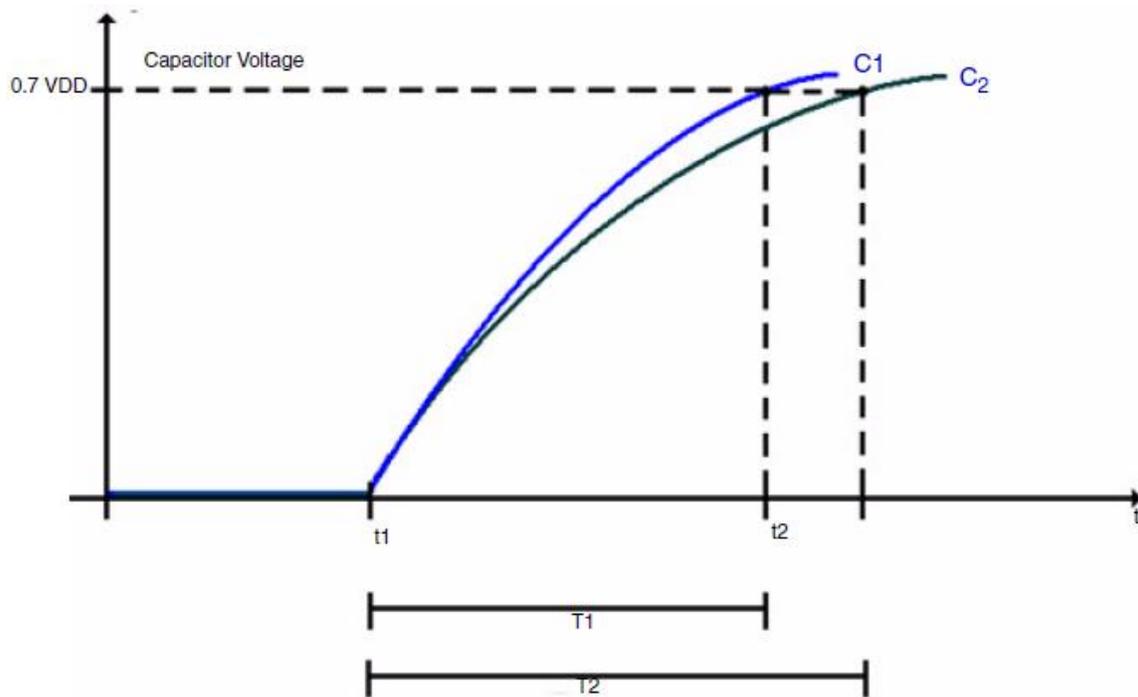


Ilustración 28 Curvas del tiempo de carga cuando no ha toque (C1) y cuando se produce un toque (C2)

Dónde:

C1: Curva del tiempo de carga cuando el electrodo no ha sido tocado.

C2: Curva de tiempo de carga cuando se ha tocado el electrodo.

T1: El tiempo de carga cuando el electrodo no ha sido tocado.

T2: El tiempo de carga cuando se toca el electrodo.

## Charge Transfer

La transferencia de carga, es un método de sensado capacitivo implementado inicialmente por el fabricante ATMEL, y más tarde por Texas Instruments y ST entre otros, el cual ofrece numerosas ventajas comparadas con los otros métodos, anteriormente descritos, tales como: mayor flexibilidad, muy alta sensibilidad/precisión a los cambios capacitivos, excelente robustez a la humedad y elevada inmunidad al ruido [1]. En este método se mide un cambio en la capacitancia basado en la carga de un condensador con capacidad conocida a partir de la carga y descarga de un condensador con capacidad desconocida y menor. Esta tecnología de medición es la adoptada por el periférico de sensado táctil del microcontrolador SAMD20 escogido para realizar este proyecto.

Cuando se inicia una conversión, la capacitancia externa desconocida que se está midiendo, la del sensor, se carga a una tensión conocida. A continuación la carga de ese condensador externo se transfiere a un condensador de muestreo/medida ( $C_s$ ) que está en el chip cuya capacitancia es conocida. El resultado de conversión, denominado Count, es simplemente el número de transferencias de carga desde el condensador externo al condensador de muestra interno que se requieren para "llenar" el condensador de muestra interno. El número de transferencias necesarias para hacerlo es representativo de la capacitancia del electrodo externo que se está midiendo. El tiempo requerido para medir la capacitancia se llama Conversión o Tiempo de medición.

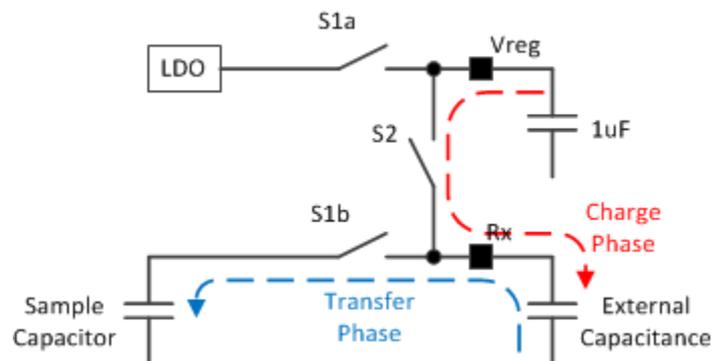
Cuando se produce un contacto, la capacidad externa desconocida cambia y, consecuentemente, el número de veces que se repite el proceso de transferencia de carga cambia. Este cambio se utiliza para determinar si se ha producido o no un toque.

La variación en el número de ciclos depende del tipo de capacitancia implementada. Si se emplea Self Capacitance, al poner el dedo se introducirá una capacitancia externa en paralelo con la del sensor con lo que la capacidad externa desconocida aumentará, reduciendo el número total de ciclos requeridos para llenar el condensador  $C_s$ . En cambio en un sistema Mutual Capacitance, la interacción con el dedo interfiere el acoplamiento del campo eléctrico, reduciéndose la capacitancia y en consecuencia aumentando el número de ciclos necesarios para llenar el condensador  $C_s$ .

El proceso de la transferencia de carga para cada tipo de capacidad (Self y Mutual) es el siguiente:

#### *Transferencia de carga para Self Capacitance*

En el Self-Capacitance, primero se realiza la carga del condensador externo, el constituido por el sensor cuya capacidad es desconocida. A continuación, la carga resultante se transfiere a un condensador interno de medida ( $C_s$ ) en el MCU. Estas fases de carga y transferencia se repiten hasta que el voltaje de  $C_s$  alcanza un voltaje concreto,  $V_C$ . Al poner un dedo sobre la superficie táctil se introduce una capacitancia externa que aumenta la cantidad de carga transferida en cada ciclo, reduciendo el número total de ciclos requeridos para que  $C_s$  alcance la tensión  $V_C$ . Cuando el número de ciclos se sitúa por debajo de un umbral establecido, el sistema determina que se ha producido un toque.



*Ilustración 29 Fases de carga y transferencia en método Self-Capacitance implementado por el periférico táctil de Texas Instruments, CapTIvate [1].*

#### *Transferencia de carga para Mutual Capacitance*

En el modo Mutual capacitance, se mide la capacidad entre dos electrodos; el de recepción (Rx o X) y el de transmisión (Tx o Y). Durante la fase de carga, un circuito simple-and-hold controla el nodo Rx mientras el nodo Tx está a nivel bajo. En la fase de transferencia, el nodo Tx es puesto a nivel alto y la carga se transfiere al condensador  $C_s$  a través de la pista del electrodo de recepción.

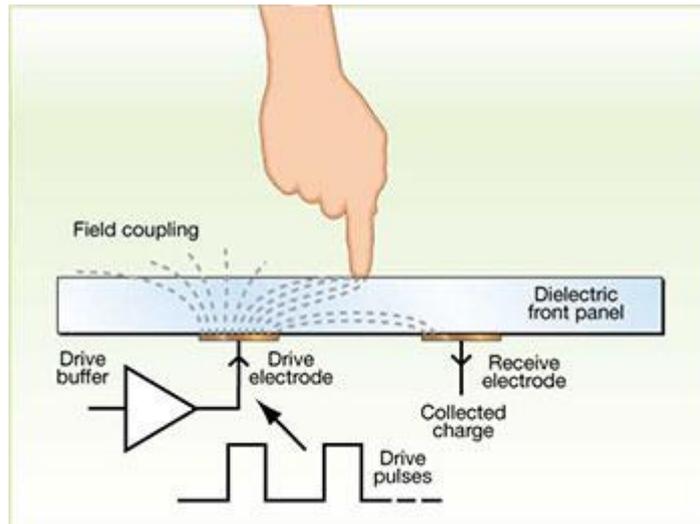


Ilustración 30: Funcionamiento del método Mutual-Capacitance centrado en la fase de carga [15].

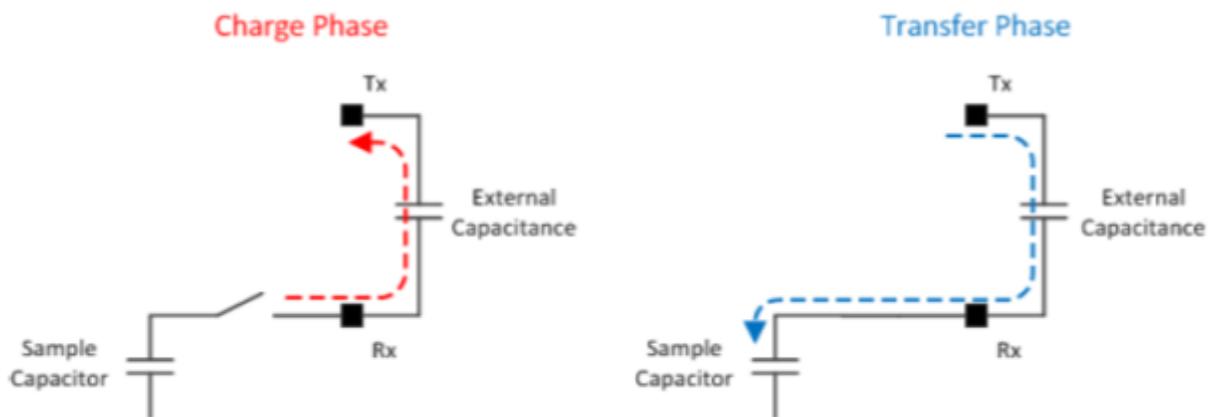


Ilustración 31 Fases de carga y transferencia en método Mutual-Capacitance [1].

## 1.2 Análisis interferencias RF conducidas en entornos táctiles [12]

El problema con las interferencias de RF es que inyectan corrientes que pueden acoplarse en los electrodos receptores (Rx). Generalmente, las aplicaciones táctiles capacitivas no están afectadas por el ruido conducido hasta que hay una interacción con dispositivo-usuario. Esto se debe a que las líneas de alimentación mantienen una diferencia estable entre VDD y GND y como no se proporciona ninguna vía de retorno a la referencia de la fuente de ruido (normalmente tierra), el circuito funciona sin alteraciones destacables. .

Sin embargo, cuando se produce una interacción usuario-sensor, el dedo proporciona un camino de retorno y acopla el ruido directamente en el sensor capacitivo. Cuando este ruido alcanza niveles donde los algoritmos de filtrado estándar se vuelven ineficaces, se introducen errores en la adquisición del toque y el sistema se vuelve poco fiable. Esto puede manifestarse por medio de una ausencia de detección, una falsa detección o en algunos casos, un bloqueo completo del sistema cuando se produce un toque. Los efectos adversos observados fruto de las interferencias conducidas son distintos para Self y Mutual Capacitance, por lo que serán tratados separadamente.

### Self-Capacitance

En presencia de ruido los sensores Self-capacitance experimentan varios efectos diferentes (incremento de la sensibilidad y corrupción de las medidas) dependiendo de los siguientes factores:

#### 1. Frecuencia del ruido

Si el ruido se encuentra centrado en la frecuencia de conversión o en sus armónicos inferiores ( $\pm 50$  kHz), las medidas se corromperán positiva y negativamente, tal y como se muestra en la siguiente figura. Esta corrupción ocurre tanto si hay o no toque, no obstante el efecto se amplifica notablemente.

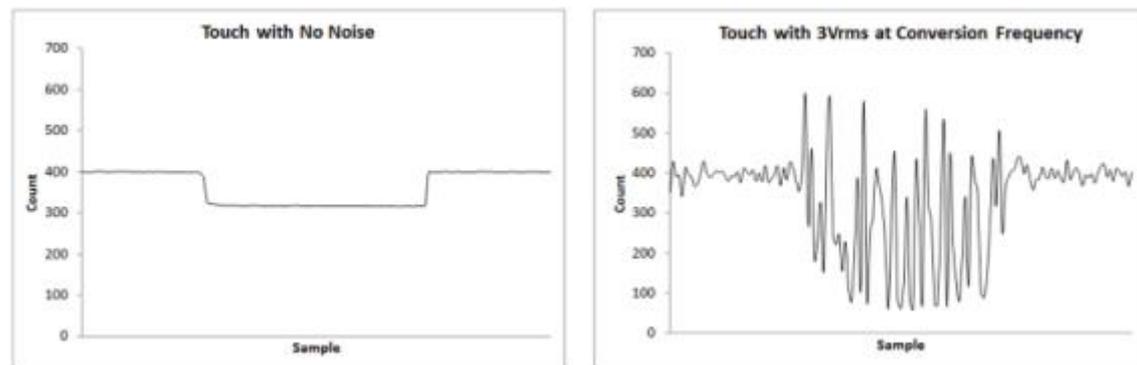


Ilustración 32: Valor de la señal de un botón Self-Capacitance sin ruido (izq) y con ruido conducido 3Vrms centrado en la frecuencia de conversión (der) [12].

En cambio, si el ruido se encuentra cerca de la frecuencia de conversión, pero no directamente alineado con ella o con un armónico inferior, la medida no se dañará, pero experimentará un aumento de la sensibilidad al tacto con un ruido variable en el tiempo.

La sensibilidad adicional se deriva del hecho de que la corriente asociada con la señal de ruido e inyectada al MCU carga rápidamente el condensador de integración, completando la medida/conversión con un número menor de ciclos carga-transferencia que en caso de no ruido.

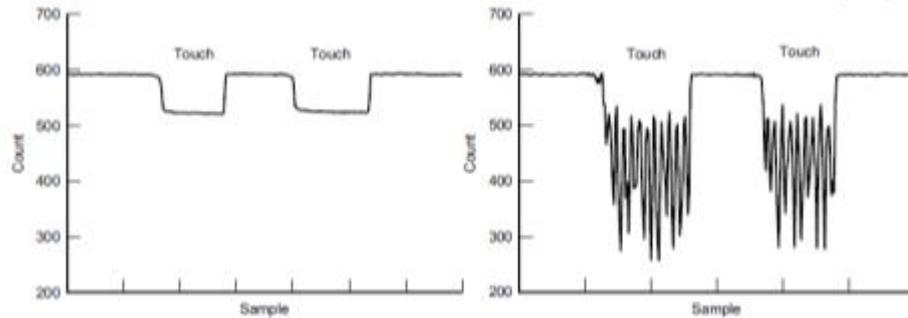


Ilustración 33: Valor de la señal de un botón Self-Capacitance sin ruido (izq) y con ruido conducido 3Vrms cercano a la frecuencia de conversión (der) [3].

Tal y como podemos ver en la figura, la medición es estable, manteniéndose en el entorno de 590 ciclos si no hay toque y que el ruido sólo se produce cuando hay toque pero en una dirección (disminución del número de ciclos carga-transferencia) debido al aumento de la sensibilidad.

## 2. Amplitud del ruido

A medida que aumenta la amplitud del ruido, la delta asociada a un toque aumenta, resultado de la mayor corriente inyectada en el Rx, por lo que este efecto se manifiesta como un aumento de la sensibilidad al tacto.

Por ejemplo, un botón puede detectar toque con unos pocos mm de proximidad en lugar de un toque completo en la superficie.

## Mutual Capacitance

Los sensores basados en Mutual Capacitance presentan corrupción total en la medida tanto si el ruido está centrado en la frecuencia de conversión como en sus armónicos, la banda de susceptibilidad es generalmente de unos 100kHz alrededor de la frecuencia de conversión. En la siguiente figura se puede observar un ejemplo de la corrupción de la información cuando el ruido conducido de 3V se encuentra en la frecuencia de conversión:

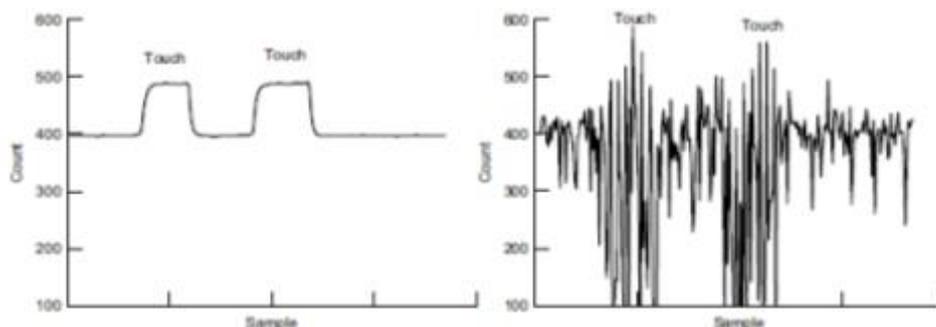


Ilustración 34: Valor de la señal de un botón Mutual-Capacitance sin ruido (izq.) y con ruido conducido 3Vrms centrado o cerca de la frecuencia de conversión (der) [3].

De acuerdo a la figura anterior podemos ver como la información captada es inservible, dado que las medidas varían aleatoriamente tanto inferior como

superiormente al nivel base, que en este caso serían 400. Además a diferencia de lo que sucede en el método Self-capacitance el ruido está presente independientemente de si hay o no toque, sólo que su amplitud aumenta cuando los sensores experimentan interacción con el usuario.

#### Ensayo de ruido RF conducido

Debido a las largas longitudes de onda de las frecuencias más bajas, la inmunidad a las perturbaciones RF en el rango de 0 Hz a 80 MHz se prueba acoplado directamente la señal ruidosa al dispositivo a ser testeado a través de sus cables de alimentación o de señal. Este método de acoplamiento también es indicativo de escenarios reales. La norma IEC 61000-4-6 especifica cómo se debe testear un producto para inmunidad a perturbaciones conducidas en el rango de frecuencias de 150 kHz a 80 MHz, mientras que la norma IEC 61000-4-3 lo hace para las perturbaciones radiadas, aquellas cuya frecuencia está por encima de los 150MHz.

Aunque ambas pruebas son importantes, la de inmunidad conducida es la más relevante dado que la mayoría de los circuitos de sensado capacitivo operan por debajo de los 80 MHz, y es allí donde se producen la mayoría de problemas de inmunidad.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques de la configuración de la prueba de inmunidad conducida.

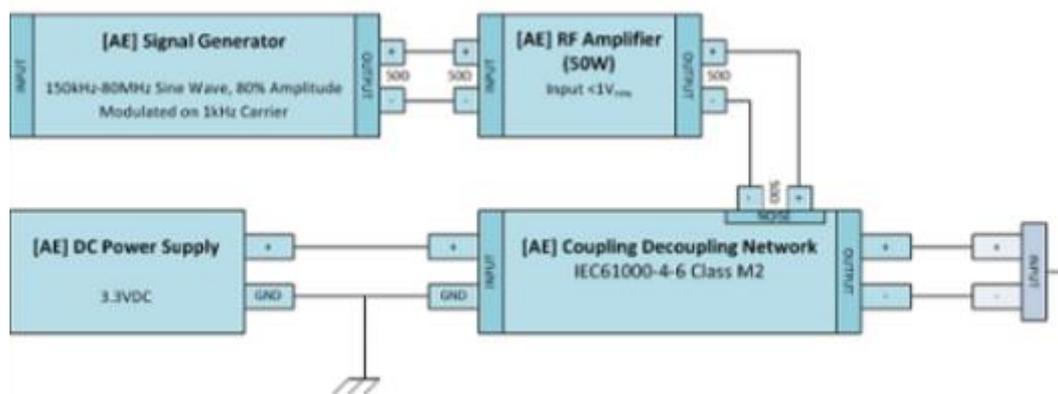


Ilustración 35: Diagrama de bloques de la instrumentación para la realización del test conforme a la norma IEC 61000-4-6 [1].

#### Técnicas mejora robustez RF

Para mejorar la inmunidad a las interferencias RF conducidas y radiadas se emplean básicamente las siguientes técnicas:

- Buenas pautas en el diseño de la PCB: tales como uso de pistas cortas para unir los electrodos del sensor con las entradas del MCU, mantener una distancia mínima entre las pistas de sensado y las de señales digitales, uso de planos de masa en el diseño PCB para reducir la franja de acoplamiento de espacio libre del electrodo y su pista a tierra y el usuario, etc.
- Frequency hopping o salto frecuencial. En ambas topologías capacitivas (Self y mutual) cuando el ruido se centra en la frecuencia de adquisición de la medida, se produce inestabilidad de los datos que en el caso Self es fruto de un aumento de la sensibilidad del sensor y en el mutual en una corrupción total

que impide determinar si se ha producido o no un toque, por lo tanto para evitar que el ruido en una banda de frecuencias dada corrompa la medición se agregan los datos de X frecuencias de conversión diferentes y se emplea un algoritmo para el procesado de la información obtenida para determinar un toque o descartar una falsa detección.

- Filtros paso bajo. Implementación hardware de filtros paso bajo para reducir la amplitud del ruido, especialmente cuando es excesiva, mediante la incorporación de resistencias en serie en la pista de sensado. Incrementando la impedancia de las pistas de sensado entre el electrodo del sensor y la entrada del microcontrolador se mejora significativamente la inmunidad al ruido conducido y a ESD al proporcionar alta impedancia al ruido mientras se mantiene la integridad global de la señal.
- Filtros IIR y de-bounce usados para agregar robustez adicional.

### 1.3 CARACTERÍSTICAS DISEÑO TÁCTIL ROBUSTO AL RUIDO BASADO EN SOLUCIÓN PTC

Para lograr un elevado nivel de inmunidad al ruido en un diseño táctil capacitivo, es necesario un diseño enfocado en tres áreas: emplear buenas pautas de diseño táctil PCB, aplicar las características del PTC y utilizar los algoritmos de procesado de señal del PTC. A continuación se detallan cada uno de estos pilares:

#### 1.3.1 Diseño táctil PCB [1], [3], [4], [5], [6], [8], [9], [10], [11], [12], [13]

A la hora de diseñar la PCB en la que se encuentran los sensores táctiles, es necesario seguir unas buenos principios de diseño con el objetivo de reducir la habilidad del ruido de acoplarse a la parte táctil (víctima) modificando el medio de acoplo, reducir la susceptibilidad de la víctima al ruido y reduciendo la amplitud del ruido a un nivel que no afecte a la víctima. A continuación se detallan los más importantes.

##### *Utilización de planos de masa*

La adición de densas estructuras de masa, ya sean planos sólidos o mallas, permite limitar al máximo las franjas de las líneas de campo Eléctrico de los electrodos, estabilizándolos y en consecuencia mejorando drásticamente la inmunidad al ruido conducido y radiado así como a ETF y ESD.

Aunque normalmente las recomendaciones de diseño de circuitos capacitivos promueven limitar las estructuras de masa cerca del área de detección activa (sensores) debido a que añaden una elevada capacidad parásita que reduce la sensibilidad llegando a afectar la performance del sensor, en situaciones que requieren de elevada inmunidad al ruido, el trade-off es muy beneficioso. Por otro lado el PTC de Atmel incorpora un circuito de compensación de capacidad haciendo posible el mantener una sensibilidad adecuada incluso cuando se emplean densos planos de masa. No obstante, es habitual utilizar una malla en lugar de un plano sólido cerca de las pistas y sensores táctiles para reducir el área y consecuentemente la capacidad parasita asociada al sensor (C\_electrode) y a la pista (C\_trace). Atmel recomienda una rejilla del 40% o menos [6], para mejorar la inmunidad o la sensibilidad respectivamente.

### *Pistas táctiles cortas*

Habitualmente se emplean pistas (y electrodos) de cobre debido a su baja resistividad ( $1.68 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ ) [1] que permite obtener una gran sensibilidad, pero también se pueden emplear otros materiales como la plata o el ITO (Indium-Tin-Oxide). Aunque la transparencia del ITO es muy buena, siendo ideal para la construcción de los sensores que por requerimientos de diseño deban ser transparentes, su elevada resistividad ( $1.05 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ ) [1] degrada la sensibilidad de la solución. Esto obliga a tener incrementar el ancho de las pistas para reducir la impedancia aunque a expensas de un aumento de la capacidad parásita y de la reducción de la inmunidad al ruido. Además esta menor sensibilidad debe ser compensada mediante firmware, lo que resulta en medidas más largas y un incremento del consumo del MCU.

Es bueno dirigir todos los electrodos críticos (Rx) en la capa inferior del PCB si es posible. Este enrutamiento impide que las trazas se vuelvan sensibles al tacto y limita la capacidad del ruido de acoplarse a las trazas desde el lado superior.

### *Enrutado entre pistas*

El rutado de las pistas táctiles deberá de hacerse procurando no colocarlas cerca de otras pistas y componentes, dado que puede causar un aumento de las capacidades parásitas e interferencias.

El rutado de las pistas táctiles es crítico debiendo de hacerse procurando no colocarlas cerca de otras pistas y componentes, dado que puede causar un aumento de las capacidades parásitas e interferencias.

### *Características de la pista*

El rutado desde los pines del microcontrolador a los electrodos del sensor debe ser lo más corto posible. Limitando la longitud de las pistas se limita su capacidad para actuar como antenas al ruido radiado y el área superficial total, lo cual mejora la inmunidad a las perturbaciones conducidas y reduce la capacitancia parásita asociada con la pista ( $C_{trace}$ ).

También es importante emplear pistas estrechas, dado que presentan una alta impedancia a corrientes transitorias tales como las resultantes de un ESD, reducen la capacidad parásita asociada ( $C_{trace}$ ) y mejoran la inmunidad al ruido y a ETF. El tamaño ideal está en el rango de 0.2 mm a 0.25 mm [1], [7].

### *Separación entre pistas*

Las señales digitales, tales como las de PWM o de comunicaciones I2C o SPI, pueden actuar como agresores estando activas durante la medición de capacitancia. Es por ello que se recomienda mantener una distancia mínima de 4 mm con ellas, por otro lado si ambas pistas se deben cruzar se debe hacer trazando un ángulo de  $90^\circ$ .

### *Separación pistas-GND*

Las pistas y planos GND no deben colocarse cerca de los electrodos y pistas táctiles dado que aumentan la capacidad parásita asociada reduciendo la sensibilidad. Para

minimizar la carga ambas pistas se deberán cruzar con un ángulo de 90° en capas separadas y mantener una separación  $\frac{1}{8}$  el grosor del overlay, lo que permite un equilibrio entre capacidad parásita e inmunidad al ruido.

Además teniendo en cuenta que la principal contribución a la capacidad parasita asociada a la pista es la de los planos de masa, como menor sea la separación vertical entre las pistas y el plano mayor será la capacidad de la pista. La recomendación de TI es mantener una distancia de más de 1 mm entre ellos [12].

Adicionalmente, si no es posible mantener estas distancias de separación y/o la capacidad parásita sigue siendo elevada se puede usar una malla en lugar de un plano sólido, con lo que se reduce el área y consecuentemente la capacidad parásita.

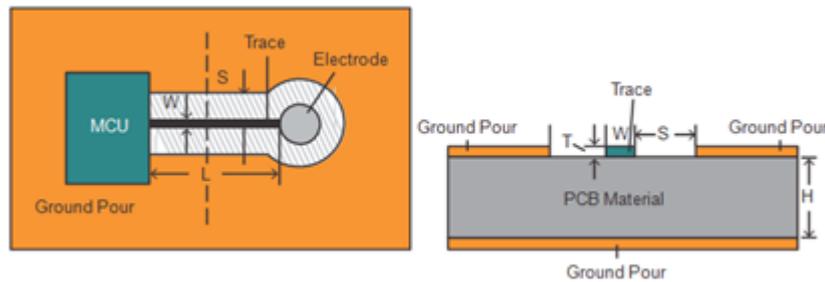


Ilustración 36: Vista Top y de sección del trazado de la pista capacitiva en la PCB

Tabla 2: Capacidad por unidad de longitud según grosor (T), ancho (W), separación respecto eje Y con el plano de masa (H) y respecto al eje X (S) de la pista entre MCU y el electrodo.

W (mm)	S (mm)	T (mm)	H (mm)	Er	C (pF/cm)
0.152	0.152	0.036	1.6	4.6	0.633
0.152	0.254	0.036	1.6	4.6	0.555
0.152	0.381	0.036	1.6	4.6	0.496
0.203	0.152	0.036	1.6	4.6	0.692
0.203	0.254	0.036	1.6	4.6	0.602
0.203	0.381	0.036	1.6	4.6	0.543
0.254	0.152	0.036	1.6	4.6	0.740
0.254	0.254	0.036	1.6	4.6	0.641
0.254	0.381	0.036	1.6	4.6	0.578
0.254	0.152	0.036	2.54	4.6	0.736
0.254	0.254	0.036	2.54	4.6	0.637
0.254	0.381	0.036	2.54	4.6	0.566

La tabla anterior muestra cómo influyen los distintos parámetros de diseño de las pistas y separación con los planos de masa en la capacidad de la pista. Por ejemplo, aumentando la separación (S) desde los 0.152 mm hasta los 0.381 mm permite reducir en más de un 20 % la capacidad, o el emplear una pista con un ancho (W) de 0.152 mm en lugar de una con 0.203 mm en casi un 10 %.

#### Separación entre pistas táctiles

Debido a la distinta naturaleza entre las dos tecnologías, el rutado de las pistas táctiles varía notablemente.

Para un diseño basado en Self-Capacitance como las líneas Tx que no están siendo escaneadas activamente son puestas a tierra las recomendaciones de separación que aplican son las mismas que las que para táctil-GND. En diseños para robustez al ruido

la distancia que permite optimizar capacidad parásita e inmunidad es 1/8 del grosor del overlay.

En cambio para diseños mutual-Capacitance, como la combinación de las líneas Tx (Y) y Rx (X) forma un canal de detección, el área de sus pistas puede ser sensible a toques. Se recomienda por tanto, rutar en grupo las pistas X por un lado y las Y por el otro, separados físicamente en la PCB. La separación entre pistas del mismo tipo deberá de ser igual o mayor que el triple del ancho de la pista, y dejar un espacio entre grupos de por lo menos el grosor del overlay, sino fuese posible se debe colocar una pista GND entre ellos.

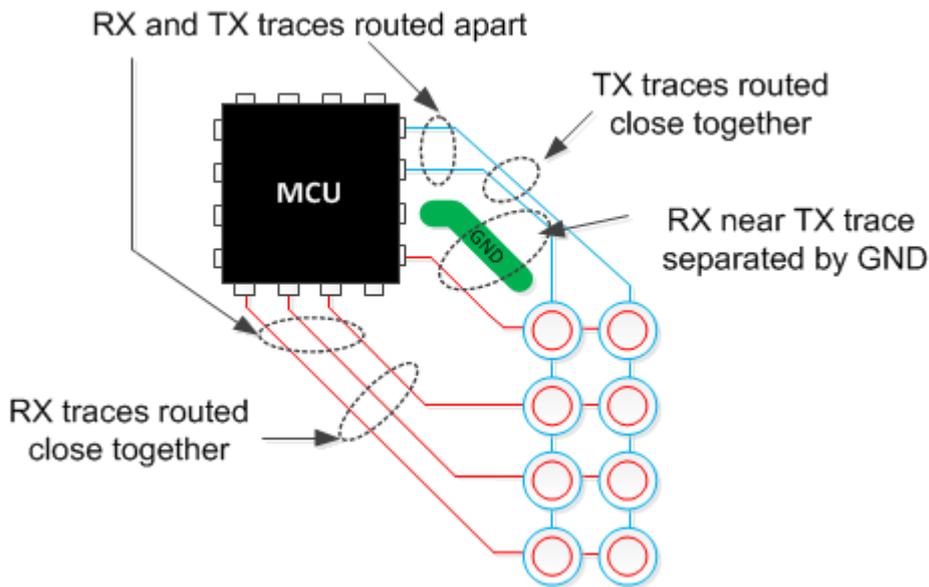


Ilustración 37: Ruteado de las pistas capacitivas para sensor Mutual Capacitance [1]

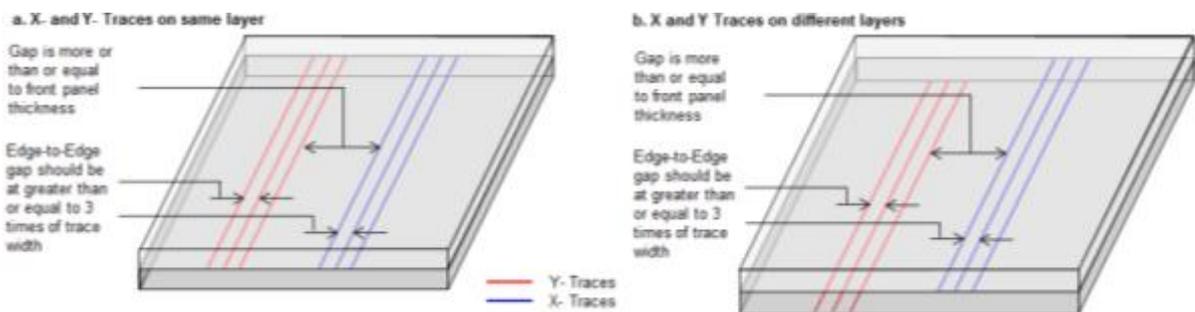


Ilustración 38: Distancias en el enrutado de las pistas capacitivas para sensor Mutual Capacitance [7]

### Alimentación y filtrado

Es importante emplear buenos principios de diseño de la alimentación para limitar el ruido en el punto de entrada. Para ello se recomienda emplear un regulador de tensión dedicado sólo para el MCU para conseguir mayor inmunidad, preferiblemente un LDO dado que genera menos ruido que una fuente conmutada, y garantizar que la alimentación tenga un rizado menor que  $\pm 5\%$  la tensión de alimentación. Si no se puede emplear un regulador dedicado, se deberá añadir un inductor entre la alimentación externa y la de los pines del MCU.

Por otro lado todos los pines de alimentación del MCU deberán tener un condensador de desacoplo lo más cerca posible de cada pin correspondiente, ATMEL recomienda el

empleo de 3 distintos (1  $\mu\text{F}$ , 100 nF y 1 nF) para reducir el los efectos en las distintas bandas de ruido <sup>[13]</sup>.

Además se recomienda que con el objetivo de prevenir que el ruido digital se acople al dominio de la alimentación analógica se añada un núcleo de ferrita con suficiente impedancia (50  $\Omega$  a 20 MHz y 220  $\Omega$  a 100 MHz) <sup>[8]</sup> en la alimentación analógica del MCU (VDDANA). Es preferible un núcleo de ferrita a un inductor por su mejor comportamiento de filtrado a altas frecuencias.

### 1.3.2 Características del PTC para robustez al ruido [5] [6] [8]

El periférico de sensado táctil PTC incorpora una serie de prestaciones y algoritmos que junto a un buen diseño PCB permiten reducir los problemas de compatibilidad electromagnética y mejorar la robustez al ruido. Las prestaciones y algoritmos de los que dispone son:

#### *Circuito de compensación*

El periférico PTC dispone de un circuito interno para la compensación de la capacidad parásita, hasta un máximo de 31.5 pF tanto en sensores tipo Self como Mutual. El establecimiento del valor a compensar es realizado automáticamente por la librería QTouch durante la calibración pero también puede ser ajustado manualmente por el usuario. Esta característica resulta de gran utilidad para mantener una sensibilidad adecuada cuando se debe emplear planos de masa para mejorar la inmunidad al ruido.

#### *Resistencias en serie*

Una buena solución para reducir el nivel de ruido en la señal de adquisición es la implementación hardware de un filtro paso bajo, mediante la adición de una resistencia en serie en la pista. El periférico PTC incorpora una resistencia interna configurable entre 0  $\Omega$  y 100 k $\Omega$  en cada pin de sensado táctil aunque también puede ser añadida externamente lo más cerca del pin del microcontrolador.

Aumentar la impedancia de las pistas touch entre los electrodos del sensor y la entrada del microcontrolador puede mejorar significativamente la inmunidad al ruido conducido y a las descargas electroestáticas, debido a que una mayor resistencia en serie en el camino de adquisición proporciona una alta impedancia al ruido mientras se mantiene la integridad global de la señal.

La aplicación de este filtro paso bajo permite evitar que cuando la amplitud del ruido es excesiva, los componentes del PTC experimenten una saturación de la medida, produciéndose un “recorte”. A menudo, este recorte no es observable en la resolución de la adquisición, ya que sólo se produce en una porción de las muestras de medición, pero la presencia de muestras recortadas impide un correcto promediado y reduce la eficacia del procesado de la señal.

Atmel recomienda que en los sensores Self-capacitance se emplee una resistencia en serie externa porque es más eficaz en comparación con la interna mientras que en los sensores mutual-capacitance se coloque una resistencia interna para filtrar el ruido en combinación con una externa de 1 k $\Omega$  para la protección contra descargas electroestáticas.

En algunos ambientes extremos la resistencia interna de 100 k $\Omega$  puede no ser suficiente. En tales casos, se puede usar una resistencia externa conjuntamente con o sin la resistencia en serie interna para aumentar aún más la impedancia de la pista touch, pero hasta máximo 1 M $\Omega$ .

La siguiente figura muestra para distintas resistencias internas (0  $\Omega$  y 100 k $\Omega$ ) la diferencia en el nivel de ruido observado en la variación de la señal ( $\Delta$ ) debido a un toque cuando el sistema táctil está sometido a un ruido conducido:



Ilustración 39: Capturas del ruido cuando se produce variación de la señal con touch sin resistencia en serie (Superior) y con una de 100kΩ (Inferior) [6]

Tal y como se puede observar en la Ilustración 14, empleando una resistencia serie de 100 kΩ permite obtener una delta mucho más estable con variaciones máximas absolutas (o maximum drawdown) de 9 puntos, mientras que cuando no se utiliza resistencia en serie alguna esta variación aumenta hasta los 35 puntos.

Sin embargo, la adición de una resistencia en serie elevada aumenta el tiempo de transferencia de carga necesario para cada adquisición incrementando el tiempo de respuesta del sistema y el consumo de energía, siendo necesario reajustar el prescalado del clock del periférico para garantizar que se realizan transferencias de carga completas. Por lo tanto dependiendo del ruido se deberá escoger la resistencia en serie más óptima permita alcanzar el nivel de supresión de ruido requerido, cumpliendo los criterios de consumo de energía y tiempo de respuesta.

#### Frequency Hop Mode

En el sensado capacitivo cuando el ruido se centra en la frecuencia de adquisición de la medida, se produce inestabilidad de los datos que en el caso Self es fruto de un aumento de la sensibilidad del sensor y en el mutual en una corrupción total que impide determinar si se ha producido o no un toque. Para evitar que el ruido en una banda dada de frecuencias corrompa la adquisición, el periférico PTC incorpora un modo de operación, el `FREQ_MODE_HOP` o Frequency hopping, que permite utilizar dos frecuencias distintas adicionales para realizar la adquisición táctil y aplicar un filtro de la mediana de los datos obtenidos a partir de estas tres frecuencias para determinar un toque o descartar una falsa detección.

El usuario además puede seleccionar las tres frecuencias para realizar la adquisición táctil a partir de una lista de dieciséis frecuencias o bien habilitar la opción Frequency Auto Tune. Esta función avanzada mide el ruido en las 16 posibles frecuencias

disponibles para ser utilizadas en el modo `FREQ_MODE_HOP` y reemplaza dinámicamente las frecuencias más ruidosas, quedando seleccionadas finalmente aquellas frecuencias con la mejor SNR. Esta opción es muy útil cuando el sistema se ve afectado por diferentes ruidos de frecuencias variables.

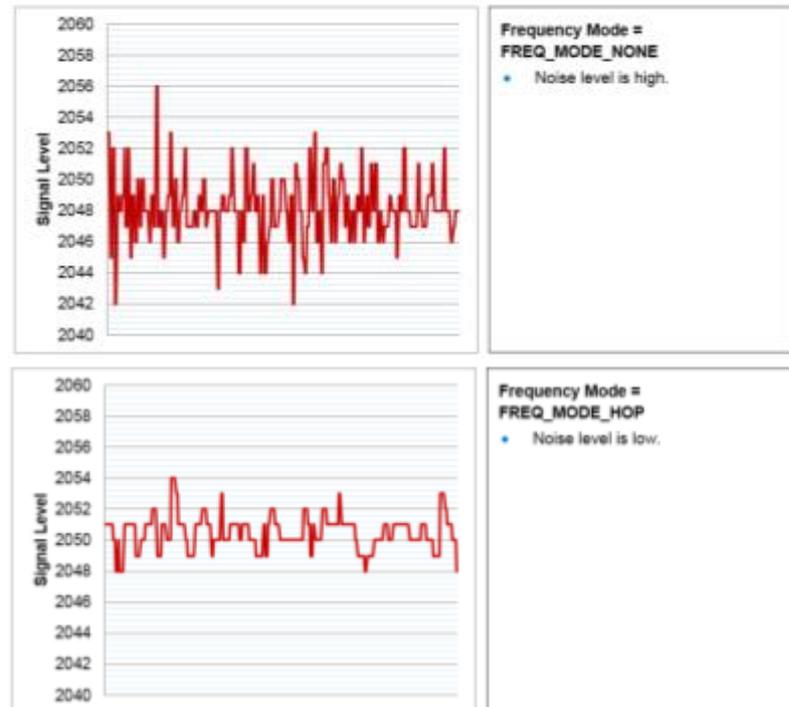


Ilustración 40: Ruido en la señal vs Frequency Mode Hop [6]

En la ilustración anterior se puede observar cuanto de útil resulta operar con el modo Frequency Hop, pudiéndose observar un claro aumento del ruido cuando no se emplea. Esta opción permite obtener medidas con un nivel bajo de ruido cuando el empleo de filtros estándares y sobre muestreo resulta insuficiente.

#### *Sensor LockOut*

El periférico PTC permite la medición del ruido de cada canal táctil una vez realizada cada adquisición. Cuando el ruido excede cierto límite de estabilidad, establecido manualmente, del nivel de ruido y durante un mínimo número de adquisiciones, la librería táctil bloquea los sensores, no reportando la detección de touch y deteniendo la compensación (drifting) de la señal base/ referencia de la medida. Si el nivel de ruido del sensor vuelve a un nivel inferior al límite y permaneciendo durante un número concreto de mediciones, el sensor se desbloquea volviendo a estar listo nuevamente para la detección de touch.

Esta característica es muy buena opción a aplicar en situaciones con ruido extremo pero que limita la funcionalidad de la aplicación en la que se encuentra integrado el sensor dado que durante esa situación de bloqueo el dispositivo no puede ser operado táctilmente.

### 1.3.3 Algoritmos procesado señal del PTC

#### Filtro

La librería QTouch ofrece la opción de realizar un sobre-muestreo (Over-sampling) y promediado, actuando como un filtro paso bajo y reduciendo significativamente el nivel de ruido. Viene determinado por el nivel de filtro que controla el número de muestras (veces que se repite una medida) que se toman para resolver cada adquisición, siendo el mínimo una y el máximo 64. Un nivel elevado de muestras del filtro proporciona una mejor SNR en entornos ruidosos pero aumenta el tiempo total necesario para la medición final de la capacidad resultando en un mayor consumo y tiempo de respuesta de la aplicación. A continuación se muestra la variación de la señal (medida de la capacidad) cuando se emplea un nivel de filtro de 32 y con 64:

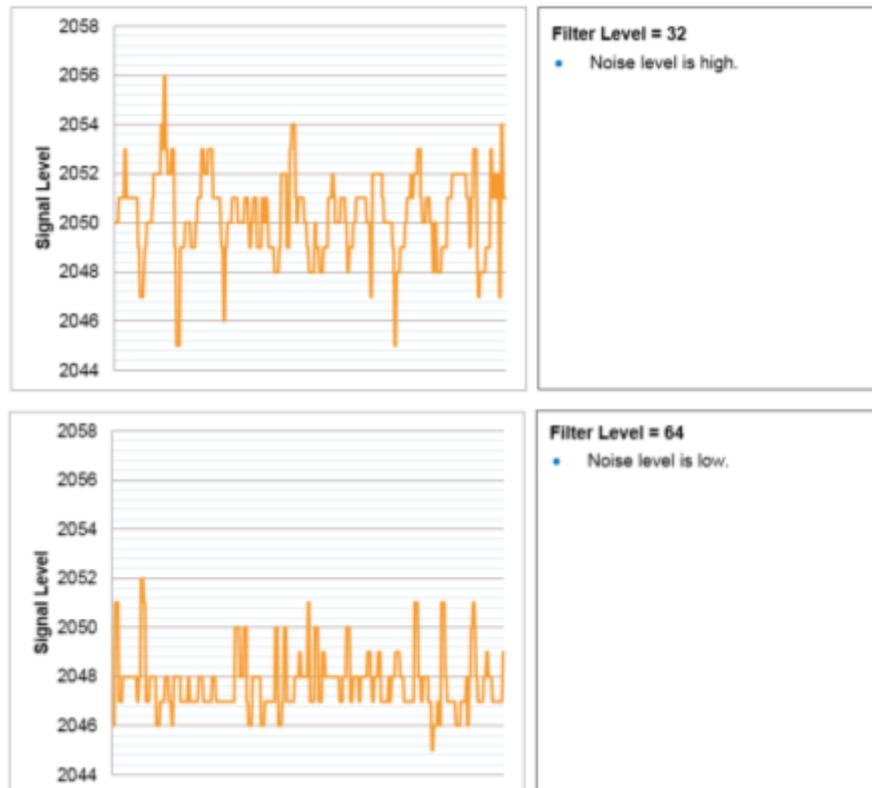


Ilustración 41: Nivel de ruido en la señal en función del nivel del filtro [6]

La ilustración 16 muestra como el ruido resultante cuando se establece un nivel del filtro de 64 muestras es bastante más reducido que cuando se establecen 32 muestras.

#### Auto Sobremuestreo o AutoOversamples

El periférico PTC permite que se realicen un número adicional de muestreos de los canales del sensor para determinar si hay o no touch cuando se detectan que las señales son inestables, a pesar de haberse establecido un elevado nivel del filtro. Habilitar esta opción resulta en que se realicen “Nivel del filtro · Auto OverSamples” muestras en el canal del sensor correspondiente cuando se observen señales inestables por lo que se trata de un “multiplicador” del nivel del filtro. Esta opción debe de ser aplicada solo en las circunstancias de ruido más desfavorables debido al considerable aumento en el tiempo de respuesta del sistema que se produce.

No obstante la ventaja de esta característica es que sólo aplica cuando hay cierta inestabilidad (grandes variaciones en la señal) sino, el tiempo para resolver cada adquisición es de:

$$A + (B * \text{FILTER\_LEVEL}) \text{ ms}$$

Dónde:

A: tiempo total de la configuración y post-procesamiento del PTC,

B: período de medición por muestra/medida.

FILTER\_LEVEL: Nivel del filtro establecido

En cambio, cuando se aplica AUTO\_OS, este tiempo se eleva hasta:

$$A + (B * \text{FILTER\_LEVEL} * (1 + \text{AUTO\_OS})) \text{ ms.}$$

### Detect Integration

La librería QTouch cuenta con un mecanismo de integración de detección, el Detect Integration o DI también llamado de-bounce, que permite confirmar la detección en un entorno robusto al proporcionar un control acerca de cómo entra y sale de los estados de detección touch. El DI actúa como un simple filtro de señal para suprimir falsas detecciones causadas por falsos eventos tales como un pico momentáneo de ruido eléctrico.

Este mecanismo consiste en un contador que se incrementa cada vez que la señal del sensor ha excedido el umbral de detección (detect threshold) y se ha mantenido durante un número específico de medidas. Cuando este contador alcanza un límite preestablecido, el valor de DI, el sensor finalmente declara que se ha producido un toque. Si en cualquier medida el delta pasa a situarse por debajo del umbral, el contador se reinicia con lo que el proceso empieza de nuevo. El DI se puede aplicar tanto para entrar en el estado de detección, declarando que hay toque, (De-Bounce In) como para salir de dicho estado (Debounce-Out).

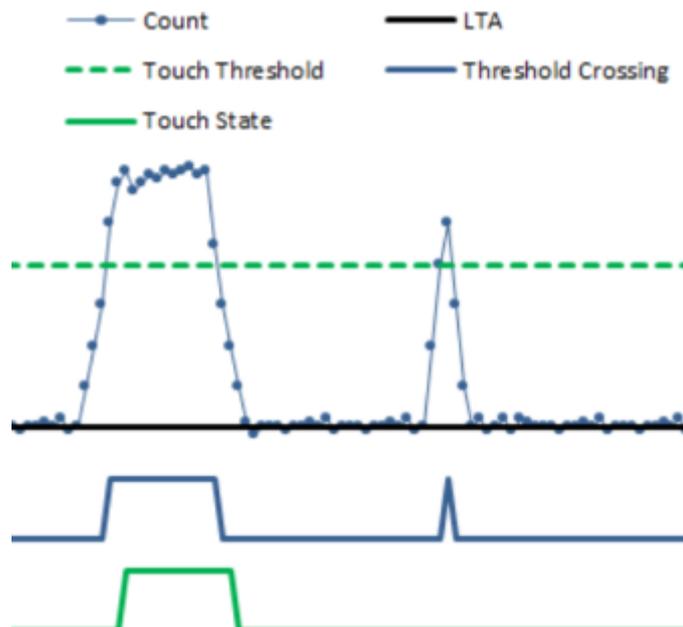


Ilustración 42: Ejemplo del valor final del estado touch aplicando la funcionalidad De-Bounce [1]

En la figura vemos que en dos momentos distintos la señal supera el umbral de detección pero solo el primero es finalmente declarado como un toque, porque durante más de dos medidas se supera el umbral. En la siguiente figura en cambio se puede

observar la operatividad del De-Bounce Out, a lo largo de un periodo de muestras en que se ha superado hay dos intermedias en que no pero al tener un de-bounce de 2 muestras está ausencia de superación del umbral no se traduce en una falsa no detección.

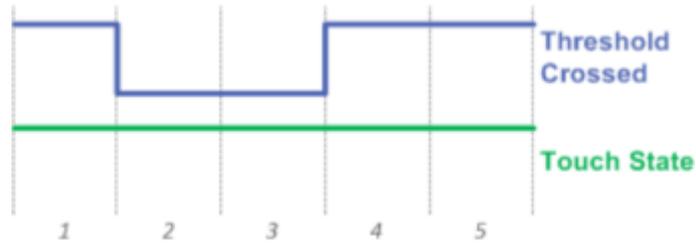


Ilustración 43: Valor final del estado touch con De-Bounce Out de 2 muestras

Este mecanismo es de gran utilidad para prevenir que un pico de ruido momentáneo origine una falsa detección o bien establezca ausencia de toque cuando en realidad la hay, haciendo más robusto el sistema de detección.

## Anexo 2

### ANALISIS TECLA DIMMER AUREA ACTUAL

#### 2.1 ANÁLISIS SLIDER AUREA

La interfaz táctil del actual dimmer de AUREA, se encuentra en una lámina monocapa de Poliamida de grosor 0.025 mm (25  $\mu$ m) y de dimensiones 34 mm x 69.5 mm. En la misma se encuentra además la antena ZWAVE para la comunicación inalámbrica con el resto de dispositivo AUREA.

La actual interfaz táctil es un Slider formado por 7 electrodos rectangulares cobre de 8.36 mm x 20.6 mm distribuidos de modo discrecional a lo largo de la lámina. Este diseño discreto, no dentado (interdigitated) permite una mayor robustez y funcionalidad táctil en entornos ruidosos dado que hay 7 canales táctiles sobre los que analizar cambios en la capacidad, de modo que al ser necesario menos superficie de cada uno para cubrir todo el área de la interfaz, la capacidad de cada electrodo (y también la parásita) será menor con lo que los cambios relativos en la capacidad asociados a un touch serán mayores. El ancho de 8.36 mm de cada electrodo permite que siempre haya por lo menos dos electrodos sobre los que interactúa el dedo, evitando la aparición de zonas ciegas en las que no es posible determinar la posición.

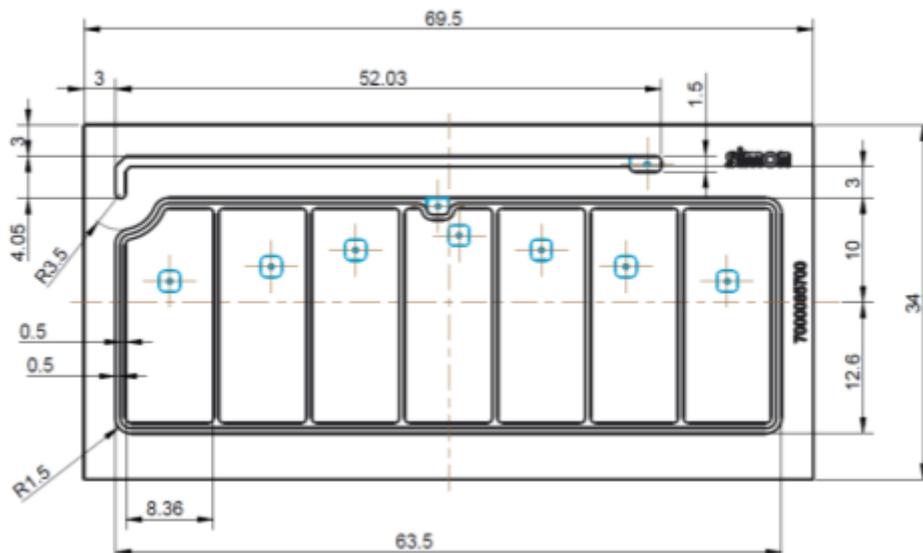


Ilustración 44: Vista con las dimensiones de la lámina de poliamida del slider

Encima de la poliamida se encuentra una plancha rectangular de polimetilmetacrilato (PMMA) y 1.9 mm de grosor que constituye el acabado de la tecla AUREA y es el overlay de la aplicación táctil, actuando como dieléctrico entre el usuario y los electrodos. El PMMA es un polímero termoplástico lineal, caracterizado por su resistencia a la intemperie, transparencia, resistencia al rayado y al impacto, que junto a su suficiente constante eléctrica (2.8-4), tal y como muestra la tabla 2, lo convierten en el materia ideal para realizar el acabado y overlay de aplicaciones táctiles.

El grosor actual empleado es un valor crítico dado que es el mínimo que permite:

- No se produzca un efecto visual de aguas
- Incorporar un tratamiento adicional contra las rayadas.
- Cumplir la normativa ESD (61000-4-2) con nivel de estrés de 8kV.

El stackup de la interfaz táctil (electrodos y overlay) presenta una estructura apilada no insertada por lo que al no haber ningún elemento aislante que cubra totalmente los electrodos, aislándolos del exterior sino que son una capa más del stackup, aplica la normativa de seguridad eléctrica según la cual hay que dejar 3 mm de distancia de las partes activas. Esto reduce notablemente el espacio disponible en la tecla para colocar un plano de masa que permita estabilizar el slider y mejorar la inmunidad al ruido, por lo que el plano de masa implementado se limita a un “anillo” de grosor 0.5 mm que rodea al slider. Las dimensiones totales del Slider (incluyendo el anillo GND) son de 63.5 mm x 22.6 mm, y la superficie activa de 61.5 mmx 20.6 mm.

El stackup de la tecla está formado por un esqueleto de plástico que alberga la PCB de la tecla en su interior, encima se coloca la lámina de poliamida con los electrodos y a continuación el acabado de PMMA (overlay). El contacto entre los electrodos y la placa PCB se realiza superficialmente MKL05Z32VFM4 por medio de los flejes SMD SPRING FINGER soldados en la placa PCB de la tecla y que hacen contacto con la superficie de cada electrodo con un pad.

La distancia entre los electrodos es de  $\frac{1}{4}$  el grosor del overlay, 0.5 mm, la misma que entre los electrodos y masa. El slider se encuentra a 3 mm de los bordes laterales e inferior de la placa PCB de acuerdo a la normativa de seguridad eléctrica. A la vez se mantiene una distancia una distancia de 3 mm entre la antena ZWAVE y el slider para minimizar las interferencias.

Tabla 3: Tabla de propiedades eléctricas de Poly(methyl methacrylate) (PMMA), Technical University of Gabrovo – Milena Koleva

Electrical Properties	Value
Electrical Resistivity	$10^{14} - 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$
Surface Resistance	$10^{14} - 10^{15} \Omega$
Loss factor, 20°C, 1000 Hz, 60% humidity	0.04
Dielectric Constant	2.8 - 4
Dielectric Constant, Low Frequency	3 - 4
Dielectric Strength	17.7 - 60 kV/mm
Dissipation Factor	0.03 - 0.55
Arc Resistance	100 - 180 s

## 2.2 ANÁLISIS TECLA

La PCA de la tecla está formada por una PCB multicapa con tecnología Rigi-Flex y en la que se encuentra todos los componentes electrónicos necesarios para la regulación vía interfaz HMI táctil de la luminosidad de la carga, el feedback luminoso y acústico para el usuario y la comunicación con otros dispositivos mediante ZWAVE.

### Board Layer

La tecla dimmer es una PCA constituida por una placa PCB de 4 capas, grosor 0.8 mm y con tecnología Rigi-Flex. La placa presenta dos áreas solidas: una rectangular de 67.2 mm x 29m en la cual se encuentran dispuestos toda la circuitería de la placa: Módulo ZWAVE, uC, flejes, memoria,) y otro pequeño rectángulo de 14mm x 5mm en el que se encuentran 4 pogo-pines para la comunicación I2C entre la tecla y el back y la alimentación 3V3 que el back suministra a la tecla. La unión entre ambos receptáculos y sus respectivas pistas se realiza mediante poliamida, de allí la necesidad de implementar la tecnología RIGI-Flex en la PCB.

La placa PCB consta de 4 capas: Top, Signal Layer 1, Signal Layer2 y Bottom. Las capas TOP, Signal Layer 1 y Bottom se emplean para las conexiones de toda la circuitería presentes en las caras Top y Bottom, mientras que la Signal Layer 2 se emplea para realizar un plano de masa.

El plano de masa que se implementa en la capa Signal Layer 2 es del tipo hatched y de 45 °, con un grosor de las pistas de 0.15 mm y un espaciado de 0.8 mm además se encuentra a una profundidad de 0.54 mm desde la cara Top. Todas estas características son muy importantes dado que hay que buscar un equilibrio entre los beneficios que aporta un plano de masa en cuanto a estabilización del electrodo, protección contra el ruido en especial del generado en el back, y el aumento en la capacidad parásita, dado que a mayor cercanía entre GND y los electodos y pistas capacitivas mayor protección pero también mayor capacidad parásita.

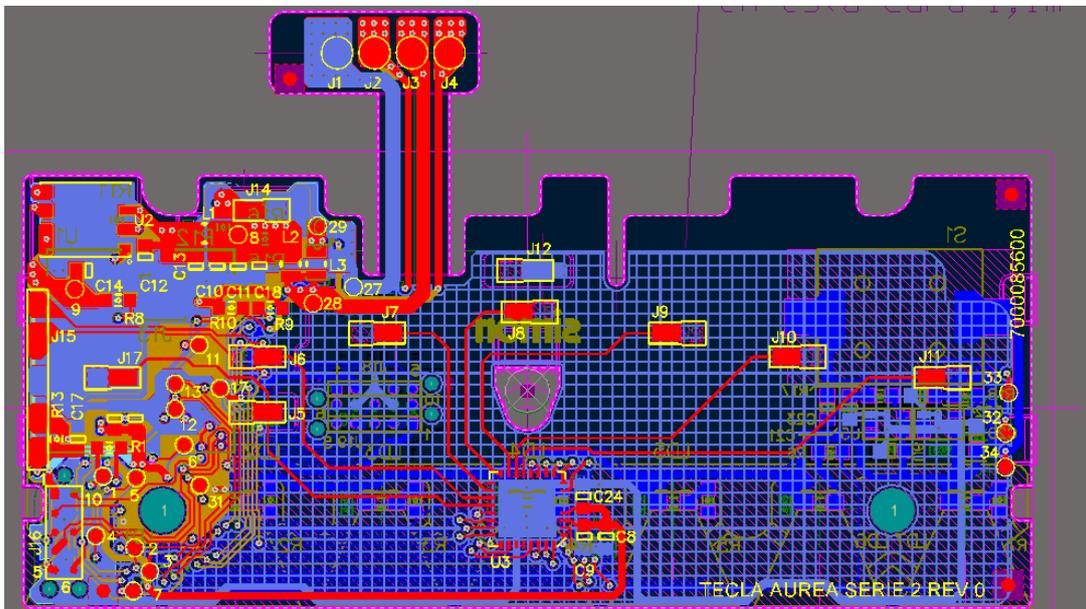


Ilustración 45: Vista completa de la PCB de 4 capas de la actual tecla dimmer Aurea

### MCU

En la cara TOP de la PCB se encuentran el microcontrolador KL05Z32VFM4 del fabricante Freescale, ahora NXP, el package empleado es un QFN32 de dimensiones 5

mm x 5 mm, y que se encuentra en el centro inferior. Se trata de un ARM Cortex-M0+ de 32 bits a 48 MHz con 32 KB de memoria flash programable, dotado del periférico de sensado táctil capacitivo TSI (Touch Sensing Input) y con hasta 28 GPIO's. Además dispone de tres interfaces de comunicación: I2C, UART y SPI.

En la tabla 3, se muestra la asignación de los pines del MCU KL05Z32VFM4 para la señal asignada:

Tabla 4: Asignación puertos en el actual MCU

MKL05Z32VFM4 NXP		
Pin nº	Uc	Asignación señales
0	PAD DISIPACIO	GND
1	PTB6 / TPM0_CH3	LED_FRONT0
2	PTB7 / TPM0_CH2	LED_FRONT1
3	VDD	VDD
4	VREFH	VDD
5	VREFL	GND
6	GND	GND
7	PTA3 / I2C0SDA	I2C_SCL
8	PTA4 / I2C0SCL	I2C_SDA / PULSADOR SWITCH
9	PTA5 / TPM0_CH5 / SPI0_SS	LED_FRONT6
10	PTA6 / TPM0_CH4 / SPI0_MISO	LED_FRONT4
11	PTB8 / TPM0_CH3	LED_FRONT5
12	PTB9 / TPM0_CH2	
13	PTB10 / TPM0_CH1 / ADC0_SE9 / TSIO_IN7	TSI_S6
14	PTB11 / TPM0_CH0 / ADC0_SE8 / TSIO_IN6	TSI_S5
15	PTA7 / ADC0_SE7 / TSIO_IN5 / SPI0_MOSI	TSI_S4
16	PTB0 / ADC0_SE6 / TSIO_IN4 / SPI0_SCK	TSI_S3
17	PTB1 / DAC0_OUT / TSIO_IN3	
18	PTB2 / ADC0_SE4 / TSIO_IN2	TSI_S2
19	PTA8 / ADC0_SE3 / TSIO_IN1	TSI_S1
20	PTA9 / ADC0_SE2 / TSIO_IN0	TSI_S0
21	PTA10 / TSIO_IN11	ZW_WAKE-UP
22	PTA11 / TSIO_IN10	ZW_RST
23	PTB3 / UART0_TX / I2C_SCL	UC-TX_ZW-RX
24	PTB4 / UART0_RX / I2C_SDA	UC-RX_ZW-TX
25	PTB5 / NMI / TPM1_CH1	LED_FRONT2
26	PTA12 / TPM1_CH0 / ADC0_SE0	LED_FRONT3
27	PTA13 / TSIO_IN9	
28	PTB12 / TSIO_IN8	
29	PTB13 / ADC0_SE13 / TPM1_CH1	SOUND
30	SWD_CLK / PTA0 / TPM1_CH0	JTAG_CLK
31	RESET / PTA1 / IRQ1	RST
32	SWD_DIO / PTA2	JTAG_DIO

#### Indicador Luminoso

La tecla AUREA presenta una interfaz luminosa en la parte inferior, para que el usuario tenga feedback cuando procede a la regulación de la luminosidad de la carga, conozca el estado de regulación de la carga así como warnings de falta de calibración de la tecla y acerca de su estatus en una red ZWAVE. Este feedback luminoso lo componen 7 LEDS alimentados por la alimentación de la tecla no del MCU (VFEEDBACK) y controlados por 7 pines GPIOs del MCU (LED\_FRONTX), de modo que cuando el pin se encuentre a nivel bajo, el LED conducirá y estará en ON y cuando se ponga a nivel alto estará OFF. Los LEDS tienen una protección de limitación de corriente mediante una resistencia de 750 Ω en serie con el LED. La corriente que circula por el LED es:

$$I_F = \frac{V_{CC} - V_F}{R} = \frac{3.3 V - 2.5 V}{750 \Omega} = 1.1 mA$$

Obteniendo un tenue indicador con el suficiente brillo deseado. Los LEDS escogidos son los CSL0406WBCW1 del fabricante ROHM, de tipo SMD con proyección lumínica blanca horizontal (90°) y colocados en la cara BOTTOM de la tecla. Para conducir la luminosidad hacia la parte inferior de la tecla se coloca encima de ellos un difusor.

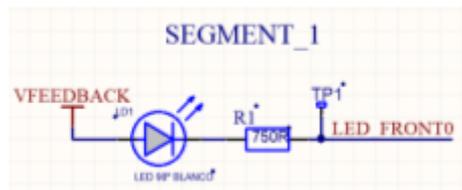


Ilustración 46: Esquemático del control del LED

### Comunicación ZWAVE

La tecla dispone de conectividad ZWAVE lo que le permite formar parte de una red de dispositivos dotados con tecnología ZWAVE, interactuando con ellos y permitiendo el control remoto del dimmer.

Esta conectividad se implementa un bloque formado por tres componentes:

- 1- Módulo transceiver ZWAVE (U1) ZM5202AE-CME3R de Sigma Design. Este módulo se encarga de la modulación, codificación, decodificación y demodulación de la comunicación ZWAVE. Colocado en la cara BOTTOM. El módulo ZWAVE es alimentado con la alimentación de la tecla (Vcc) pero previamente se pone un filtro PI entre la alimentación de la tecla y el pin de alimentación del módulo transceiver, siguiendo la recomendación del fabricante Sigma Design. Este filtro pi permite suavizar al máximo el rizado y evitar que el ruido generado por el módulo se acople a la alimentación del resto del circuito pudiendo afectar componentes delicados de la tecla, especialmente el MCU.
- 2- Memoria Flash de 8 MB (U2) SMD M25PE80-VMP6TG VFQFPN de Micron Technology. La memoria se encuentra en la parte superior izquierda de la cara TOP y es exigida por ZWAVE para guardar las librerías.
- 3- Antena ZWAVE ubicada en la placa de poliamida de los electrodos y conectada con el módulo transceiver ZWAVE por medio de un fleje (J14), como los de la interfaz táctil.

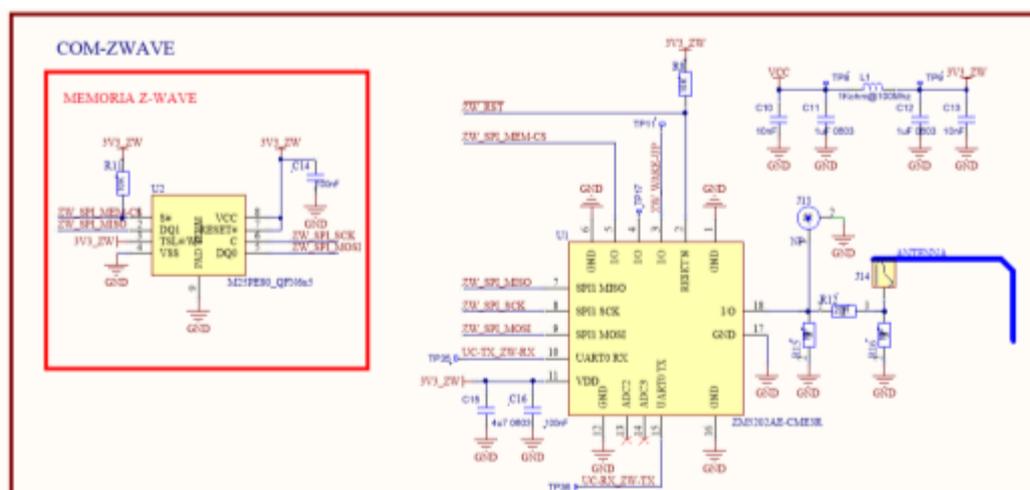


Ilustración 47: Esquema electrónico para la comunicación ZWAVE

La comunicación entre el módulo ZWAVE y el uC se realiza mediante un bus full-duplex UART: UC-RX\_ZW-TX y UC-TX\_ZW-RX. Por otro lado la comunicación entre el

módulo ZWAVE y la memoria flash es vía BUS SPI: ZW\_SPI\_MISO, ZW\_SPI\_MOSI y ZW\_SPI\_SCK.

### Interfaz táctil

La interfaz táctil capacitiva en la tecla AUREA DIMMER la constituye un slider Self-capacitance con 7 electrodos implementados en una lámina de poliamida. Esta lamina se encuentra superpuesta a la PCB de la tecla, por lo que cada electrodo, que constituye un canal táctil, está conectado a su correspondiente pin del módulo TSI del MCU mediante el fleje SMD 1551573-5 de TE Connectivity. Estos flejes son de tipo SMD haciendo contacto superficial en cada electrodo cuando se superpone la lámina de poliamida en la estructura plástica de la tecla. Cada uno de los flejes se ubica longitudinalmente a lo largo de la cara TOP de la PCB y son la terminación de las pistas de sensado capacitivo que discurren por la PCB de la tecla desde los correspondientes pines TSI del MCU. Las pistas de sensado capacitivo (TSI\_Sn) son de 0.2 mm de ancho y discurren siempre por la cara TOP con la menor longitud posible. Las líneas TSI\_S0 y TSI\_S1 son las únicas que no mantienen una distancia de 4 mm con otras pistas digitales debido a la imposibilidad de recolocar los flejes en zonas sin circuitería alrededor, teniendo una distancia mínima de 0.4 mm.

Además también hay un octavo fleje que forma parte de la estructura sensorial y que es el fleje que permite conectar a GND un anillo que rodea al slider a modo de mínimo plano de masa.

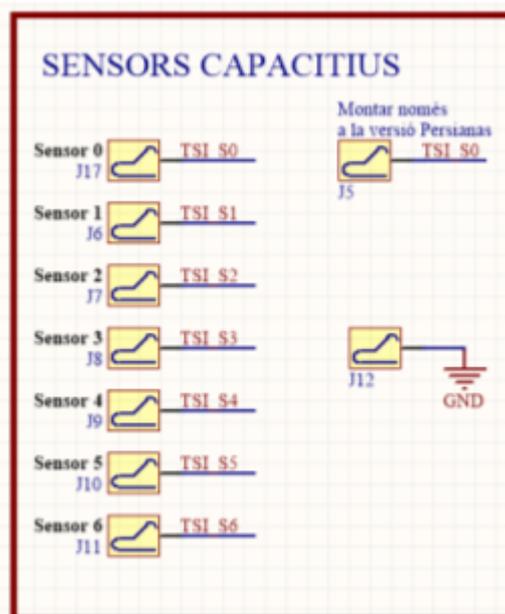


Ilustración 48: Esquema de la interfaz para el sensor capacitivo implementado

### Programación

La tecla dimmer presenta dos elementos a programar: el módulo transceiver ZWAVE con interfaz SPI para su programación y el MCU que está dotado con la interfaz Two-Wire SWD para su programación, testeo y debugación. Ambos dispositivos tienen en la tecla 4 footprints de programación (2 para el ZWAVE y 2 para el MCU) con una disposición de pads concreta conectados a los pines de programación correspondientes de cada dispositivo, de este modo se evita el uso de conectores de acoplamiento en la PCB con su consiguiente reducción en costes, tiempo y espacio. Dos footprints se encuentran en el lateral izquierdo de la cara TOP, el J15 para MCU y

el J16 para ZWAVE, y los otros dos cerca del centro en la cara BOTTOM, J18 MCU y J19 ZWAVE.

La incorporación de dos áreas de programación (footprints) en cada cara de la PCB se debe a la necesidad de disponer un área de programación más accesible y segura una vez ensamblada toda la tecla sin que sea necesario desarmar la tecla y extraer la PCA para proceder a su programación. Las áreas de programación en la cara BOTTOM son dos footprints tipo TAG-Connect<sup>[1]</sup> superpuestos e invertidos, que permiten que con un solo conector se puedan programar ambos en función de la posición del TAG-Connect.



*Ilustración 49: Vista del conector TAG-Connect colocado para programar en su footprint genérico característico*

El emulador programador JTAG empleado es el SEGGER J-LINK con los correspondientes adaptadores del pin-out de programación para el ZWAVE y el MCU.

<sup>[1]</sup> Tag-Connect es un estándar diseñado por TAG-CONNECT LLC para conexión entre un programador/debugger con una PCB que consiste en una interfaz de conexión especial que elimina la necesidad de emplear un cabezal de programación u otros conectores sólidos en la parte de la PCB reduciendo costes y espacio.

### *Interfaz con el back*

La tecla DIMMER AUREA forma parte de un bloque global compuesto por la tecla que es la parte de control de la aplicación y por el back encargado de la parte de potencia.

La comunicación entre ambos módulos se realiza mediante un bus I2C. Con esta interfaz ambas partes intercambian información acerca del estado de la carga, el nivel de regulación definido por el usuario mediante el slider táctil y que el back tiene que establecer para la carga, entre otras.

Además el back se encarga de suministrar la alimentación necesaria (3V3) para toda la tecla. El contacto entre la tecla y el back se realiza mediante 4 pogo-pines dorados (90023-AS del fabricante Preci-Dip) dispuestos en la pequeña superficie rectangular flotante de la tecla y enlazada al cuerpo central mediante Poliamida. Estos pogo-pines hacen contacto en los pads que hay dispuestos frontalmente en la superficie del back. Los pogo-pines J1 y J3 suministran la alimentación, siendo J1 GND y J3 3V3. Mientras que J2 y J4 son las líneas de señal SDA y SCL respectivamente.

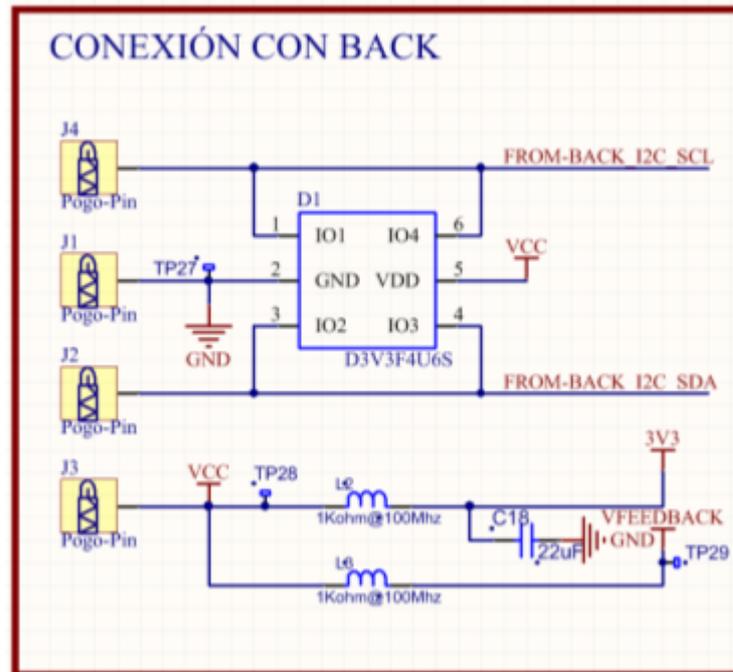


Ilustración 50: Representación esquemática de la conexión con el back mediante los 4 pogo-pines

Ambas líneas incorporan en la tecla una resistencia pull-up de  $4.7\text{ k}\Omega$ , la cual se encuentra comprendida dentro de los valores de acuerdo a las especificaciones del datasheet de entre:

$$R_{P(\text{min})} = \frac{V_{CC} - V_{OL(\text{máx})}}{I_{OL}} = \frac{3.3\text{ V} - 0.5\text{ V}}{5 \cdot 10^{-3}\text{ A}} = 560\ \Omega$$

$$R_{P(\text{máx})} = \frac{t_r}{0.8473 \cdot C_b} = \frac{1000 \cdot 10^{-9}\text{ s}}{0.8473 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 11.8\text{ k}\Omega$$

Dónde:

- $V_{CC}$ : Tensión de alimentación del dispositivo
- $V_{OL\text{ MAX}}$ : Max Output Low Voltage
- $I_{OL}$ : Output Low Current
- $t_r$ : Tiempo subida señales SDA y SCL
- $C_b$ : Capacitancia de la línea

Por otro lado, también están protegidas contra descargas electrostáticas (ESD) al inicio de la tecla mediante un array de diodos supresores de transitorios de tensión (TVS) del fabricante Diodes Incorporated, el D3V3F4U6S. El cual ofrece 4 canales protección contra descargas electrostáticas por aire de  $\pm 15\text{ kV}$  y por contacto de  $\pm 8\text{ kV}$  ((IEC 61000-4-2 Level 4)

#### Power supply

La alimentación de todos los componentes presentes en la tecla es suministrada desde el back por medio de las líneas Vcc y GND a través del enlace back-tecla de los pogo-pines J1 y J3. La alimentación procedente del back en la tecla se desdobra en dos: 3V3 y VFEEDBACK. 3V3 se emplea para alimentar al MCU y el módulo ZWAVE. Aunque

en éste último se implementa a continuación un filtro en pi para eliminar el rizado y evitar que el ruido generado por el módulo se acople a la alimentación del MCU pudiendo derivar en un mal funcionamiento e inoperatividad. Mientras que VFEEDBACK es utilizado para los LEDs y los disparadores Schmitt empleados en el feedback sonoro.

Cada una de estas dos líneas es filtrada previamente por un núcleo de ferrita, el 742792096 de WÜRTH ELEKTRONIK con una impedancia de 1 k $\Omega$  a 100 MHz, para reducir el ruido de alta frecuencia procedente de la red eléctrica y el back. Además en 3V3 se añade un condensador de 22  $\mu$ F formando un filtro paso bajo.

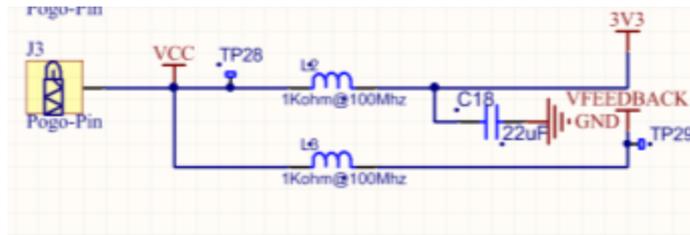


Ilustración 51: Esquema de la estructura power supply en la actual tecla Dimmer Aurea a partir de la recibida por el Back

Además todos los CI en la tecla incorporan un condensador cerámico de desacoplo de 100 nF.

#### Feedback sonoro

La tecla además de incorporar un feedback luminoso para guiar al usuario durante el proceso regulación de la carga implementa un buzzer de tipo piezo transducer con el que se realiza una pequeña vibración para cuando se encienden o apagan los leds del feedback luminoso.

El piezo transducer escogido es el AST1109MLTRQ del fabricante MALLORY SONALERT. El funcionamiento del buzzer es controlado por el MCU mediante la señal SOUND. Cuando esta señal se encuentra a nivel alto el buzzer genera una pequeña vibratoria acústica, y cuando pasa a nivel bajo deja de producirse. La conducción del piezo a partir de la señal SOUND es realizada por un multivibrador monoestable implementando por dos Schmitt Trigger de un canal (el 74LVC1G14 de DIODES Incorporated) y una red R-C, estableciendo una frecuencia de oscilación de 4.1 kHz.

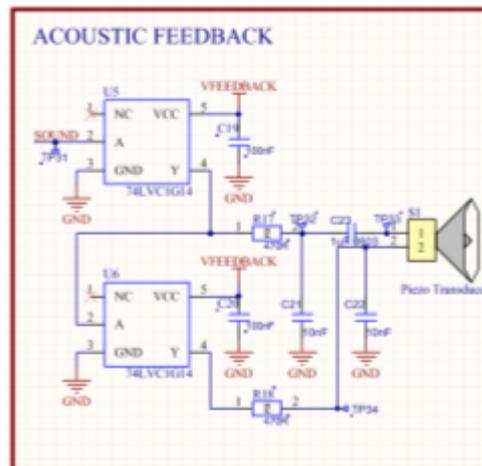


Ilustración 52: Esquema del feedback sonoro implementado con el Piezo Transducer y multivibrador monoestable

## ANNEXO 3

## CÁLCULOS DISEÑO SLIDER SELF-CAPACITANCE [1], [3], [7]

*Separación entre electrodos-GND*

Los planos de masa alrededor de los electrodos afectan a la sensibilidad táctil. Esto es visto principalmente como un incremento en la capacidad del sensor a medida que se reduce la distancia entre electrodo y masa y aumenta el área del plano.

La reducción de la distancia con un plano de masa cercano permite limitar la proyección del campo eléctrico, reduciendo el acoplamiento de espacio libre a tierra y en consecuencia se limita la capacidad del ruido conducido o radiado de afectar al electrodo, especialmente cuando ningún usuario está interactuando con él. Por lo tanto esta práctica estabiliza el electrodo de escenarios de detección falsa.

No obstante la reducción de la distancia se traduce en un incremento de la carga parasita así como la reducción de campo E, lo cual se considera una mala práctica en el diseño de circuitos táctiles porque dificulta la detección del tacto en términos de sensibilidad, pero en el caso de la inmunidad al ruido el trade-off es muy beneficioso y recomendado por los fabricantes de MCU's con periféricos de sensado táctil.

Normalmente se recomienda una distancia electrodo-GND de  $\frac{1}{2}$  el grosor del overlay, por ser el valor más óptimo y equilibrado entre una buena y acotada proyección del campo E, elevada sensibilidad y una limitada capacidad parásita. Pero para entornos ruidosos se recomienda reducirla hasta  $\frac{1}{4}$  el grosor del overlay. Al prevalecer el conseguir una gran inmunidad al ruido se establece una distancia entre electrodos y GND de  $\frac{1}{4} \cdot \text{grosor overlay} = \frac{1}{4} \cdot 1.9 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$ .

El incremento en la capacidad parásita del sensor al establecer una distancia de 0.5 mm en lugar de la típica de  $\frac{1}{2} \cdot \text{grosor overlay} = \frac{1}{2} \cdot 1.9 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$  será contrarrestado con la característica circuito de compensación de la capacidad parásita del que dispone el periférico PTC, siendo posible recuperar suficiente sensibilidad y permitiendo la adición de estructuras de planos de masa muy cercanos alrededor del electrodo con la consiguiente mejora en la inmunidad al ruido.

*Separación entre electrodos*

Por defecto, el Qtouch Software Library conduce a GND los electrodos que no están siendo escaneados activamente, permitiendo que los electrodos adyacentes sean tratados como una extensión del plano de masa. De modo que la separación entre los electrodos sigue las mismas reglas y consideraciones así como las mismas implicaciones que para el espaciado entre electrodo y masa. Por lo tanto, el objetivo es espaciar los electrodos una distancia óptima tal que se proporcione suficiente espacio para que el campo eléctrico se propague hacia arriba y a través del overlay, evitando una de-sensibilización notable del electrodo, a la vez que estabilizar el electrodo para obtener mayor inmunidad al ruido, tal y como se ha comentado en la sección anterior.

En base a estas consideraciones se establece la misma separación entre electrodos que entre electrodo-GND:  $\frac{1}{4} \cdot \text{grosor overlay} = \frac{1}{4} \cdot 1.9 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$ .

#### Diseño dimensiones y forma electrodos

Una vez concretado las distancias entre los electrodos y masa, ya se puede determinar el área activa del slider. Como se comenta previamente, en la lámina de poliamida, toda el área que se dispone para los electrodos es de 63.5 mm x 22.6 mm. Entonces, si se le descuenta el grosor del anillo de masa y la distancia de éste con respecto a los electrodos se obtiene un área efectiva de:

Área activa restante= Longitud activa x altura activo=61.5 mm x 20.6 mm

Dónde:

- Longitud activa ( $L_{\text{efectivo}}$ )=  $L_{\text{disponible}} - 2 \cdot (W_{\text{anillo}} + d_{\text{electrodos-GND}}) = 63.5 \text{ mm} - 2 \cdot (0.5 \text{ mm} + 0.5 \text{ mm}) = 61.5 \text{ mm}$
- Altura activa ( $H_{\text{efectivo}}$ )=  $H_{\text{disponible}} - 2 \cdot (W_{\text{anillo}} + d_{\text{electrodos-GND}}) = 22.6 \text{ mm} - 2 \cdot (0.5 + 0.5) \text{ mm} = 20.6 \text{ mm}$

Determinada el área efectiva, se debe escoger la forma de los electrodos que lo permitan cubrir teniendo en cuenta la restricción del periférico PTC para el Self-capacitance de usar sólo 3 canales táctiles y la necesidad de reducir al máximo la aparición de deadzones, lo cual requiere que siempre por lo menos se esté tocando la superficie de 2 electrodos. Hay dos opciones, emplear un diseño dentado (interdigitated) o uno discreto rectangular. Por las características del diseño dentado, éste se puede implementar siempre, en cambio un diseño discreto rectangular se recomienda sólo cuando el ancho efectivo sea inferior a 26 mm, sino el diseño presenta una elevada deadzone perdiendo el slider linealidad:

#### Electrodos Rectangulares

Si los electrodos de cada canal son discretos rectangulares, el dimensionado de cada electrodo sería:

$$L_{\text{electrodo}} = \frac{L_{\text{efectivo}} - 3 \cdot d_{\text{electrodos}}}{3} = \frac{61.5 \text{ mm} - 3 \cdot 0.5 \text{ mm}}{3} = 20 \text{ mm}$$

$$H_{\text{electrodo}} = H_{\text{efectivo}} = 20.6 \text{ mm}$$

Con este dimensionado en el 60% del área efectiva del slider no sería posible determinar la posición (dead-zone) tal y como se detalla a continuación:

Teniendo en cuenta las consideraciones del inicio, para llegar a solapar 1 mm del electrodo adyacente sería necesario desplazar el dedo  $\frac{W_{\text{electrodo}} - \text{eje mayor elipse dedo}}{2} = \frac{20 \text{ mm} - 11 \text{ mm}}{2} = 4.5 \text{ mm}$  para que la parte más exterior llegue al extremo del electrodo, a lo que hay que añadir 0.5 mm del espacio entre ambos electrodos más el 1 mm necesario de solapamiento con el electrodo adyacente para que el MCU tenga suficiente información para determinar la siguiente posición. Resultando en un desplazamiento de  $4.5 + 0.5 + 1 = 6 \text{ mm}$  en los que no será posible determinar la posición (deadzone) porque o no se está solapando dos electrodos a la vez o bien no hay suficiente área solapada (1 mm en nuestro caso) como para generar un cambio suficiente en la capacitancia del electrodo contiguo.

Como el desplazamiento puede ser en ambas direcciones (de izquierda a derecha o de derecha a izquierda) la zona en la que no será posible la determinación de posición sería de  $2 \cdot 6 \text{ mm} = 12 \text{ mm}$ . Con lo que se producirían saltos de  $\frac{\text{Deadzone}}{\text{Resolución} \left(\frac{\text{mm}}{\text{punto}}\right)} = \frac{12 \text{ mm}}{\frac{61.5 \text{ mm}}{100 \text{ puntos}}} = 19,5 \text{ puntos}$  en la posición por cada electrodo, siendo las dead zones prácticamente el 60% del área efectiva y obteniendo una performance no lineal del slider y que no es válida para nuestra aplicación dimmer.

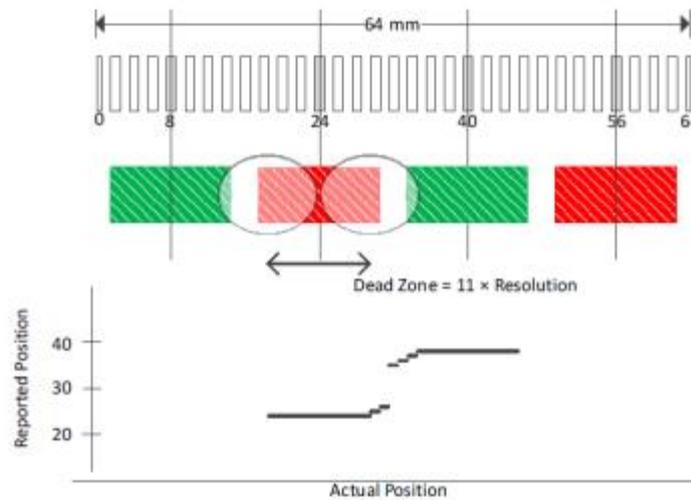


Ilustración 53: Posición reportada por un slider discreto rectangular de 64 posiciones con deadzones [3]

De modo que el único diseño válido con las especificaciones y limitaciones es el dentado (interdigitated).

#### Electrodos Interdigitated

Las partes de cada dentado deberán ser cuidadosamente diseñadas para minimizar las posibles zonas de deadzone. Un electrodo dentado consta de tres partes: dos dentados laterales y un cuerpo sólido rectangular.

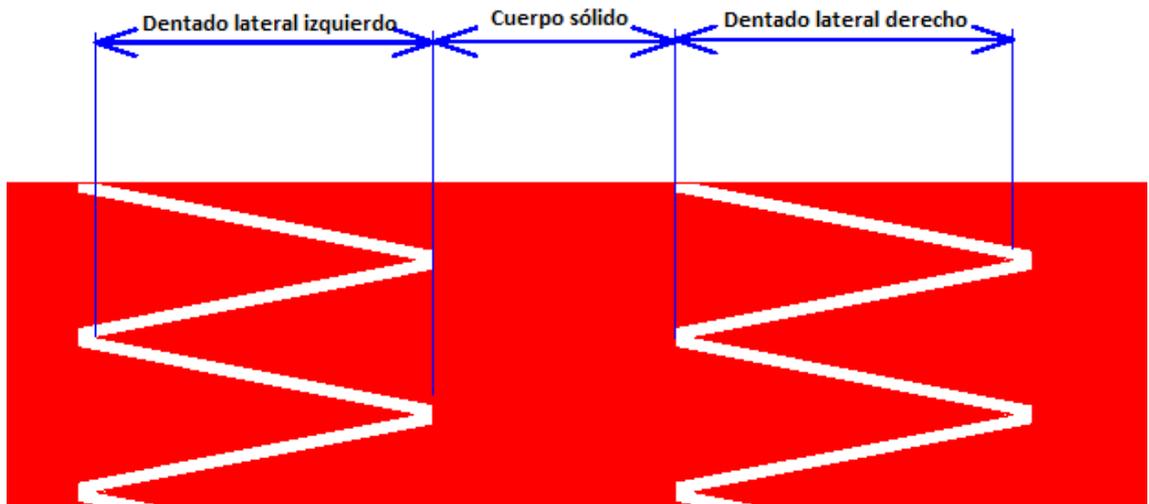


Ilustración 54: Representación de las partes que constituyen un electrodo interdigitated

#### Cuerpo sólido

En el cuerpo sólido el ancho constituye el parámetro crítico de diseño dado que tiene que ser tal que se garantice que no se producen dead-zone debido a que la superficie del dedo queda toda ella inscrita en el interior del cuerpo sólido. Este ancho determina directamente el dimensionado de los dientes laterales.

Las consideraciones concernientes a su dimensionado vienen determinadas por:

- 1- Tamaño de la superficie de contacto del dedo
- 2- Área mínima de solapamiento del electrodo adyacente
- 3- Separación máxima entre el cuerpo sólido y el puntal del diente del electrodo contiguo.



Ilustración 55: Vista ampliada del dentado de un electrodo interdigitated centrado en la distancia entre el cuerpo sólido y el puntal del diente del electrodo contiguo

Estos condicionantes particularizados al proyecto son:

- 1- Se asume que el dedo índice (el habitual de los de la mano utilizado para desplazarse por el slider) de un usuario estándar tiene forma elíptica de 11 mm x 7 mm.
- 2- Es necesario que el área del dedo solape 1mm del electrodo para que haya suficiente información disponible (variación de la capacidad) con la que determinar la siguiente posición.
- 3- La separación máxima entre el cuerpo sólido y el puntal será de 2 mm

- 4- La posición más crítica es cuando el dedo está justo en el centro del cuerpo sólido, porque es en ella cuando se solapa mayor superficie de un único electrodo.

Por lo tanto, partiendo del centro de uno de los electrodos restan 5.5 mm de superficie del dedo en cada lado. Para llegar a solapar 1 mm del electrodo contiguo será necesario desplazar el dedo una distancia  $D = \frac{W_{\text{cuerpo sólido}} - \text{Semieje mayor del dedo}}{2}$  para que la parte más exterior del dedo llegue al extremo del electrodo actual que se está tocando, a los que hay que añadir 2 mm de espacio máximo entre ambos electrodos más el 1 mm necesario de solapamiento del dedo con el electrodo adyacente. Todo ello resulta en un desplazamiento  $D+3$  mm en los que no será posible determinar la posición porque o no se está solapando dos electrodos a la vez o bien no hay suficiente área solapada como para generar un destacable cambio en la capacitancia del electrodo contiguo.

Por lo que la inecuación que define el máximo ancho del cuerpo sólido es:

$$\frac{W_{\text{cuerpo sólido}}}{2} + d_{\text{maxelectrodos}} + I \leq R_D \rightarrow W_{\text{cuerpo sólido}} \leq 2 \cdot (R_D - d_{\text{maxelectrodos}} - I)$$

Dónde:

$W_{\text{cuerpo sólido}}$ : Ancho del cuerpo sólido

$d_{\text{maxelectrodos}}$ : Separación máxima entre los electrodos (puntal diente y cuerpo sólido)

$I$ : Entrada de solapamiento en el electrodo contiguo

$R_D$ : Semieje mayor de la elipse definida por el dedo al tocar la superficie

Y particularizado al proyecto,  $W_{\text{cuerpo sólido}} \leq 2 \cdot (5.5 - 2 - 1) \rightarrow W_{\text{cuerpo sólido}} \leq 5 \text{ mm}$

Para tener cierto margen, útil por ejemplo en caso de que el usuario ejerza una débil presión sobre la superficie durante el deslizamiento o bien que un usuario con una superficie menor a la calculada, se adopta un ancho de 4 mm.

#### Dentado lateral

Una vez determinado el ancho del cuerpo sólido, 4 mm, el ancho a cubrir por cada dentado lateral en cada electrodo deberá ser:

$$\begin{aligned} & W_{\text{Cubierto por electrodo lateral izquierdo}} + d_{\text{maxelectrodos}} + W_{\text{Cubierto por electrodo central 1}} \\ & + d_{\text{maxelectrodos}} + W_{\text{Cubierto por electrodo central 2}} + d_{\text{maxelectrodos}} \\ & + W_{\text{Cubierto por electrodo lateral derecho}} = L_{\text{área activa}} \rightarrow \\ \rightarrow & \left( \frac{1}{2} \cdot W_{\text{cuerpo sólido}} + W_{\text{dentado lateral}} \right) + d_{\text{maxelectrodos}} + \left( W_{\text{cuerpo sólido}} + W_{\text{dentado lateral}} \right) \\ & + d_{\text{maxelectrodos}} + \left( W_{\text{cuerpo sólido}} + W_{\text{dentado lateral}} \right) + d_{\text{maxelectrodos}} \\ & + \left( \frac{1}{2} \cdot W_{\text{cuerpo sólido}} \right) = L_{\text{área activa}} \rightarrow \\ \rightarrow & 3 \cdot W_{\text{cuerpo sólido}} + 3 \cdot W_{\text{dentado lateral}} + 3 \cdot d_{\text{maxelectrodos}} = L_{\text{área activa}} \rightarrow \\ \rightarrow & 3 \cdot 4 \text{ mm} + 3 \cdot W_{\text{dentado lateral}} + 3 \cdot 2 \text{ mm} = 61.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$W_{\text{dentado lateral}} = \frac{43.5}{3} = 14.5 \text{ mm}$$

El diseño del dentado lateral viene limitado/definido por la altura del área activa del slider, parámetro que condiciona el número de dientes a emplear.

El número de dientes de cada uno de ellos tiene que ser tal que se garantice que cuando el dedo del usuario se encuentra justo en el centro de uno de ellos no se produce dead-zone porque la separación entre dientes es tal que durante parte del deslizamiento desde el cuerpo sólido hasta el puntal del dentado el dedo queda circunscrito en el interior del electrodo, tal y como se puede ver en la ilustración 31. La posición más desfavorable en el desplazamiento del dedo es cuando el dedo se encuentra a media altura del diente ( $\frac{h}{2}$ ), porque si el diente es muy alto toda la superficie del dedo quedaría encapsulada dentro del diente durante parte del recorrido en el diente, tardando en solapar el electrodo contiguo por lo que se produciría dead-zone durante parte del desplazamiento.

- Si se emplean pocos dientes, mayor altitud tendrá cada uno, con lo que si la superficie activa longitudinal requerida es grande y el número de electrodos pequeño tendrá diferentes dead-zones en función de la posición del dedo respecto al eje vertical Y. Particularmente, en el área de unión entre el cuerpo sólido y el dentado.
- En cambio, un elevado número de dientes, garantizará la ausencia de dead-zones pero por el contrario la superficie será más reducida con la consiguiente reducción del C\_Touch.

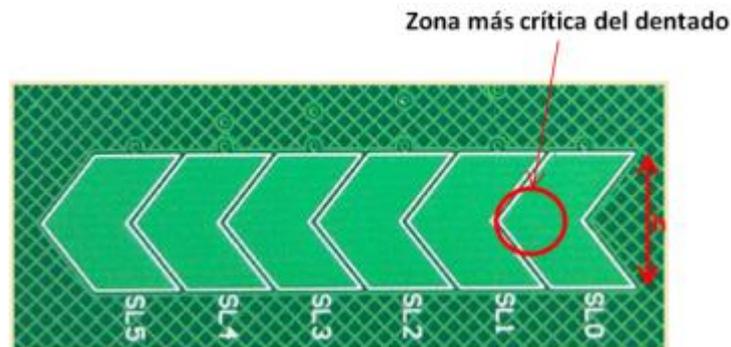


Ilustración 56: Captura de la zona potencial de dead-zone cuando el dedo se desliza por el centro del electrodo

Por lo tanto, dado que se considera las dimensiones de un dedo de una elipse de 11mmx7mm, cuando éste se encuentre centrado al inicio del dentado y a media altura de él ( $\frac{h}{2}$ ), el dedo deberá sobresalir por lo menos 1mm del electrodo para empezar a interactuar con el contiguo. En esta posición el dedo estará solapando 5.5 mm de los 14.5 mm del dentado lateral por lo que el dedo deberá sobresalir por arriba y abajo del diente del electrodo para empezar a solaparse con el contiguo. Por lo tanto la altura deberá de ser máximo  $h \leq$

*Semieje elipse dedo* –  $d_{electrodos} - I \rightarrow h \leq 7mm - 0.5mm - 1mm \rightarrow h \leq 5.5 mm$ . Se implementa una altura final de 4 mm para disponer de un pequeño margen que permite abarcar dedos algo más pequeños o deslizamientos bastante suaves sobre la superficie. El valor escogido está en el rango de valores que indica el fabricante ATMEL en su guía de diseño de sensores táctiles [7], en la que recomienda entre 4-6 mm por sección

De modo que para la altura de la superficie activa de 20.6 mm, cada dentado lateral estará formado por  $\frac{20.6}{4} = 5.15$  dientes.

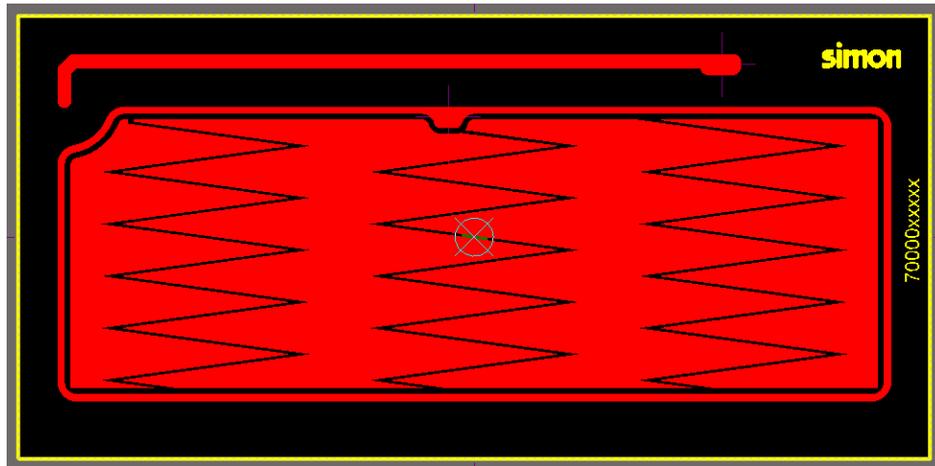


Ilustración 57: Diseño final en Altium Designer de los electrodos del slider Self atendiendo a los parámetros calculados

## CÁLCULOS DISEÑO SLIDER MUTUAL-CAPACITANCE [1], [3], [7]

### Ancho electrodos Y ( $Y_{width}$ )

El electrodo Y deberá usar una pista lo más fina posible (entre 0.1 mm y 0.5 mm) para los dedos, dado que ello permite minimizar la posibilidad de que el ruido se acople al sensor durante el touch, obteniéndose mejor SNR que si se usa un ancho dependiente del grosor del overlay (T).

### Ancho electrodos X ( $X_{width}$ )

Para los electrodos X, es mejor emplear dedos gruesos porque tienden a actuar como escudos parciales de las pistas Y, maximizando el acoplo de espacio libre. Su ancho debe ser calculado a partir del grosor del overlay, empleándose generalmente  $\frac{T}{2}$  mm. Además el ancho del electrodo X ( $W_{key}$ ) deberá estar comprendido entre los 6 mm y los 8 mm, para garantizar que no se producen dead-zones porque no hay dos electrodos interactuando simultáneamente con el dedo.

### Espacio entre electrodos

El espaciado entre los dedos del electrodo X y los del Y, es relativo al grosor del overlay y se recomienda mantenerlo a  $\frac{T}{2}$  mm. La razón se debe a que el acoplo entre el electrodo "exterior" X y el interior Y depende del espaciado entre estos electrodos. A mayor distancia más lejos se extenderá el campo, ahora bien si la distancia es excesiva se es más vulnerable a que se acople ruido, en cambio si la distancia es pequeña existe el riesgo de que el campo eléctrico generado no se extienda lo suficiente a través del overlay dificultando la detección de touch. La distancia de  $\frac{T}{2}$  mm permite una buena propagación hacia fuera del overlay del campo eléctrico entre X e Y.



Ilustración 58: Representación de las líneas del campo eléctrico entre dos electrodos RX y TX [3]

### Área de acoplamiento

El objetivo con el diseño interdigitated es optimizar la SNR maximizando el área de acoplamiento entre los electrodos X e Y dentro de los confines del espacio asignado para la key. El área de acoplamiento está determinada por la combinación del número de dedos X e Y, sus respectivos anchos y la separación entre ellos. Emplear varios dedos finos significa un área de acoplamiento más grande que si se emplean unos pocos y anchos dedos, resultando en una mejor SNR en la primera situación.

### Espaciado electrodos-GND

Los sensores Mutual es que como se mide la capacidad entre X e Y cualquier efecto parásito en X o Y afecta mínimamente a diferencia de los sensores tipo Self. Esto se traduce en la ventaja de poder ubicar planos de masa muy próximos a X, incluso por debajo de los  $\frac{T}{4}$  mm recomendados para entornos que requieran de gran inmunidad al ruido, blindando los electrodos sin causar un efecto peyorativo en la sensibilidad del

sensor. En cambio no se debe mantener una distancia inferior a la distancia entre X e Y para GND e Y en los sensores, dado que se produciría una desensibilización en el sensor.

*Cálculos electrodo X*

El slider es una sucesión de electrodos X que constan de una serie de dedos entrelazados cuyo número depende de la superficie del área activa (a cubrir por el sensor,  $L_{\text{área activa}}$ ), del ancho de los dedos de X e Y. Además su número deberá ser tal que los bordes de los extremos laterales tengan un ancho  $\geq T$  mm que asegure que el campo no se propaga más allá de la superficie deseada. Las ecuaciones que definen el número de dedos por slider ( $X_{\text{fingers slider}}$ ), por key interior ( $X_{\text{key interior}}$ ) y lateral ( $X_{\text{key lateral}}$ ) y el ancho de los bordes ( $W_{\text{border}}$ ) son:

$$X_{\text{fingers slider}} = \left\lfloor \frac{L_{\text{área activa}} - 3 \cdot T - Y_{\text{width}}}{1.5 \cdot T + Y_{\text{width}}} \right\rfloor$$

$$X_{\text{Key interior}} = \frac{(X_{\text{fingers slider}} + 2)}{\text{keys}} \qquad X_{\text{Key lateral}} = X_{\text{Key interior}} - 1 = \frac{(X_{\text{fingers slider}} + 2)}{\text{keys}} - 1$$

$$W_{\text{border}} = \frac{L_{\text{área activa}} - X_{\text{fingers}} \cdot (1.5 \cdot T + Y_{\text{width}}) - T - Y_{\text{width}}}{2} \rightarrow W_{\text{border}} \geq T$$

$$W_{\text{key}} = \left( \frac{(X_{\text{fingers}} + 2)}{\text{keys}} \cdot (1.5 \cdot T + Y_{\text{width}}) - Y_{\text{width}} \right) \rightarrow 6\text{mm} < W_{\text{key}} < 8\text{mm}$$

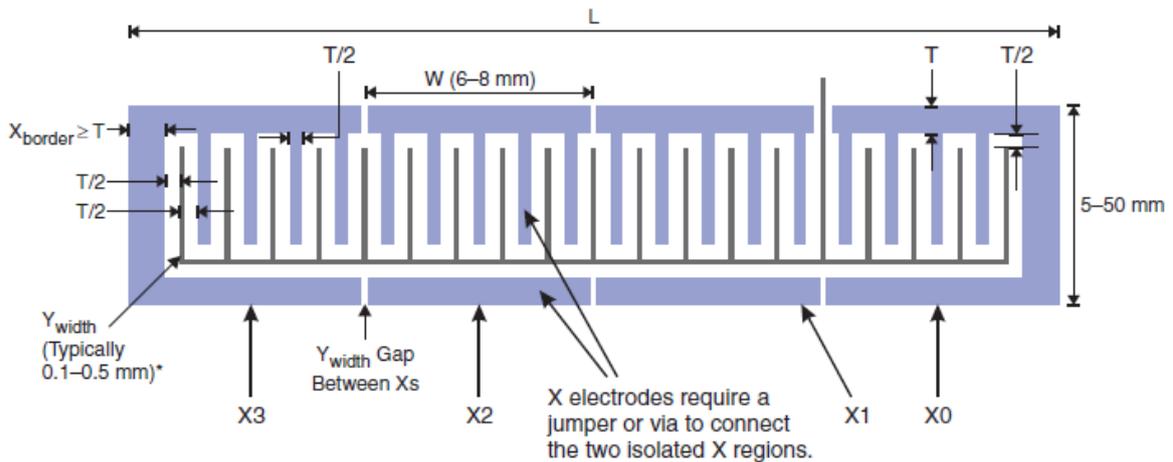


Ilustración 59: Representación del dimensionado en el slider mutual capacitance interlocking fingers [7]

*Diseño y modificaciones con Altium Designer*

Para proceder al cálculo de todos estos parámetros de diseño analizados se parte de las especificaciones del proyecto de área activa 61.5mm x 20.6mm y grosor del overlay T=1.9mm:

Área activa restante= Longitud activa x altura activo=61.5mm x 20.6mm

Dónde:

- Longitud activa ( $L_{efectivo}$ ) =  $L_{disponible} - 2 \cdot (W_{anillo} + d_{electrodos-GND}) = 63.5 \text{ mm} - 2 \cdot (0.5 \text{ mm} + 0.5 \text{ mm}) = 61.5 \text{ mm}$
- Altura activa ( $H_{efectivo}$ ) =  $H_{disponible} - 2 \cdot (W_{anillo} + d_{electrodos-GND}) = 22.6 \text{ mm} - 2 \cdot (0.5 + 0.5) \text{ mm} = 20.6 \text{ mm}$

Se decide usar un ancho de las pistas del electrodo Y ( $Y_{width}$ ), de 0.2 mm, atendiendo a la recomendación de Atmel de emplear un ancho lo más fino posible.

Previamente a calcular el número de dedos  $X_{fingers}$ , es necesario determinar el número de keys a emplear. A la hora de establecer el número de keys se debe tener en cuenta:

- 1- Este tipo de sliders es idóneo para sensores con una longitud de entre n x 6 mm y nx8mm siendo n el número de keys. Partiendo de que hay que cubrir 61.5 mm, se deberá emplear 8 o más keys.
- 2- Dado que cada electrodo X de cada key está conectado a un único canal táctil, y que la limitación del periférico PTC para sliders mutual-capacitance es de 8 combinaciones X-Y táctiles, el máximo número de keys es de 8.

De modo que para cubrir los 61.5 mm se necesitan 8 o más keys, quedando finalmente sólo 8 por la limitación de canales táctiles para el slider del PTC.

Con todos estos parámetros establecidos se calcula el número de dedos del slider ( $X_{fingers slider}$ ), a partir de la ecuación:

$$X_{fingers slider} = \left\lfloor \frac{L_{\text{área activa}} - 3 \cdot T - Y_{width}}{1.5 \cdot T + Y_{width}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{61.5 \text{ mm} - 3 \cdot 1.9 \text{ mm} - 0.2 \text{ mm}}{1.5 \cdot 1.9 \text{ mm} + 0.2 \text{ mm}} \right\rfloor = \lfloor 18.23 \rfloor = 18$$

Se comprueba que el ancho de cada key,  $W_{key}$ , esté comprendido entre los 6 y 8mm:

$$W_{key} = \left( \frac{(X_{fingers} + 2)}{keys} \cdot (1.5 \cdot T + Y_{width}) - Y_{width} \right) = \left( \frac{(18+2)}{8} \cdot (1.5 \cdot 1.9 \text{ mm} + 0.2 \text{ mm}) - 0.2 \text{ mm} \right) = 7.425 \text{ mm}$$

Se calcula donde se producen los espaciados entre las keys, calculando el número de dedos que le corresponden a cada key. Para las keys interiores será  $X_{Key interior} = \frac{(X_{fingers slider} + 2)}{keys} =$

$$\frac{(18+2)}{8} = 2.5 \text{ dedos mientras que están en las de los laterales será } X_{Key \text{ lateral}} = X_{Key \text{ interior}} - 1 = \frac{(X_{fingers \text{ slider}} + 2)}{keys} - 1 = \frac{(18+2)}{8} - 1 = 2.5 - 1 = 1.5 \text{ dedos.}$$

Finalmente, se calcula el ancho de los bordes ( $W_{border}$ ) de los electrodos exteriores:

$$W_{border} = \frac{61.5 \text{ mm} - 18 \cdot (1.5 \cdot 1.9 \text{ mm} + 0.2 \text{ mm}) - 1.9 \text{ mm} - 0.2 \text{ mm}}{2} = 2.25 \text{ mm} \quad W_{border} \geq T \checkmark$$

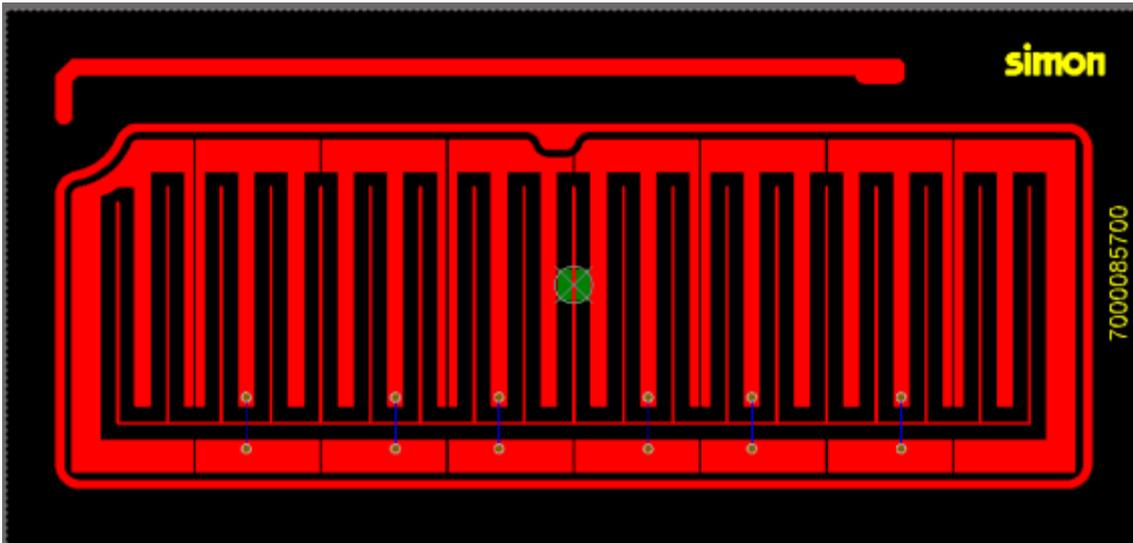


Ilustración 60: Diseño en el Altium Designer del slider Mutua de acuerdo a los parámetros calculados

## MODIFICACIONES PLACA PCB

A continuación se detallan todas las modificaciones realizadas en la placa PCB de la tecla dimmer actual para implementar el nuevo MCU, el SAMD20G16A, así como para mejorar la robustez al ruido mediante la aplicación de las buenas pautas de diseño PCB en aplicaciones táctiles.

### Power Supply

En ambas versiones se reorganiza y modifica la alimentación de la tecla para filtrar la alimentación externa suministrada por el back (Vcc), separar las alimentaciones del dominio analógico de las del digital y reforzar la prevención de que el ruido generado por el módulo ZWAVE se acople al dominio de la alimentación analógica del MCU. Para ello:

- 1- Se colocan condensadores de desacoplo de 100 nF en todos los pines de alimentación del MCU, y se mantienen los del resto de CI que ya había en la tecla AUREA inicial.
- 2- Se separa la alimentación analógica del MCU (VDDANA GNDANA) de la digital (VDDIO) mediante la adición de un núcleo de ferrita, el 742792096 de WÜRTH ELEKTRONIK con una impedancia de 1 k $\Omega$  a 100 MHz, en cada una, L2 y L3.
- 3- Se añade un condensador de 22  $\mu$ F a la alimentación analógica y a la digital formando un filtro paso bajo adicional, C18 y C30 respectivamente
- 4- Se modifica la toma de conexión de la alimentación para el ZWAVE, de modo que en lugar de ser la misma que la del MCU aunque posteriormente filtrada mediante un filtro en pi, se coge directamente la procedente del Back. Así se refuerza la prevención de que el ruido procedente del módulo ZWAVE se acople al dominio de la alimentación analógica del MCU.
- 5- Por recomendación de Atmel<sup>[13]</sup> se añade un condensador de desacoplo de 1  $\mu$ F (C27) en el pin correspondiente al regulador de tensión interno (1.2 V) del que dispone el SAMD20G16

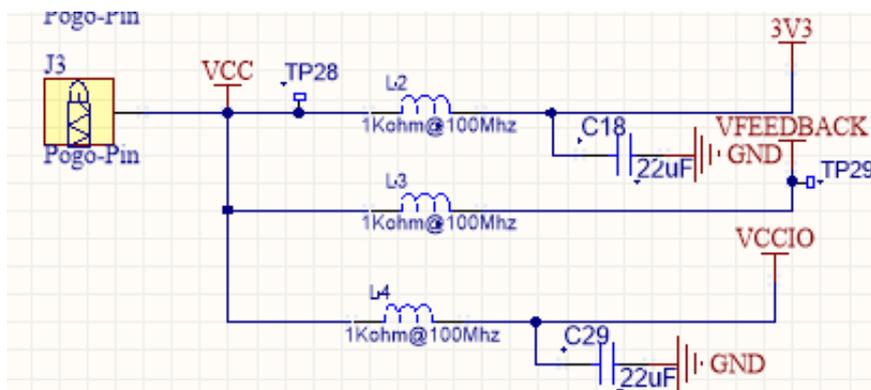


Ilustración 61: Esquema con la reorganización y modificación de la estructura del Power Supply

### Resistencias serie pistas capacitivas

Con el objetivo de reducir el nivel de ruido en la señal de adquisición táctil se añade un filtro paso bajo mediante la adición de una resistencia en serie a 0.5 mm del MCU.

Aunque el periférico táctil PTC incorpora una resistencia interna configurable en cada pin de sensado para la versión Self se emplea una resistencia externa en lugar de una interna siguiendo la recomendación de Atmel, de 220 k $\Omega$  (R19, R20 y R21) mientras que en la mutual se implementa una combinación de una externa de 1 k $\Omega$  (R25  $\rightarrow$  R31) para protección contra descargas electrostáticas con una interna de 100 k $\Omega$ .

### Protección contra Reset no intencionado

En el pin de RESET del MCU se mantiene el filtro RC formado por una resistencia de pull-up de 4.7 k $\Omega$  y un condensador de filtrado de 100 nF para garantizar que en entornos ruidosos no se produce un reset no intencionado.

Además se añade una resistencia de pull-up de 1 k $\Omega$  (R22) en la línea de clock de la interfaz de programación Serial Wire Debug (SWD)

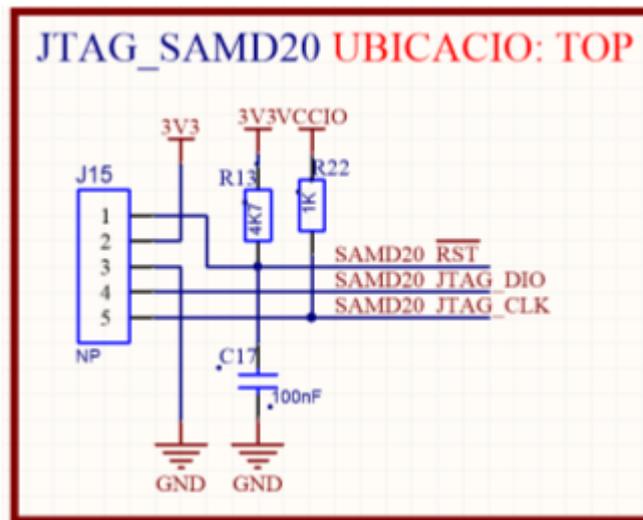


Ilustración 62: Filtro RC y resistencia de pull-up para protección de la señal de Reset y de clock para la programación vía SWD del SAMD20G

### Selección pines capacitivos

#### Versión Self

Para implementar el slider Self diseñado se requieren de 3 canales táctiles de tipo Y, de los cuales el fabricante Atmel recomienda no emplear para aplicaciones robustas al ruido los Y[0] e Y[2] por tener mayor capacidad parásita que las otras líneas Y. El uso de estos pines obliga a tener que emplear un mayor prescalado del clock del PTC para garantizar la completa medida del sensor, esto aumenta el tiempo de respuesta del sistema que en entornos normales no conlleva un deterioro de la performance pero en entornos de ruido extremo en los que es necesario emplear medidas adicionales que también afectan a la respuesta del sistema provocaría una degradación de la aplicación táctil. Además, los pines escogidos deberán permitir trazar pistas lo más cortas posibles hasta los flejes y mantenerse idealmente a 4 mm de otras pistas digitales. Como los electrodos laterales forman parte de un mismo canal será necesario 4 flejes dispuestos longitudinalmente a lo largo de la placa y aproximadamente equidistantes. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones se escoge el pin Y[9] para el canal 0, el Y[0] para el 1 y el Y[8] para el canal 2 del slider.



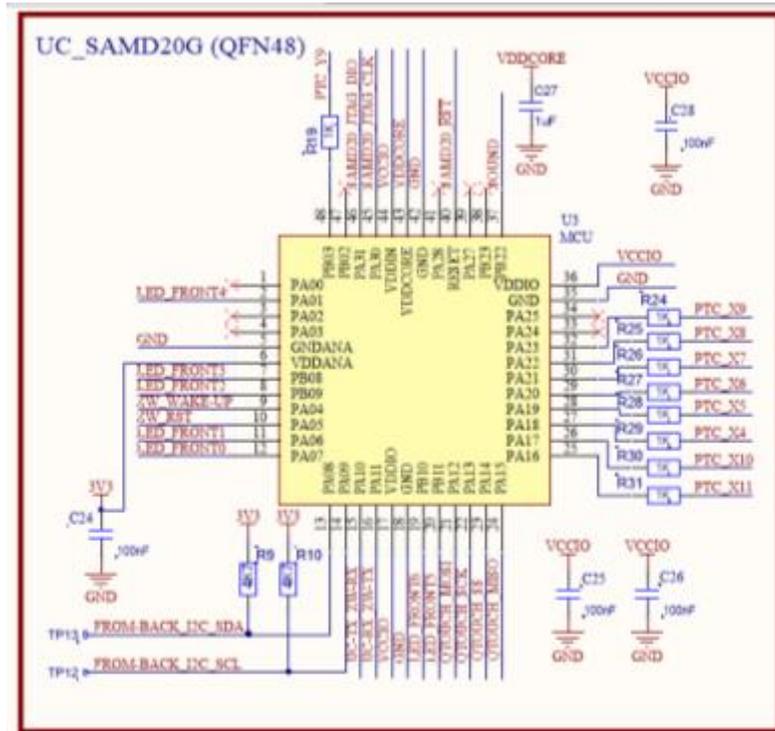


Ilustración 64: Esquema del MCU SAMD20G con sus correspondientes señales en la versión Mutual con resistencias en serie de 1 kΩ en las pistas de sensado capacitivo

*Incorporación interfaz monitorización señales touch*

Para analizar las señales táctiles, y facilitar el ajuste de los parámetros touch así como de las medidas contra el ruido que incorpora el periférico PTC vía software, se establece una interfaz de comunicación, Serial Peripheral Interface (SPI), entre la tecla AUREA desarrollada y el PC

En esta versión de la tecla es necesario establecer una interfaz de comunicación para la monitorización de las señales Touch para su análisis y posterior ajuste de los parámetros táctiles y de las medidas contra el ruido que ofrece el periférico PTC vía software. Esta monitorización se realiza con el aplicativo QTouch Analyzer que integra el entorno de desarrollo de Atmel (Atmel Studio) [14]. La comunicación entre la aplicación táctil desarrollada (tecla AUREA) y el QTouch Analyzer se realiza mediante un tercer elemento el Embedded Debugger (EDBG) [16]. Entre el EDBG y la tecla AUREA se debe de implementar una comunicación Serial Peripheral Interface (SPI), con las líneas MOSI (Master-input Slave-Output), MISO (Master-output Slave-Input), RST (Reset) y SS (Slave Select).

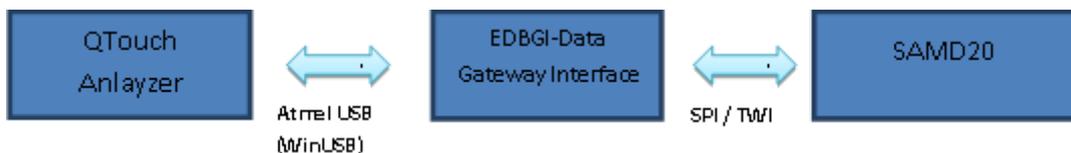


Ilustración 65: Diagrama de las distintas interfaces de comunicación para la monitorización de las señales táctiles entre el SAMD20G implementado en la tecla y el QTouch Analyzer [14]

De los pines restantes disponibles, una vez asignados todos los necesarios para garantizar la misma funcionalidad de la tecla AUREA Inicial y que cuenten con interfaz de comunicación se escogen los del 21 al 24 (SERCOM4[0]...[4]):

Tabla 5: Asignación de la señal SPI para la monitorización QTouch Analyzer

Pin MCU	Funcionalidad del puerto	Asignación señal SPI
21	PA12/I2C_SDA/SERCOM4[0]-UART-TX	SPI_Qtouch_Analyzer-MOSI
22	PA13/I2C_SCL/SERCOM4[1]-UART-RX	SPI_Qtouch_Analyzer-SCK
23	PA14/SERCOM4[2]-UART-TX	SPI_Qtouch_Analyzer-SS
24	PA15/SERCOM4[3]-UART-RX	SPI_Qtouch_Analyzer-MISO

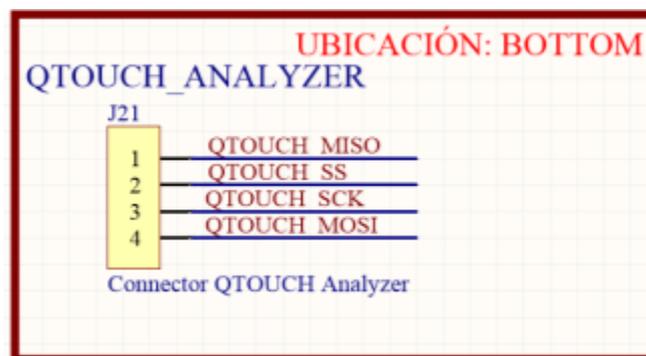


Ilustración 66: Esquema del conector y de las señales SPI para la monitorización del QTouch\_Analyzer

En la parte inferior izquierda de la cara Bottom de la tecla se colocan 4 pads conectados a cada uno de estos pines para así facilitar su conexión con el EDBG mediante un pequeño adaptador dotado con un aislador digital (TI ISO 7131), que permita la monitorización durante los ensayos de inmunidad conducida a 10V.

#### Posición Flejes capacitivos

Los flejes deben ser colocados teniendo en cuenta que se garantice su contacto con la superficie de los electrodos correspondientes y que se encuentren lo más alejado posible de otras pistas. Como en la mitad inferior de la tecla AUREA se encuentran la mayoría de las pistas, porque el MCU se encuentra en esa zona, se decide disponer los flejes en la mitad superior.

Para la ubicación exacta de los flejes a lo largo de la mitad superior se superpone en el Altium Designer la capa correspondiente a los electrodos diseñados a la PCB de la tecla y se delimita las zonas en las que debe de colocarse cada uno de los flejes. Una vez establecida la zona se procede a encontrar la posición ideal que permita mantener una distancia lo más alejada posible de otras pistas.

La versión Self por la tipología del slider empleado permite un elevado grado de libertad. Siguiendo las pautas del departamento de mecánica de Simontech se colocan los flejes horizontalmente por ser la posición en la que se minimiza el riesgo de deformación durante la inserción de la PCA en el esqueleto plástico de la tecla. Para colocar el fleje J17 se modificó el rutado de varias pistas y se desplazó el test point 11 alejándolo hasta los 2.1 mm, el máximo posible.

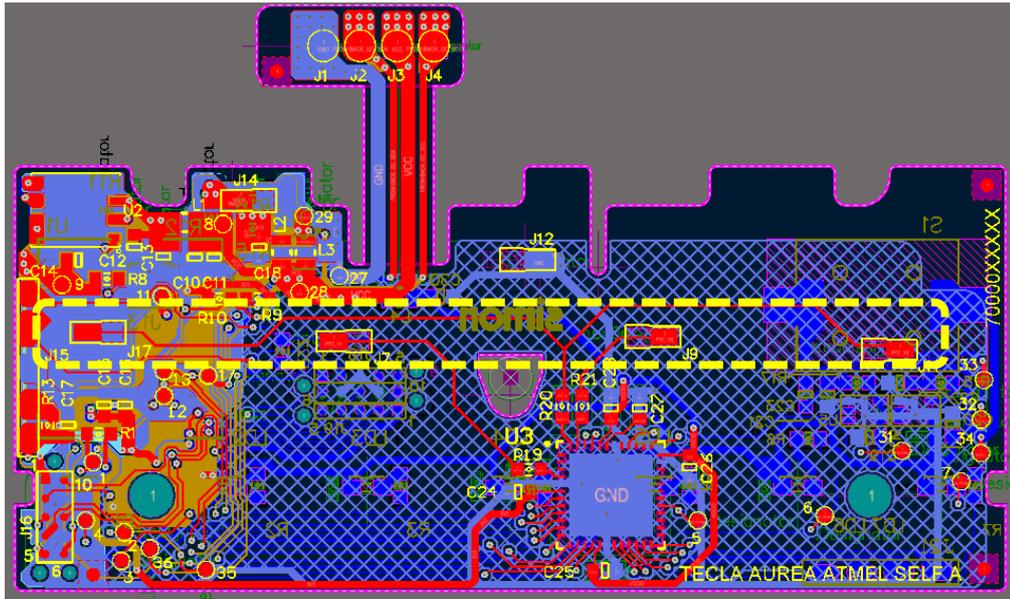


Ilustración 67: Vista de la PCB de la versión *Self* desarrollado resaltando la nueva posición de los 4 flejes para el contacto capacitivo

En la versión *Mutual* la colocación de los flejes de contacto está muy restringida dado que el área de contacto son los fingers de los electrodos X de apenas 1 mm de ancho y de 0.95 mm para el Y. La elección de la ubicación del fleje de la línea Y (J20) en la mitad inferior izquierda se debe a que es la que permite el enrutado más corto de la pista, manteniendo una distancia de más de 4 mm con las pistas capacitivas X, alejada de pistas digitales y con suficiente espacio para su colocación. Por otro lado, todos los flejes están con orientación vertical porque es la única que garantiza que en el ensamblado de la PCA en el esqueleto de la tecla y de los electrodos, el desplazamiento que experimenta la punta del fleje a causa de la presión, no haga que contacte o con los fingers del electrodo Y fuera del electrodo correspondiente.

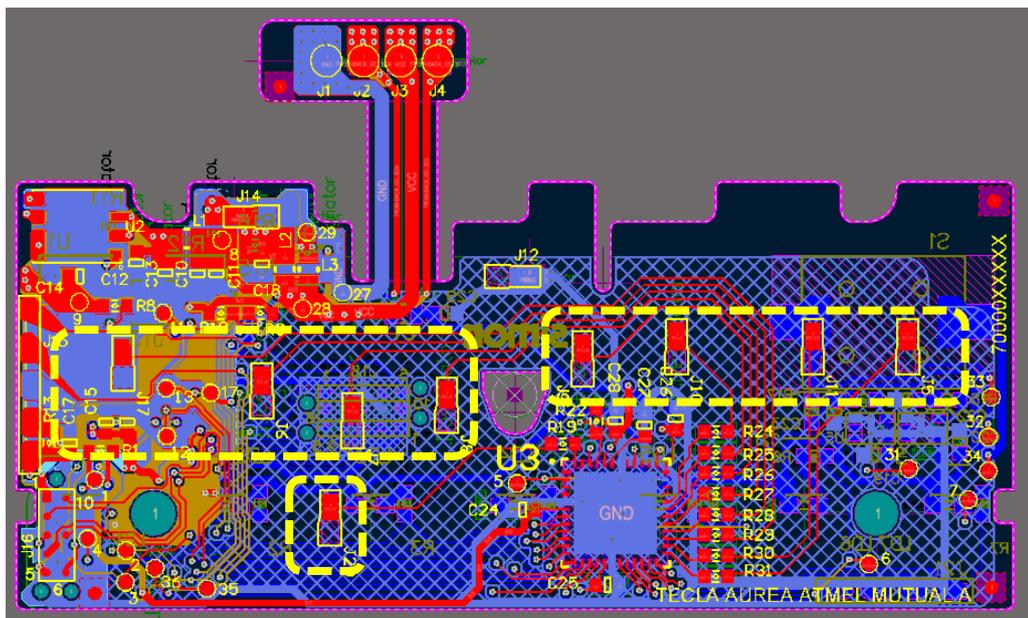


Ilustración 68: Vista de la PCB de la versión *Mutual* desarrollada con la nueva posición para los 9 flejes del contacto capacitivo

### Plano de masa

En la tecla original AUREA, hay un plano de masa situado a 0.54 mm de la cara TOP, que es en la que tiene lugar el rutado de las pistas capacitivas, y a 1.54 mm de los electrodos.

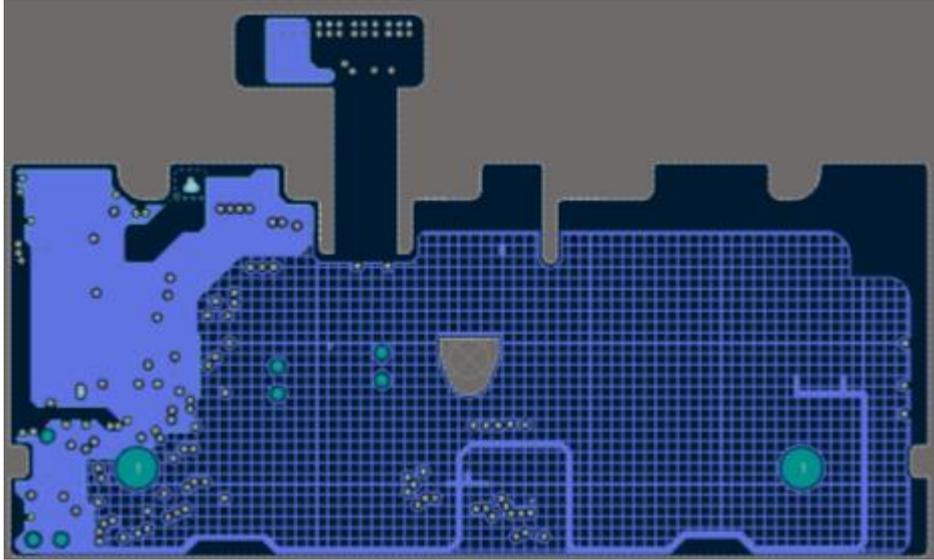


Ilustración 69: Vista del plano de masa implementado en la PCB de la actual tecla dimmer

Se mantiene la posición del plano de masa respecto al eje vertical de la placa PCB en los 0.54 mm, porque cumple con la recomendación de mantener una distancia  $\frac{1}{4}$  el grosor del overlay entre las pistas y el plano de masa en diseños de robustez al ruido. Pero se amplía la parte que es de tipo sólido, cubriendo más y dejando un margen en la parte en la que se encuentra el módulo transceiver ZWAVE dado que es la zona con elementos más ruidosos.

Además se modifica el plano de masa mesh de 90° por uno de 45° por su mayor efectividad en la protección contra el ruido de las pistas capacitivas.

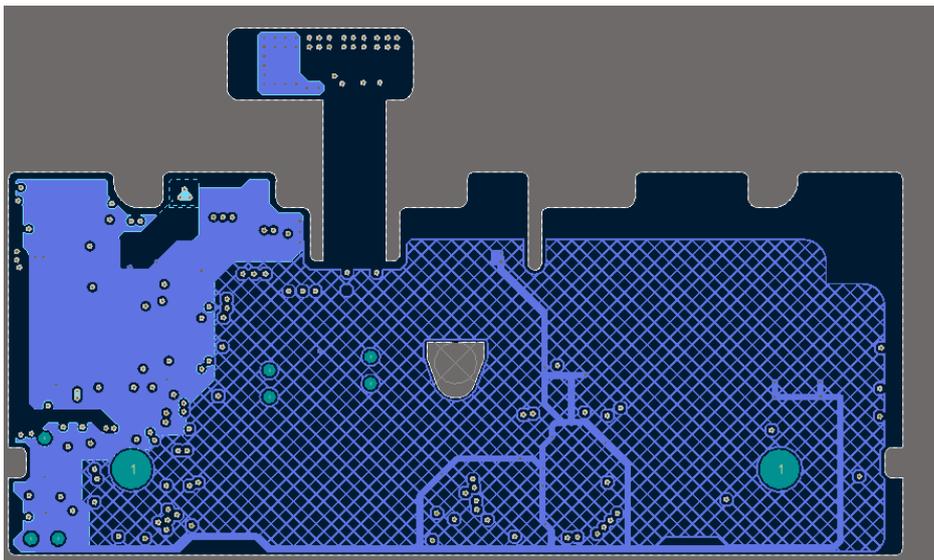
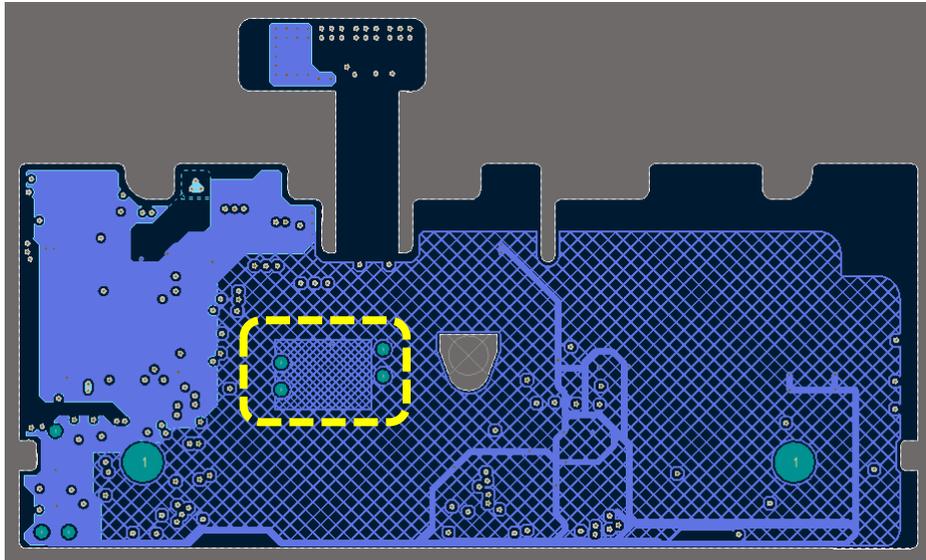


Ilustración 70: Vista del plano de masa en la PCB de la versión Self de la nueva tecla dimmer

Por otro lado en la versión mutua, el fleje J7 se debe colocar justo encima de una disposición de pads conectados a pistas digitales de comunicación entre el MCU y el módulo ZWAVE, con lo que dada la imposibilidad de reubicar el fleje se aumenta la densidad del plano de masa en

el entorno de todo esa zona desde el 20% actual hasta el 50%, con el objetivo de blindar ese canal capacitivo que por su proximidad será más vulnerable a las interferencias.

Llevando a cabo la recomendación de mantener una distancia  $\frac{1}{4}$  el grosor del overlay entre las pistas y el plano de masa en diseños de robustez al ruido.



*Ilustración 71: Vista del nuevo plano de masa implementado en la PCB de la versión Mutua de la tecla dimmer, resaltando la mayor densidad en la zona del fleje J7*

Una vez diseñadas ambas PCBs se procede a realizar el panelado de las teclas Self y Mutua en Altium Designer para su posterior fabricación por el fabricante LAB-Circuits:

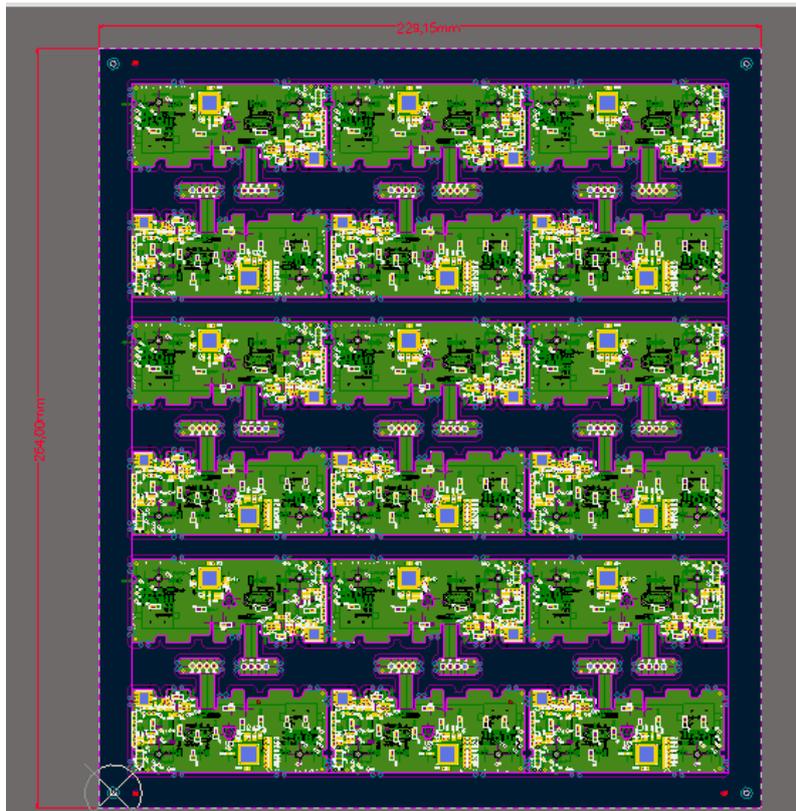


Ilustración 72: Vista del panelado con las teclas Self y Mutual combinadas en el mismo

Finalmente se ensambla cada versión en acabados distintos para facilitar su diferenciación: blanco para la versión Self y negro para la Mutual, realizando manualmente la adaptación de cada esqueleto plástico y el ensamblaje de los electrodos.

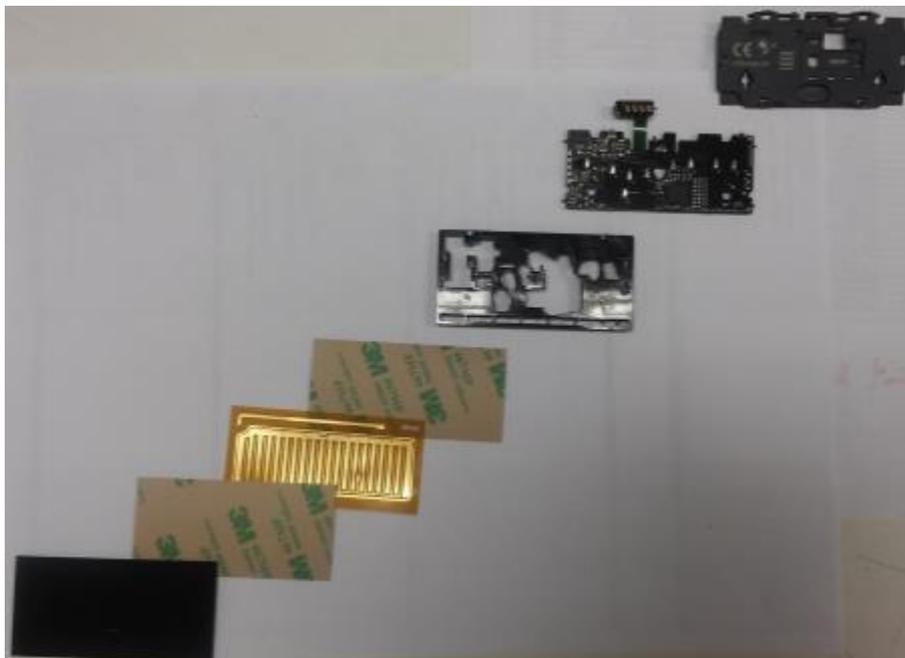


Ilustración 73: Despiece de la tecla dimmer AUREA versión Mutual en disposición de ensamblado. En orden ascendente: Acabado oscuro de PMMA, Adhesivo 3M, lámina poliamida con el slider mutual, adhesivo 3M, esqueleto plástico, PCA y tapa de plástico anterior.



*Ilustración 74: Despiece de la tecla dimmer AUREA versión Self (Izq.) y Mutua (Der.) en disposición de ensamblado. En orden ascendente: Acabado PMMA, Adhesivo 3M, lámina poliamida con el slider correspondiente, adhesivo 3M, esqueleto plástico, PCA y tapa de plástico anterior.*

## Anexo 5

### ANÁLISIS PARÁMETROS TÁCTILES IMPLEMENTADOS

A continuación se comenta la parte del código correspondiente al periférico PTC con la configuración del slider y los parámetros de adquisición. La cual será completamente distinta en cada una de las dos versiones, Self y Mutual.

#### *Versión Mutual*

El slider Mutual está formada por 8 canales táctiles X (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11) en combinación con uno de táctil Y, el Y(9). Estas combinaciones X-Y son escaneadas de modo secuencial ordenadamente de izquierda a derecha [ X(6)Y(9), X(7)Y(9), X(8)Y(9), X(9)Y(9), X(10)Y(9), X(11)Y(9), X(5)Y(9), X(4)Y(9)], dado que el algoritmo del slider de la librería QTouch calcula la posición siguiendo la disposición secuencial de escaneo de los canales. Y la resolución del slider se establece en las 127 posiciones (7 bits) que son escaladas en la aplicación para obtener una regulación de la carga de 100 puntos.

A diferencia de los sensores Self, en los Mutual las capacidades parásitas, especialmente las debidas a la proximidad con GND afectan mínimamente con lo que se puede emplear una frecuencia para el clock del PTC más elevada. Con un prescalado de 1, y en consiguiente una frecuencia de 4MHz se garantiza la carga completa en la adquisición de resultados estables y repetibles, aun empleando una resistencia en serie interna de 100kΩ la cual incrementa la constante de carga del sensor.

Se escala la delta asociada al touch por un factor de 2 para hacer más sensible el slider, facilitando suaves deslizamientos en el slider y ampliando la superficie táctil un poco más allá de donde hay sensor estrictamente, concretamente facilitando algo de detección en la zona en la que se encuentra el feedback luminoso. En la tecla AUREA actual se carece totalmente de respuesta táctil en esa zona porque no hay sensor.

Se establece un Detect Threshold de 18 y un Detect Integration (DI) de 3, de modo que la señal deberá incrementarse en 18 puntos respecto al nivel de referencia para calificar esa variación en la señal como una potencial detección touch y permanecer por encima de ese umbral durante 3 muestras consecutivas para declararse finalmente el touch.

Para reducir la escala del ruido combinado con la señal de adquisición se implementa un filtro paso bajo mediante la combinación de la capacitancia del sensor con la una resistencia en serie interna de 100kΩ, la máxima que ofrece el PTC pero suficiente.

Una vez que se mediante el filtro paso bajo se previene que una amplitud del ruido excesiva combinada con la señal de adquisición provoque que los componentes del PTC experimenten saturación en la medida se establece un filtro de nivel 64, el máximo permitido por la librería QTouch, con lo que para resolver cada adquisición se repite la medida del cada canal capacitivo 64 veces, obteniendo una mejor SNR en entornos ruidosos. Por otro lado no es necesario realizar más medidas adicionales por canal mediante la característica "Auto-Oversamples" cuando hay cierta inestabilidad en la señal con lo que se limita el aumento del tiempo de respuesta del sistema.

Todos estos parámetro anteriores (DI, resistencia interna en serie y nivel 64 del filtro) contribuyen a minimizar el efecto del ruido combinado con la señal de adquisición, ahora bien si el ruido incluye un componente de frecuencia que está relacionado con la frecuencia de adquisición de medición de capacitancia PTC, ninguna cantidad de sobremuestreo asociado al nivel del filtro promediará los efectos de ruido. Por lo que para eliminar o minimizarlos es necesario cambiar la frecuencia de adquisición. Así que se implementa el modo de operación FREQ\_MODE\_HOP estableciendo manualmente las 3 frecuencias,

esta combinación de frecuencias separadas permite obtener un mejor rechazo al ruido. Adicionalmente se hace uso de la funcionalidad avanzada `Frequency_Auto_Tune` ajustada de tal modo que cuando una frecuencia experimente una variación en la señal de 8 puntos a lo largo de 8 adquisiciones consecutivas reemplaza dinámicamente las frecuencias más ruidosas seleccionando aquellas con la mejor SNR.

La monitorización del slider cuando se encuentra en condiciones normales, sin estar sometido al ensayo de Inmunidad Conducida de 10V, muestra un sensor muy estable en la adquisición de las medidas, al observarse una oscilación máxima de la señal es de 1 punto, y con nula afectación de las interferencias de los componentes de la tecla así como del back.

### *Versión Self*

El slider Self está formada por 3 canales táctiles Y, los cuales son escaneados de modo secuencial ordenadamente de izquierda a derecha, Y(9),Y(1),Y(8). Del mismo modo también se mantiene una resolución de 7 bits (127 posiciones posteriormente escaladas a 100 puntos).

Esta versión a diferencia de la mutual presenta una elevada capacidad parásita, la asociada a la del sensor consecuencia del plano de masa de la PCB de la tecla, al anillo de guarda alrededor del slider y al hecho de que los electrodos adyacentes que no son escaneados activamente son conducidos a GND. Esta elevada capacidad parásita obliga a:

- 1- Reducir la frecuencia del clock del PTC un factor de 8, quedando establecida en los 500 kHz para garantizar la carga completa en cada muestra de adquisición obteniendo resultados estables y repetibles. De lo contrario el valor del delta asociado al touch no es que corresponde y hace imposible la determinación de la posición. Además el empleo de la resistencia en serie externa de 220 k $\Omega$  en las líneas capacitivas también influye en el incremento en la constante de carga del sensor.
- 2- Escalar la delta asociada al touch por un factor de 4 para incrementar la sensibilidad, la cual se ve mermada por la elevada capacidad parásita.

A diferencia del slider Self, la monitorización de los canales táctiles muestra mucha inestabilidad en la adquisición de las medidas cuando se encuentra en condiciones normales de operación, sin estar sometido al ensayo de Inmunidad Conducida de 10V. Se observan oscilaciones máximas de la señal de hasta 18 puntos, en lugar de los 2-3 puntos que suele ser la variación habitual deseable en las medidas en entornos estables. Las oscilaciones máximas de 18 puntos observadas son el canal 0 el cual se corresponde con el canal de los endpoints del slider. Esto es consecuencia del hecho de que la pista que une ambos endpoints se encuentra localizada en la PCB y recorre toda ella de punta a punta siendo vulnerable a interferencias y a mayores capacidades parasitas.

Con oscilaciones tan elevadas, se producirán falsas detecciones en entornos ruidosos. Por lo que se hace necesario establecer parámetros de ajuste más exigentes que en la versión Self. Para ello se establece un Detect Threshold de 25 con un Detect Integration de 6 con el que limitamos las opciones de que la inestabilidad genere falsas detecciones en entornos normales de operación, y para reducir la oscilación de las señales cuando no hay touch se selecciona una resistencia en serie interna para cada canal de 100 k $\Omega$  adicional a

la de 220 kΩ externa. Con este filtro paso bajo se consigue reducir las oscilaciones hasta un máximo de 5 puntos.

Igual que en la versión Self, se fija un filtro de nivel 64, el máximo permitido para resolver cada adquisición Y se decide no activar la funcionalidad de Auto-Oversamples cuando hay inestabilidad porque ahora estas oscilaciones no son lo suficientemente elevadas como para justificar su uso que lleva apareado una pérdida de performance al aumentar considerablemente el tiempo de respuesta del sistema.

También se implementa el modo de operación `FREQ_MODE_HOP` estableciendo manualmente las tres frecuencias de adquisición junto con el uso de la funcionalidad avanzada `Frequency_Auto_Tune` ajustada a una señal inestable de 8 puntos a lo largo de 8 adquisiciones consecutivas. Para eliminar/minimizar la afectación del ruido en la adquisición cuando éste se encuentre cerca de la frecuencia de medición.

## Anexo 6

### ENSAYOS INMUNIDAD CONDUcida 3 V y 10 V

Para el ensayo de a 3 V en primer lugar se realizó el barrido frecuencial desde los 150 kHz hasta los 80 MHz completo sin interactuar con el slider y una vez realizado se repitió pero deslizando el dedo por el slider a lo largo de toda ella con especial atención en la zona desde los 150 kHz hasta los 10 MHz. Los parámetros táctiles utilizados son los indicados en el anexo 6 para la versión mutual y Self, a excepción del nivel de filtro que para esta prueba se estableció en 32. La primera versión en ser testeada es la mutual, por ser la que muestra en condiciones normales una mayor estabilidad, y luego la Self.

Estos ensayos, tanto operados como sin operar para ambas versiones (Self y mutual) son favorables. En ningún momento se produce falsa detección en el que no es operado, y se detecta correctamente la posición del usuario en el slider cuando se realiza operadamente, mostrándose los leds del Feedback luminoso correspondientes.

El Mutual a lo largo de toda la prueba no operada presenta una estabilidad mayor que la del Self, dado que sus oscilaciones máximas eran de 4 puntos, y para el Self de 8 puntos.

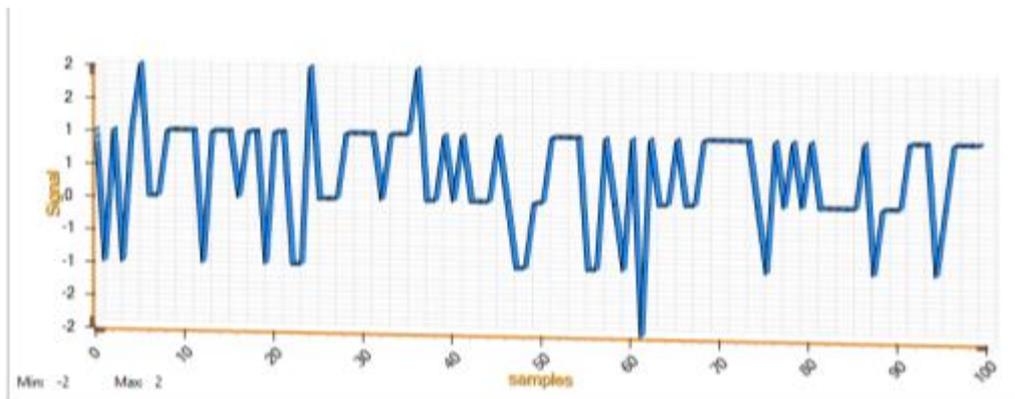


Ilustración 75: Captura de la máxima oscilación del delta de la señal observada en el slider Mutual a lo largo del ensayo de 3V sin touch

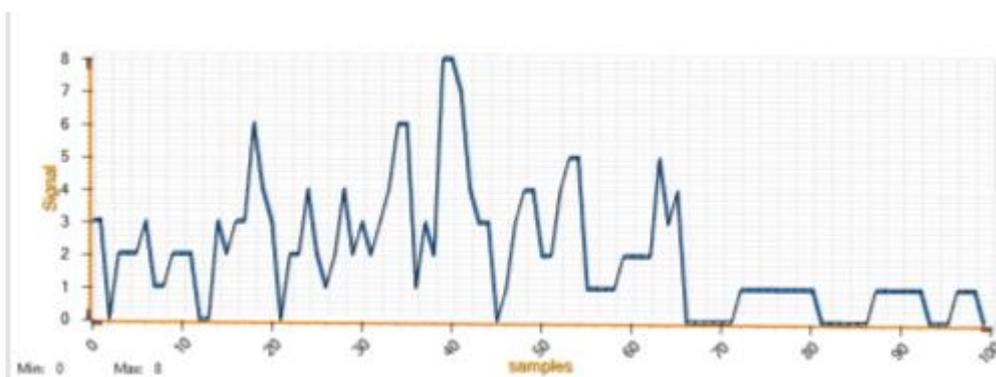


Ilustración 76: Captura de la máxima oscilación en el delta de la señal del slider Self durante el ensayo de 3V en ausencia de touch

Con el ensayo de IC a 10 V se procede del mismo modo, primero se realiza uno completo sin operar y luego operado, aunque éste último no lo exige la norma, siendo primero testeada la versión mutual y posteriormente la Self.

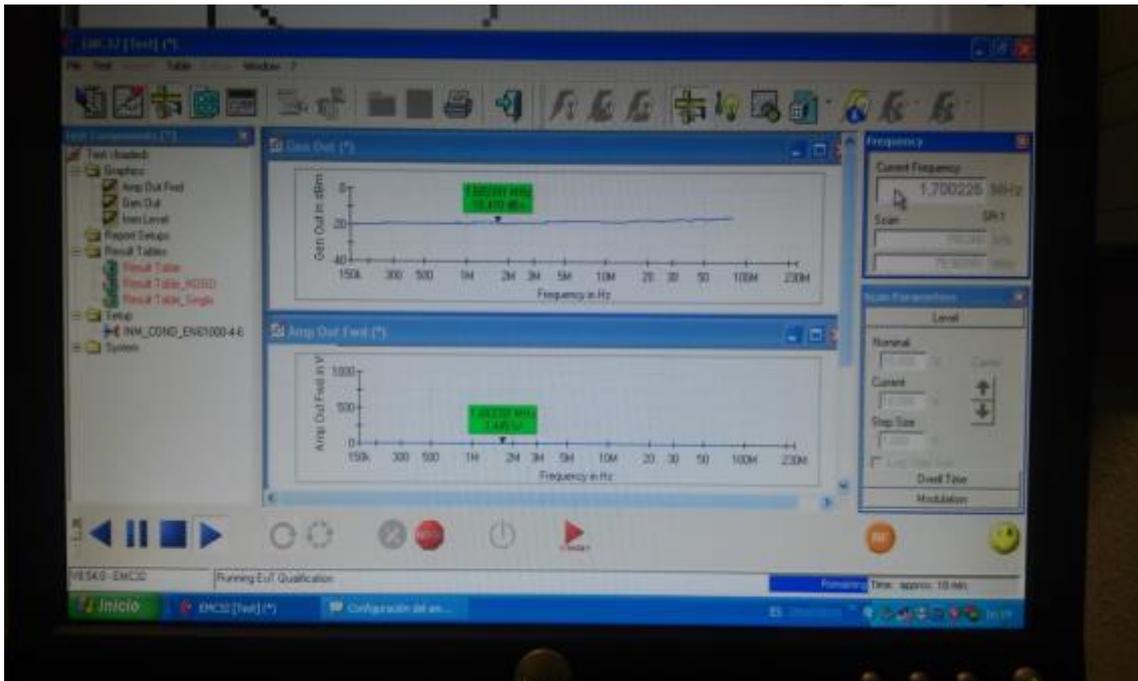


Ilustración 77: Captura del programa EMC32 utilizado para la realización de la prueba de inmunidad Conductida a 10 V

En los primeros ensayos se utilizan los mismos parámetros que en el de 3 V, produciéndose falsas detecciones en los 230 kHz, 335 kHz y 560 kHz en la versión mutua (con variaciones de la señal máxima de 27 puntos) y prácticamente en toda la banda de frecuencias comprendida desde los 150 kHz hasta los 2.2 MHz en la versión Self, con oscilaciones máximas de 38 puntos.

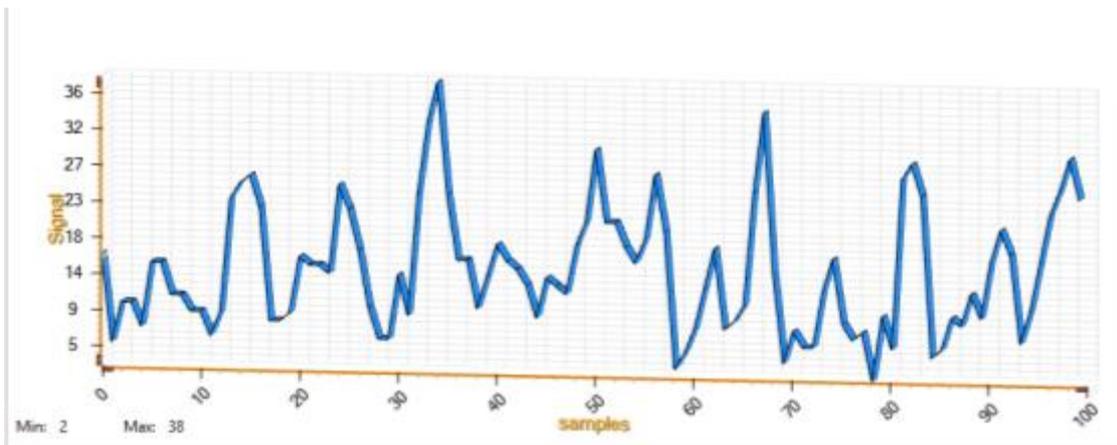


Ilustración 78: Oscilaciones máximas observadas en el delta de la señal de la versión Self durante el ensayo de 10 V en la zona de los 2.2 MHz en ausencia de touch cuando se emplean los mismos parámetros táctiles que en los 3V

Dada esta situación se procede a aumentar el nivel del filtro desde los 32 actuales hasta el máximo que permite el PTC: 64. Esta vez los ensayos son superados favorablemente por ambas versiones (Self y mutua) incluido cuando son operados. La plena operatividad del sensor táctil cuando es sometido a ensayo de 10V da prueba del nivel de robustez al ruido conseguido mediante la combinación de buenas prácticas de diseño PCB, adecuado empleo

de las medidas contra el ruido del periférico PTC y correcta elección de los parámetros de las funciones de procesado de señal táctil.

A lo largo de los ensayos, la versión mutual exhibe una oscilación máxima de 10 puntos en los 2.2 MHz, en la que se activa la funcionalidad Frequency Auto Tune que permite minimizar el efecto del ruido al escogerse nuevas frecuencias de adquisición y no llegándose nunca a producir un falso touch, en el resto de frecuencias se producen picos de oscilación de 7 puntos, siendo la habitual 4 puntos.

Mientras que en la versión Self se alcanza un máximo de 17 puntos pero que no van más allá por la activación del Frequency Auto Tune, la oscilación típica más habitual es de unos 8 puntos.

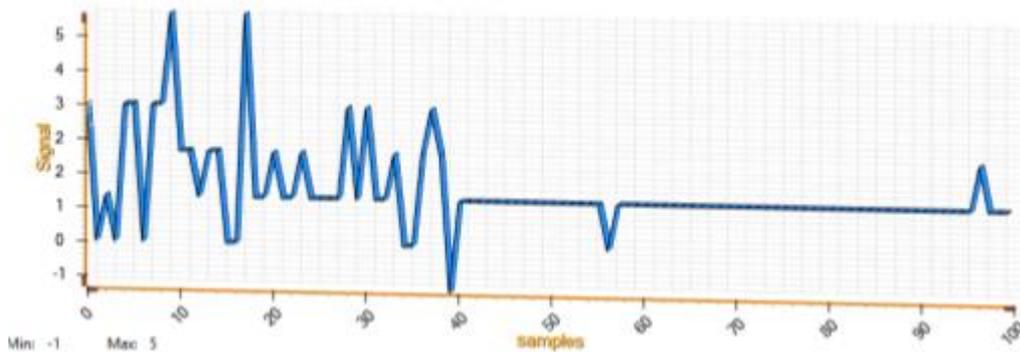


Ilustración 79: Oscilación del delta en la versión Mutual en la frecuencia de los 760 kHz durante ensayo de ruido conducido 10V

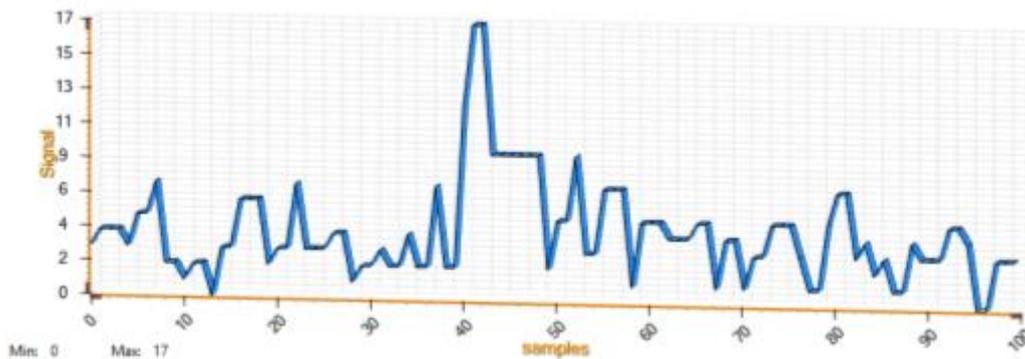


Ilustración 80: Oscilación del delta en la versión Self en la frecuencia de los 760 kHz durante ensayo de ruido conducido 10V

Adicionalmente se realizan ensayos en la tecla mutual para determinar cuánto contribuye en la versión mutual la resistencia en serie interna de 100 kΩ en la superación del test, para ello se reduce la resistencia hasta los 20 kΩ, produciéndose bastantes falsas detecciones entre los 264 kHz y 560 kHz, a pesar de tener establecido un Detect Integration de 6 muestras. Con una resistencia de 50 kΩ se producen menos, sólo, dos falsas detecciones la misma banda frecuencial por la reducción en el nivel de ruido combinada con la señal y por la acción del Detect Integration.

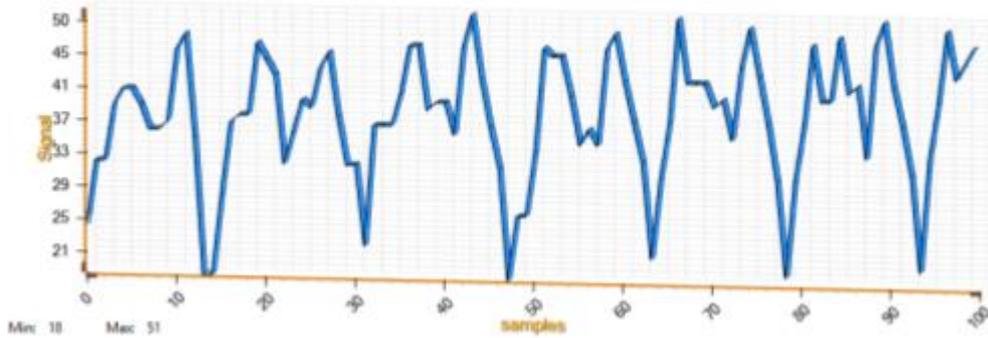


Ilustración 81: Captura de la delta de la señal en el slider Self durante ensayo de 10V con  $R_s=20\text{ k}\Omega$  en la frecuencia de los 560 kHz

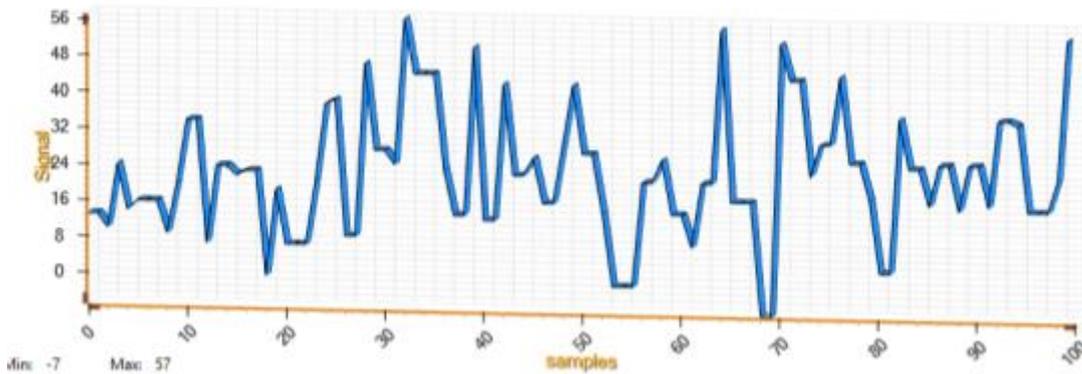


Ilustración 82: Captura de la delta de la señal en el slider Self durante ensayo de 10V con  $R_s=50\text{ k}\Omega$  en la frecuencia de los 560 kHz

Dado que el empleo de  $100\text{ k}\Omega$  en lugar de  $50\text{ k}\Omega$  no implica un aumento del prescalado para reducir la frecuencia del clock del PTC, ni un empeoramiento en la performance del sensor, se decide aumentar la  $R_s$  hasta los  $100\text{ k}\Omega$ , en lugar de poner un mayor DI o reducir el límite para el que se activa el Frequency Auto Tune que implican un mayor tiempo de respuesta del sistema que con la aplicación desarrollada (feedback luminoso y sonoro) no se aprecia pero que podría cuando se lleve a cabo en un futuro la migración de toda la funcionalidad de la tecla actual a esta versión nueva de tecla.

## Anexo 7

### COSTES TECLAS DIMMER AUREA

Coste de los componentes de las PCAs (Printed Circuit Assembly) del dimmer AUREA actual, el de la versión Self y el de la versión Mutal:

Tabla 6: Listado de componentes y coste de la PCA del actual dimmer AUREA

Designator	Quantity	DESC	Manufacturer	Manufacturer Ref.	Supplier	Supplier Ref.	Value	CRITIC	Precio unitari (1000u) €	Precio total €
C8, C14, C16, C17, C19, C20, C24	7	CAPACITOR SMD 0603	KEMET	C0603C104K5RACTU	FARNELL	1288255	100nF	NO	0,0072	0,0504
C9	1	C.CERAM. SMD 2U2F	AVX	06036C225KAT2A	FARNELL	1657930	2,2uF	NO	0,048	0,048
C10, C13, C21, C22	4	C.CERAM. SMD 10nF	AVX	06035C103KAT2A	FARNELL	2280661	10nF	NO	0,0127	0,0508
C11, C12, C23	3	CAPACITOR SMD 0603	MURATA	GRM188R61C105KA93D	FARNELL	1828801	1uF 0603	NO	0,0112	0,0336
C15	1	CAPACITOR SMD 0603	MURATA	GRM188R60J475ME19D	FARNELL	2362095	4u7 0603	NO	0,022	0,022
C18	1	C.CERAM. SMD 22UF	MURATA	GRM188C60J226MEA0D	DIGIKEY	490-10468-1-ND	22uF	NO	0,05247	0,05247
D1	1	DIODE SMD 3.3V 5A	DIODES	D3V3F4U65	DIGIKEY	D3V3F4U65-7DICT-ND	TVS 3V3	SI	0,11977	0,11977
J1, J2, J3, J4	4	CON SMD Pogo-Pin	Preci-Dip	90023-AS	Rutronik	90023-AS	Pogo-Pin	SI	0,2764	1,1056
J6, J7, J8, J9, J10, J11, J12, J14, J17	9	CON SMD SPRING FIN	TE CONNECTIVITY	1551573-5	FARNELL	2131179	FLEJE SENSOR	SI	0,178	1,602
L1, L2, L3	3	CHOCKE SMD 1Kohm	WÜRTH ELEKTRONIK	742792096	FARNELL	1635737	1Kohm@100Mhz	NO	0,176	0,528
LD1, LD2, LD3, LD4, LD5, LD6, LD7	7	LED SMD WHITE 90°	ROHM	CSL0406WBCW1x2x	Rutronik	CSL0406WBCW1x2x	LED 90° BLANCO	SI	0,714	4,998
R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7	7	RES SMD 750R 1% 0.1	PANASONIC	ERJ3EK7F500V	FARNELL	2059323	750R	NO	0,0136	0,0952
R8, R11	2	RESISTOR SMD 0603	VISHAY	CRCW06034K0R0FKEA	FARNELL	1469748RL	10K	NO	0,0168	0,0336
R9, R10, R13	3	RES. SMD 4K7 5% 0.04	VISHAY	CRCW06034K70R0FKEA	FARNELL	1469807	4K7	NO	0,0168	0,0504
R12	1	RES. SMD 20R 1% 0.2	PANASONIC	ERJPA3F20R0V	FARNELL	2335873	20R	NO	0,0891	0,0891
R17, R18	2	RES. SMD 470R 1% 0.1	YAGEO	RT0603FRE07470RL	FARNELL	1500635	470R	NO	0,0623	0,1246
S1	1	BUZZER PIEZO SMD 5	MALLORY SONALERT	AST1109MLTRQ	DIGIKEY	458-1093-1-ND	Piezo Transducer	SI	1,45826	1,45826
U1	1	PCA MODULO ZWAVE	Sigma Desings	ZM5202AE-CME3R	DIGIKEY	703-1071-1-ND	RADIO ZWAVE	SI	5,84156	5,84156
U2	1	IC_ Flash	Micron Technology	M25PE80-VMP6TG	DIGIKEY	M25PE80-VMP6TGCT-ND	M25PE80_QFN6x5	SI	0,98	0,98
U3	1	IC MCU K10S232M QF	Freescale Semiconductor	MKL05Z32VFM4	FARNELL	2253370	MKL05Z32VFM4	SI	1,29	1,29
U5, U6	2	CI INVERSOR, DISPAR	DIODES	74LVC1G14SE-7	FARNELL	1893832	74LVC1G14	NO	0,0486	0,0972
PCB	1	PCB*TECLA AUREA FR4_ FLEX 6x3 4 H39167W.8	LAB CIRCUITS					SI	11,01	11,01
									<b>TOTAL</b>	<b>29,68056</b>

Tabla 7: Listado de componentes y coste de la PCA de la versión Mutal del dimmer AUREA

Designator	Quantity	DESC	Manufacturer	Supplier	Value	CRITIC	Precio unitari (1000u) €	Precio total €	
C14, C16, C17, C19, C20, C24, C25, C26, C28	9	CAPACITO	KEMET	FARNELL	100nF	NO	0,0072	0,0648	
C10, C13, C21, C22	4	C.CERAM.	AVX	FARNELL	10nF	NO	0,0127	0,0508	
C11, C12, C23, C27	4	CAPACITO	MURATA	FARNELL	1uF 0603	NO	0,0112	0,0448	
C15	1	CAPACITO	MURATA	FARNELL	4u7 0603	NO	0,022	0,022	
C18, C29	2	C.CERAM.	MURATA	DIGIKEY	22uF	NO	0,05247	0,10494	
D1	1	DIODE SMD	DIODES	DIGIKEY	TVS 3V3	SI	0,11977	0,11977	
J1, J2, J3, J4	4	CON SMD	Preci-Dip	DIGIKEY	Pogo-Pin	SI	0,2764	1,1056	
J5, J6, J7, J8, J9, J10, J11, J12, J14, J17, J20	11	CON SMD	TE CONNECTIVITY	FARNELL	FLEJE SENSOR	SI	0,178	1,958	
L1, L2, L3, L4	4	CHOCKE SMD	WÜRTH ELEKTRONIK	FARNELL	1Kohm@100Mhz	NO	0,176	0,704	
LD1, LD2, LD3, LD4, LD5, LD6, LD7	7	LED SMD	ROHM	Rutronik	LED 90° BLANCO	SI	0,714	4,998	
R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7	7	RES SMD	PANASONIC	FARNELL	750R	NO	0,0136	0,0952	
R8, R11	2	RESISTOR	VISHAY	FARNELL	10K	NO	0,0168	0,0336	
R9, R10, R13	3	RES. SMD	VISHAY	FARNELL	4K7	NO	0,0168	0,0504	
R12	1	RES. SMD	PANASONIC	FARNELL	20R	NO	0,0891	0,0891	
R17, R18	2	RES. SMD	YAGEO	FARNELL	470R	NO	0,0623	0,1246	
R19, R22, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31	10	RES. SMD	VISHAY	FARNELL	1K	NO	0,016	0,16	
S1	1	BUZZER P	MALLORY SONALERT	DIGIKEY	Piezo Transducer	SI	1,45826	1,45826	
U1	1	PCA MOD	Sigma Desings	DIGIKEY	RADIO ZWAVE	SI	5,84156	5,84156	
U2	1	IC_ Flash	Micron Technology	DIGIKEY	M25PE80_QFN6x5	SI	0,98	0,98	
U3	1	IC MCU AT	ATMEL	MOUSER	ATSAMD20G16A	SI	1,45	1,45	
U5, U6	2	CI INVERSOR, DISPAR	DIODES	FARNELL	74LVC1G14	NO	0,0486	0,0972	
PCB	1	PCB*TECLA AUREA FR4_ FLEX 6x3 4 H39167W.8	LAB CIRCUITS			SI	11,01	11,01	
								<b>TOTAL (€)</b>	<b>30,56263</b>

Tabla 8: Listado de componentes y coste de la PCA de la versión Self del dimmer AUREA

Designator	Quantity	DESC	Manufacturer	Supplier	Value	CRITIC	Preu unitari (partint de 1000u)	Preu
C14, C16, C17, C19, C20, C24, C25, C26, C28	9	CAPACITOR SMD	KEMET	FARNELL	100nF	NO	0,0072	0,0648
C10, C13, C21, C22	4	C.CERAM. SMD	AVX	FARNELL	10nF	NO	0,0127	0,0508
C11, C12, C23, C27	4	CAPACITOR SMD	MURATA	FARNELL	1uF 0603	NO	0,0112	0,0448
C15	1	CAPACITOR SMD	MURATA	FARNELL	4u7 0603	NO	0,022	0,022
C18, C30	2	C.CERAM. SMD	MURATA	DIGIKEY	22uF	NO	0,05247	0,10494
D1	1	DIODE SMD 3.3V	DIODES	DIGIKEY	TVS 3V3	SI	0,11977	0,11977
J1, J2, J3, J4	4	CON SMD Pogo-Pin	Preci-Dip	DIGIKEY	Pogo-Pin	SI	0,2764	1,1056
J7, J9, J11, J12, J14, J17	6	CON SMD SPRING	TE CONNECTIV	FARNELL	FLEJE SENSOR	SI	0,178	1,068
L1, L2, L3, L4	4	CHOCKE SMD 1K	WÜRTH ELEKTR	FARNELL	1Kohm@100Mhz	NO	0,176	0,704
LD1, LD2, LD3, LD4, LD5, LD6, LD7	7	LED SMD WHITE	ROHM	Rutronik	LED 90° BLANCO	SI	0,714	4,998
R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7	7	RES SMD 750R	PANASONIC	FARNELL	750R	NO	0,0136	0,0952
R8, R11	2	RESISTOR SMD	VISHAY	FARNELL	10K	NO	0,0168	0,0336
R9, R10, R13	3	RES. SMD 4K7	VISHAY	FARNELL	4K7	NO	0,0168	0,0504
R12	1	RES. SMD 20R	PANASONIC	FARNELL	20R	NO	0,0891	0,0891
R17, R18	2	RES. SMD 470R	YAGEO	FARNELL	470R	NO	0,0623	0,1246
R19, R20, R21	3	RES. SMD 220K	VISHAY	FARNELL	220K	NO	0,0073	0,0219
R22	1	RES. SMD 1K 1%	VISHAY	FARNELL	1K	NO	0,016	0,016
S1	1	BUZZER PIEZO	MALLORY SON	DIGIKEY	Piezo Transducer	SI	1,45826	1,45826
U1	1	PCA MODULO Z	Sigma Desings	DIGIKEY	RADIO ZWAVE	SI	5,84156	5,84156
U2	1	IC_ Flash memor	Micron Techno	DIGIKEY	M25PE80_QFN6x5	SI	0,98	0,98
U3	1	IC MCU ATSAM	ATMEL	MOUSER	ATSAMD20G16A	SI	1,45	1,45
U5, U6	2	CI INVERSOR, DI	DIODES	FARNELL	74LVC1G14	NO	0,0486	0,0972
PCB	1	PCB*TECLA AUREA	LAB CIRCUITS			SI	11,01	11,01
<b>TOTAL</b>								<b>29,55053</b>

## 8. Bibliografía

- [1] CapTlvate™ Technology Guide, Texas Instruments, 2016. Disponible: [http://software-dl.ti.com/msp430/msp430\\_public\\_sw/mcu/msp430/CapTlvate\\_Design\\_Center/latest/exports/docs/users\\_guide/html/ch\\_lib.html](http://software-dl.ti.com/msp430/msp430_public_sw/mcu/msp430/CapTlvate_Design_Center/latest/exports/docs/users_guide/html/ch_lib.html)
- [2] AT08578: SAM D20 QTouch Robustness Demo, Atmel, 2014.
- [3] H. Gu, C. Sterzik, Capacitive Touch Hardware Design Guide, Texas Instruments, Revisión 2015.
- [4] RC acquisition principle for touch sensing applications, ST Microelectronics, 2009.
- [5] QTouch Library Peripheral Touch Controller, User Guide, Atmel, 2016.
- [6] AT09363: PTC Robustness Design Guide, Application Note, Atmel, 2016.
- [7] Touch Sensor Design Guide, Design Guide, Atmel, 2009.
- [8] AT02259: QTouch Schematic and Layout Checklist, Application Note, Atmel, 2016.
- [9] Atmel AVR3000: QTouch Conducted Immunity, Application Note, Atmel, 2011.
- [10] Power Supply Considerations for Atmel Capacitive-touch ICs, Application Note, Atmel, 2011.
- [11] AVR040: EMC Design Considerations, Application Note, Atmel, 2006.
- [12] Noise-Tolerant Capacitive-Touch Human-Machine Interfaces, Design Guide, Texas Instruments, 2016.
- [13] Atmel SAM D20E / SAM D20G / SAM D20J, Complete Datasheet, Atmel, 2016.
- [14] QTouch Composer, Atmel, 2015. Disponible: <http://www.atmel.com/webdoc/qtouchstudio/index.html>
- [15] AKKOÇ, Ferat; ŞAHİN, Özge Cihanbeğendi. Development and Experimental Comparison of Low-Cost, Reliable Capacitive Touch Sensing Boards. *Sensors*, 2016, vol. 16, no 11, p. 1786.
- Capacitive Touch Sensing, MSP430™ Slider and Wheel Tuning Guide, Application Report, 2013, Texas Instruments.
- SAM D20 Xplained Pro, User Guide, Atmel, 2016.
- Atmel Embedded Debugger DBG, User Guide, Atmel, 2016.
- PCB-Based Capacitive Touch Sensing With MSP430, Application Report, Texas Instruments, 2007.

## Glosario

CapTIvate: Periférico de sensado capacitivo desarrollado por Texas Instruments e implementado en los MCU MSP430FR2x3x, dotado con numerosas características para obtener elevada inmunidad al ruido y tolerancia a la humedad.

C\_Sensor: Capacidad asociada al canal capacitivo del sensor.

C\_Touch: Capacidad introducida por un touch.

C\_Trace: Capacidad asociada a la pista de rutado desde el pin del MCU hasta el electrodo correspondiente.

Deadzone: área en la que no es posible la determinación de la posición del usuario en el slider.

Delta: variación en la capacidad del sensor respecto a su nivel de referencia.

DI: Detect Integration, mecanismo que permite establecer como se entra y sale de un estado de potencial detección eliminando falsas detecciones.

HBES: Home Building Electronic Systems

HMI: Human-Machine Interface, Interficie Hombre-Máquina

JTAG: Joint Test Action Group, designación común del estándar utilizado para la prueba de submódulos de circuitos integrados y para la depuración de aplicaciones embebidas.

MCU ( $\mu$ C): Micro Controller Unit

Medida de adquisición: valor final de la medida en la capacidad del sensor una vez aplicado el procesamiento de señal correspondiente y que permite determinar si hay o no touch.

Mutual Capacitance: tipo de capacidad basado en la medición de los cambios en la capacitancia entre dos electrodos.

PMMA: Polimetilmetacrilato, polímero termoplástico altamente transparente.

PTC: Peripheral Touch Controller, periférico táctil de sensado capacitivo desarrollado por Atmel e implementado en las familias de MCUs SAMD20, SAMD21 y SAMC20, dotado de numerosas características a nivel tanto de Hardware como de Software con las que desarrollar aplicaciones táctiles con elevadísima robustez al ruido, tolerancia a la humedad y rápido tiempo de respuesta.

Self-Capacitance: tipo de capacidad basado en la medición de la capacidad de un solo electrodo con respecto a tierra.

Señal: número de transferencias y carga que se realizan para la medida de la capacidad del sensor.

Señal base: nivel de referencia de la capacidad del sensor

---

SPI: Serial Peripheral Interface, estándar de comunicación serie síncrono utilizado para la transferencia de datos entre microcontrolador y periféricos.

SWD: Serial Wire Debug, interfaz eléctrica alternativa de 2 pines basada en el protocolo JTAG  
Touch Threshold o Detect Threshold: umbral que define cuanto debe incrementarse la señal sobre su nivel de referencia para calificarlo como potencial detección touch.

Tag-Connect: estándar diseñado por TAG-CONNECT LLC para conexión entre un programador/debugger con una PCB consistente en una interfaz de conexión especial que elimina la necesidad de emplear un cabezal de programación u otros conectores sólidos en la parte de la PCB reduciendo costes y espacio.

ZWAVE: Protocolo de comunicación inalámbrica ampliamente utilizada en domótica y en redes de sensores inalámbricos. Desarrollado por Sigma Designs, opera en la banda de frecuencias de los 868.42 MHz (Europa) y 908.42MHz (Estados Unidos) y con velocidad de transferencia de datos de hasta 100kbit/s.