



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Rediseño de un transmisor de datos por radiofrecuencia

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Francisco Felipe Salgado Abreu

ASESOR DE INFORME

Dr. Jorge Rodríguez Cuevas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

*En memoria de mi abuelito Felipe, mi abuelita Cira y
mi abuelito Francisco, así como mi abuelita Paula
que aún sigue conmigo, quienes me dieron todo su
cariño, compartieron sus historias, aprendizajes y me
hicieron sentir como niño una y otra vez.*

Jurado asignado

Presidente: Dr. Pablo Roberto Pérez Alcázar

Vocal: Dr. Jorge Rodríguez Cuevas

Secretario: M. I. Vicente Flores Olvera

1er suplente: M. I. Ricardo Mota Marzano

2do suplente: Dr. Saúl de la Rosa Nieves

Agradecimientos

Agradezco a toda mi familia, en especial, a mi mamá Isa y papá Zac, por darme a mi hermanita Eli que nos hace reír y disfrutar el momento cada vez que puede, por poner nuestra educación antes que cualquier otro deseo personal, y más importante, por dedicar su vida completa a nuestro cuidado y bienestar con tal de que nada nos faltara.

Gracias Metz, mi novia querida, no sólo por los bonitos recuerdos que tenemos sino también por apoyarme, escucharme y aconsejarme cada vez que lo necesité durante la carrera, por estar conmigo en esos momentos de estrés y ayudarme a salir adelante, pero sobre todo, por tu amor y tiempo para lograr juntos nuestro objetivo.

A mis verdaderos amigos que conocí en la Facultad, con quienes disfruté y sufrí innumerables anécdotas; en especial a Paco, Roy, Manuel y Jordy, aquellos cuatro sujetos con quienes compartí risas, desveladas e historias que aún nos devuelven a la época de hace cinco años.

Mi respeto y admiración para mis maestros, compañeros y siempre amigos en Chamberlain. Rocks, Rafs, Edwin, Marx, Jake, Iván, Charles, Omars y el Ingeniero Heriberto, que sin duda me brindaron hasta el último saber del mundo laboral, gracias.

Mi prestigiosa alma máter, que me permitió conocer profesores apasionados en enseñar todo lo que tenían a su disposición para formar grandes Ingenieros. Al Dr. Jorge Rodríguez Cuevas y el jurado único, con quienes comparto ese mismo amor por la electrónica.

Le agradezco a Dios por esta oportunidad, por este gran logro y por todas las personas que conocí y dejaron una enseñanza grabada en mi ser.

Este escrito no es más que mi deseo profundo de compartir mi experiencia a cualquiera que tenga un destello de curiosidad...

“La realidad será lo que seamos capaces de construir”

JULIA NAVARRO

- Dispara, yo ya estoy muerto -

Índice general

1.	Introducción	1
2.	Objetivos	1
3.	Marco laboral	2
4.	Marco teórico	2
4.1	Interferencia y susceptibilidad electromagnética.....	3
4.1.1	<i>Blindaje</i>	4
4.1.2	<i>Sistema de tierras</i>	5
4.2	Dispositivos de protección ante grandes descargas eléctricas.....	9
4.2.1	<i>Tubo de gas para descargas</i>	10
4.3	Dispositivos de protección en sistemas digitales.....	12
4.3.1	<i>Capacitores de desacoplo</i>	12
4.3.2	<i>Diodo Zener</i>	14
4.3.3	<i>Diodo Schottky</i>	15
4.4	Circuito integrado SI4010.....	16
5.	Antecedentes	17
6.	Participación profesional.....	17
6.1	Solución y atención a fallas en sistemas	17
6.2	Componente alternativo: tubo de gas para descargas	18
6.3	Rediseño de circuito: transmisor de datos por radiofrecuencia.....	19
7.	Metodología utilizada	20
7.1	Tareas dinámicas personalizadas.....	20
7.2	Análisis de circuitos eléctricos	21
7.2.1	<i>Protección de circuitos integrados</i>	21
7.2.2	<i>Transistores como conmutadores</i>	22
7.2.3	<i>Mediciones de control</i>	24
7.3	Análisis paramétrico.....	25
7.4	Consulta de proveedores o fabricantes	26
7.5	Desarrollo de prototipos funcionales	27
7.5.1	<i>Estructura de la PCB</i>	28
7.5.2	<i>Sustrato y recubrimiento del tablero</i>	29
7.5.3	<i>Diseño asistido por computadora</i>	34
7.5.4	<i>Componentes electrónicos</i>	36
7.5.1	<i>Conformación del arreglo</i>	39
7.5.2	<i>Dibujo para fabricación</i>	41
7.6	Coordinación con equipo interdisciplinario	43

8.	Resultados	45
8.1	Replicación de situación de falla	45
8.2	Análisis paramétrico del GDT	46
8.3	Rediseño del transmisor	47
8.3.1	<i>Análisis financiero</i>	47
8.3.2	<i>Cambios en la producción de ensamblés</i>	49
8.3.3	<i>Consideraciones de diseño en el circuito</i>	54
8.3.4	<i>Cotización y obtención de prototipos</i>	56
8.3.5	<i>Pruebas funcionales y organismos reguladores</i>	58
9.	Conclusiones.....	60
10.	Referencias bibliográficas	63
11.	Anexos	68
11.1	Hoja de datos del GDT SL1021 A/B	68
11.2	Hoja de datos del circuito integrado SI4010.....	69
12.	Índice de términos.....	70

Índice de figuras y tablas

<i>Figura 1. Vista exterior de las instalaciones en Nogales, Sonora, México. Tomado de (Chamberlain Group Inc, 2020).</i>	2
<i>Figura 2. Distribución de la compatibilidad electromagnética. Modificado de (Wei, 2017).</i>	3
<i>Figura 3. Efecto del blindaje ante las fuentes de ruido. Modificado de (Ott, 1988).</i>	4
<i>Figura 4. Distinción y simbología del sistema de tierras eléctricas (Ott, 1988).</i>	5
<i>Figura 5. Corriente de desplazamiento a través de los elementos parásitos en un circuito impreso. Modificado de (Feranec, 2020).</i>	6
<i>Figura 6. Asociación óptima de los tipos de tierra en un sistema complejo, ideal para atenuar el ruido. Modificado de (Ott, 1988).</i>	8
<i>Figura 7. Ruptura de un lazo de tierra usando un optoacoplador. Modificado de (Ott, 1988).</i>	8
<i>Figura 8. Parámetros principales del ESD, EFT y descargas por rayos (Daryl Gerke, 1999) (Microchip, 2017).</i>	9
<i>Figura 9. Simbología eléctrica común utilizada para (a) MOV, (b) TVS y (c) GDT. Modificado de (Littelfuse, 2016).</i>	10
<i>Figura 10. GDT comerciales usuales: (a) dos electrodos tipo SMD, (b) dos electrodos tipo TH, (c) tres electrodos tipo SMD y (d) tres electrodos tipo TH. Modificado de (Ardley, 2008).</i>	10
<i>Figura 11. Comparación del GDT, MOV y TVS ante la descarga de un rayo. Modificado de (Littelfuse, 2016).</i>	11
<i>Figura 12. Impedancia en capacitor de desacoplo. Modificada de (Wei, 2017).</i>	12
<i>Tabla 1. Valores típicos de frecuencia de resonancia en algunos capacitores comerciales. Modificado de (Microchip, 2017).</i>	13
<i>Tabla 2. Tipos de capacitores comerciales con sus limitantes máximas en frecuencia. Modificado de (Microchip, 2017).</i>	13
<i>Figura 13. (Izquierda) Ruptura Zener o tunelaje, en comparación con el efecto avalancha (derecha), ambos presentes en uniones "pn" polarizadas inversamente. Modificado de (Neamen, 2011).</i>	14
<i>Tabla 3. Comparación entre diodo Schottky y diodo de unión "pn" (Neamen, 2011) .</i>	15
<i>Figura 14. Diagrama de bloques del circuito integrado SI4010. Tomado de (Silicon Labs, 2010).</i>	16
<i>Figura 15. Transmisor RF para automóvil utilizado en abridores de puertas.</i>	19
<i>Figura 16. Evolución del Kanban (izquierda) (Kanbanize, 2020) a recursos digitales (derecha). Modificado de (Atlasian, 2020).</i>	20

<i>Figura 17. Circuito típico en pines de entrada o salida. Modificado de (NXP Semiconductors, 2017).</i>	21
<i>Figura 18. (a) BJT y (b) FET configurados en lado alto; (c) BJT y (d) FET configurados en lado bajo. Modificado de (Lewis, 2013).</i>	23
<i>Figura 19. Circuito del amplificador no inversor. Modificado de (Franco, 2015).</i>	24
<i>Figura 20. Diagrama de flujo al realizar un análisis paramétrico.</i>	26
<i>Figura 21. Embalajes comunes en la industria eléctrica (de izquierda a derecha): granel (bulk), tira de corte (ammo pack, tape cut), tubo o varilla (tube), bandeja o plancha (tray) y riel o cinta (tape and reel). Modificado de (Action circuits, 2020) (JB Capacitors Company, 2019).</i>	27
<i>Figura 22. Elementos posibles en una PCB multicapa para formar la pila o “stackup”. Tomado de (Mitzner, 2007).</i>	29
<i>Figura 23. Parámetros comúnmente encontrados en sustratos (IPC Association Connecting Electronics Industries, 2003).</i>	30
<i>Tabla 4. Características de los sustratos más comunes en la industria (Sai Fon Technologies, 2010) (Essentra, 2020) (Nanotech Elektronik, 2019) (Nan Ya Plastics Corporation, 2014) (Panasonic, 2019) (CIF, 2020).</i>	31
<i>Tabla 5. Características de los acabados más comunes en la industria (Henninger, 2012) (Coombs, 2008).</i>	32
<i>Figura 24. Vista previa de la plantilla de Altium para el diseño de PCB (izquierda) y SCH (derecha). Modificado de (Altium, 2020).</i>	34
<i>Figura 25. Archivos de fabricación del Procesador Digital de Señales LAUNCHXL-F28379D. Modificado de (Texas Instruments, 2017).</i>	35
<i>Figura 26. Huella concentradora de calor. Modificado de (Thierauf, 2004).</i>	37
<i>Figura 27. Tipos de terminales en componentes TH: (a) radial, (b) axial y (c) múltiple. Modificado de (Hedden, 1987).</i>	37
<i>Figura 28. Transición de componentes pasivos SMD a tecnología integrada o embebida. Modificado de (Coombs, 2008).</i>	38
<i>Figura 29. Familias principales de empaquetados para circuitos integrados (EE SEMI, 2008).</i>	39
<i>Figura 30. Panel de fabricación con sus características más importantes. Modificado de (IPC Designers Council, 2016).</i>	40
<i>Figura 31. Tamaños genéricos de paneles (unidades en pulgadas), establecidos por el estándar IPC-2221 A. Estos tamaños son identificados por una letra, seguida de un nombre (yendo desde A1 hasta D4). Tomado de (Mitzner, 2007).</i>	41
<i>Figura 32. Dibujo para fabricación correspondiente al Procesador Digital de Señales LAUNCHXL-F28379D. Modificado de (Texas Instruments, 2017).</i>	42
<i>Figura 33. Grupos interdisciplinarios involucrados en el proyecto.</i>	43

<i>Figura 34. Algoritmo para replicar y resolver una situación de falla.</i>	45
<i>Figura 35. Análisis paramétrico en el GDT.</i>	46
<i>Figura 36. Principales tipos de costos en producción. Tomado de (Mankiw, 2002).</i>	48
<i>Figura 37. Principales ventajas de las tecnologías de componentes enfocadas al costo variable en producción.</i>	48
<i>Figura 38. Máquinas de preformado TH, tipo manual (izquierda) y automática (derecha). Modificado de (EMST Marketing PVT. LTD., 2018).</i>	50
<i>Figura 39. Inserción manual TH (izquierda) comparado con colocación automática SMT (derecha). Modificado de (Smith, 2009) (EMST Marketing PVT. LTD., 2018).</i>	50
<i>Figura 40. Etapas del proceso en la soldadura de refusión. Modificado de (Walsin Technology Corporation, 2002) (Sparkfun, 2006) (Surface Mount Process, 2010) (Sensotec, 2017).</i>	51
<i>Figura 41. Etapas del proceso en la soldadura de ola. Modificado de (Walsin Technology Corporation, 2002).</i>	52
<i>Figura 42. Soldadura de ola convencional. Modificado de (Gong, 2018).</i>	53
<i>Figura 43. Sección del manual de usuario entregado con algunos transmisores.</i>	54
<i>Figura 44. Herramientas ERC (izquierda) y DRC (derecha) encontradas en Altium. Modificado de (Altium, 2020).</i>	55
<i>Figura 45. Presentación realizada en la revisión final del proyecto.</i>	56
<i>Figura 46. Aportaciones principales de los reportes DFM/DFT (IPC Designers Council, 2016).</i>	57
<i>Figura 47. Arreglos prototipo del proyecto.</i>	58
<i>Figura 48. Cámara anecoica para antenas. Modificado de (Antenna Test Lab, 2019).</i>	59
<i>Figura 49. Cambios generales en la ruta de producción, obtenidos con el rediseño del transmisor de datos por RF.</i>	61
<i>Figura 50. Familia CGI 2020.</i>	62
<i>Figura 51. GDT Serie SL1021A/B. Tomado de (Littelfuse, 2020).</i>	68
<i>Figura 52. Circuito integrado SI4010. Tomado de (Silicon Labs, 2010).</i>	69

1. Introducción

Día con día, la tecnología avanza y encuentra una forma de sorprendernos más. Se diseñan productos más pequeños, se inventan nuevos circuitos, y finalmente, se crean tendencias en el mercado. Esto repercute en el ámbito laboral, ya que se debe mantener la integridad de la empresa para seguir compitiendo económicamente y asegurar su futuro comercial, manteniéndose actualizada, siempre innovando y mejorando su producción para otorgar al cliente seguridad y satisfacción de sus necesidades.

El punto clave para lograr estabilidad laboral como industria es la atención oportuna al cliente y la mejora continua de sus servicios, ya sea con un producto innovador, un rediseño que dé un mayor beneficio, o generando ingresos que permitan mantener la calidad del producto mientras se logran ahorros sustentables.

Este informe lo realicé siguiendo dicho enfoque, proporcionando al lector una visión de lo que me encontré en la industria, una opción viable para adentrarse en el mundo laboral del campo electrónico, más allá de los aprendizajes en la Universidad, y cómo pude unirlo dentro de las actividades diarias en una planta de producción.

A modo de compartir esta experiencia, plasmé mis actividades y resultados en tres bloques generales: el reemplazo de componentes electrónicos específicos, el rediseño de un transmisor de datos por radiofrecuencia y la solución oportuna a fallas en sistemas, con el trasfondo que conlleva para obtener el impacto deseado pero que muchas veces no se conoce.

2. Objetivos

- ✓ Realizar el rediseño de un transmisor de datos, al migrar de tecnología de inserción (TH)¹ hacia montaje superficial (SMT)², considerando las repercusiones y necesidades que implica.
- ✓ Dar atención oportuna a problemas en productos o sistemas eléctricos de la planta, implementando medidas correctivas y soluciones óptimas viendo a futuro.
- ✓ Generar productividad económica mediante el cambio y mejora de componentes electrónicos en los dispositivos comerciales, sin perder su calidad en el resultado.

¹ Through Hole, también encontrado como THT (Through Hole Technology). En caso específico de componentes, se puede referir como THD (Through Hole Device).

² Surface Mount Technology, por su acrónimo en inglés. Por otro lado, SMD (Surface Mount Device) es usado para el caso específico de un componente.

3. Marco laboral

La empresa donde laboré está dedicada a dar soluciones de acceso, principalmente enfocados a puertas automatizadas, cocheras y conjuntos residenciales, aunque también se encuentran productos como abridores comerciales, plumas para estacionamientos, transmisores y módulos inalámbricos, entre demás variedad de sistemas.

Siendo un ente de alto impacto en Norteamérica al poseer más del 80% de mercado en dicha índole de artículos, es necesario colocarse en la punta de la competencia, con los sistemas electrónicos más novedosos y funcionales que permitan confiabilidad al cliente al obtener un producto de esta marca.

Durante el desarrollo de mis actividades profesionales, estuve laborando en la planta ubicada en Nogales, Sonora, México, donde se transforma materia prima y elaboran los diversos productos funcionales, ya aprobados y certificados, para ser llevados a los centros de distribución listos para su consumo.



Figura 1. Vista exterior de las instalaciones en Nogales, Sonora, México. Tomado de (Chamberlain Group Inc, 2020).

4. Marco teórico

A raíz de los retos enfrentados, me dediqué a buscar antecedentes basados en conocimientos teóricos y empíricos, para conocer mejor el funcionamiento y los fenómenos a los que están sujetos los dispositivos usados en cuestión. Enseguida, presento el contexto necesario para comprender de mejor manera el desarrollo de las actividades profesionales descritas en el documento, haciendo énfasis también en algunos componentes eléctricos esenciales para su realización.

4.1 Interferencia y susceptibilidad electromagnética

Todos los sistemas electrónicos están sujetos al ruido, sin embargo, existe una confusión común al momento de aplicar el término de interferencia o susceptibilidad. Estos dos términos se desprenden de uno que engloba a ambos, llamado compatibilidad electromagnética (EMC), el cual se encuentra definido en (Ott, 1988) como “la habilidad de un sistema electrónico para funcionar apropiadamente ante su medio electromagnético y no ser a su vez una fuente de contaminación para el ambiente exterior”.

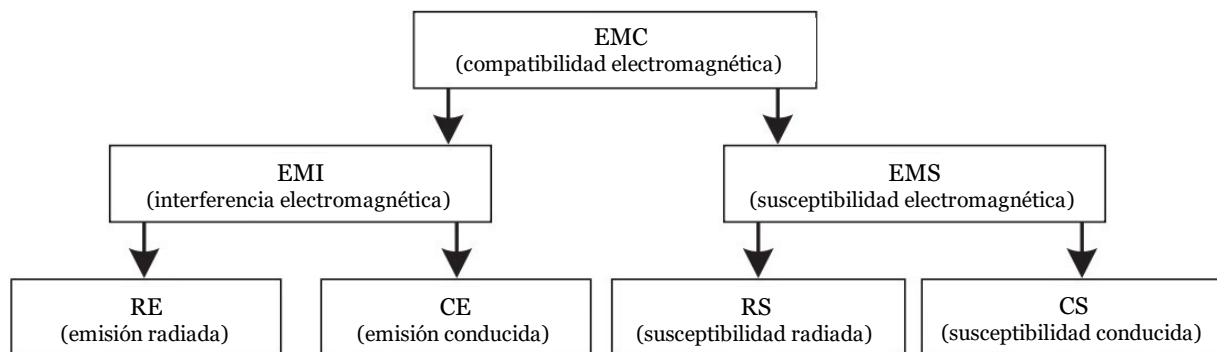


Figura 2. Distribución de la compatibilidad electromagnética. Modificado de (Wei, 2017).

Una distinción de estos problemas derivados se muestra con la figura anterior, descrita a partir de (Wei, 2017) como sigue: “la compatibilidad electromagnética (EMC) se clasifica en la interferencia o emisión electromagnética (EMI), donde el ruido es generado en el circuito y después liberado al ambiente; mientras que la susceptibilidad electromagnética (EMS) recibe el ruido proveniente del ambiente y lo acopla con los circuitos eléctricos. Ambos fenómenos pueden ser de tipo radiado, presente en antenas no deseadas generadas por trazos (RE) o descargas electrostáticas (RS); o tipo conducido, como el acoplamiento por medio de cables de alimentación (CS) o conmutación en circuitos de alta frecuencia (CE), por decir algunos”.

Estos fenómenos son consecuencias o efectos del ruido, definido por (Ott, 1988) como “cualquier distorsión de la señal eléctrica que no es deseada en alguna parte del circuito”, y siendo clasificado básicamente en tres categorías principales como sigue.

- a) *Intrínseco*: proveniente de fluctuaciones aleatorias en los sistemas físicos, por ejemplo, el ruido térmico (thermal noise) dado por la agitación térmica debido al movimiento de electrones dentro de un elemento resistivo, y el ruido de disparo (shot noise) presente en las fluctuaciones de corriente alrededor de un valor promedio debido a emisión de portadores al atravesar una barrera de potencial, por mencionar algunos.

- b) *Fuente artificial*: se basa en el funcionamiento de los dispositivos electrónicos, como motores, relevadores, electrónica digital, transmisores, entre otros.
- c) *Atmosférico*: originado de disturbios o fenómenos naturales, tales como relámpagos o manchas solares (afectaciones comunes en alta frecuencia).

Estas perturbaciones no pueden ser eliminadas por completo, pero sí reducidas en su mayoría a través del diseño eléctrico para que no afecten al funcionamiento del circuito, y a su vez, cumplan estándares de calidad impuestos por organizaciones internacionales para protección del consumidor. Las maneras primordiales de lograrlo son suprimiendo el ruido en la fuente de origen, volviendo al receptor inmune o minimizando el ruido a través del canal de acoplamiento conforme se va propagando (Ott, 1988).

Entre los métodos principales para combatir dichos sucesos se encuentra el blindaje y el sistema de tierras, los cuales son brevemente descritos. Para más información, se alienta al lector adentrarse en la investigación de éstos, tomando como referencia a (Ott, 1988) de donde fue obtenido este resumen de técnicas.

4.1.1 Blindaje

Conocido como “shielding” en inglés, el blindaje brinda dos propósitos a la vez, los cuales son proteger al circuito de ruido externo y evitar que se propague el ruido interno, es decir, “controla la propagación de campos eléctricos y magnéticos de una región a otra” (Ott, 1988), ilustrado en la siguiente figura.

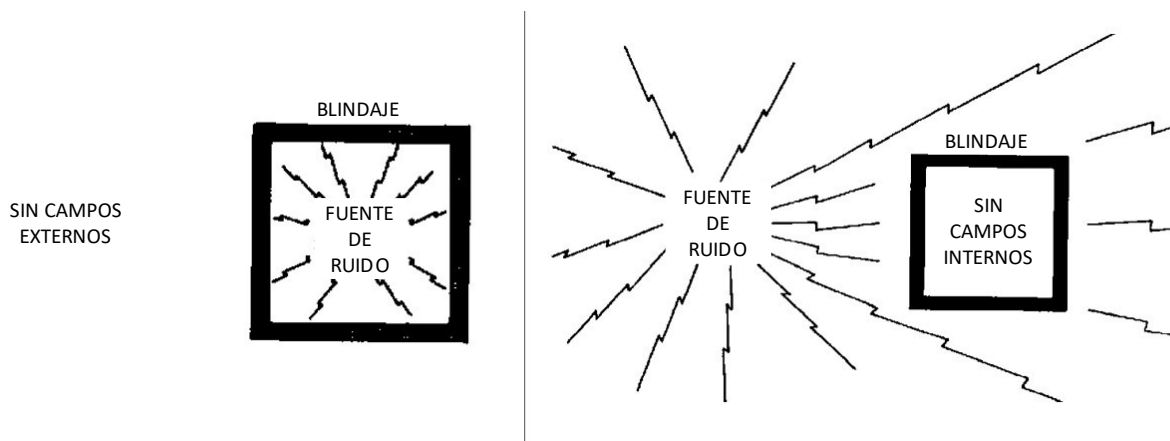


Figura 3. Efecto del blindaje ante las fuentes de ruido. Modificado de (Ott, 1988).

Este término aplica tanto al confinamiento de un sistema como al aislamiento de conductores mediante carcasas o recubrimientos metálicos (cables coaxiales). Las recomendaciones de diseño en este ámbito son las siguientes, descritas en su totalidad por (Ott, 1988).

- ⊙ Un material de blindaje no magnético es más efectivo en campos de alta frecuencia, aunque en aplicaciones comunes (baja frecuencia) basta con un material magnético.
- ⊙ Un material que es buen conductor protege adecuadamente ante campos eléctricos y frentes de onda planos.
- ⊙ Una gran cantidad de agujeros pequeños resulta en menores fugas que un agujero enorme de la misma área.
- ⊙ La efectividad del blindaje es reducida conforme aumentan las aperturas y uniones.
- ⊙ Los cables externos deben conectar su blindaje al confinamiento del sistema, o en su defecto, filtrar la señal entrante al sistema.
- ⊙ Para disminuir el efecto magnético en el cableado se deben eliminar áreas o espirales formadas por el trayecto del cable. Aplicado al caso del diseño de circuitos impresos, evitar formar áreas cerradas de material conductor delimitadas por trazos o rutas.

4.1.2 Sistema de tierras

Usualmente denotado como “grounding”, es una de las soluciones más efectivas contra el ruido, aunque su manejo incorrecto suele traer serios inconvenientes. Además, la distinción y uso de cada una depende básicamente del sistema a implementar, con base en sus tipos de circuitos, objetivo a cumplir como ente, distintas frecuencias de operación, tamaño físico del módulo, entre otros aspectos (Ott, 1988).

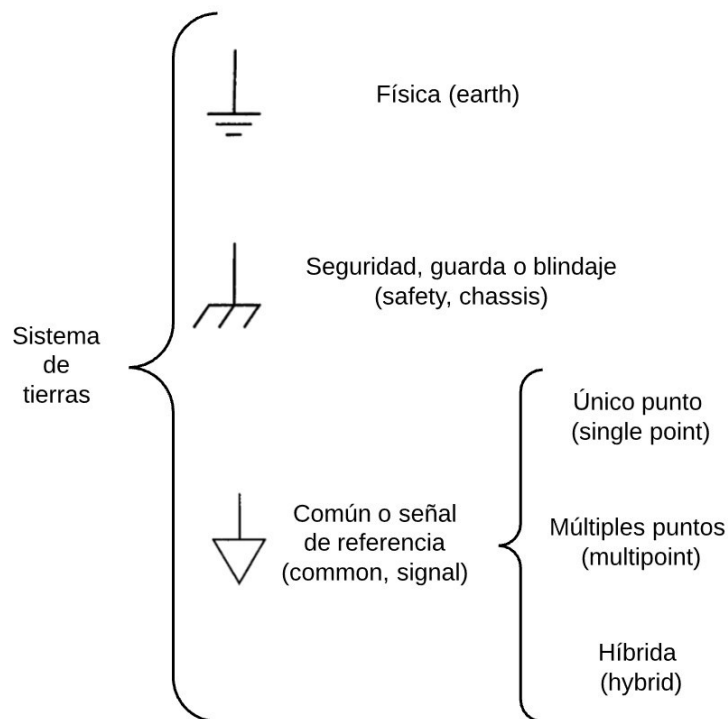


Figura 4. Distinción y simbología del sistema de tierras eléctricas (Ott, 1988).

Se tienen tres distinciones básicas para el sistema de tierras (Figura 4). La primera de ellas es la tierra física, cual es el potencial obtenido directamente de la Tierra misma, considerada el potencial cero absoluto gracias a su enorme masa planetaria (Circuit crush, 2015). A pesar de usar este símbolo en los circuitos electrónicos, generalmente se encuentra mal empleado ya que en varias aplicaciones no existe dicha conexión implementada.

El segundo caso es la tierra de seguridad, conocida comúnmente como tierra de guarda, blindaje o incluso como chasis. Este concepto de tierra es referido al mayor ente de potencial nulo en el sistema de forma local. Aunque en la mayoría de los casos se conecta un sistema electrónico a la tierra física, no siempre es posible realizar esta conexión. Prueba de ello es un avión en pleno vuelo, donde no existe un contacto estricto con tierra física, por lo que el mayor “potencial tierra” es el confinamiento o estructura metálica, de ahí el término tierra de chasis.

Por último, está la tierra común o señal de referencia, definido concretamente como “la ruta con menor impedancia que toma la corriente eléctrica para regresar a su fuente” (Ott, 1988). Cuando establecemos una trayectoria de alimentación, es común pensar que la corriente siempre regresa por “tierra”, pero no es verdad ya que no siempre coincide con ser el conductor de retorno, ni tampoco en todo momento, por eso la importancia de esta definición. Algunos argumentos para esta mal interpretación es la interferencia electromagnética en el comportamiento del circuito y la aparición de la corriente de desplazamiento³. El primer argumento es bien conocido, aunque no puedo decir lo mismo del segundo.

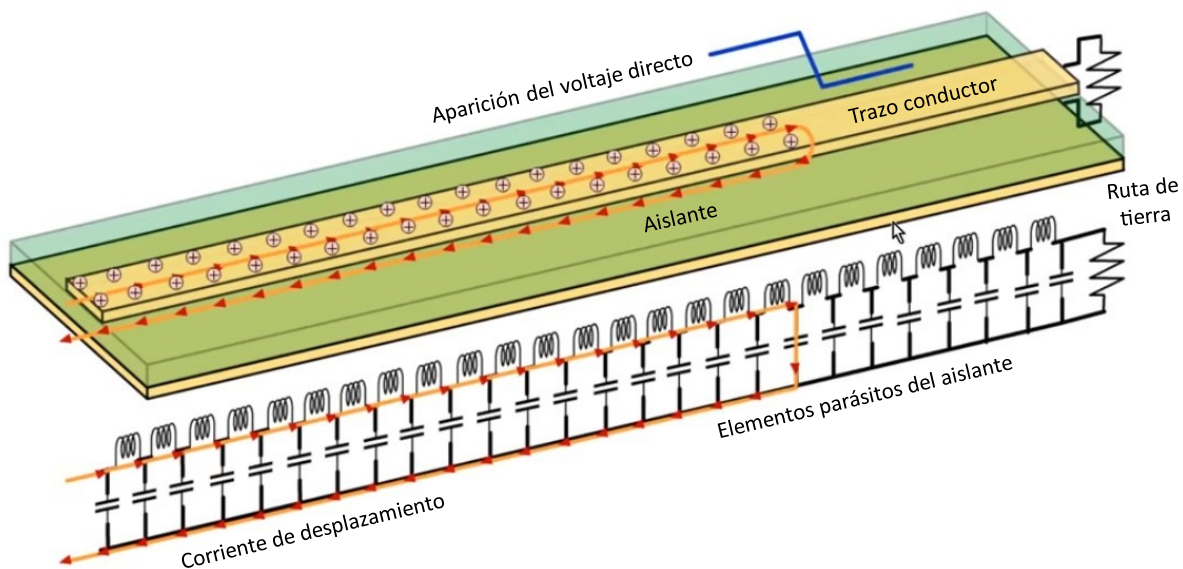


Figura 5. Corriente de desplazamiento a través de los elementos parásitos en un circuito impreso. Modificado de (Feranec, 2020).

³ Introducida por primera vez en las ecuaciones de Maxwell como “displacement current”, en 1865.

Dicha discusión es abordada con mayor detalle en (Feranec, 2020), resumiendo lo siguiente: “[...] bajo un campo eléctrico que cambia en el tiempo, se genera una diferencia de potencial que ocasiona una corriente de desplazamiento conforme los electrones van apareciendo a través del conductor. Tomando como ejemplo un trazo en un circuito impreso (Figura 5), mientras un voltaje directo aparece en el conductor (antes de alcanzar su estado estable), existe dicha corriente que es propagada a través del aislante, usando sus elementos parásitos para regresar a la fuente en lugar de la ruta designada como tierra [...]”. En concreto, es preferible tratar este concepto de tierra como únicamente un punto de referencia para los niveles de tensión.

Siguiendo las topologías para la tierra común o de referencia (Figura 4), destacué las siguientes definiciones basadas en (Ott, 1988).

- ⊙ Único punto.
 - ⊙ Usa sólo una ubicación como referencia en todo el circuito
 - ⊙ Sólo es recomendado en bajas frecuencias (<10 MHz).
- ⊙ Múltiples puntos.
 - ⊙ Minimiza la inductancia a tierra al trazar distintas rutas paralelas para las corrientes de retorno, usando un plano o una malla.
 - ⊙ Recomendado en altas frecuencias y circuitos digitales.
- ⊙ Híbrido.
 - ⊙ Por medio de inductores y capacitores entre el circuito y tierra, permite actuar como único punto en baja frecuencia y múltiple punto en alta, o viceversa.

Complementando el tema, el autor realizó una serie de recomendaciones para el diseño electrónico y su adecuado manejo de tierra, resumido en los siguientes puntos (Ott, 1988).

- ⊙ Para los circuitos impresos, los planos de tierra son considerados el mejor resguardo contra el ruido, ya que se tiene acceso directo a la referencia para cualquier componente crítico. Sin embargo, se deben cuidar las señales de retorno de cada circuito, de manera que minimicen inductancias mutuas, disminuyan capacitancias parásitas y mantengan un voltaje mínimo de ruido en el plano (se recomienda un voltaje de control por debajo de 200 mV) que asegure la integridad de las señales.
- ⊙ Es preferente separar los circuitos de potencia, analógicos y digitales con sus apropiados circuitos de tierra, para al final ser conectados únicamente en un punto, el cual se unirá a la tierra de guarda. En caso de existir blindaje para el sistema o corriente alterna en el circuito, se deberá conectar a tierra física, ejemplificado en la siguiente figura.

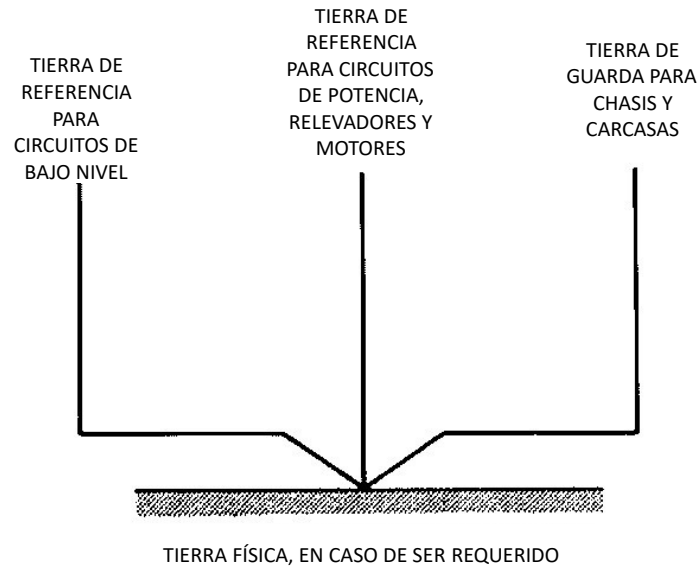


Figura 6. Asociación óptima de los tipos de tierra en un sistema complejo, ideal para atenuar el ruido. Modificado de (Ott, 1988).

- © Los lazos o circuitos de tierra⁴ deben ser suprimidos. La forma más práctica de hacerlo es aislando por medio de transformadores, bobinas de choque, optoacopladores, circuitos balanceados, tierras híbridas y amplificadores diferenciales (Figura 7). Esto minimizará el ruido en conexiones de tierra que comparten una impedancia en común.

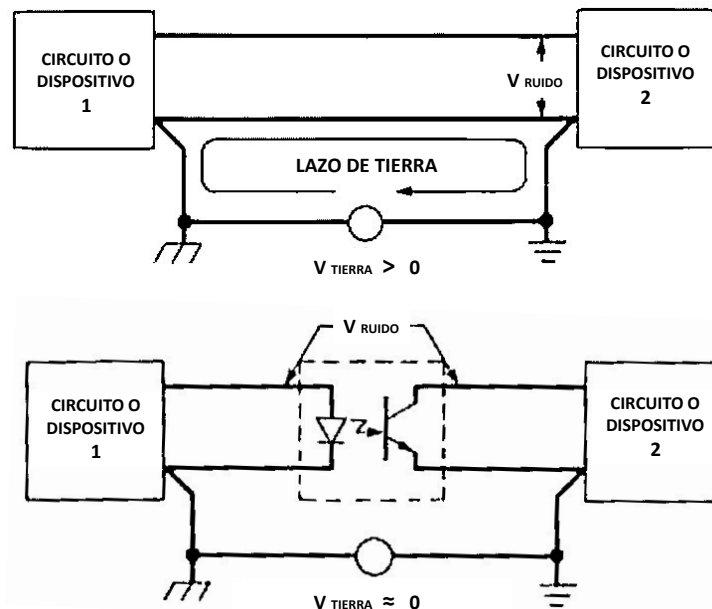


Figura 7. Ruptura de un lazo de tierra usando un optoacoplador. Modificado de (Ott, 1988).

⁴ Conocidos como "ground loops", son generados cuando dos puntos de tierra se encuentran muy distantes, o cuando se mezclan señales de retorno con gran diferencia en frecuencia o magnitud entre ellas (Ott, 1988).

4.2 Dispositivos de protección ante grandes descargas eléctricas

Existen diversos tipos de ruido aunados a distintas fuentes, de los cuales sólo algunos involucran grandes cantidades de corriente y voltaje durante su aparición en el circuito eléctrico. Los tres principales fenómenos que cumplen estas características son las descargas electrostáticas (ESD⁵), los transitorios rápidos o ráfagas eléctricas (EFT⁶) y los sobrevoltajes atmosféricos generados por las descargas de rayos (lightning⁷), con sus características eléctricas aproximadas denotadas por el diagrama siguiente.

ESD	EFT	Rayos
<ul style="list-style-type: none">• Voltaje pico 2 kV - 8 kV• Corriente pico 2 A - 50 A• Tiempo de levantamiento 0.7 ns - 1 ns	<ul style="list-style-type: none">• Voltaje pico 0.25 kV - 4 kV• Corriente pico 10 A - 1 kA• Tiempo de levantamiento 3 ns - 5 ns	<ul style="list-style-type: none">• Voltaje pico 2 kV - 8 kV• Corriente pico 1 kA - 250 kA• Tiempo de levantamiento 1 μs - 20 μs

Figura 8. Parámetros principales del ESD, EFT y descargas por rayos (Daryl Gerke, 1999) (Microchip, 2017).

Para reducir los efectos asociados a estos disturbios, se deben colocar dispositivos de protección lo más cercano posible a cualquier interacción con el usuario o el exterior (botones, conectores, alimentación primaria, interfaces y demás). Desde el punto de vista económico, mientras no exista una regulación sobre el circuito electrónico, simplemente se omiten estos componentes ya que implican un costo adicional sobre el producto final. Ahora bien, al colocarse estas secciones (acorde con las condiciones y necesidades del sistema) se evitan fallas con el usuario, mejorando la confiabilidad y calidad del producto (Littelfuse, 2017).

Entre los dispositivos de protección se encuentran los varistores (MOV), supresores de transitorios (TVS), tubos de gas para descargas (GDT), fusibles, tiristores, núcleos de ferrita (ferrite beads), supresores ESD, rectificadores controlados (SCR), entre otros (Littelfuse, 2017).

⁵ Electrostatic Discharge, por su acrónimo en inglés, son arcos eléctricos instantáneos entre un contacto humano y algún equipo electrónico principalmente, aunque también se puede generar en mecanismos internos con el rozamiento de papel, plásticos y demás materiales que generen cargas eléctricas (Daryl Gerke, 1999).

⁶ Electrical Fast Transient, son disturbios generados por la conmutación de grandes cargas inductivas como motores, relevadores y contactores, aunque también por acoplamiento a través de una red AC (Microchip, 2017).

⁷ No sólo se toman en cuenta los impactos directos sobre el equipo sino también los acoplamiento a través de la red eléctrica por medio de transformadores, líneas de alta/baja tensión o tierra física (Crouse-Hinds Series, 2016).

4.2.1 Tubo de gas para descargas

Entre los diversos componentes de protección para sobrevoltaje y sobrecorriente, resaltan los tres que tienen las mejores características para contrarrestar dichas alteraciones: el varistor óxido metálico (MOV), el diodo supresor de transitorios de voltaje (TVS) y el tubo de gas para descargas (GDT⁸). Me enfoqué en este último porque fue el componente crítico que analicé para un circuito en específico.

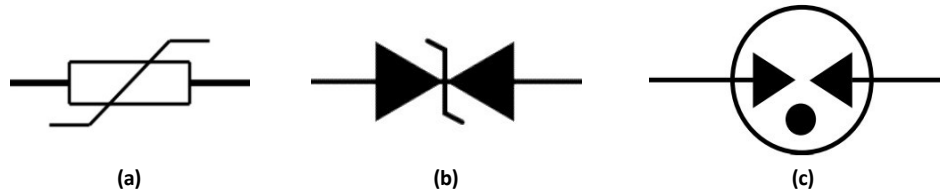


Figura 9. Simbología eléctrica común utilizada para (a) MOV, (b) TVS y (c) GDT. Modificado de (Littelfuse, 2016).

Un tubo de gas para descargas es una cámara cerámica con electrodos metálicos que sellan herméticamente un gas, por lo general argón o neón (Littelfuse, 2020). Son la primera línea de protección ya que redirigen las descargas eléctricas a tierra previo a entrar al resto del circuito.

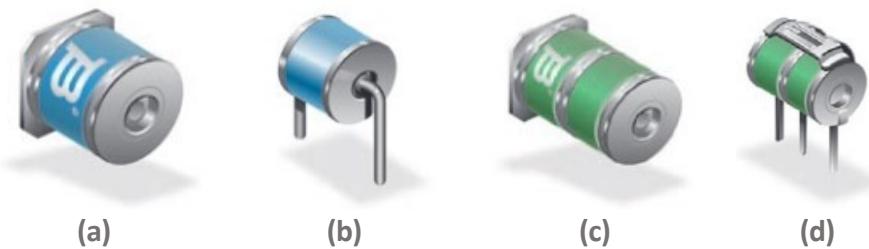


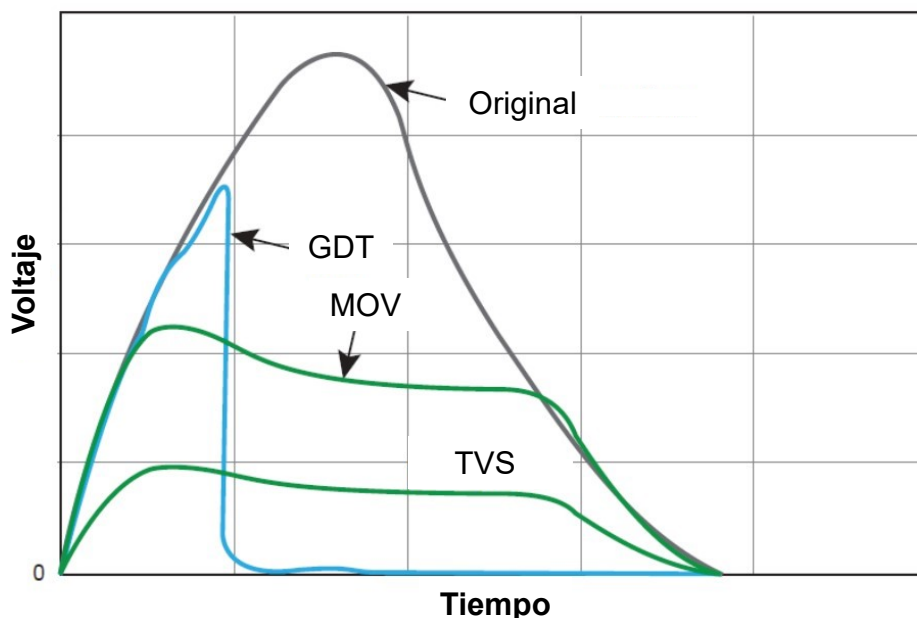
Figura 10. GDT comerciales usuales: (a) dos electrodos tipo SMD, (b) dos electrodos tipo TH, (c) tres electrodos tipo SMD y (d) tres electrodos tipo TH. Modificado de (Ardley, 2008).

Cuando el GDT se encuentra en reposo, presenta un estado de alta impedancia, evitando afectar al circuito en adelante; en cuanto un disturbio aparece, el gas comienza a ionizarse proporcionalmente a la velocidad del frente, ocasionando un efecto avalancha que convierte rápidamente al GDT en un corto circuito al llegar a su voltaje de ruptura (Ardley, 2008).

En las terminales del componente se genera entonces un voltaje de arco (menor a 10 V), el cual se mantiene pequeño para drenar grandes cantidades de corriente hacia tierra. Y una vez que la energía del impulso se atenúa y presenta un potencial menor al arco del GDT, éste regresa a su estado de reposo en alta impedancia (Ardley, 2008).

⁸ Gas Discharge Tube, en inglés. Aquellos con tres electrodos permiten proteger dos líneas distintas a la vez, por medio de sus extremos, para tener en común la terminal central que redirige las descargas eléctricas a tierra.

La ventaja de este componente sobre el MOV y TVS radica en ser el único que maneja la gran sobrecorriente del rayo. Además, su funcionamiento permite generar un circuito corto virtual a tierra, a diferencia de los otros que fijan o “anclan” el voltaje en cierto nivel y lo mantienen constante hasta que se extingue el disturbio⁹. Su gran detalle es la velocidad “lenta” de respuesta ante frentes muy rápidos, volviéndolo poco efectivo ante ESD a comparación de sus homólogos.



Tecnología	GDT	MOV	TVS
Capacidad de manejo de transitorios (8/20 μ s)	Alta (1kA~100kA)	Alta (0.1kA~100kA)	Media (0.1kA~15kA)
Tiempo de respuesta	Lento (ns)	Rápido (ns)	Muy rápido (ps)
Voltaje máximo de sujeción	Alto	Medio	Bajo
Corriente de fuga	Nula	Baja	Baja
Corriente de falla en estado activo (follow-on current)	Sí	No	No
Desgaste del componente	Sí	Sí	No

Figura 11. Comparación del GDT, MOV y TVS ante la descarga de un rayo. Modificado de (Littelfuse, 2016).

La figura anterior muestra la comparación entre estos tres dispositivos cuando se enfrentan a transitorios inducidos por rayos, mostrando una tabla con sus parámetros funcionales (Littelfuse, 2016). La mejor protección para las distintas descargas eléctricas (Figura 8) es sin duda la combinación entre ellos, así como cualquier otro adicional que ayude a preservar la vida útil del circuito en cuestión, acorde a sus condiciones y especificaciones de uso.

⁹ Este tipo de protección de sujeción se conoce como “clamping”, presente en diodos Zener, TVS y MOV. Aquella protección encontrada en GDT, TRIAC y SCR para cambiar su valor de impedancia es referida como “crowbar.”

4.3 Dispositivos de protección en sistemas digitales

Esta sección está enfocada en la protección de niveles lógicos de circuitos digitales (usualmente entradas) en sistemas sensibles a efectos electromagnéticos, primordialmente los circuitos integrados (IC), usando los componentes más comunes encontrados en los diseños.

4.3.1 Capacitores de desacoplo

También conocidos como capacitores en derivación o bypass¹⁰, filtran picos de voltaje de magnitud pequeña provenientes de algún fenómeno. Dado que estas sobrecargas son momentáneas y aparecen sobre líneas de corriente directa, se les redirige hacia tierra, previo a llegar al circuito, dándoles una línea alterna de baja impedancia.

Para considerar formalmente al capacitor de desacoplo, se deben tomar sus efectos parásitos, los cuales son la resistencia equivalente en serie (ESR) e inductancia equivalente en serie (ESL¹¹), donde la primera se relaciona con la corriente de fuga y la segunda es referida a los pines o terminales del componente (Wei, 2017).

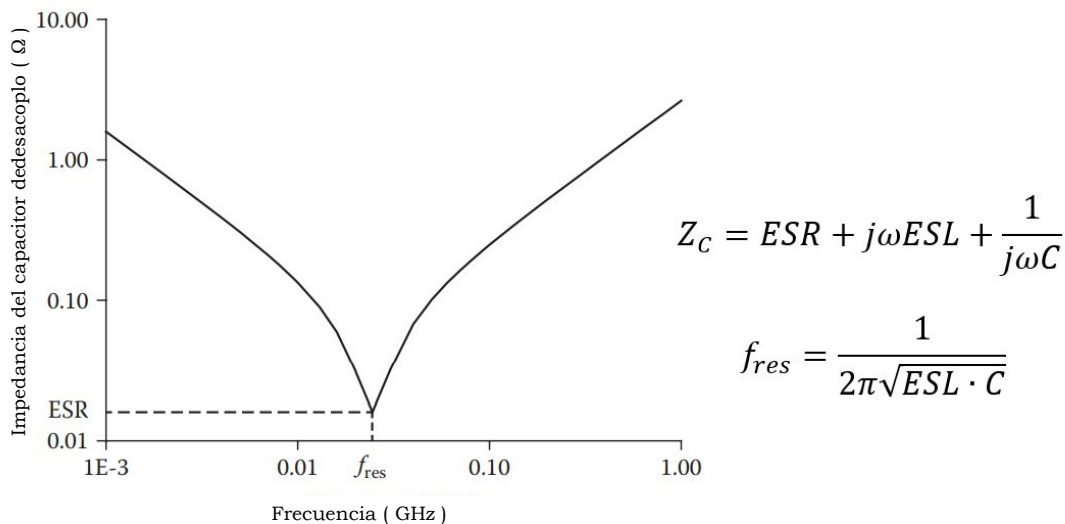


Figura 12. Impedancia en capacitor de desacoplo. Modificada de (Wei, 2017).

Aunque estos parámetros son valores muy pequeños, no pueden ser despreciados ya que complementan a los capacitores y modifican la frecuencia de resonancia a la que actuarán mejor y proveerán la impedancia mínima (Figura 12). En muchas ocasiones se conectan resistencias

¹⁰ Traducción común al inglés. También encontrados como “decoupling capacitors” o “decaps”. No confundir con los capacitores de acoplo o “coupling capacitors”, los cuales generalmente son encontrados conectados en serie entre dos etapas dentro de un circuito, permitiendo filtrar la señal DC

¹¹ Equivalent Series Inductance. Para el ESR, su acrónimo en inglés es Equivalent Series Resistance.

limitantes de corriente hacia el sistema para ayudar a los capacitores. Sin embargo, incluso sin tener un componente resistivo, implícitamente se tiene una baja resistencia por medio de los trazos conductores, lo cual resulta en un pequeño inductor que a muy alta frecuencia puede generar transitorios dañinos al circuito, siendo esta la razón para ser considerados como la última barrera de protección y ser colocados lo más cerca posible al integrado (Electronic Components KEMET, 2015). En resumen, se tiene lo siguiente.

- Una ESR pequeña disminuirá la disipación de energía en forma de calor; asimismo, una ESL pequeña evitará efectos inductivos en conjunto con el trazo conductor.
- Proporciona vías de baja impedancia a tierra, filtrando alteraciones no deseadas (Tabla 1). Incluso al posicionarlos en cascada aumenta el ancho de banda para la impedancia, y en conjunto con resistencias limitantes de corriente, es posible crear filtros paso bajas.

Tabla 1. Valores típicos de frecuencia de resonancia en algunos capacitores comerciales. Modificado de (Microchip, 2017).

Valor de capacitancia	Frecuencia de resonancia en tipos TH	Frecuencia de resonancia en tipos SMD
1 μ F	2.5 MHz	5 MHz
0.1 μ F	8 MHz	16 MHz
0.01 μ F	25 MHz	50 MHz
1000 pF	80 MHz	160 MHz
100 pF	250 MHz	500 MHz
10 pF	800 MHz	1.6 GHz

- Ayuda a regular mínimas variaciones en el voltaje de alimentación, actuando como baterías de respaldo al proveer una corriente inmediata para el circuito. Son colocados en la línea común de alimentación para un grupo de circuitos integrados¹², siendo de un tamaño, frecuencia y voltaje de ruptura acorde a su propósito (Tabla 2).

Tabla 2. Tipos de capacitores comerciales con sus limitantes máximas en frecuencia. Modificado de (Microchip, 2017).

Tipo de capacitor	Limitación en frecuencia
Electrolítico de aluminio	100 kHz
Cerámico	1 GHz
Mica	500 MHz
Mylar (película de poliéster)	10 MHz
Papel	5 MHz
Poliestireno	500 MHz
Electrolítico de tantalio	1 MHz

¹² Este tipo específico se conoce como capacitor de soporte y desacoplo (bulk decoupling capacitor).

4.3.2 Diodo Zener

La utilidad de estos diodos proviene de su mecanismo de actuación a partir de la ruptura Zener y el efecto túnel o “tunelaje”, gracias a su dopaje en la unión y voltaje de ruptura al estar polarizado inversamente (Neamen, 2011), a diferencia de un diodo de propósito general que se usa en polarización directa o inversa.

Es preciso no confundir su mecanismo con el efecto avalancha del diodo convencional (Figura 13), descrito sencillamente (Paul Gray, 2009) como sigue: “[...] ocurre en las uniones ‘pn’, donde los huecos (portadores minoritarios) y electrones, estando en la zona de depleción bajo un fuerte campo eléctrico de ruptura, colisionan con átomos de silicio, adquiriendo energía suficiente para formar pares [...]”.

En contraste, el efecto túnel debe tener un muy alto dopaje en la unión para alcanzar así un voltaje de ruptura Zener en niveles muy bajos de voltaje (hasta 2.7 V en componentes comerciales), comparados con los diodos convencionales (alrededor de 100 V). Poniéndolo en palabras simples (Domelen, 2020): “en el mecanismo Zener, el dopaje es tan alto que logra un espectro de energía suficiente para que la banda de valencia en el material ‘p’ alcance la banda de conducción en el material ‘n’, y con el impulso del potencial inverso, se logra el ‘tunelaje’ de electrones de forma exponencial”.

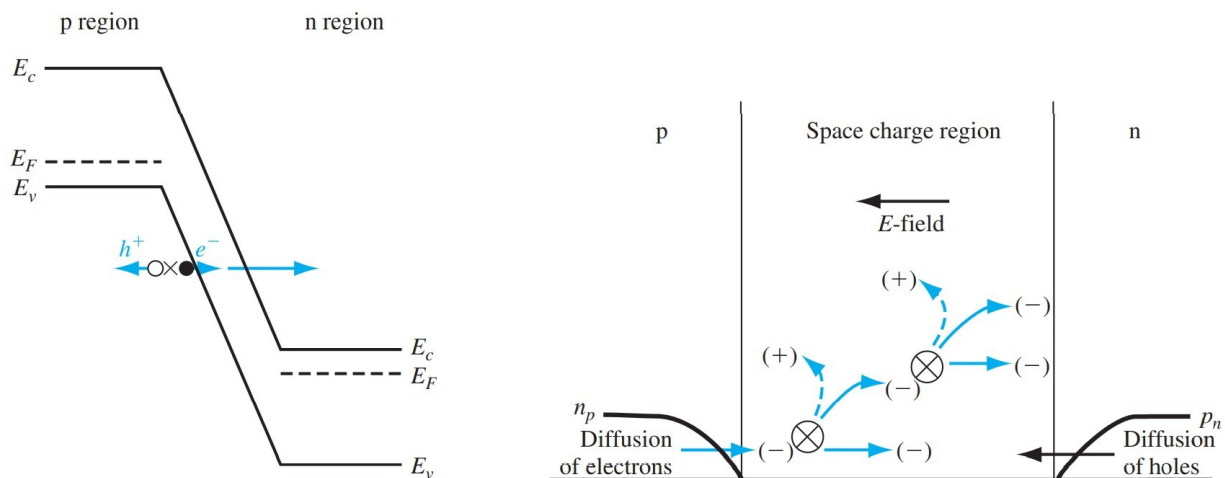


Figura 13. (Izquierda) Ruptura Zener o tunelaje, en comparación con el efecto avalancha (derecha), ambos presentes en uniones "pn" polarizadas inversamente. Modificado de (Neamen, 2011).

Gracias a que existe un denso flujo de electrones, se estabiliza o “ancla” de forma automática el voltaje mientras se drena corriente extra hacia tierra, funcionando como protección de sobrevoltajes en ramas como lo son líneas de datos o alimentación, primordialmente. Expandiendo este funcionamiento especial se creó el diodo TVS, siendo una implementación dual al funcionar análogamente como dos Zener unidos por el cátodo (Figura 9).

4.3.3 Diodo Schottky

Es el componente primordial para la protección de los pines, debido a sus características al funcionar en configuración directa e inversa, así como su alta velocidad de conmutación. También llamado “diodo de punto de contacto” (Neamen, 2011), se compone por un metal (ánodo) y un semiconductor (cátodo, usualmente tipo “n”).

Tabla 3. Comparación entre diodo Schottky y diodo de unión “pn” (Neamen, 2011).

Parámetro	Diodo Schottky	Diodo de unión “pn”
Ánodo	Metal	Semiconductor tipo “p”
Modelo electrónico		
Polarización directa	Emisión termoiónica de portadores mayoritarios	Difusión de portadores minoritarios
Polarización inversa	Barrera de potencial establecida en el ánodo que bloquea flujo de corriente inversa hasta el punto de saturación	
Densidad de corriente de saturación inversa	$\sim 10^{-7} \frac{A}{cm^2}$	$\sim 10^{-5} \frac{A}{cm^2}$
Conmutación en polarización directa	$\sim 0.3 V$	$\sim 0.7 V$

Este diodo funciona análogamente a la protección interna de los pines de los circuitos integrados. Dado que tienen una caída de potencial muy baja, fija el valor extra de voltaje únicamente al voltaje de referencia $\pm 0.3 V$, drenando así también mayor corriente en inversa. Suponiendo entonces un circuito que funciona con un voltaje de entrada de 0 V a 3.3 V, con diodos Schottky se tendría una tolerancia máxima de -0.3 V a 3.6 V para su funcionamiento.

Hay que destacar también su funcionamiento especial como conmutador al ser usado en polarización directa, ya que al no tener una difusión de portadores minoritarios, elimina la capacitancia de difusión, y dado que se colocan en paralelo a las cargas, no genera capacitancias parásitas, logrando así que no exista disminución de velocidad en líneas de datos.

4.4 Circuito integrado SI4010

Uno de los controladores más asequibles y completamente dedicados para transmisores de radiofrecuencia es el SI4010, fabricado por Silicon Labs. Merece la pena notar sus características principales, acorde a su hoja de especificaciones (Silicon Labs, 2010).

- ♣ Microcontrolador 8051 integrado como unidad de procesamiento.
- ♣ Memoria RAM OTP NVM¹³, ROM y EEPROM integrada.
- ♣ Transmisión frecuencial de 27 a 960 MHz.
- ♣ Potencia de salida ajustable para la emisión electromagnética.
- ♣ Capacidad de sintonizar la antena automáticamente (con sus apropiados componentes y trazos asociados a su funcionamiento sobre el circuito impreso).
- ♣ Permite modulación digital variable en OOK y FSK.
- ♣ Periféricos adaptables para funcionalidad GPIO, manejador led, contador, etc.
- ♣ Módulo optimizado para ultra bajo consumo de corriente (menor a 10 nA) con voltaje de operación de 1.8 a 3.6 V.

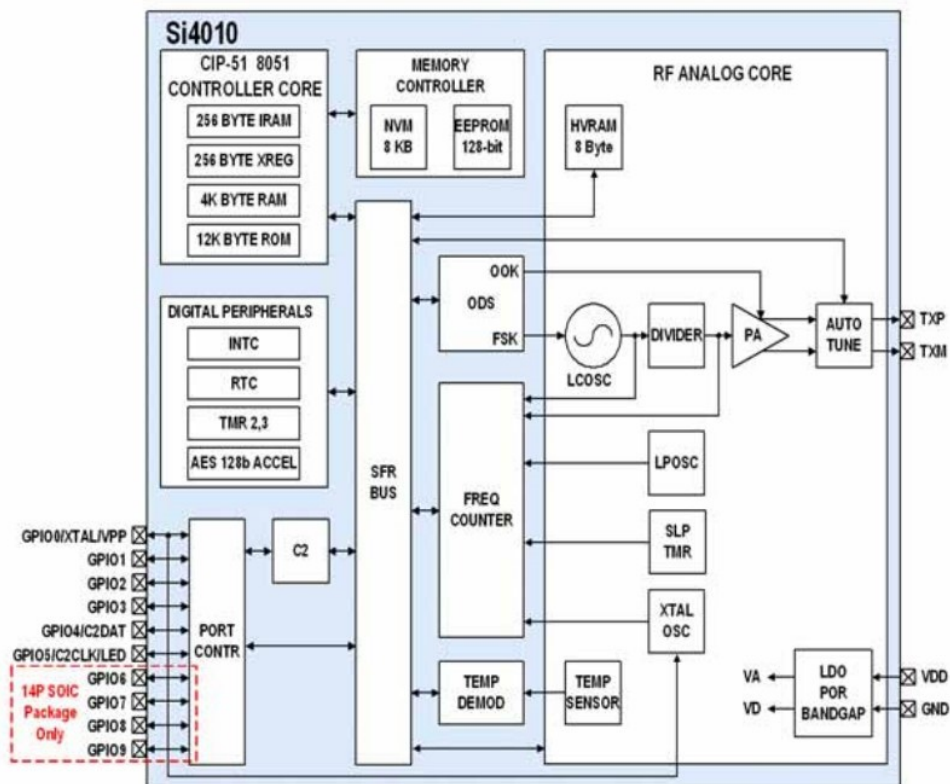


Figura 14. Diagrama de bloques del circuito integrado SI4010. Tomado de (Silicon Labs, 2010).

¹³ Acrónimo referente a One Time Programmable – Non Volatile Memory.

5. Antecedentes

Para lograr una mejora continua como empresa, se tiene como opción viable el desarrollar un producto mejorado y novedoso, para lanzarlo al mercado como recién adquisición y lograr de esa forma el interés en el consumidor. Sin embargo, previo a trabajar en nuevos diseños, primero se debe establecer un alto índice de confiabilidad sobre la empresa por parte de los clientes. Esto se logra atendiendo debidamente las fallas detectadas en los sistemas, mejorando la experiencia del usuario y dando paso a mejores productos.

Otro aspecto importante en este ámbito es obtener productividad en diseños producidos al día. Una forma de lograrlo es realizando cambios a los dispositivos de los cuales exista una alternativa, y en este caso específico, dicha opción resultó ser un GDT. Este componente es usado en sistemas perimetrales (rejas o portones, alejados de la entrada directa en una propiedad) como protección ante fenómenos atmosféricos, razón por la cual tiene un costo elevado. Aquí se encontró un punto de mejora para el producto, y fue mi tarea evaluar los posibles cambios para lograrlo.

Y finalmente, el trabajo en equipo fortalece la empresa en todos los aspectos. Gracias a la colaboración entre grupos interdisciplinarios, se ubicaron puntos de mejora en algunos productos, formalizando un proyecto al encontrar un transmisor de datos. Dicho dispositivo requería una renovación, aprovechando su alta demanda en el mercado. Sin embargo, al ser un rediseño, requiere pruebas de campo, certificaciones para ser puesto en venta, tiempo de desarrollo y demás factores económicos en gran escala. El reto aquí fue vencer estos factores con una propuesta sólida que viera estos cambios no como gasto sino como inversión a futuro para la empresa, tanto desde el punto de vista ingenieril como administrativo.

6. Participación profesional

Durante mi estancia laboral, realicé actividades según los requerimientos o problemas que se tuvieran en ese momento, en colaboración y con el asesoramiento de mis compañeros de trabajo en el área eléctrica, resumidas en las siguientes tres actividades.

6.1 Solución y atención a fallas en sistemas

La prioridad del grupo de trabajo es el soporte oportuno¹⁴ a los problemas presentados o fallas que ocurrieran en el momento, es decir, establecer una línea de atención a fallas en los sistemas.

¹⁴ Sustaining, es como se conoce en el argot laboral inglés.

Aquí puse a prueba mis conocimientos y habilidades de ingeniería para detectar y arreglar dichos inconvenientes.

La primera y más importante etapa de este proceso fue conocer el producto donde se presentó la falla, es decir, saber el propósito del sistema, para así, con base en el esquema eléctrico entender el comportamiento y su óptimo funcionamiento.

La segunda fue obtener la descripción de la falla. En la mayoría de los casos, tanto en soporte al cliente como en la línea de producción no se dan descripciones detalladas sino apenas una breve descripción del problema o simplemente unas cuantas palabras, por lo que fue necesario obtener y recaudar la mayor información en la medida de lo posible.

Una vez que consolidé estos dos puntos, realicé el análisis del problema. En algunas situaciones de mayor urgencia, el propósito primordial fue dar una solución lo más pronto posible al sistema. Sin embargo, para realizar el trabajo completo, tuve que encontrar la causa raíz para así eliminarla completamente y evitar problemas similares a futuro.

6.2 Componente alternativo: tubo de gas para descargas

Dado que este tipo de componente no lo conocía en su momento, antes de adentrarme en la propuesta de cambio, primero me di la tarea de investigar sobre este dispositivo y conocer sus funcionalidades y aplicaciones en la industria.

Posteriormente, con la investigación obtenida, me adentré en la idea de cambio de este elemento, entendiendo así que la búsqueda de una alternativa era para encontrar un punto de productividad laboral, ya que el uso de éste generaba gastos elevados comparados con los demás componentes en el circuito impreso.

Con el fin de cubrir las posibles alternativas de cambio, realicé una comparación entre componentes similares o usados con el mismo propósito, además de generar búsquedas con diferentes proveedores y fabricantes para encontrar mejores precios.

Acto seguido, al encontrar opciones viables para el cambio, procedí a realizar un análisis comparativo entre la pieza actual y los posibles candidatos de reemplazo, sin pasar por alto ningún parámetro esencial o regulatorio.

Finalmente, al lograr satisfactoriamente el análisis del componente y habiendo sido aprobado el cambio por el equipo de ingeniería eléctrica, procedí a realizar cambios necesarios en los tableros actuales para realizarles pruebas y ser llevados a producción.

6.3 Rediseño de circuito: transmisor de datos por radiofrecuencia

Usado en la visera de los autos para la apertura de puertas automáticas (Figura 15), este pequeño circuito constituyó un proyecto para llevar a cabo su rediseño eléctrico. En primera instancia, la propuesta de mejora llegó del equipo de manufactura, ya que se observaron muchos cambios viables, donde destacó un rediseño total para ir de componentes TH a SMT en su totalidad, desarrollado completamente dentro de las instalaciones en Sonora.



Figura 15. Transmisor RF para automóvil utilizado en abridores de puertas.

Para empezar, realicé un análisis de costo del tablero considerando su demanda anual, para observar la repercusión en caso de modificar dicho circuito. Una vez terminada esa parte, procedí a analizar el sistema y sus componentes, para buscar oportunidad de mejora en ellos y lograr ganancias óptimas al llevar a cabo dicho cambio.

Cuando identifiqué los componentes que podía cambiar, realicé análisis de parámetros para ver si los cambios tendrían consecuencias no deseadas; y tan pronto como los cambios quedaron aprobados, me dediqué a crear el rediseño mediante su esquema eléctrico (SCH)¹⁵ y circuito impreso (PCB)¹⁶.

Debido a que realicé un rediseño total, necesité llevar el esquema a una junta de especialistas en el tema para obtener su aprobación y dar seguimiento al proyecto. Al haber obtenido su visto bueno, procedí a la creación de prototipos del circuito, para tomar así las pruebas funcionales previo a ser llevado a producción. Esta etapa fue la última en mi estancia laboral, aunque me involucré en los pasos futuros a seguir para su validación y certificación, antes de ser llevado al entorno comercial.

¹⁵ Schematic, por su acrónimo en inglés. Conformar la estructura eléctrica del sistema en cuestión, representada por lo general en un programa computacional.

¹⁶ Printed Circuit Board, referido al diseño individual, también conocido como tablero.

7. Metodología utilizada

En mi desarrollo profesional realicé las siguientes actividades, aunque no secuencialmente pero sí siendo aplicadas según la tarea lo requiriera, acorde a los objetivos planteados.

7.1 Tareas dinámicas personalizadas

En el grupo de trabajo tuve una dinámica de asignación de tareas personalizadas, llevada a cabo mediante una metodología denominada Kanban¹⁷. Las primeras implementaciones de esta ideología se llevaron a cabo de forma física, en Japón (Figura 16), dentro de la planta de manufactura de Toyota (Kanbanize, 2020). Sin embargo, se fue modernizado hasta encontrar la misma forma de trabajo de manera digital, con numerosos sitios web que han facilitado su aplicación, como lo es Atlassian, de donde se rescaté la siguiente definición.

“El tablero Kanban es una herramienta ágil de gestión de proyectos diseñada para ayudar a visualizar, limitar y maximizar la eficiencia del trabajo en curso”. (Atlassian, 2020). Justamente es el propósito de asignar las tareas específicas, porque así cada persona está dedicada en su tablero donde visualiza el flujo de su trabajo.

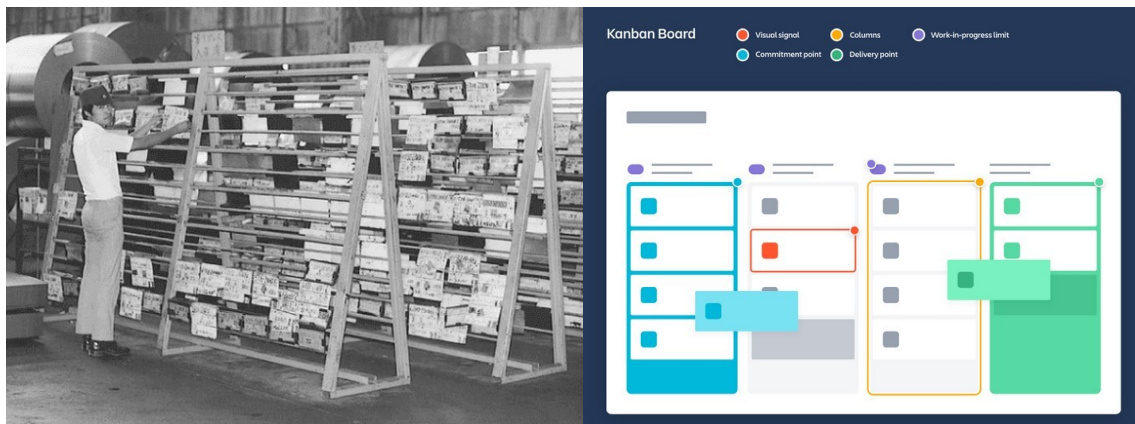


Figura 16. Evolución del Kanban (izquierda) (Kanbanize, 2020) a recursos digitales (derecha). Modificado de (Atlassian, 2020).

Realmente me ayudó y convenció esta forma de trabajo porque al momento de recibir una tarea de cualquier miembro de la planta, me fue posible seguir el proceso de la misma a través de las columnas del tablero (en espera, trabajada, implementada, finalizada, entre otras), comentando y revisando de mejor forma el contenido, al mismo tiempo que las personas interesadas en el asunto podían visualizar el progreso y aportar sugerencias o proveer información que me ayudaran a la mejor resolución en el menor tiempo posible.

¹⁷ Palabra japonesa que significa “señal visual”.

7.2 Análisis de circuitos eléctricos

Esta fue una de las actividades más retadoras que tuve en dicha estancia desde el momento en que llegué. La razón es porque me asignaron múltiples circuitos de los productos de la empresa, basándome únicamente en el esquema y su manual de usuario doméstico que se entrega a cada cliente. ¿El reto? Analizar el funcionamiento con base en los componentes y la distribución en el esquema, usando bases sólidas y no con una simple suposición.

Dicha tarea fue el pilar para comenzar con la detección de fallas en los sistemas, donde pude tener una visión global de la ingeniería eléctrica al conformar un conglomerado de conocimiento adquirido empíricamente, complementado a su vez con la experiencia del equipo con quien compartí el trabajo. Algunas configuraciones interesantes de bloques funcionales con las que tuve contacto seguido son las descritas a continuación.

7.2.1 Protección de circuitos integrados

Una requisición básica que encontré en muchos esquemas es el uso estricto de protección en los circuitos digitales, principalmente hacia pines de microcontroladores o integrados de alto valor comercial con funcionamientos específicos. A pesar de que estos dispositivos tienen una protección interna, es fundamental acondicionar la protección necesaria para que reciban el menor daño posible y cumplan su propósito de forma ideal.

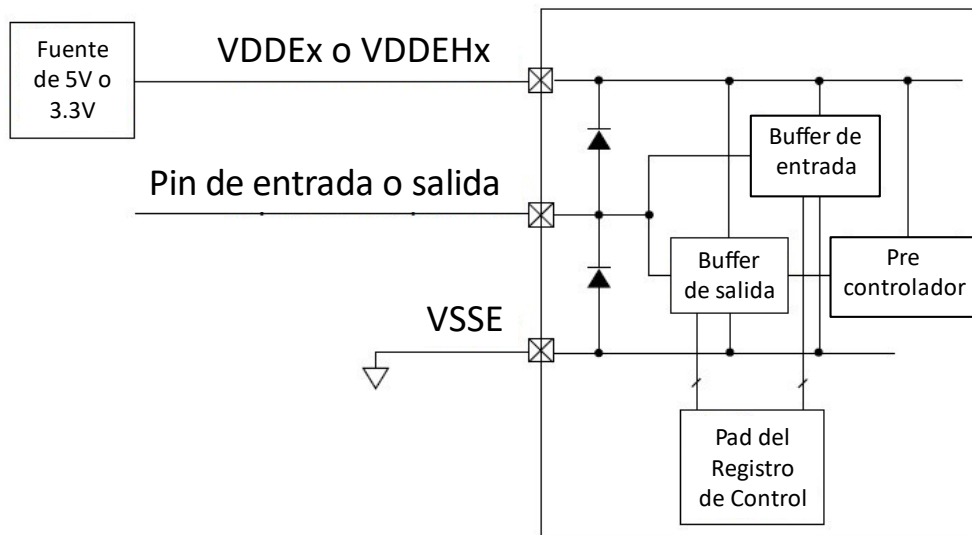


Figura 17. Circuito típico en pines de entrada o salida. Modificado de (NXP Semiconductors, 2017).

Por ejemplo, tomando el microcontrolador de la figura anterior, acorde a su fabricante (NXP Semiconductors, 2017), posee un circuito interno para contrarrestar efectos de ESD, donde se puede deducir lo siguiente.

- El registro de control permite habilitar los “buffers” de entrada o salida, uno a la vez.
- El bloque pre controlador permite manejar la corriente de salida en el “buffer”.
- Los diodos internos conectados entre el pin de entrada/salida y los voltajes de referencia permiten limitar el voltaje en la línea. El diodo superior, se acciona únicamente al detectar un voltaje mayor a la referencia positiva, mientras el inferior enciende una vez detectado un voltaje menor a la referencia negativa.

Aunque es normal encontrar protección integrada en los dispositivos electrónicos, acorde con especificaciones técnicas del fabricante, no está de más implementar medidas protectoras adicionales con circuitos de externos (capacitores de desacoplo, diodos Zener, diodos Schottky, etc.) para mejorar la vida útil del sistema y sus componentes.

Usualmente se dan valores recomendados en las hojas de especificaciones del fabricante para establecer filtros, capacitores de desacoplo e incluso diodos. Esto se debe a que ellos mismos han realizado pruebas y determinado el rango de valores con mejor desempeño para la protección de sus componentes, por lo que es bueno tomar como referencia dichas medidas para diseñar la protección.

A propósito, una recomendación que recibí como medida adicional de protección es siempre conectar los pines de los integrados para evitar que sean susceptibles al ruido (ya sea a voltaje o tierra, según la descripción de la terminal en específico), independientemente que el fabricante asegure que no hay problema al quedar desconectado.

7.2.2 Transistores como conmutadores

Siendo la conmutación la aplicación básica que se le puede dar a un transistor, ya sea BJT o FET, es ampliamente utilizado ya que, sin necesidad de componentes extra, se genera un interruptor. Desde mi punto de vista, una razón para ser usados de esta forma es su bajo precio, esencialmente cuando se trata de tecnología SMT, logrando dimensiones mínimas en los diseños.

La segunda razón es que su manejo en el circuito es sumamente sencillo, ya sea con una pequeña corriente en la base de un BJT o con un voltaje en compuerta para un FET. Esto permite aislar o proteger otros circuitos integrados al interactuar directamente con cargas no lineales (Malvino, 2000).

Ésta última función juega un papel importante, ya que, según su distribución, una carga notable puede conectarse en lado bajo o alto del transistor, es decir, depende si la conexión se realiza entre el transistor y la fuente de voltaje o entre tierra y el transistor (Figura 18).

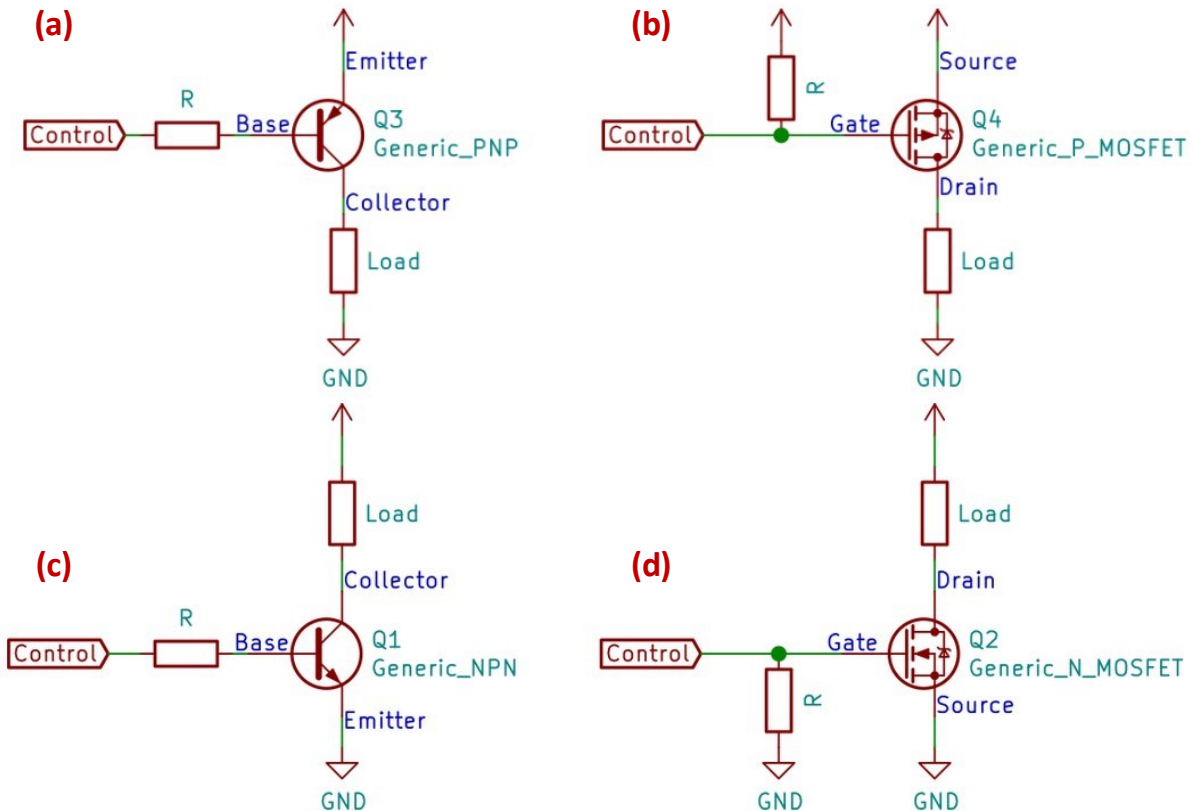


Figura 18. (a) BJT y (b) FET configurados en lado alto; (c) BJT y (d) FET configurados en lado bajo. Modificado de (Lewis, 2013).

La ventaja de una conexión en lado alto¹⁸ es que siempre se tiene una conexión de la carga a tierra, lo cual es ideal para dispositivos no lineales o aquellos con gran inercia mecánica eléctrica como puede ser un motor (Lewis, 2013). Por otro lado, la disposición en lado bajo evita la caída de voltaje en la unión del transistor al conectar la carga y entrega la potencia “completa” de la fuente. Desde el punto de vista eléctrico, el lado alto provee una mejor protección en caso de fallar el transistor, siendo por esto la más encontrada en los circuitos.

Cabe destacar que se debe poner atención al circuito integrado utilizado, ya que éste no debe configurar sus pines de control de salida como colector o drenador abierto¹⁹. La razón es porque existe un transistor interno que conecta su colector/drenador con dicho pin de salida, y el control del pin recae directamente en la base/compuerta (según sea el caso) en lugar del pin físico. Por lo tanto, al estar desactivado, presenta un estado de alta impedancia en la terminal (de ahí el término “abierto”); sin embargo, al activarse, el pin de “salida” se comporta eléctricamente como entrada al habilitar la ruta colector-emisor o fuente-drenador y conectar automáticamente a tierra el circuito ligado.

¹⁸ Conocida como “high-side transistor”, con su equivalente “low-side transistor”.

¹⁹ Recomendable leer las especificaciones técnicas para “open collector” en BJT y “open drain” en FET.

7.2.3 Mediciones de control

Para realizar el monitoreo de sistemas, generalmente se toman como referencia corrientes o voltajes en ciertos puntos de control. Es común encontrar estas mediciones en líneas de potencia por lo general, ya que están directamente relacionados con el comportamiento de los actuadores y partes mecánicas al momento de tomar su alimentación eléctrica.

Esta información recabada se lleva al núcleo de procesamiento, a través de un valor digital regido por un valor binario, o con una medición analógica más precisa que necesite acondicionamiento previo. En concreto, me fue común encontrarme con amplificadores operacionales, y por consiguiente, entender su configuración fue primordial para saber el propósito en el circuito y sus posibilidades de mejora.

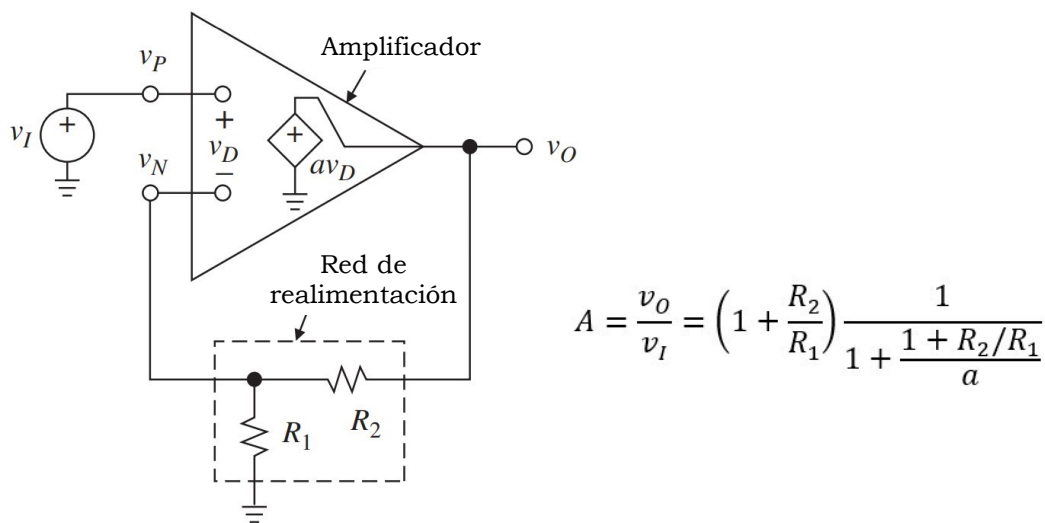


Figura 19. Circuito del amplificador no inversor. Modificado de (Franco, 2015).

El punto fundamental fue conocer y dominar las configuraciones que encontré (entre inversores, no inversores, comparadores y disparadores Schmitt, principalmente), así como no confundir la ganancia del circuito o lazo cerrado, denominada como "A", con la ganancia del amplificador operacional o lazo abierto "a", tal como se muestra como ejemplo (Figura 19) con un amplificador no inversor (Franco, 2015).

Desde mi entendimiento y aprendizaje, las ventajas de acondicionar y tomar señales de control con amplificadores operacionales son las siguientes.

- ❖ Resulta sencillo obtener la ganancia deseada con un par de resistencias.
- ❖ La aplicación del circuito es de bajo costo comparada con otras opciones complejas.
- ❖ Se pueden aplicar filtros en la misma configuración de realimentación.

- ❖ La mayoría de las mediciones de control se ocurren en baja frecuencia o en DC, permitiendo que el amplificador operacional funcione adecuadamente.
- ❖ En específico, una configuración no inversora permite tratar la señal tal cual se toma del sistema.

Siempre es preferible tomar las condiciones completas del amplificador y no perder de vista el propósito del circuito, para acondicionar mejor las señales de medición por medio de los cálculos realizados para su implementación.

7.3 Análisis paramétrico

Esta herramienta la aprendí a detalle con los ingenieros en componente, aunque debería ser un conocimiento básico para esta rama. Para adentrarme, tuve la necesidad de leer a detalle las hojas de datos de aquellos componentes eléctricos que debía aprobar o rechazar, siendo contrastadas sus características con el componente conocido o usado en producción.

En general, hay dos criterios distintivos que permiten agrupar la mayoría de sus características.

- ✚ *Eléctricos*: voltajes de entrada en directa e inversa, corriente consumida o máxima soportada, niveles lógicos, temperatura de operación y almacenamiento, ciclo de vida, conductividad eléctrica o térmica, tamaños de memoria, entre otros.
- ✚ *Mecánicos*: material aislante, tipo de actuador, dimensión tridimensional, tipo de montaje, platinado, tamaño de empaquetado, número y forma de terminales, etc.

Por obvias razones no todos los parámetros están presentes para todos los componentes. Sin embargo, debí realizar la comparación según los parámetros aplicables a cada parte, para así obtener las diferencias críticas o tolerables en cada caso, decidiendo si se puede aceptar como alternativa a los productos involucrados.

El diagrama de flujo (Figura 20) lo realicé con la intención de generalizar los pasos que seguí para aprobar o rechazar algún componente eléctrico. Por integridad de la empresa, es necesario someter dichos análisis a una revisión extra, ya sea ingenieril o regulatoria, según sea el caso, para determinar si el cambio es válido, y de ser así, implementarlo a futuro en los diseños que lo requieran.

Incluso, en algunos casos fue necesario discutir algún componente o sus parámetros con el equipo de diseño mecánico, ya que un cambio que a mi parecer era transparente para el circuito, involucraba complicaciones con otros factores ajenos a mi análisis.

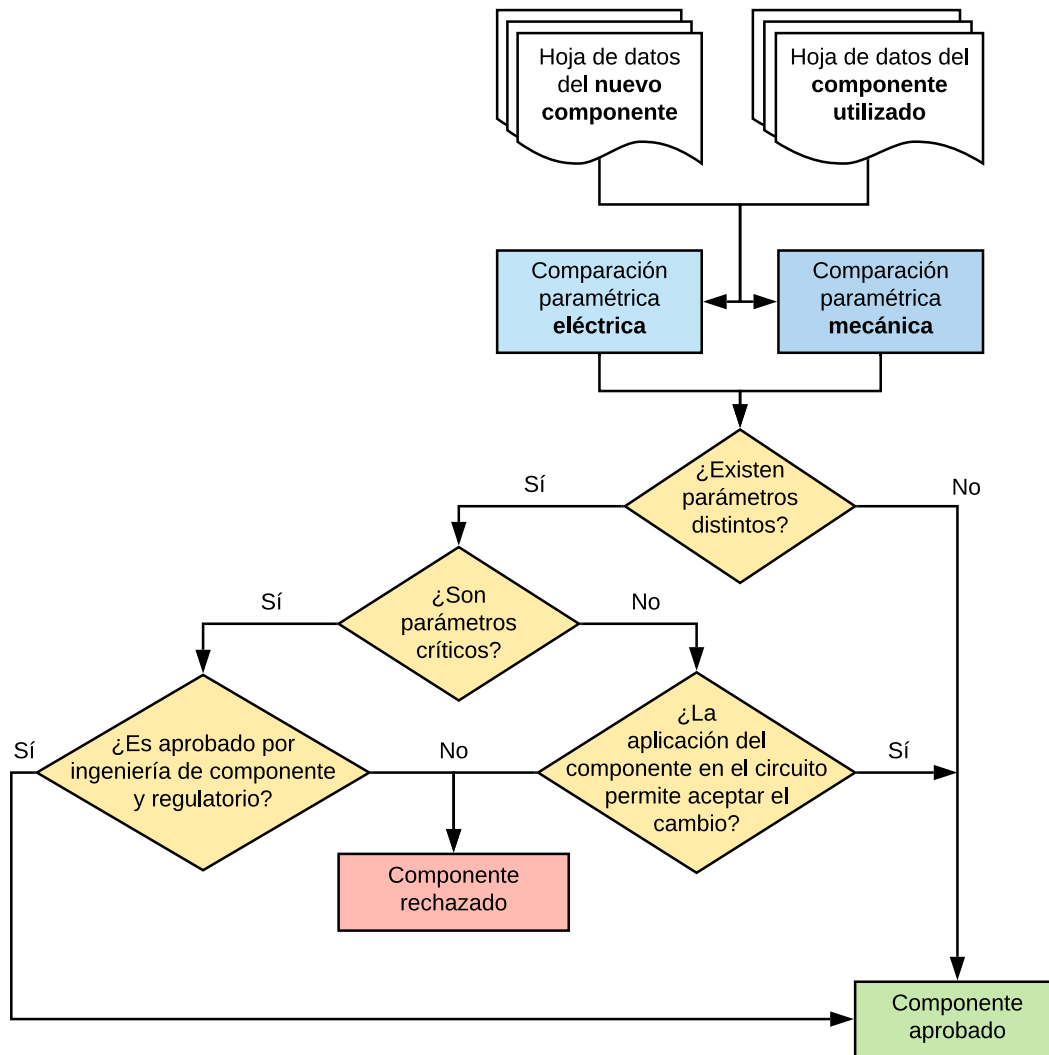


Figura 20. Diagrama de flujo al realizar un análisis paramétrico.

7.4 Consulta de proveedores o fabricantes

La comunicación con el grupo de Mercadotecnia²⁰ me fue fundamental para el proyecto, ya que ellos son el enlace directo con los fabricantes o proveedores, teniendo como propósito:

- Establecer comunicación directa con fabricantes o proveedores, ya sean aprobados por la empresa o nuevos a tratar.
- Realizar cotizaciones sobre un componente o material en específico, acompañado de una demanda o lote aproximado para obtener un mejor precio.
- Tiempo de vida estimado del componente, así como disponibilidad a largo plazo.

²⁰ Sourcing, es como se conoce en el argot laboral inglés.

- Solicitar a fabricantes recomendaciones en su catálogo a piezas alternas, ya sea por razones económicas o estándares de calidad.
- Pedir muestras de componentes para probarlos en los equipos involucrados y analizar su desempeño.

Una vez que realicé los análisis de componentes, y los mismos fueron aprobados, me dediqué a comunicarme con este grupo, proporcionando un número de parte del fabricante y su demanda aproximada para obtener un precio favorable.

Respecto a las ofertas dadas por los fabricantes, tomé en cuenta dos factores fundamentales, el embalaje (usualmente antiestático, por su naturaleza electrónica) y su costo de envío o embarque, asegurándome de escoger la mejor opción.

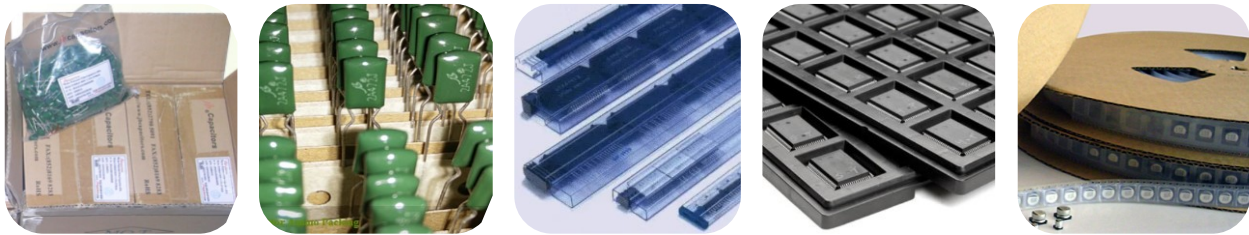


Figura 21. Embalajes comunes en la industria eléctrica (de izquierda a derecha): granel (bulk), tira de corte (ammo pack, tape cut), tubo o varilla (tube), bandeja o plancha (tray) y riel o cinta (tape and reel). Modificado de (Action circuits, 2020) (JB Capacitors Company, 2019).

El embalaje (Figura 21) depende del componente solicitado, ya que muchos pueden usar distintos tipos. Por ejemplo, pidiendo capacitores TH, puede solicitarse un lote a granel y ser colocados por trabajadores en la línea, o usar una máquina específica para separar los componentes si se piden en tiras de corte.

Para el fabricante, la forma de embalaje puede considerarse como un gasto más en material al crear el empaquetado final, tiempo de uso en su maquinaria para realizar el acomodo de las piezas y procesos extras de preformado o adecuación del componente.

Ahora bien, relativo al costo de envío o embarque, dependerá de la planta matriz de donde se mande el material, y por consiguiente, los aranceles de importación. Además, se debe contemplar el gasto que involucra mandar cierta cantidad, por decir, de 10 mil piezas a 10 millones, pudiendo negociar el costo si se compra mayor producto al proveedor.

7.5 Desarrollo de prototipos funcionales

Como preámbulo, es importante recalcar que todas las mediciones se realizan ya sea en el Sistema Internacional de Unidades o Sistema Inglés (SI). El primero de ellos ya lo conocía ampliamente, aunque el segundo, al no usarlo constantemente me creó ciertas confusiones.

Dado que la empresa era regida por el SI en muchos aspectos, las conversiones y mediciones de longitud que más usé para este ámbito son las siguientes.

$$1" \text{ (pulgada)} = 25.4 \text{ mm} = 2.54 \text{ cm}$$

$$1 \text{ mil (milésima de pulgada)} = 0.0254 \text{ mm} = 25.4 \mu\text{m}$$

$$40 \text{ mils} \cong 1 \text{ mm}$$

Volviendo al tema principal del apartado, enlisto las principales acciones y detalles que debí aprender y entender para ir desde un circuito electrónico simulado y completamente funcional (modelo anterior ya producido) hacia el rediseño de la PCB y sus respectivos prototipos.

7.5.1 Estructura de la PCB

Mi primer paso para comprender este proceso ingenieril (una vez que ya se tiene en cuenta el panorama del circuito eléctrico) fue analizar la estructura física necesaria de la PCB. Basado en la complejidad y propósito del circuito, puede realizarse con tantas capas conductoras y sus respectivos sustratos aislantes, jugando no sólo con la dimensión 2D al crecer o disminuir el tamaño del tablero sino también al incrementar el número de núcleos²¹, conformando así la pila de capas o “stackup” del circuito (Figura 22).

Si la PCB tiene una sola capa de diseño, se denomina sencilla o de una cara; al generar el circuito tanto en el lado superior como inferior, se denomina doble cara o lado; y con diseños adicionales en capas intermedias, se conoce como multicapa²². Sus componentes principales, descritos en (Thierauf, 2004), son los siguientes.

- ✓ *Trazos o rutas*: conforman las líneas conductoras, pudiendo ser superficiales, embebidas (dentro de máscaras de soldadura) o enterradas (ubicadas entre núcleos).
- ✓ *Planos*: son capas completas o la mayor parte de estas, usados para mantener la integridad en señales al conseguir un nivel lógico idéntico (tierra o potencial) en todos los puntos de la PCB. Usualmente son encontrados en las capas intermedias del diseño.
- ✓ *Vías*: conexiones utilizadas en forma de agujero en el eje Z (transversal) para comunicar distintas capas.
 - Si la vía tiene como propósito comunicar un circuito de la capa superior con la inferior o entre distintas capas de la PCB (como conectar tierra entre algún trazo

²¹ Se entiende como núcleo o “core” (Mitzner, 2007) a un sustrato con laminado conductor, ya sea por uno o ambos lados.

²² También conocidos estos diseños como “single-sided”, “double-sided” y “multilayer”, respectivamente.

y un plano), forzosamente deben ser recubiertas con material conductor, tomando el nombre de agujero platinado o metalizado (PTH)²³.

- Si no existe platinado alguno, simplemente se denomina agujero no platinado (NPTH, NPH)²⁴. Estos suelen ser usados por manufactura para ubicar posición del arreglo o ser sostenidos en rieles para soldar sus componentes (al atravesar por completo la pila de capas).

Una vez que entendí la complejidad del circuito y las características del tablero, pude conformar la pila de capas necesarias y suficientes para cumplir con el acometido del circuito, respetando con el grosor necesario en cada capa y dieléctrico.

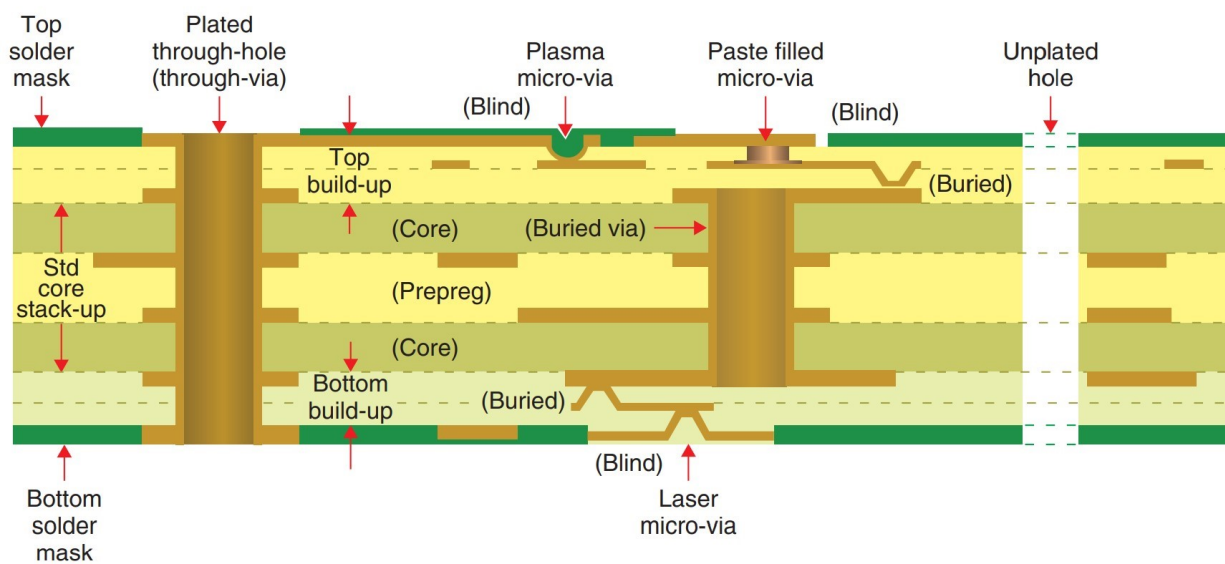


Figura 22. Elementos posibles en una PCB multicapa para formar la pila o "stackup". Tomado de (Mitzner, 2007).

7.5.2 Sustrato y recubrimiento del tablero

Me fue común ver tableros con sustrato FR4 o acabado HASL, ya que ambos son los más usados hoy en día para los diseños en general, pero en este caso, quise adentrarme más a porqué usar este tipo y qué beneficios otorga. Para lograrlo, me puse la tarea de ver las diferencias entre las opciones ofrecidas en el mercado y compararlas para escoger mejor.

²³ Plated Through Hole, por su acrónimo en inglés.

²⁴ Non Plated Through Hole, también encontrado como "Non Plated Hole" o "Unplated Hole".

Definido en (Tempo Automation, 2016), “el sustrato es una estructura dieléctrica compuesta por resina²⁵ y papel o vidrio mejorado con cerámicas, denominado dieléctrico principal”. Dado que se usan varias capas en PCB complejas, también suelen ser llamados laminados. En la fabricación de PCB, se tienen parámetros distintivos en cada material, donde se destacan son los siguientes (Mittal, 2015) (IPC Association Connecting Electronics Industries, 2003).

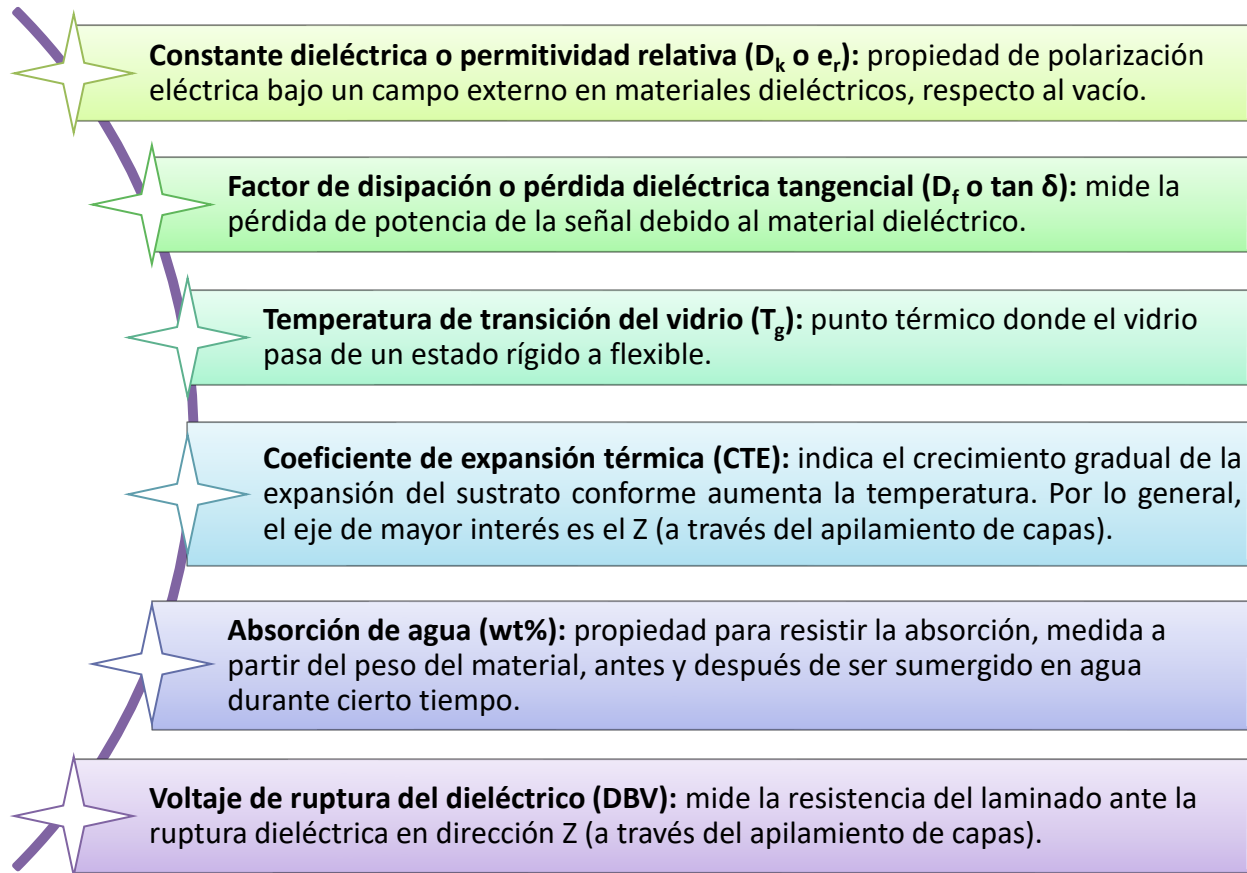


Figura 23. Parámetros comúnmente encontrados en sustratos (IPC Association Connecting Electronics Industries, 2003).

Realicé a continuación una rápida descripción de los materiales más usuales para los sustratos (Tabla 4), aunque existen diversas variantes que mejoran alguna de sus propiedades. Estrictamente hablando, muchos de ellos sólo son designaciones NEMA o ANSI y no el compuesto en concreto, aunque son ampliamente conocidos de esa forma en el ambiente comercial (Sai Fon Technologies, 2010) (Essentra, 2020). Los valores descritos son aproximados, por lo que es necesario consultar con el fabricante o proveedor las cualidades exactas del material.

²⁵ Polímero termoestable que se endurece al entrar en contacto con un material endurecedor específico. Estos son los adhesivos más comunes, encontrados en aislamiento eléctrico y uniones mecánicas (IPC Association Connecting Electronics Industries, 2003).

Tabla 4. Características de los sustratos más comunes en la industria (Sai Fon Technologies, 2010) (Essentra, 2020) (Nanotech Elektronik, 2019) (Nan Ya Plastics Corporation, 2014) (Panasonic, 2019) (CIF, 2020).

Designación	Composición	D_k / ϵ_r	$D_f / \tan \delta$	T_g (°C)	CTE (ppm/°C)
FR-1	Papel celulosa con resina fenólica.	4.0 a 5.0	0.025 a 0.035	105 a 130	57
FR-2	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Recomendado solamente para diseños rígidos de una cara. ✓ Fácil manufactura que permite bajo precio en los diseños. ✗ Baja resistencia ante estrés térmico. 				
CEM-1	Papel celulosa con fibra de vidrio y resina epóxica.	4.0 a 4.2	0.025 a 0.031	95 a 120	250
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Útil únicamente en circuitos rígidos de una cara o lado, debido a que no es compatible con los agujeros platinados (PTH). ✓ Material sumamente barato, siendo alternativa directa del FR-4. ✗ Tiene una débil respuesta ante estrés mecánico y humedad. 				
CEM-3	Comprimido de vidrio y resina epóxica.	4.0 a 5.0	0.015 a 0.03	125 a 135	160 a 260
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Recomendado solamente para diseños rígidos de una y doble cara. ✗ No tiene buena respuesta ante estrés mecánico. 				
FR-4	Fibra de vidrio con resina epóxica.	3.9 a 4.8	0.022	110 a 140	50 a 85
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permite manejar hasta 14 capas en diseños rígidos complejos. ✓ Sus características estándar y bajo precio permiten ser el material más utilizado en diseños actuales. ✗ No recomendado para circuitos específicos de alta frecuencia ni digitales de alta velocidad. 				
PTFE (teflón)	Politetrafluoroetileno.	2.0 a 2.4	0.003	240 a 280	110
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usado en circuitos flexibles e híbridos (rígido-flexible). ✓ Permite circuitos de control de potencia y alta frecuencia. ✓ Tiene gran estabilidad térmica y mecánica. ✗ Material difícil de manufacturar, elevando el precio en los circuitos. 				
Poliamida	Polímero sintético.	3.4 a 4.1	0.01	220 a 280	35 a 70
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Encontrado comúnmente en circuitos flexibles. ✓ Permite circuitos de alta frecuencia. ✓ Resiste fácilmente en ambientes extremos. ✗ Material difícil de manufacturar, elevando el precio en los circuitos. ✗ Absorbe gran cantidad de humedad, requiriendo tratamiento adicional. 				

Una vez determinado el sustrato de la PCB, el mismo fabricante coloca un acabado o “finishing” sobre la superficie del modelo físico al sumergirlo en un compuesto, el cual, “tiene la función de proteger el área conductora y mejorar el contacto tanto con los componentes electrónicos como con la soldadura, obteniendo una mejor durabilidad a largo plazo” (Henninger, 2012).

Al igual que en los sustratos, algunos de los acabados más usados en la industria los resumí enseguida, tomando de referencia estudios y especificaciones de fabricantes, principalmente en (Henninger, 2012) (Coombs, 2008), los cuales tienen las siguientes características.

Tabla 5. Características de los acabados más comunes en la industria (Henninger, 2012) (Coombs, 2008).

Designación	Composición	Grosor (μm)	Costo referido	Duración (meses)²⁶
HASL (Soldadura uniforme por aire caliente)	Soldadura basada en una aleación plomo y estaño.	2 a 40	\$	18
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Acabado más usado, al ser de bajo precio y fácil manufactura. ✓ Fácilmente retrabajable e ideal para unión con soldadura genérica. ✓ Opciones libres de plomo²⁷ usan aleaciones Sb-Cu, Sb-Ag-Cu y Sb-Cu-Ni. ✗ No ofrece una superficie planar uniforme, además de generar posibles filamentos²⁸ en trazos angostos y vías, así como conexiones entre trazos. ✗ Posible daño térmico al circuito debido a tratamiento a altas temperaturas. 			
OSP (Conservante orgánico para soldadura)	Recubrimiento orgánico fuertemente acoplado al conductor.	0.1 a 0.6	0.7 x \$	6
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Acabado completamente plano, ideal para trazos y componentes finos. ✓ Fácil manufactura y sumamente barato. ✓ Retrabajable y libre de plomo. ✗ No es posible saber la calidad del acabado debido a su transparencia, poniendo en riesgo la unión con la soldadura y el platinado de vías, obteniendo posibles daños en la integridad del circuito. ✗ Presenta una vida útil limitada comparada con otros acabados. ✗ Resistencia superficial dificulta el contacto con las secciones conductoras y puede producir desvaríos en pruebas funcionales. 			

²⁶ Este tipo de duración denominada “shelf-life” estima el tiempo de vida del circuito en estado de buena calidad mientras se encuentra almacenado o sin operación.

²⁷ La organización que otorga esta certificación o sello de cumplimiento a los aparatos electrónicos se conoce como RoHS (Restriction of Hazardous Substances), orientada a reducir el uso de Pb, Hg, Cd, Cr VI, PBB y PBDE bajo niveles permitidos.

²⁸ Conocidos como “whiskers”, estos filamentos son susceptibles a conexiones eléctricas no deseadas entre superficies conductoras, poniendo en riesgo la integridad del circuito.

ENIG (Inmersión de oro y níquel químico)	Deposición de oro sobre cobre, previamente protegida con níquel para mejorar el contacto bimetálico.	3.05 a 5.15	3 x \$	24
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Acabado completamente plano, trazos finos y libres de plomo. ✓ Permite superficie expuesta para componentes de contacto, como baterías tipo moneda. ✓ Evita oxidación y corrosión en la superficie conductora. ✗ Precio elevado debido a su materia prima y proceso de fabricación. ✗ No retrabajable, con posible daño a la máscara anti-soldadura. ✗ Puede presentar problemas en el proceso de soldadura como superficies oscurecidas²⁹, inhibiendo la unión con componentes. ✗ Presenta pérdidas de energía en circuitos de alta frecuencia. 			
Inmersión de plata	Baño de plata que ayuda a remover el cobre degradado.	0.1 a 0.4	0.8 x \$	12
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Acabado completamente plano, ideal para trazos y componentes finos. ✓ Proceso sencillo que permite alternativa económica sin plomo. ✓ Retrabajable y útil para realizar superficies expuestas para componentes de contacto, como baterías tipo moneda. ✗ Tiende a opacarse el acabado, obstaculizando la unión con la soldadura. ✗ Un baño de plata mal procesado puede alterar superficies conductoras de cobre, máscara anti-soldadura e incluso generar corrosión. ✗ Es posible generar micro huecos³⁰ en las posiciones de los componentes. 			
Inmersión de estaño	Recubrimiento de estaño que permite una unión ideal entre la superficie y la soldadura.	0.6 a 1.2	0.8 x \$	6
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Acabado completamente plano, ideal para trazos y componentes finos. ✓ Proceso sencillo que permite alternativa económica sin plomo. ✓ Retrabajable, además de permitir conexiones ideales con componentes. ✗ Sumamente sensible al contacto, pudiendo ocasionar mal funcionamiento. ✗ El proceso de manufactura usa agentes cancerígenos y genera constantemente filamentos en trazos angostos y vías. ✗ Sufre degradación con el tiempo, además de una ligera corrosión. 			

²⁹ Referido como “black pad”, es la corrosión natural de níquel al depositar el oro o retrabajar un tablero ENIG. Una correcta y controlada deposición de estos materiales es la clave para evitar este problema (Mittal, 2015).

³⁰ Conocidos como “microvoids”, reducen considerablemente la fusión entre la superficie conductora y la soldadura aplicada en el componente, produciendo incluso un circuito abierto.

7.5.3 Diseño asistido por computadora

Para conseguir prototipos, es necesario trabajar con un software de desarrollo, siempre y cuando se tenga ya un circuito simulado y teóricamente funcional, para realizar la migración hacia un sistema CAD³¹ especializado en diseño de PCB, como lo puede ser OrCad, Eagle, etc.

A lo largo de mi estancia, realicé los diseños con Altium Designer (Figura 24), el cual tiene la capacidad de crear los esquemas SCH con base en bibliotecas de la empresa o de los fabricantes, facilitando su creación. Una vez terminado el diseño, se puede migrar hacia la PCB, estableciendo sus conexiones con indicadores intuitivos que faciliten el modelado.

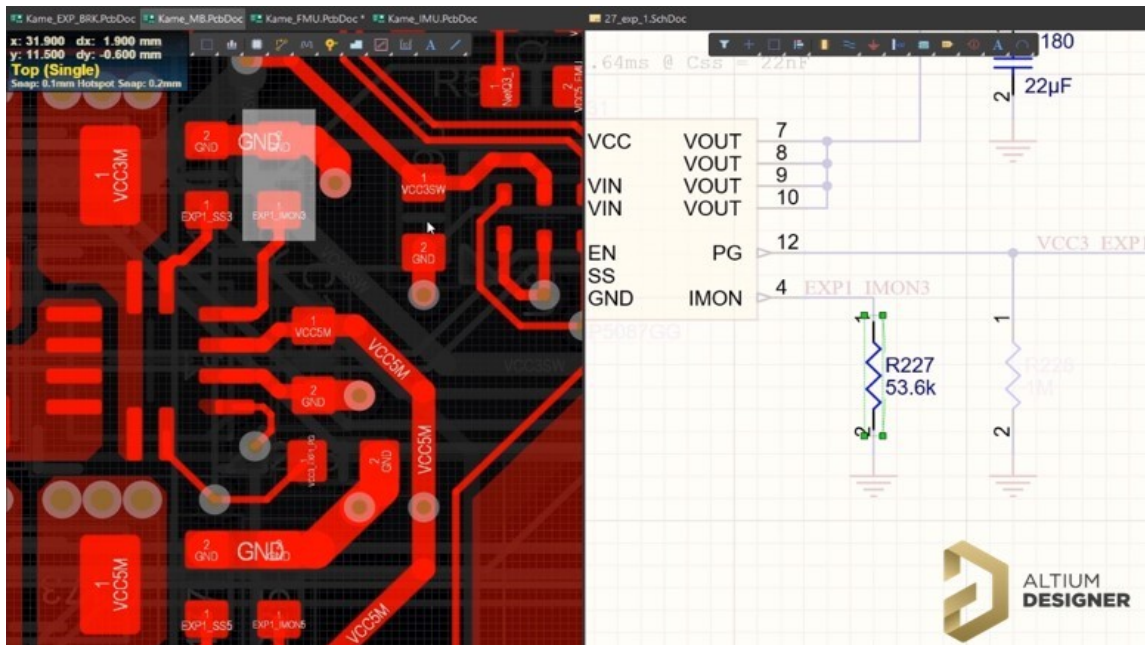


Figura 24. Vista previa de la plantilla de Altium para el diseño de PCB (izquierda) y SCH (derecha). Modificado de (Altium, 2020).

La verdadera potencialidad e importancia en el manejo de este software que noté sobre otros es el fácil manejo de la PCB a través de las distintas capas de diseño (layers) con base en la estructuración previa. Esto me permitió rápidamente exportar y conformar el conjunto de archivos base para su fabricación³².

Las capas más importantes que usé para la creación de la PCB, representadas a través de los archivos de fabricación, son las siguientes (Altium, 2020).

³¹ Computer Aided Design, por su acrónimo en inglés.

³² Conocidos como “gerber files”, involucran el conjunto de archivos de fabricación provistos al fabricante de PCB, sin compartir necesariamente el esquema eléctrico y/o dar información de su funcionamiento. Sus acrónimos comienzan con la letra G, para su fácil distinción.

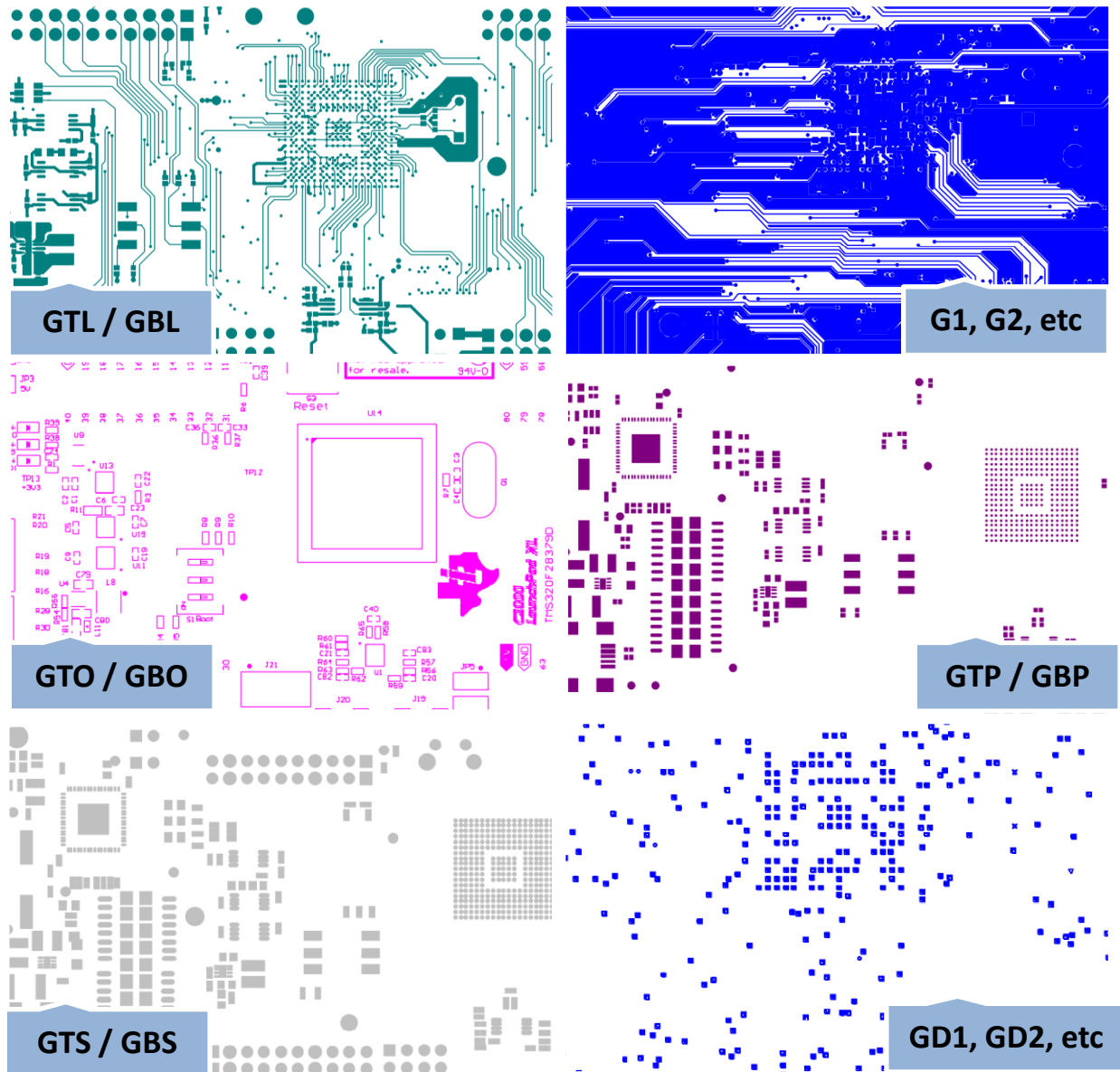


Figura 25. Archivos de fabricación del Procesador Digital de Señales LAUNCHXL-F28379D. Modificado de (Texas Instruments, 2017).

- ✚ GTL (Gerber Top Layer): muestra los trazos y conexiones eléctricas entre componentes de la capa conductora superior. Su contraparte es la capa inferior de la PCB, denominada GBL (Gerber Bottom Layer).
- ✚ G1, G2, etc (Gerber Mid-layer): usados al realizar una PCB multicapa, donde se requieren conexiones enterradas o planos intermedios de referencia.
- ✚ GTO (Gerber Top Overlay): muestra los identificadores de componentes y descripciones adicionales en la capa superior. Su contraparte inferior es GBO.

- ✚ GTP (Gerber Top Paste-mask): contiene el área donde se colocará soldadura, correspondiente a las terminales de los componentes. Su contraparte inferior es GBP.
- ✚ GTS (Gerber Top Solder-mask): ubica las zonas donde no se necesita soldadura, delimitando a la capa GTP. La capa inferior se conoce como GBS.
- ✚ GD1, GD2, etc (Gerber Drill): ubica los agujeros en el diseño, acorde a los componentes TH y del arreglo conformado.
- ✚ GM1, GM2, etc (Mechanical Layer): ubica el contorno de la PCB, contorno del arreglo, cortes internos (si es que existen), ubicación de componentes, puntos de prueba³³, etc.

7.5.4 Componentes electrónicos

Cuando coloqué los componentes sobre el SCH en Altium, verifiqué a la par su patrón o huella³⁴ en la PCB. Es primordial notar dos cosas importantes en estos componentes.

- *Tamaño*: preferible que sean dimensiones pequeñas, ya que se pueden colocar más componentes en un espacio reducido. No obstante, al reducir en demasía, implica que operadores manuales tengan dificultad para colocarlos, o en caso de un proceso automático, las máquinas deberán proveer la precisión adecuada para no errar su ubicación y evitar problemas posteriores.

Por experiencia, es importante confirmar que los tamaños de las huellas usados en la PCB coincidan con las dimensiones correspondientes estipulados en las hojas de datos del fabricante; asimismo, corroborar que su vecindad (espacio libre alrededor del componente) sea adecuado y no interfiera con algún otro dispositivo o mecanismo del sistema en cualquier eje.

- *Tipo de huella*: existen componentes de mayor tamaño que necesitan una huella que permita concentrar y liberar el calor únicamente en sus terminales³⁵ (Figura 26) para no disiparlo en la misma capa conductora donde se ubica (Thierauf, 2004).

De manera similar, si se trata de un tablero doble vista con componentes superficiales, se necesitará una huella más amplia para las terminales de un componente en la capa inferior, ya que ésta debe pasar por soldadura de ola necesariamente, a diferencia de la capa superior que completa su proceso de fijación al pasar únicamente por el horno de reflujo.

³³ Traducido como “test points”, son diminutas áreas circulares con el conductor expuesto, usados para monitorear líneas de voltaje, identificar daños en componentes y realizar pruebas funcionales del circuito impreso.

³⁴ Referido como “footprint”, son usadas para colocar y soldar las terminales de los componentes.

³⁵ Conocido como “thermal relief” en el ámbito inglés.

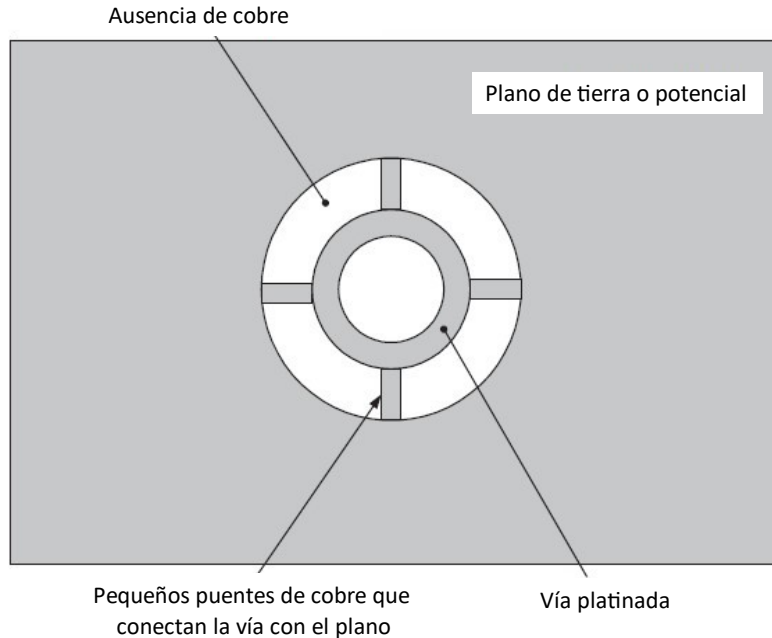


Figura 26. Huella concentradora de calor. Modificado de (Thierauf, 2004).

Relativo a la huella, debí tener en cuenta el tipo de terminal³⁶ (coloquialmente llamadas “patitas”) en los componentes TH, los cuales se caracterizan de terminales que deben ser incrustadas en la PCB a través de agujeros (platinados o no platinados, según se requiera).

Vienen en forma radial (terminales salientes del centro de sus extremos, como diodos), axial (terminales salientes de un mismo lado, como transistores) o múltiple (unión de las anteriores, como lo son los circuitos integrados) (Hedden, 1987), mostrados en la figura siguiente.

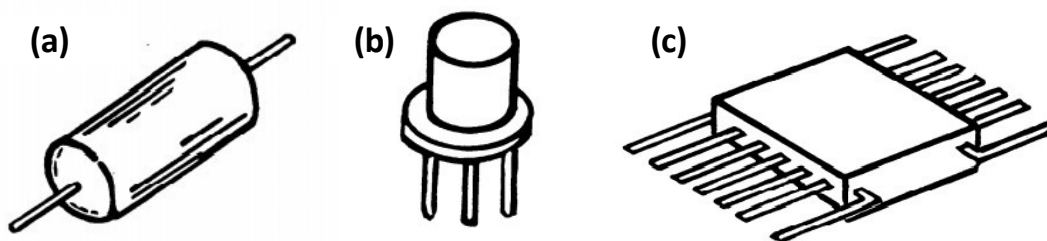


Figura 27. Tipos de terminales en componentes TH: (a) radial, (b) axial y (c) múltiple. Modificado de (Hedden, 1987).

Esta desventaja de incrustar componentes se elimina mediante SMT, los cuales se montan sobre la superficie, permitiendo diseños más compactos, con menores efectos parásitos debido a las terminales y luciendo más elegantes.

³⁶ Encontradas en la literatura inglesa como “leads” para componentes TH. En los componentes SMD se conocen como terminales de contacto o “pad”.

Claro que esta tecnología también ha evolucionado, al punto de introducir o construir dispositivos discretos en las capas intermedias conductoras (Figura 28), llamados componentes integrados o embebidos, teniendo la ventaja de liberar el espacio en la superficie a cambio de un complejo trazado de conexiones en el diseño (Coombs, 2008).

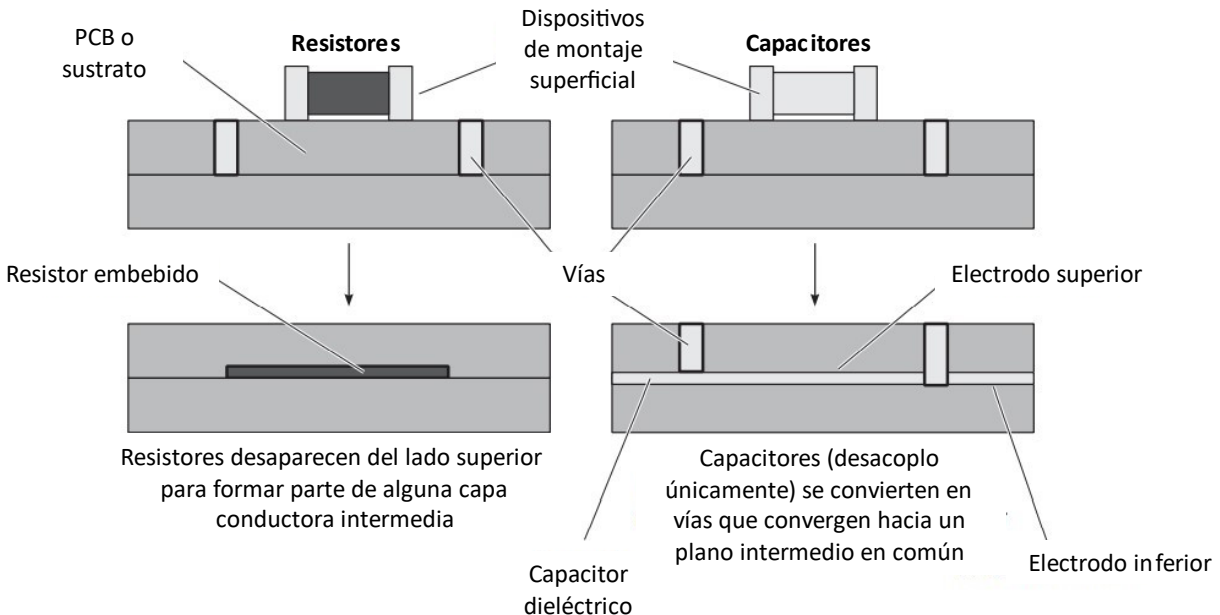


Figura 28. Transición de componentes pasivos SMD a tecnología integrada o embebida. Modificado de (Coombs, 2008).

Y finalmente, en lo que respecta a los circuitos integrados, se encuentra la mayor cantidad de empaquetados disponible, tanto en versiones SMT como en TH. Ahora bien, en específico para el implementado en el transmisor, identifiqué el tipo de empaquetado que usaron anteriormente para así escoger el adecuado al distribuir sus pines y trazar las pistas en el circuito hacia las demás involucradas.

Una tendencia natural en el diseño electrónico para IC es el uso de empaquetados tipo BGA o LGA (Figura 29), ya que el hecho de no extender sus terminales y ubicarse por debajo del integrado permiten reducir aún más su tamaño. Sin embargo, este tipo de huella ocasionalmente genera problemas de corto circuito entre sus contactos o soldaduras deficientes cuando no se tiene el equipo o proceso adecuado de manufactura, siendo esta la razón por la cual muchas veces se rechaza este tipo en diversas empresas.

Dejando de lado este paréntesis informativo, listé los empaquetados usuales en el siguiente diagrama (EE SEMI, 2008). A la mayoría de ellos se les suele agregar un prefijo que alude a una modificación en su tamaño, o un sufijo para determinar el número de pines del integrado, como puede ser un MSOP 8 (empaquetado tipo SOP en reducción mini con 8 pines).

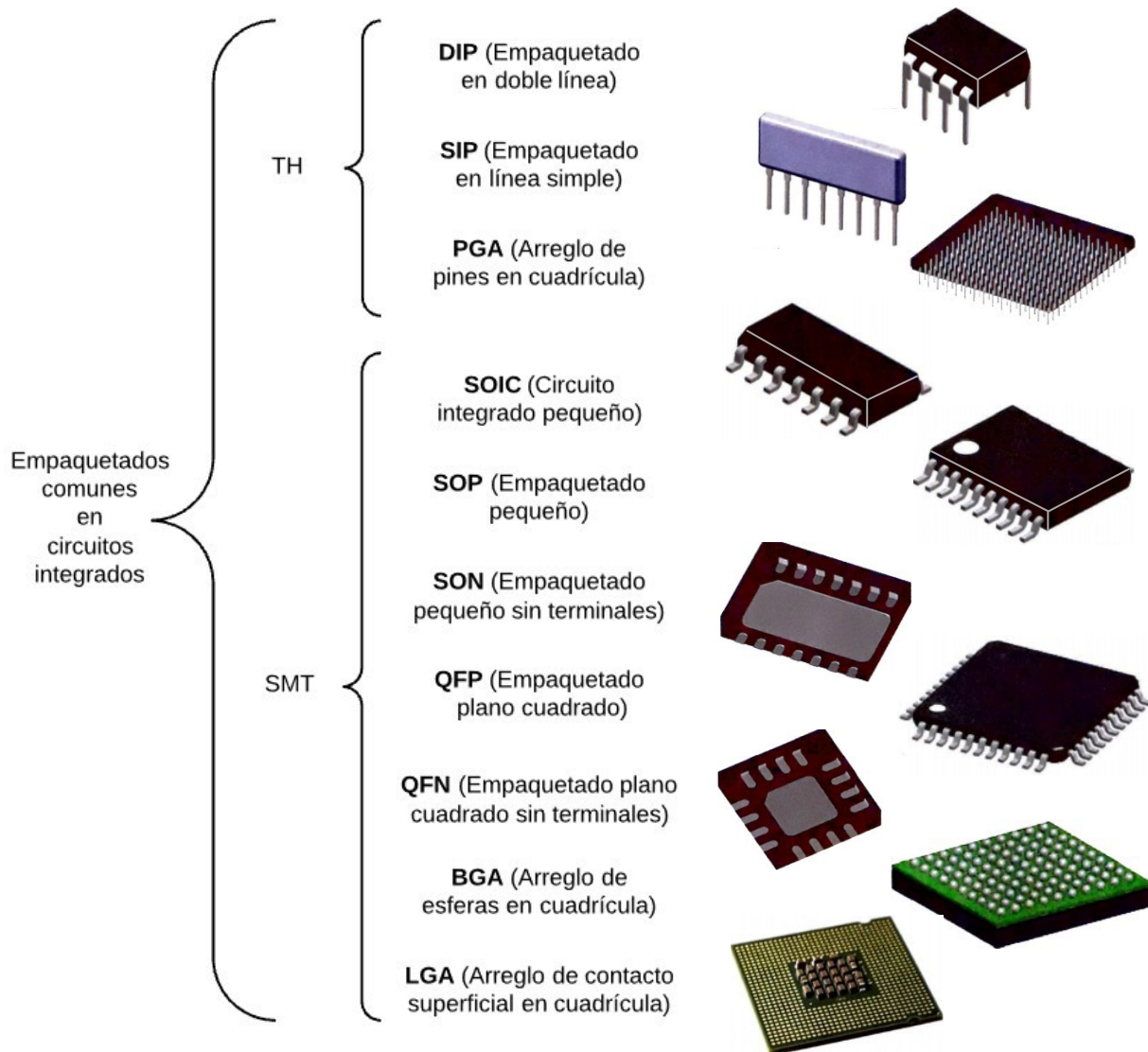


Figura 29. Familias principales de empaquetados para circuitos integrados (EE SEMI, 2008).

7.5.1 Conformación del arreglo

Finalmente, al terminar el diseño con sus respectivos trazos hacia los componentes y conexiones del circuito, procedí a construir el arreglo. Conviene especificar la diferencia entre un arreglo y un panel (IPC Designers Council, 2016); el primero, también conocido como “array” o “pallet” es el conjunto de PCB (diseños individuales iguales), fiduciales, pestañas, etc. Por otro lado, el panel es la incrustación del arreglo en el material de fabricación³⁷, agregando secciones de prueba o identificadores (test coupons). Las definiciones dadas por IPC para los segmentos principales son las siguientes (IPC Designers Council, 2016):

³⁷ Se debe regir por los tamaños comerciales o estandarizados, preferentemente.

- *Fiduciales*: agujeros redondos muy pequeños usados como referencia para el escáner óptico, ubicando así la distribución física de los componentes.
- *Pestañas (tabs)*: espacios extra de material en los dos extremos largos del arreglo, donde se colocan agujeros de soporte. Son usados por manufactura para sostener el arreglo y recorrerlo a través de los procesos de inserción de componentes.
- *Agujeros de soporte (tooling holes)*: son agujeros no platinados con forma redonda u ovalada, usados como referencia en el arreglo para posicionarlo en la dirección correcta durante su fabricación y ensamble automatizado. De igual forma se encuentran en la PCB como referencia y dirección del circuito (usualmente opuestos en diagonal).
- *Identificadores (test coupons)*: agregadas por los fabricantes, ofrecen información de fabricación acerca del panel creado, parámetros de control, identificadores, etc.

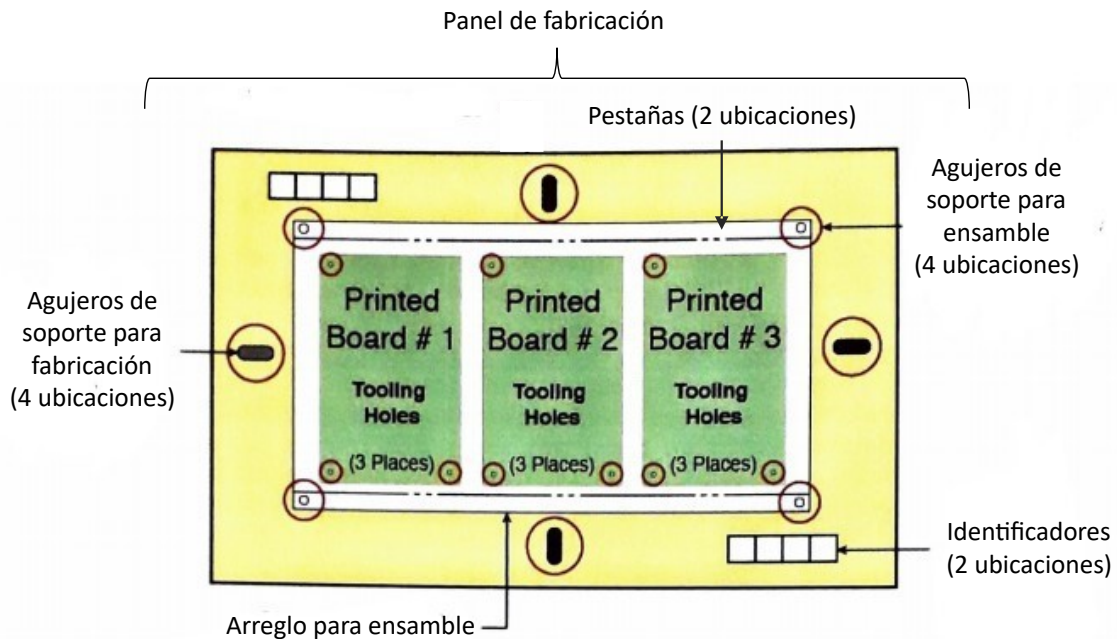


Figura 30. Panel de fabricación con sus características más importantes. Modificado de (IPC Designers Council, 2016).

En lo personal, fue mi tarea enfocarme en el diseño del arreglo y no en el panel, ya que éste casi siempre es generado por los fabricantes debido a que les proporciona información relevante acerca de sus procesos.

Usando Altium y tomando como referencia el ensamble anterior, diseñé el arreglo completo para maximizar el espacio disponible acorde al tamaño genérico del panel establecido por el fabricante (Figura 30) y ocupar así la mayor cantidad de material.

Letter	Number			
	1	2	3	4
A	2.4 × 3.2	2.4 × 6.7	2.4 × 10.2	2.4 × 13.8
B	4.7 × 3.2	4.7 × 6.7	4.7 × 10.2	4.7 × 13.8
C	7.1 × 3.2	7.1 × 6.7	7.1 × 10.2	7.1 × 13.8
D	9.5 × 3.2	9.5 × 6.7	9.5 × 10.2	9.5 × 13.8

Figura 31. Tamaños genéricos de paneles (unidades en pulgadas), establecidos por el estándar IPC-2221 A. Estos tamaños son identificados por una letra, seguida de un nombre (yendo desde A1 hasta D4). Tomado de (Mitzner, 2007).

En este proceso hay dos notas importantes a tomar en cuenta: la primera es ubicar los agujeros de soporte en lugares donde no se interrumpa en ninguna capa al circuito. Para el equipo de manufactura es importante tanto la ubicación como la forma de éstos, ya que sirven como simbología y referencia al momento de colocar componentes y establecer la dirección correcta al momento de llevarlo a través de las bandas transportadoras.

Como segundo punto, es primordial marcar correctamente el contorno de la PCB y el arreglo, así como todos aquellos cortes internos que existan en el diseño. Esto es porque debí colocar trazos de corte (score line) que permitieran delimitar y separar los tableros de las secciones únicamente funcionales para su manufacturación.

7.5.2 Dibujo para fabricación

Junto con los archivos base para la construcción de la PCB (capas del diseño individual o en arreglo), el dibujo para fabricación (fabrication drawing) es la parte más importante para solicitar prototipos, ya que lleva los requerimientos necesarios para su fabricación.

Revisé los dibujos de diversos productos y destacué los siguientes puntos fundamentales para una buena comunicación con el fabricante, numerándolos en la figura siguiente como ejemplo.

1. *Encabezado o titular:* incluye el nombre del proyecto, propietario del diseño, fecha de realización, número de parte o clave de referencia, entre otros más.
2. *Tabla de revisiones:* permite cotejar la versión del diseño para fabricación entre el fabricante y el diseñador de PCB, así como cambios realizados en versiones recientes.
3. *Especificación del ensamble individual y/o arreglo:* adecuadamente acotado con unidades unificadas, sistema de referencia y tolerancias incluidas en las mediciones.
4. *Detalle de laminación:* especifica las onzas³⁸ de conductor (usualmente cobre, aunque puede ser níquel o aluminio con diferentes tratamientos en su implementación) y

³⁸ Para el material conductor, se especifica el grosor de la capa a través de la cantidad de material depositado sobre el sustrato, medido en onzas por cada pie cuadrado (oz/ft²) o gramos por metro cuadrado (g/m²), aunque coloquialmente se encuentra descrito en el dibujo como onzas (oz), dando por entendida la unidad.

grosor del sustrato, así como del apilamiento de capas (la forma gráfica es recomendada para su mejor comprensión).

5. Sección de notas al fabricante adicionales, que incluye lo siguiente.

- Material dieléctrico y acabado del tablero.
- Tabla de especificación de agujeros, incluyendo la simbología y conteo para platinados, no platinados y fiduciales.
- Trazos de corte, usados para dividir el arreglo en los tableros ya definidos, disminuyendo el riesgo de dañarlos al separarlos individualmente.
- Lista de archivos base para la fabricación, correspondientes a las capas de ensamble del circuito (Figura 25).
- Normativas y estándares de fabricación a cumplir.

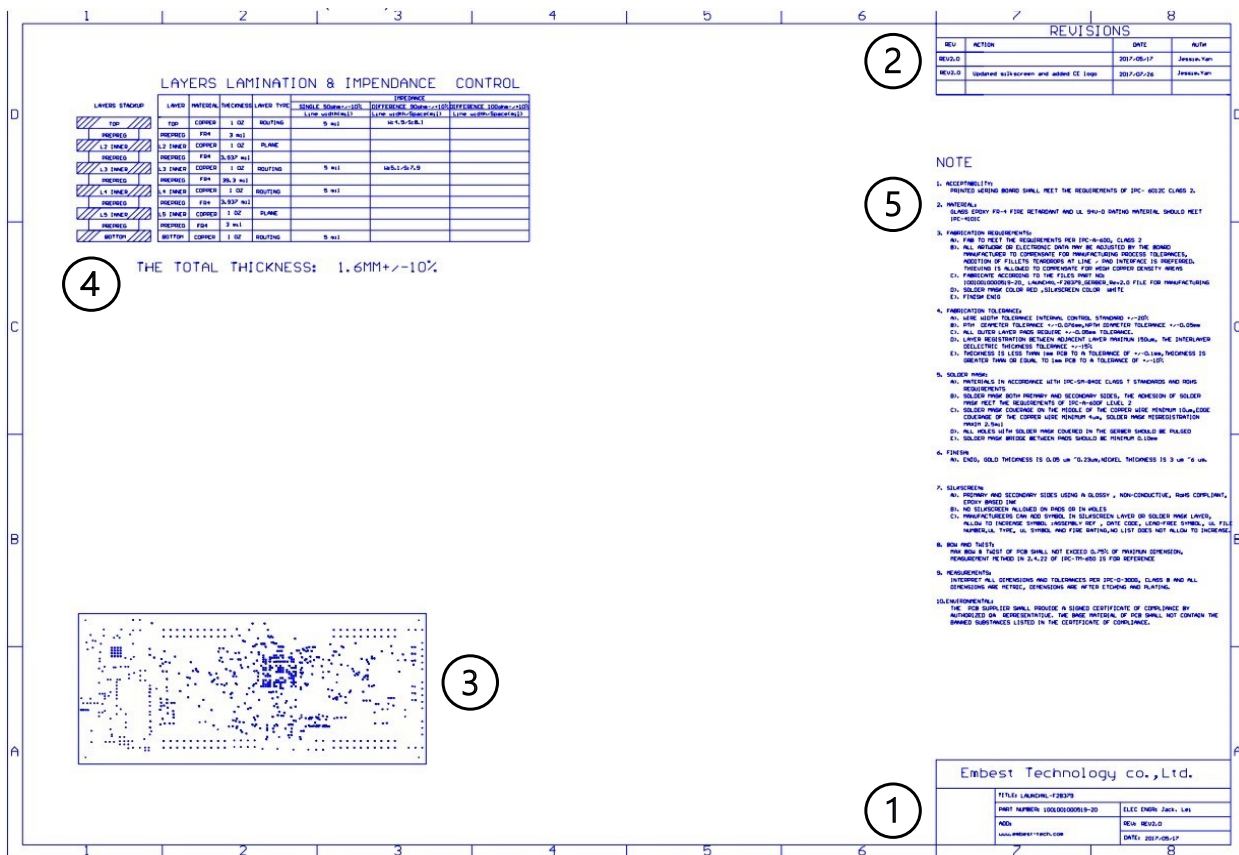


Figura 32. Dibujo para fabricación correspondiente al Procesador Digital de Señales LAUNCHXL-F28379D. Modificado de (Texas Instruments, 2017).

Una vez reunidos tanto el dibujo como los archivos base de construcción para la PCB, puede solicitar una primera cotización al fabricante, sirviendo este conjunto también como base para refinar posteriormente el circuito al momento de consultar el diseño con el equipo.

7.6 Coordinación con equipo interdisciplinario

Laborar en un ambiente tan grande requiere de una gran cantidad de personal dividida en grupos asignados a tareas específicas. Personalmente, estuve asignado al equipo de diseño y soporte oportuno del área eléctrica, quienes me enseñaron todo lo necesario para conseguir esta experiencia laboral, aunque también estuve en contacto con otros equipos interdisciplinarios alrededor de la planta, en virtud de notificar cambios acerca de mis actividades realizadas y recibir asesoramiento por parte de ellos.

Fue fundamental entablar una buena relación con cada integrante involucrado al proyecto, ya que entre todos logramos un mejor resultado, aportando ideas y retomando propuestas anteriores para mejorar el producto. Los grupos interdisciplinarios con los que tuve mayor contacto se muestran a continuación, aunque no son los únicos de la empresa.

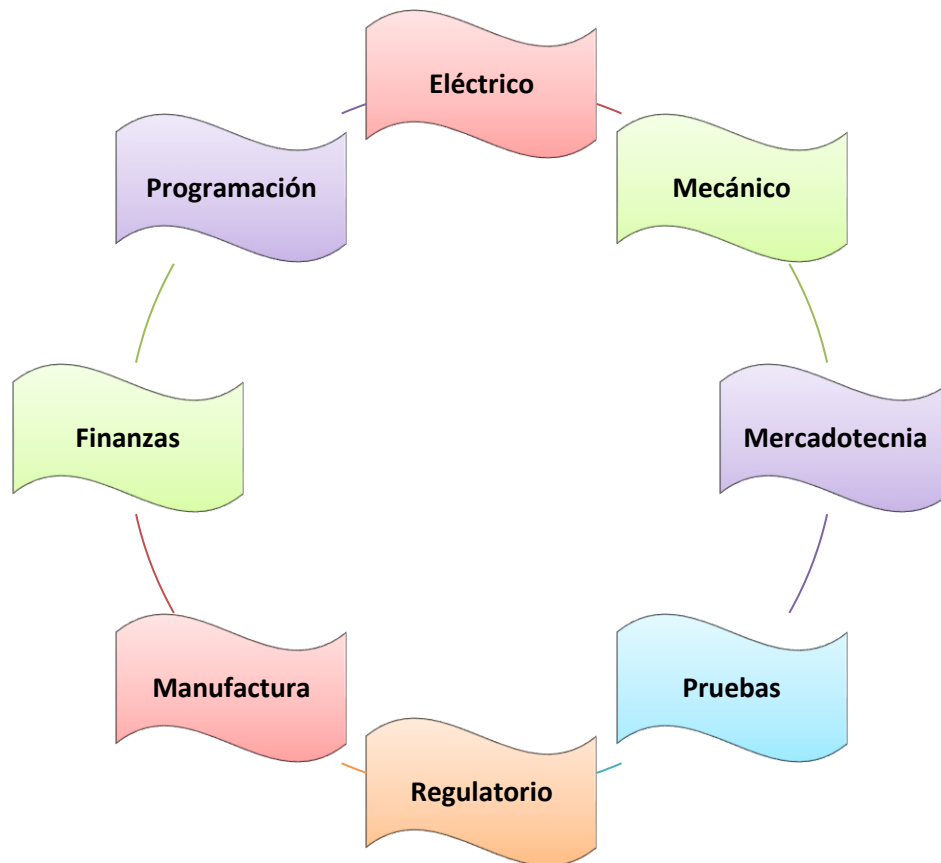


Figura 33. Grupos interdisciplinarios involucrados en el proyecto.

Como ya mencioné, el equipo de Mercadotecnia me ayudó para conseguir componentes alternativos, en ese caso, encontrar variantes de TH a SMT cuando no se encontraba opción alguna en el inventario de la planta. Para el caso de tamaños y modificaciones de posición en los

componentes, lo verifiqué siempre con el equipo mecánico, quienes se encargaron de asegurarme que la colocación de los dispositivos no interfería con los actuadores.

De comunicación directa también estuve en contacto con el equipo de programación, ya que, al rediseñar el circuito, establecí nuevas conexiones eléctricas y componentes que debían actualizarse en código para proveer el mismo o mejorado funcionamiento.

Para el caso del equipo de pruebas y manufactura, aprendí cómo llevar a cabo el proceso en la línea de producción, y fijar los estándares de pruebas para el correcto funcionamiento del sistema, yendo de la mano con el equipo regulatorio, quienes tenían a su disposición la lista de normas a cumplir por el transmisor de datos y demás productos de la empresa.

Y finalmente, el equipo de finanzas, quienes llevando a cabo sus análisis financieros acerca de los nuevos cambios con la implementación del producto, decidían si el proyecto seguía adelante y era fructífero para la compañía, o simplemente no valía la pena su inversión.

Tuve una grata convivencia con todos ellos, sin mencionar lo mucho que me enseñaron acerca de sus disciplinas gracias a su experiencia, y sobre todo, la paciencia para compartir su conocimiento con alguien que comienza en ese ambiente laboral.

8. Resultados

Toda la metodología incluida en este reporte rinde frutos a través de los resultados presentados a continuación. Además, durante mi estancia usé todo software bajo licencia de la empresa. He de dejar en claro que ningún diseño es mostrado debido a la cláusula de confidencialidad otorgada a la empresa, por lo que no puedo dar explicación detallada, aunque mi verdadera intención es proporcionar una visión general de lo obtenido a través del proyecto.

8.1 Replicación de situación de falla

Este evento lo tuve constantemente presente en la empresa, ya que se daba debido a las quejas de cliente o los problemas momentáneos en la línea de producción. Por esta razón, siempre eran prioridad para resolver. Tan pronto como tenía una vista general del comportamiento del circuito y sus problemas asociados, procedía a analizar el daño. Con base en las diversas experiencias y situaciones que encontré, pude generar el algoritmo siguiente para su resolución.

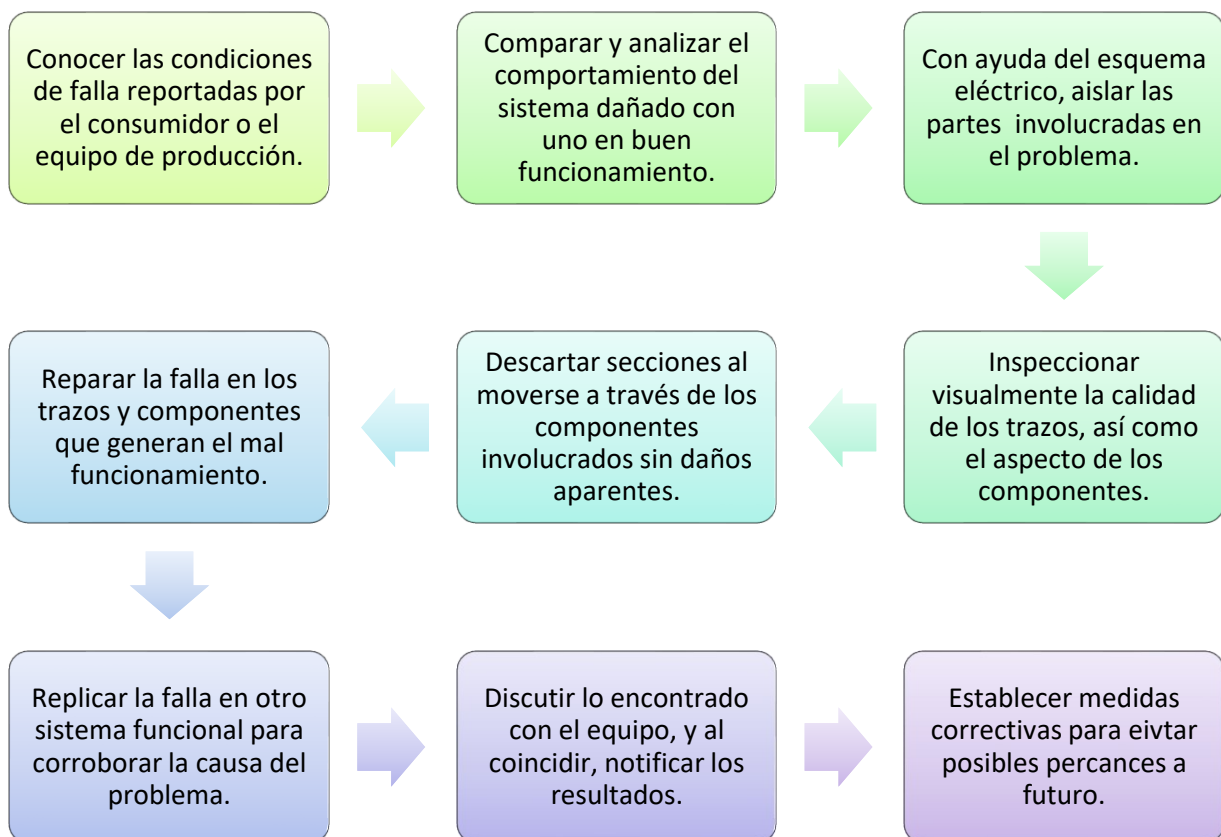


Figura 34. Algoritmo para replicar y resolver una situación de falla.

Dentro de las fallas recurrentes había componentes y trazos dañados, así como afectaciones sujetas a descargas electrostáticas externas, entre las más comunes. Para realizar reparaciones y detecciones correctas, siempre tuve a mi disposición el equipo necesario que me permitió retrabajar tableros y analizar sus diversos comportamientos.

8.2 Análisis paramétrico del GDT

La razón de cambio de este componente fue buscar productividad en el diseño, ya que era uno de los dispositivos más caros, comparado con los demás en la factura de materiales (BOM)³⁹ del tablero donde se ocupaba. Fue mi primer y más complejo análisis paramétrico que realicé, ya que no conocía nada acerca del elemento, por lo que revisarlo fue muy gratificante.

Una de las opciones disponibles era crear un nuevo diseño para protección con menos componentes, sin embargo, el circuito ya estaba reducido al mínimo, por lo que descarté esa idea. Otra alternativa fue buscar más fabricantes del mismo componente y realizar análisis paramétricos entre ellos para determinar la opción viable de cambio. Este fue el camino que tomé; y después de recopilar posibles candidatos, procedí a realizar las comparaciones.

La forma en que aprendí y se me hizo sencillo desarrollar los análisis fue a través una hoja de cálculo, donde listé los parámetros (eléctricos y mecánicos directamente de la hoja de especificaciones) del componente actual, contrastados con los valores para el nuevo producto.

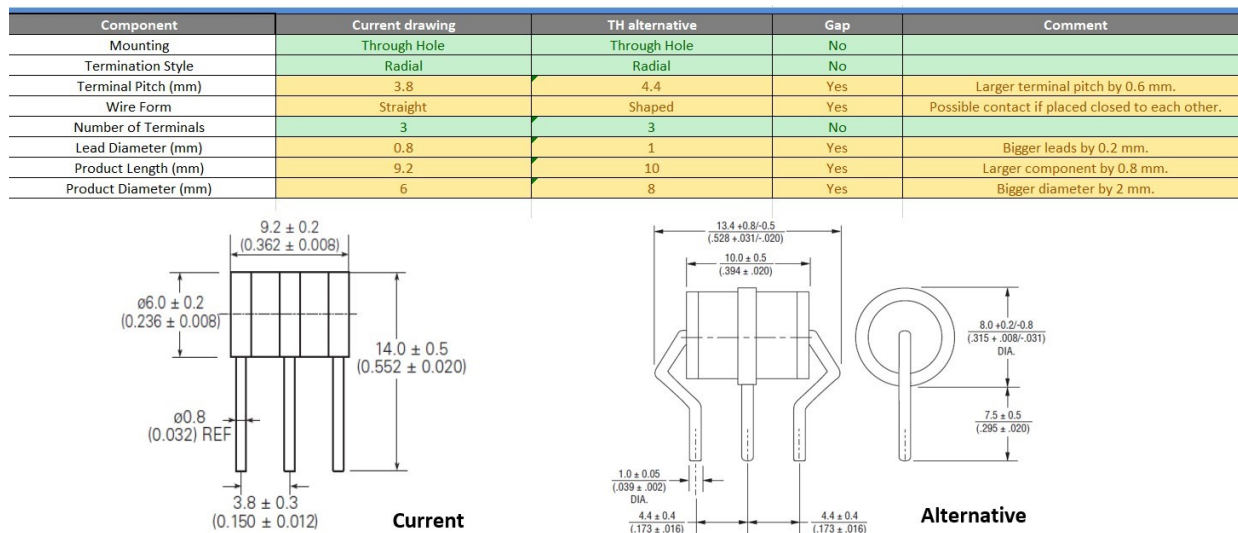


Figura 35. Análisis paramétrico en el GDT.

³⁹ Bill Of Materials, por sus siglas en inglés. La factura de materiales conforma la cantidad exacta (en el caso de componentes) o aproximada (aplicable en consumibles, como soldadura) de sus conglomerados, precio unitario y extendido, números de parte, proveedor, entre otros parámetros más.

Después, coloqué una columna adicional donde resalté aquellos parámetros distintos entre los modelos, con comentarios acerca de las variantes (Figura 35). Estas diferencias, también conocidas como “gaps”, pueden descartarse al ser irrelevantes para el componente, o en su defecto, rechazar el componente al ser características críticas (Figura 20). De aquí el nombre dado en inglés, conocido como “gap analysis”. Una recomendación muy útil para estos casos es utilizar colores que resalten las diferencias.

Por ejemplo, tomando como referencia la figura anterior y suponiendo que sus parámetros eléctricos son coincidentes en todos los aspectos, resta únicamente notar los mecánicos. De acuerdo con su longitud total, existe una distancia entre terminales (terminal pitch) de 0.6 mm, la cual podría no afectar al diseño. Sin embargo, la forma de éstas no es recta en ambos casos, lo que podría generar un contacto no deseado con otros componentes cercanos, en caso de tener un ensamble⁴⁰ sumamente poblado. Y sabiendo que el GDT sirve como protección atmosférica al circuito, podría llevar a tierra alguna conexión de voltaje, por lo que automáticamente queda descartada esta opción.

Por obvias razones, debí cuidar el precio del componente alternativo ya que el propósito era buscar productividad y así generar ganancias a largo plazo. Por último, una vez aceptado y revisado el análisis por un tercero, busqué los ensamblados donde se ocupaba el componente, y con base en la demanda anual, calculé los ahorros que generaría el cambio.

8.3 Rediseño del transmisor

A pesar de formar parte de la etapa inicial de proyecto, no tuve tiempo de involucrarme en las pruebas de campo y certificaciones realizadas al transmisor, pero la creación y seguridad de saber que el diseño en el que participé con mis compañeros de trabajo sería producido, fue de mi total satisfacción. De igual forma, consideré importante mencionar los pasos futuros a seguir para la completa aprobación del sistema y su pronta venta al público en general.

8.3.1 Análisis financiero

La premisa financiera de cualquier empresa puede resumirse tal como lo denota (Mankiw, 2002): “[...] el objetivo de las empresas es maximizar los beneficios, que son iguales al ingreso total menos el costo total. Cuando se analiza la conducta de una empresa, es importante incluir todos los costos de oportunidad de la producción [...]”.

⁴⁰ Usualmente se conoce como “ensamble” a un tablero ya poblado, es decir, salida del proceso de manufactura con componentes soldados y listo para pruebas funcionales.

Término	Definición	Descripción matemática
Costes explícitos	Costes que exigen un gasto de dinero por parte de la empresa	–
Costes implícitos	Costes que no exigen un gasto de dinero por parte de la empresa	–
Costes fijos	Costes que no varían con la cantidad producida	CF
Costes variables	Costes que varían con la cantidad producida	CV
Coste total	El valor de mercado de todos los factores que utiliza una empresa en la producción	$CT=CF+CV$
Coste fijo medio	Costes fijos divididos por la cantidad de producción	$CFMe=CF/Q$
Coste variable medio	Costes variables divididos por la cantidad de producción	$CVMe=CV/Q$
Coste total medio	Coste total dividido por la cantidad de producción	$CTMe=CT/Q$
Coste marginal	Aumento del coste total provocado por una unidad adicional de producción	$CM=\Delta CT/\Delta Q$

Figura 36. Principales tipos de costos en producción. Tomado de (Mankiw, 2002).

Entre los costos involucrados se encuentran los definidos en la imagen anterior, los cuales se dividen principalmente en fijos y variables. A simple vista, pareciera que ninguno de ellos se vio afectado ya que no existió ningún cambio en la cantidad de producción. No obstante, el hecho de mover un ensamble TH a SMT trae consigo bastantes ventajas y desventajas hacia los costos variables principalmente, afectando la productividad de la empresa.

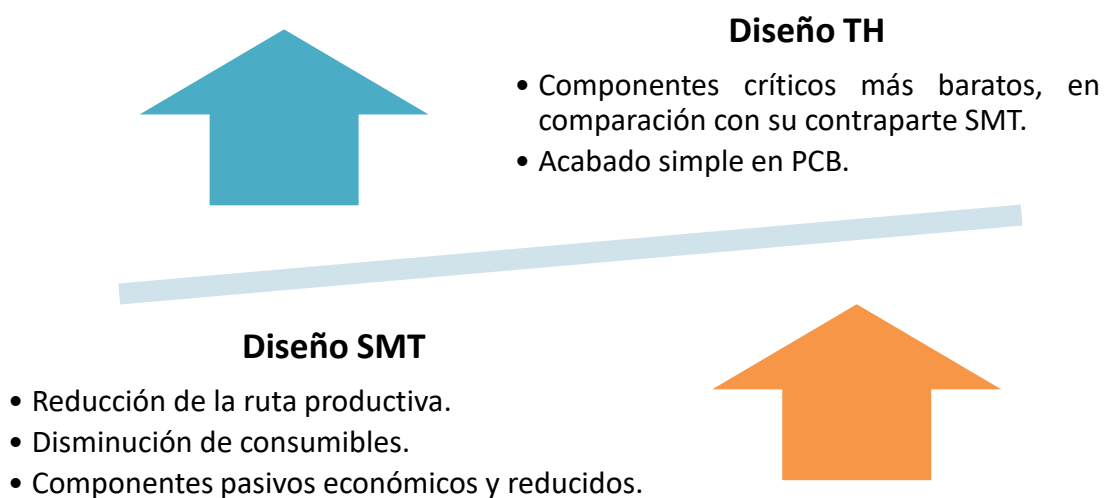


Figura 37. Principales ventajas de las tecnologías de componentes enfocadas al costo variable en producción.

Como mencioné, la colaboración con los grupos interdisciplinarios trajo a la mesa el rediseño de este transmisor, principalmente impulsado por el equipo de manufactura. Y la razón principal fue apostar por la reducción de la ruta productiva⁴¹.

Lo que en un principio no fue considerado es que el ensamble contenía componentes críticos que, al mover de TH a SMT, aumentó considerablemente el precio no sólo por su tipo de tecnología sino también el requerimiento de un diferente acabado en la PCB.

En primera instancia, estas modificaciones no fueron suficientes para lograr ingresos en el proyecto, por lo que se vino abajo. Sin embargo, realicé un análisis sobre los BOM para maximizar las ganancias por componente individual, así como también busqué y encontré dispositivos alternativos asequibles que, sin duda, al ser complementados con las ganancias de manufactura le dieron la vuelta a la situación económica, logrando resultados mejores de los esperados y convenciendo totalmente de la factibilidad del rediseño.

Esta decisión fue reiterada finalmente con el equipo de finanzas, quienes, al realizar su análisis a través de todas las áreas involucradas, corroboraron los beneficios y dieron su visto bueno para la planificación de los cambios.

8.3.2 Cambios en la producción de ensambles

Realmente no estuve directamente involucrado en el área de manufactura, pero los cambios en los cuales participé impactaron totalmente. Además, mi colaboración con ellos me ayudó a comprender cómo se realizan los procesos de fabricación de un ensamble y la forma en que impacta la ruta productiva, por lo que consideré necesario incluir esta sección.

Un cambio significativo en el proceso de manufactura entre un ensamble SMT y TH radica en la naturaleza de los mismos componentes. Esto es porque en TH, al requerir terminales que deben ser introducidas a través de una PCB, necesitan un acondicionamiento previo llamado preformado⁴², donde usualmente se desempaquetan y se les doblan o cortan sus extremos, entre sus principales actividades. Ya sea que se realice de forma automática o manual (Figura 38), involucra un costo variable en la ruta productiva debido al tiempo invertido, herramientas auxiliares, trabajadores dedicados a la tarea, entre otros factores más. Por consecuencia, al evitar esta etapa en SMT ya que éstos no necesitan acondicionamientos previos, es posible generar ahorros.

⁴¹ Conocidos como “routing manufacturing”, es el conjunto de procesos de manufactura para transformar una materia prima en un producto funcional.

⁴² Encontrado en el argot inglés como “TH preforming”.

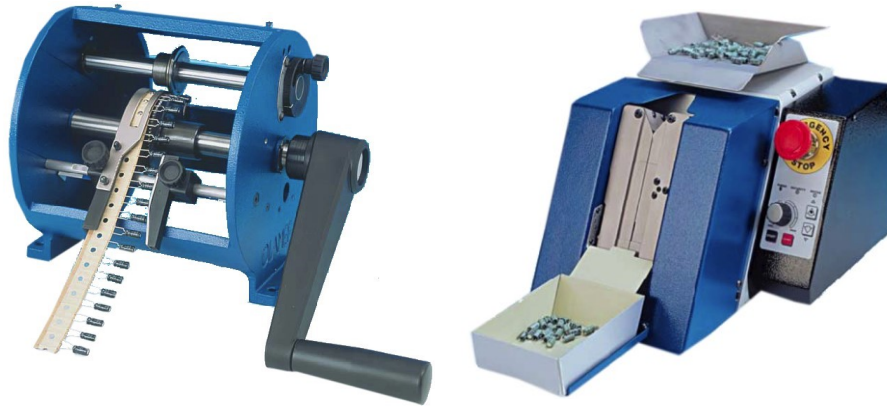


Figura 38. Máquinas de preformado TH, tipo manual (izquierda) y automática (derecha).
Modificado de (EMST Marketing PVT. LTD., 2018).

La segunda diferencia notable radica en la inserción o colocación de componentes. Sin importar el tipo de tecnología, los arreglos se hacen pasar a través de rieles (ubicados siempre en la misma dirección usando como guía los agujeros de soporte) para que sean llevados a las máquinas colocadoras de componentes o a través de la línea de producción con operadores enfocados a dicha tarea. He aquí la importancia de los fiduciales e identificadores en los diseños de PCB, ya que otorgan una referencia óptica para las máquinas u operadores al colocar las partes en el ensamble (auxiliadas por las diversas capas del diseño CAD). Para el caso de SMT se usa comúnmente un proceso automático debido a la precisión requerida acorde al tamaño de cada parte, mientras que la inserción TH puede ser encontrada de forma manual (Figura 39).



Figura 39. Inserción manual TH (izquierda) comparado con colocación automática⁴³ SMT (derecha).
Modificado de (Smith, 2009) (EMST Marketing PVT. LTD., 2018).

⁴³ Al tratar con componentes TH, el proceso específicamente se conoce como inserción (insertion), mientras que al ser SMD se denomina colocación (placement). Esta actividad se conoce como “pick and place”, ya que la máquina toma los componentes de los rieles o bandejas para posicionarlos en el ensamble (IPC Designers Council, 2016).

La desventaja que existe aquí al tratar con TH está en las terminales del componente. Por ejemplo, suponiendo que se realiza un pedido de capacitores a granel y se posicionan automáticamente en los agujeros correspondientes de la PCB, existe la probabilidad de que algún capacitor tenga las terminales dobladas o ligeramente separadas más de lo normal, es decir, la varianza de estas partes radica totalmente en el fabricante/proveedor, lo que genera problemas al no coincidir exactamente con la posición designada en el tablero.

Dado que se realiza una inspección de seguridad al salir de esta etapa, si dicho componente no está puesto apropiadamente en su lugar o se encuentra maltratado, es desechado⁴⁴ y repetido el proceso, generando pérdidas en material y tiempo de producción, fundamentalmente.

Finalmente, la última diferencia se encuentra en el proceso industrial de soldado de componentes, y por ende, los consumibles utilizados en sus respectivos tratamientos. Los procedimientos que conocí son la soldadura de refusión y soldadura de ola, siendo a su vez los más utilizados para la producción en masa de ensamblés.

El primero de ellos, también conocido como soldadura de reflujo o “reflow soldering” es únicamente utilizado para acoplar componentes de montaje superficial sobre el circuito impreso en una de sus caras. En caso de ser un diseño SMT doble lado, se debe realizar el procedimiento dos veces, volteando el tablero para aplicar soldadura en la cara que lo requiera.

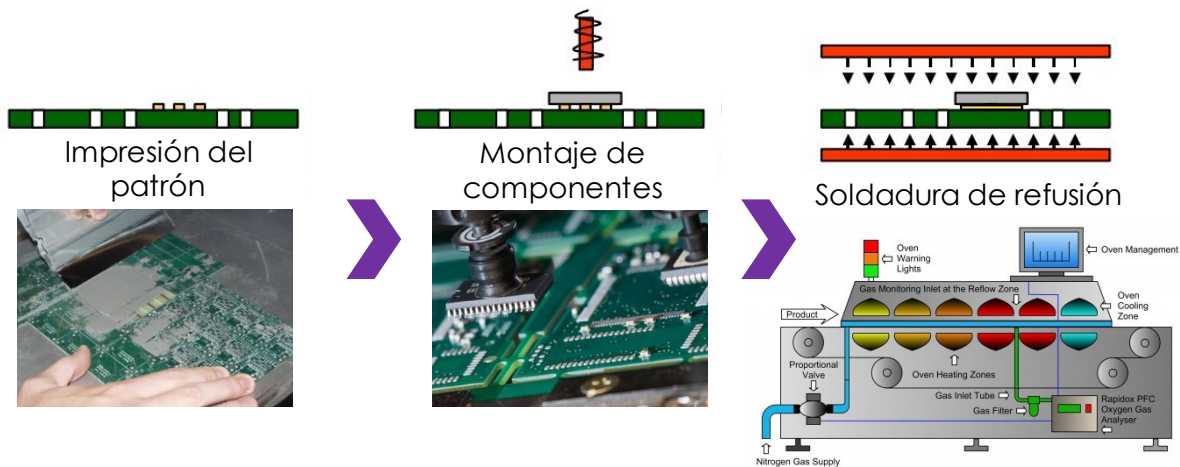


Figura 40. Etapas del proceso en la soldadura de refusión.

Modificado de (Walsin Technology Corporation, 2002) (Sparkfun, 2006) (Surface Mount Process, 2010) (Sensotec, 2017).

Básicamente se compone de 3 etapas, ilustradas (Figura 40) y descritas por (IPC Designers Council, 2016) (Koji, 2007) a continuación.

⁴⁴ Referido como “scrap”, es un problema serio que manufactura busca reducir constantemente, ya que este término también se extiende hacia residuos de paneles al sustraer los tableros poblados y demás sobrantes no útiles en los diversos procesos de ensamble.

1. Impresión del patrón, donde se usa una plantilla⁴⁵(hecha con la capa GTP/GBP) para colocar soldadura en pasta⁴⁶ sobre la PCB en las secciones donde se requiera.
2. Montaje de los componentes en sus respectivas ubicaciones.
3. Calentamiento en el horno de refusión⁴⁷ para soldar los componentes uniformemente. Es común encontrar operadores dedicados a inspeccionar cada etapa para minimizar los errores antes de seguir su flujo en la ruta productiva.

Una consideración sumamente importante que aprendí al colaborar con manufactura es tomar en cuenta el perfil para soldar (soldering profile) los componentes, circuitos impresos y consumibles (soldadura, adhesivo, flux, entre otros). Esta especificación térmica indica con qué tipo de proceso es compatible, estableciendo sus límites de temperatura durante un periodo de tiempo, antes de sufrir alteraciones o daños que repercutan en su funcionamiento.

Pasando tema, la segunda forma de soldar componentes que observé fue la soldadura de ola o “wave soldering”. Ésta se realiza en una máquina específica con el mismo nombre, y se utiliza en diseños TH de una cara, TH doble cara (se debe repetir el proceso para soldar los componentes de cada lado) y diseños mixtos doble cara, donde su lado superior se conforma de componentes TH, mientras que la inferior lleva únicamente SMT, ilustrado enseguida.

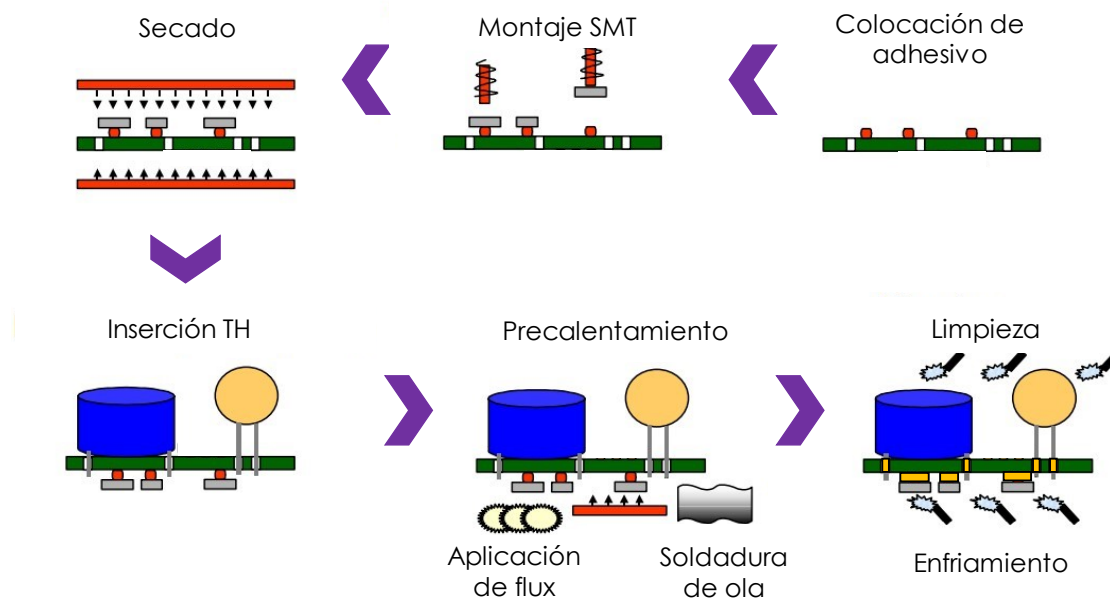


Figura 41. Etapas del proceso en la soldadura de ola. Modificado de (Walsin Technology Corporation, 2002).

⁴⁵ Coloquialmente conocido como estencil, dada su traducción del inglés “stencil”.

⁴⁶ Llamada “solder paste”, es de consistencia viscosa para su fácil aplicación manual o automática.

⁴⁷ La tecnología convencional consiste en un recorrido de la PCB a través de diversas zonas térmicas a distinta temperatura, propiciando la fusión gradual de la soldadura (BTU, 2018). Encontrado en inglés como “reflow oven”.

Para el caso mixto (siendo el más eficiente y completo, al soldar TH y SMT al mismo tiempo), el proceso funciona de la siguiente forma (IPC Designers Council, 2016) (Coomb, 2008).

1. Antes de entrar a la soldadura de ola, primero se trabaja la capa SMT, colocando adhesivo por debajo de donde se colocarán los componentes de montaje superficial, para que éstos no se desprendan o muevan al entrar en contacto con la soldadura.
2. Se montan los dispositivos SMT alineados de forma específica y se le aplica al tablero un tratamiento térmico que endurece o “cura” el adhesivo de los componentes a la PCB.
3. Se gira el tablero para colocar los elementos TH y entra a la soldadura de ola.
4. Dentro, se vaporiza flux sobre el tablero para mejorar el contacto con la soldadura.

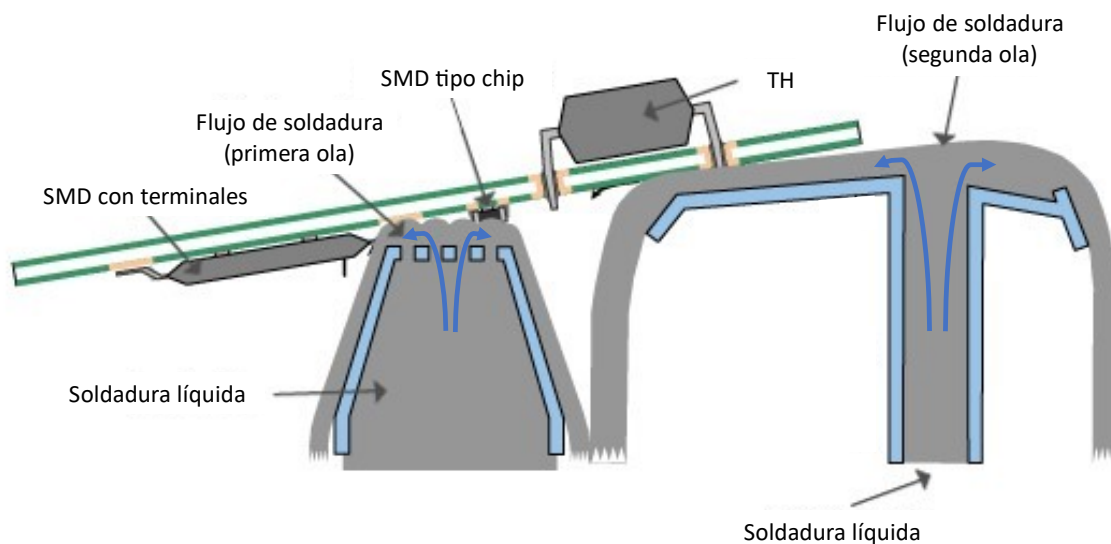


Figura 42. Soldadura de ola convencional. Modificado de (Gong, 2018).

5. Todo el conjunto es entonces precalentado para entrar a la etapa de olas, alimentadas por un depósito de soldadura líquida (Walsin Technology Corporation, 2002) (Hirosaki Akihiro, 2018). La primera ola es turbulenta y angosta, con la función de penetrar la soldadura a través de las vías de los componentes TH y afianzar la unión en los SMT; mientras la segunda ola es constante y prolongada, buscando llenar los huecos restantes y dar un acabado uniforme en todos los puntos de conducción (Hirosaki Akihiro, 2018), tal como se identifica en la imagen inmediata anterior. Aquí es de gran ayuda la capa GTS/GBS, ya que con esta máscara es posible evitar que la soldadura haga contacto en uniones no deseadas o vías no platinadas.
6. Previo a salir el arreglo de la máquina, se enfría la soldadura y limpian los residuos.

Conocer estos procesos me ayudó a entender cómo el transformar un tablero de TH a SMT cambia completamente su manufactura al disminuir desechos, ahorrar consumibles, reubicar operadores y minimizar tiempo de operaciones al agilizar la obtención del ensamble final.

8.3.3 Consideraciones de diseño en el circuito

Cuando aprendí lo necesario del circuito, su funcionamiento y producto final, comencé a trabajar sobre el rediseño del transmisor. No obstante, me dieron dos condiciones necesarias a cumplir: no modificar la superficie del ensamble ni tampoco la sección de la antena del diseño.

La razón del primer requerimiento yace en su diseño mecánico. Como es un transmisor portátil y diseñado para colocarse en la visera de los autos, requiere su cubierta plástica así como los actuadores de los botones activadores del sistema para la puerta automática (Figura 43). Un cambio en los moldes plásticos para estas partes representa un gasto mucho mayor que la productividad del proyecto completo, por lo que evitar afectarlos fue primordial.

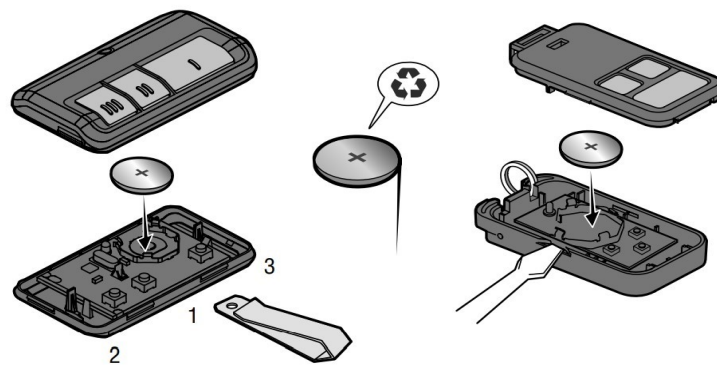


Figura 43. Sección del manual de usuario entregado con algunos transmisores.

La segunda cuestión es debido a que trabaja con radiofrecuencia, donde los trazos y componentes involucrados para la transmisión habían sido previamente calculados y aprobados por las comisiones certificadoras y reguladoras de telecomunicaciones. Por lo tanto, preservar sus características electromagnéticas acopladas al microcontrolador fue un reto adicional. Aunque no participé en la programación del sistema, estuve al tanto de las características del microcontrolador utilizado, analizando sus características presentadas en la hoja de datos para entender su distribución electrónica y la razón de cada componente en el esquema.

Previo a comenzar a trabajar en Altium, tuve un curso de capacitación a cargo de la plantilla ingenieril, donde aprendí el manejo de sus herramientas. Además, cada vez que trabajaba en la detección o replicación de fallas, reforzaba el uso del software. Por consecuente, cuando estuve involucrado en el proyecto, ya tenía a la mano las habilidades básicas para crear desde cero el rediseño.

Con el BOM mejorado y los nuevos componentes a implementar en el diseño tuve diversos retos, ya que llevarlos al diseño CAD no fue sencillo. Por ejemplo, los botones SMT necesitan gran espacio en la superficie para sus terminales, ya que no tienen el soporte mecánico de sus

análogos TH, los cuales son insertados y soldados transversalmente. Además, el hecho de montarlos en la superficie incrementa su altura, por lo que su interacción vertical con algo externo no debe interferir en su mecanismo. Otra consideración importante fue el caso de la batería tipo moneda, porque al momento de desaparecer sus retenedores TH, debí entonces encontrar una versión SMT que pudiera soportar la interacción con el usuario. Y claro, debí tener en cuenta el tamaño adecuado en los componentes pasivos⁴⁸ de manera que el grupo de manufactura no tuviera problemas en colocarlos automáticamente.

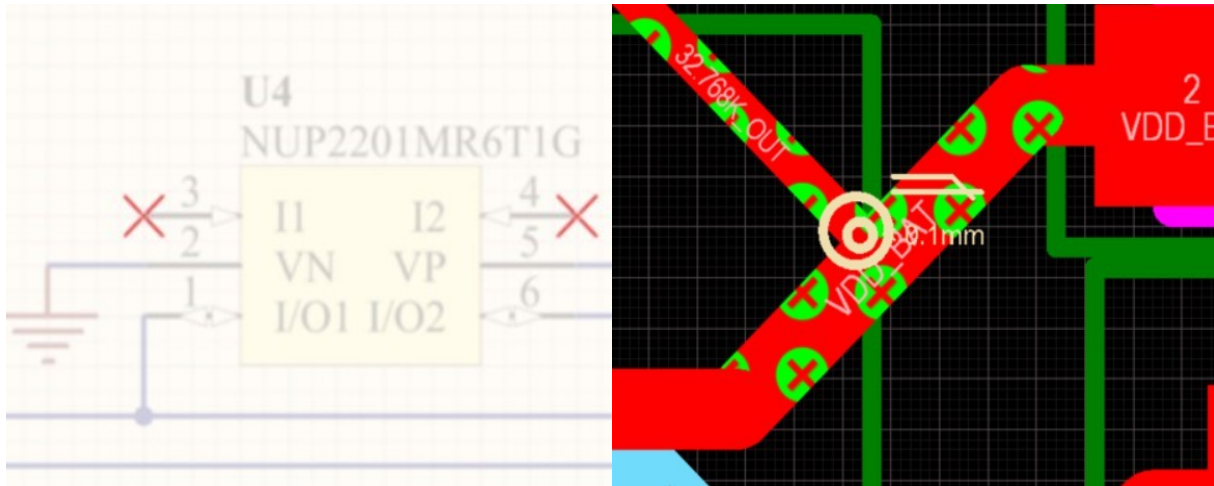


Figura 44. Herramientas ERC (izquierda) y DRC (derecha) encontradas en Altium. Modificado de (Altium, 2020).

Usando Altium tenía a mi disposición dos herramientas muy útiles que usualmente se encuentran en los sistemas CAD enfocados a la creación de circuitos impresos: ERC y DRC⁴⁹. El ERC se enfoca en encontrar errores eléctricos en los SCH (pines, trazos y redes flotantes), mientras DRC busca desaciertos en el diseño del PCB, como separación de componentes, conexión de redes eléctricas en las capas, integridad en planos y trazos, huellas de dispositivos, etc. Estas capacidades del programa me resultaron útiles para dar confiabilidad al diseño.

Mi último paso como diseñador de circuitos fue la revisión entre colegas (traducción usual de “peer review”). Esta fue una experiencia enriquecedora porque estuve en varias reuniones con profesionales expertos en el área electrónica de la empresa, aportando ideas, sugerencias e incursionando sobre el rediseño, para conocer y dar su aprobación acerca de lo realizado, así como su futura implementación, desde el punto de vista ingenieril. Simplemente, al no ser

⁴⁸ Estos componentes tipo “chip” se rigen por un código numérico que indican sus dimensiones longitudinales en pulgadas. Por ejemplo, un capacitor 1206 mide 0.12” de largo por 0.06” ancho. Generalmente, las dimensiones más comunes varían entre 1812 y 0201. Fuera de esos tamaños (más grandes o pequeños) resulta más difícil y complejo su proceso de manufactura.

⁴⁹ Design Rule Check y Electric Rule Check, por sus acrónimos en inglés.

respaldado por esta junta no se puede avanzar en el desarrollo, ya que requiere su análisis acerca del circuito que asegure la funcionalidad del sistema.

Y de la mano de esta reunión viene la revisión final de diseño⁵⁰, la cual se maneja de forma similar, pero presentada a los altos directivos, quienes evalúan la productividad y factibilidad del proyecto completo, involucrando el impacto y su retribución a futuro. Es aquí donde se decide si este trabajo es desechado o llega a su punto de desarrollo formal, a través de prototipos, pruebas sistemáticas y manufactura.

May 6th, 2020

Venom project



RAS

Reported by
Jacob Castellanos / Marcos Chavez / Juan Omar Hdz / Francisco Salgado
Electrical Engineering
05/06/2020

Figura 45. Presentación realizada en la revisión final del proyecto.

8.3.4 Cotización y obtención de prototipos

La primera cotización de tableros es fundamental en la consideración del proyecto, ya que se usa como referencia para determinar si el diseño electrónico generará ahorros o gastos en su implementación. Como parte de mi aprendizaje, me permitieron realizar la cotización al fabricante acerca del diseño, sin embargo, mi error de no considerar las pestañas en el arreglo durante la primera cotización ocasionó gastos adicionales no considerados para la segunda cotización (dado que necesitaba más material sustrato), y al considerar la demanda anual del producto, el resultado fue desfavorable. De aquí la razón para utilizar un modelo completo en esta etapa, pudiendo prevenir inconvenientes no esperados.

Mi último aporte en este proyecto fue la realización de mejoras sobre el rediseño inicial, con base en las sugerencias del equipo y expertos del tema. Una vez que terminé la versión mejorada,

⁵⁰ Conocida como “design review” o “concept design review”.

solicité los reportes DFT y DFM⁵¹ al equipo de manufactura y pruebas. Ambos reportes me fueron requeridos aprobados, abarcando los siguientes objetivos e inspecciones principales, descritos a detalle en las regulaciones (IPC Association Connecting Electronics Industries, 2003) (IPC Designers Council, 2016).

Reporte DFM

Objetivos

- Reducir defectos de fabricación o ensamble del producto.
- Optimizar el proceso de manufactura al minimizar las operaciones implicadas.

Inspecciones principales

- Apropiaada orientación y dimensión de los componentes para el proceso de soldadura que aplique.
 - Ruteo de señales y uso de huellas apropiadas de los dispositivos.
 - Separación ideal entre los componentes para su correcto ensamble.
- Soportes físicos entre componentes y ubicación de fiduciales, PTH y NPH.
 - Correcta panelización, respetando las limitaciones para procesos involucrados.

Reporte DFT

Objetivos

- Proveer fiabilidad para las pruebas de funcionamiento.
- Reducir costos de producción al eliminar errores inherentes del circuito.

Inspecciones principales

- Revisión de puntos de prueba sobre el tablero en cada nodo de la red.
 - Protección a componentes digitales, osciladores y baterías.
- Capacidad de programación en controladores, procesadores y circuitos integrados específicos (cuando estén presentes en el diseño) a través de circuitos externos.
 - Códigos de identificación de ensambles y productos.
- Correcta distribución del circuito, respetando las limitaciones para procesos involucrados.

Figura 46. Aportaciones principales de los reportes DFM/DFT (IPC Designers Council, 2016).

⁵¹ Design For Manufacturing, muchas veces conocido también como DFA (Design For Assembly). El otro acrónimo es referido como Design For Testability. En caso de no contar con personal dedicado a realizar estos informes, se debe consultar al ensamblador de PCB acerca de sus parámetros y limitaciones en manufactura.

Para el caso del DFT, me fue necesario reubicar algunos puntos de prueba para mejorar el contacto con las unidades verificadoras, mientras que en DFM tuve que reorientar componentes para optimizar el proceso de soldadura, entre otras consideraciones más. Así fue como llegué a la versión prototipo final, aprobada completamente por todos los equipos interdisciplinarios involucrados.

Unos pocos días antes de mi término laboral tuve la fortuna de ver los arreglos prototipo del rediseño recién recibidos del fabricante (Figura 47), lo que me dio una satisfacción indescriptible al notar mi esfuerzo en el proyecto hecho realidad.

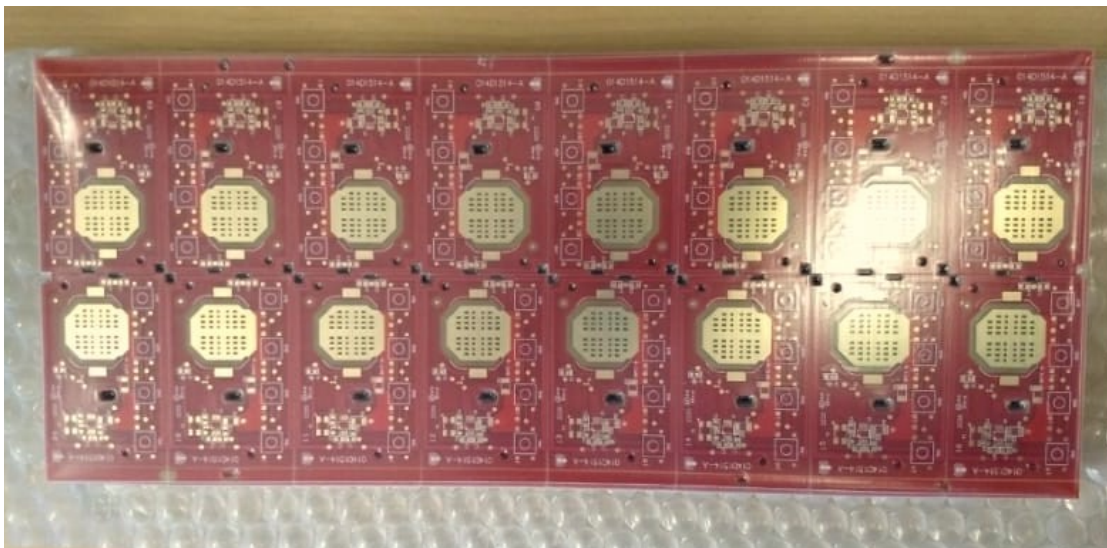


Figura 47. Arreglos prototipo del proyecto.

8.3.5 Pruebas funcionales y organismos reguladores

Antes de producir algún bien, se deben cumplir estándares y pruebas funcionales que lo aseguren y respalden. Esta siguiente etapa en el proyecto no formó parte de mis actividades, aunque considero relevante mencionar qué pasos siguieron. De forma local (dentro de la empresa) existen primordialmente tres pruebas inmediatas a cualquier prototipo o tablero ya manufacturado (IPC Designers Council, 2016).

- ❖ *ICT (In Circuit Test)*: verifica aspectos eléctricos en el circuito a través de los puntos de prueba, como circuitos abiertos, cortos circuitos, componente dañado, mal funcionamiento, polaridades invertidas, etc.
- ❖ *AXI (Automated X-ray Inspection)*: se enfoca en aspectos relativos al proceso de soldadura, como excesos o déficits en uniones, soldadura fría, microvacíos, etc.
- ❖ *AOI (Automated Optical Inspection)*: busca defectos de manufactura, como mal posicionamiento de componentes, orientación invertida, daños en la PCB, etc.

Análogamente, los estándares en electrónica son establecidos por cuatro entes principales:

- ISO (International Organization for Standardization).
- UIT (International Telecommunication Union).
- IEC (International Electrotechnical Commission).
- IPC (Association Connecting Electronics Industries).

Estuve más relacionado con IPC, ya que fija normas y recomendaciones ideales para el diseño de PCB y contenido relativo al tema. Al seguir estos preceptos, las características del producto mejoran considerablemente, al ser avalado alrededor del mundo como estándar de calidad.

En cambio, para obtener un certificado de venta es necesario recibir la aprobación de algún organismo regulador. En el caso del transmisor de datos, el permiso lo otorga FCC (Federal Communications Commission) en Estados Unidos, siendo su contraparte el IFT (Instituto Federal de Telecomunicaciones) en México y CE (Conformité Européenne) en la Unión Europea.

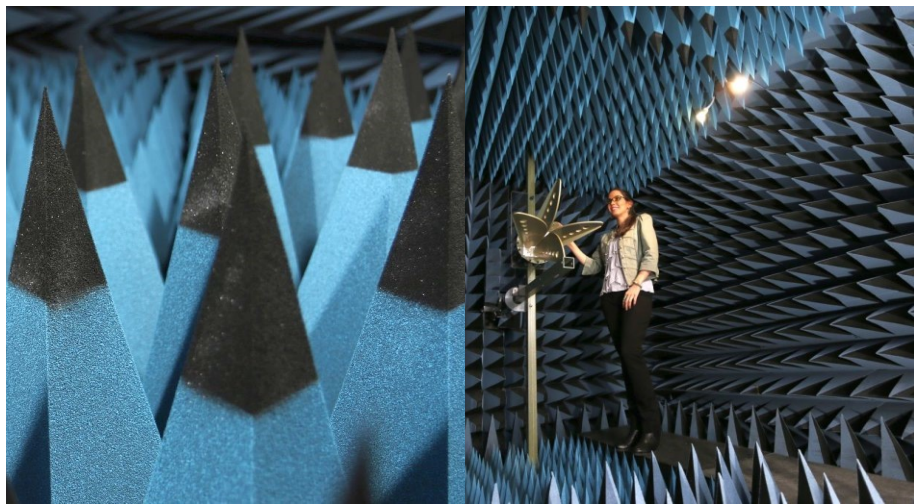


Figura 48. Cámara anecoica para antenas. Modificado de (Antenna Test Lab, 2019).

Como trabajé con un transmisor de datos por radiofrecuencia, fui informado acerca de las pruebas necesarias a validez ante el FCC, de las cuales destacan las de rango y armónicos. Dado que deben cumplir con los rangos establecidos por el organismo regulador, se realizan pruebas previas para adecuar el sistema en cuanto a su funcionamiento dentro de cámaras anecoicas⁵². Aquí entra en juego la colaboración con el equipo de programación, para ajustar tanto los parámetros en el microcontrolador como los elementos en la antena, de manera que se encuentre el punto perfecto para su óptimo desempeño en campo.

⁵² En inglés “anechoic chambers”, son cuartos blindados y recubiertos internamente con material absorbente que permite aislar el dispositivo bajo prueba de interacciones externas. De esta forma, las ondas electromagnéticas y los parámetros del artefacto son medibles dentro del cuarto de control (Antenna Test Lab, 2019).

9. Conclusiones

Trabajar directamente en la planta de manufactura me permitió involucrarme y conocer los procesos electrónicos, aprender cómo se ensamblan, crean y distribuyen hasta llegar al consumidor. Mis actividades variadas me dieron un panorama completo en diversos aspectos de la empresa, así como aumentaron mis conocimientos adquiridos a través de la experiencia.

Durante el rediseño del transmisor y las demás actividades relacionadas pude concebir una visión industrial distinta a la académica, llevando más lejos los aprendizajes adquiridos al reunirlos y aplicarlos para lograr un fin específico. Con base en mis observaciones, resultados y consecuencias del desarrollo electrónico del dispositivo, destaco lo siguiente.

- La transición SMT a TH permitió mover un desarrollo de doble capa a una sola, reduciendo el proceso de ensamble y requiriendo únicamente soldadura de reflujo, prescindiendo así de la soldadura de ola junto con sus consumibles.
- La inserción manual en componentes TH pudo ser reubicada a otros ensambles, logrando así reducir el tiempo de fabricación y aumentar su productividad.
- Al usar componentes superficiales no se requiere preformado, eliminando esta etapa y dependiendo únicamente de una máquina colocadora SMT.
- El exceso de partes defectuosas o dañadas debido a las terminales de los componentes en granel fue eliminado completamente.
- Por medio del análisis de componentes de la lista de materiales, se obtuvo mejora y optimización del diseño, destacando el microcontrolador, el cual fue reducido en su empaquetado, permitiendo una electrónica más versátil para las variantes del modelo.
- Los componentes pasivos fueron reducidos en tamaño al ser SMT, permitiendo obtener una ganancia económica considerable gracias a la alta demanda del producto.
- El material de acabado de la PCB fue modificado para evitar corrosión, mejorar puntos de unión y acrecentar el contacto con la batería.
- Con una lista de materiales actualizada, es acertado asegurar un tiempo de vida más largo para el producto, tanto para producción como para el usuario final.
- La inversión inicial para los prototipos, certificaciones regulatorias y cambios en la ruta de producción, a pesar de ser un monto fuerte, sería cubierto en un mediano plazo, y rebasado por la productividad y mejora del producto final a largo plazo.
- La actualización del producto permitió identificar los modelos obsoletos y eliminarlos así de los recursos informáticos propios de la empresa.
- El impulso de este proyecto de mejora y productividad abrió la puerta para la detección y evaluación de más diseños ensamblados en la planta. En consecuencia, al hacer notar la ingeniería mexicana de la empresa, fue posible conseguir nuevos desarrollos de producto.

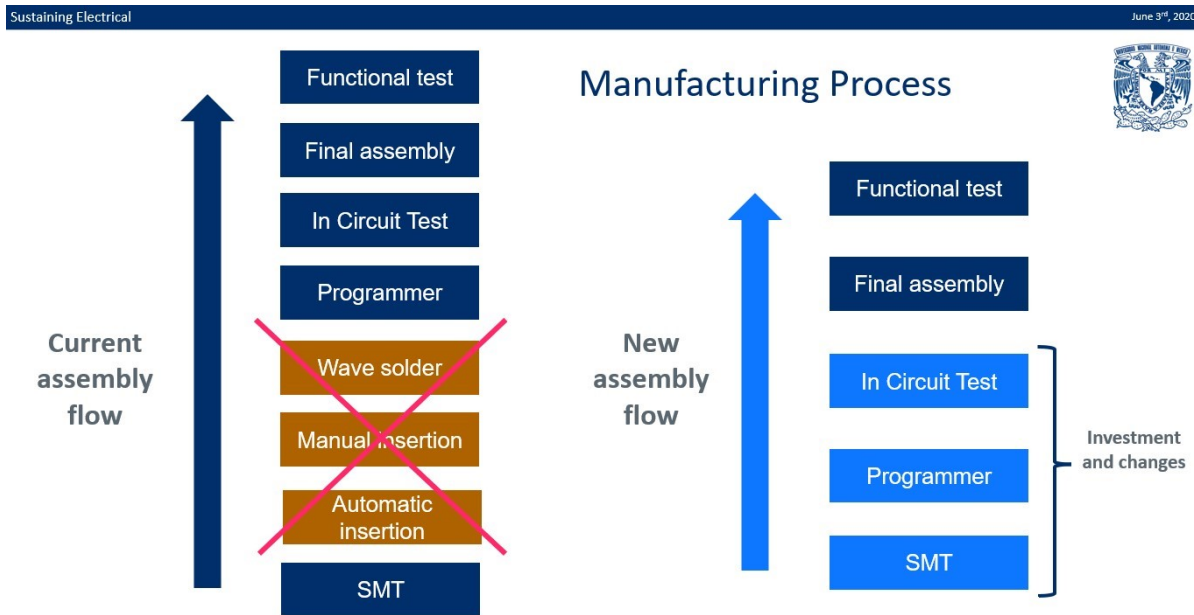


Figura 49. Cambios generales en la ruta de producción, obtenidos con el rediseño del transmisor de datos por RF.

Gracias a las actividades realizadas y en todas aquellas en las que estuve involucrado durante mi estancia, puedo resumir mis principales logros desarrollados y obtenidos como los siguientes.

- ✓ Desarrollé mis habilidades de validación y diseño de pruebas para sistemas electrónicos, así como su caracterización.
- ✓ Mejoré mi análisis de circuitos eléctricos con base en el comportamiento del sistema, archivos fuente de diseño e interacción con los mismos.
- ✓ Aprendí a retrabajar ensambles electrónicos TH o SMT, y detectar fallas eficientemente en sistemas complejos usando el material de laboratorio a mi disposición.
- ✓ Actualicé dispositivos al detectar algunos de sus componentes con área de mejora, lo que permitió cambiarlos para mejorar su calidad y generar productividad.
- ✓ Rediseñé un dispositivo electrónico, aprendiendo el proceso ingenieril que conlleva a nivel profesional e industrial.
- ✓ Descubrí los procesos de manufactura involucrados en la creación de diversos productos finales, no sólo en el ámbito electrónico sino también mecánico, administrativo y demás.
- ✓ Investigué y aprendí sobre nuevos componentes, circuitos eléctricos, fenómenos involucrados, áreas especializadas de la electrónica y sus diversas aplicaciones.
- ✓ Conocí el ámbito regulatorio para la certificación de bienes, permitiendo calidad y seguridad para el usuario junto con integridad para la empresa.
- ✓ Entendí la importancia de una buena comunicación multidisciplinaria para lograr un objetivo en común que otorgue beneficios para todos.

Mi mayor logro es, sin duda, este aprendizaje que otorga la experiencia, lo que terminó por afianzar mi gusto por la electrónica. El hecho de conocer, descubrir nuevas tendencias y entender mejor cómo funcionan las cosas en un pedacito del mundo laboral me hizo realmente feliz.

Este fue un gran paso para mí, que sin duda, luego de un enorme esfuerzo que rindió frutos, no me queda más que compartir lo aprendido para que más personas se interesen, adentren y disfruten de sus vocaciones.



Figura 50. Familia CGI 2020.

10. Referencias bibliográficas

- Action circuits. (Mayo de 2020). *Device programming and reeling specialists*. (Action Circuits) Obtenido de Action circuits: <https://www.actioncircuits.com/products/tape-and-reeling-materials/>
- Altium. (Abril de 2020). *Altium Designer 20*. (Altium Limited) Obtenido de Altium: <https://www.altium.com/altium-designer/>
- Antenna Test Lab. (Marzo de 2019). *What is an Anechoic Chamber?* (Antenna Test Lab) Obtenido de Antenna Test Lab: <https://antennatestlab.com/antenna-education-tutorials/what-is-an-anechoic-chamber>
- Ardley, T. (2008). *First Principles of a Gas Discharge Tube (GDT) Primary Protector*. EUA: Bourns Inc.
- Atlassian. (Mayo de 2020). *Atlassian Kanban*. (Atlassian) Obtenido de Atlassian: <https://www.atlassian.com/es/agile/kanban/boards>
- BTU. (Marzo de 2018). *¿Qué es un horno de reflujo?* (Amtech Group) Obtenido de Amtech Group: <https://www.btu.com/es/reflow-ovens/what-is-a-reflow-oven/>
- Chamberlain Group Inc. (Febrero de 2020). *Chamberlain*. (Chamberlain Group Inc) Obtenido de CGI: <https://www.chamberlain.com/>
- CIF. (Enero de 2020). *Technical datasheet PTFE boards*. Obtenido de CIF: <https://docs.rs-online.com/15d4/0900766b80e36130.pdf>
- Circuit crush. (Julio de 2015). *Getting Grounded: Types of Electrical Grounding and What They Mean*. Obtenido de Circuit crush: <https://www.circuitcrush.com/types-of-electrical-grounding/>
- Coombs, C. F. (2008). Advanced component packaging. En *Printed Circuits Handbook* (págs. 90-100, 679-773, 1100-1114). EUA: McGraw-Hill.
- Crouse-Hinds Series. (2016). *AN904-1001 - Lightning surge protection for electronic equipment - a practical guide*. Reino Unido: Eaton Electric Limited.
- Daryl Gerke, W. K. (1999). Electromagnetic compatibility. En J. Webster, *The measurement, instrumentation and sensors handbook* (págs. 2350-2366). EUA: CRC Press.

- Domelen, L. V. (Abril de 2020). *Quantum mechanics for engineers*. Obtenido de Florida A&M University - Florida State University, College of Engineering: http://www.eng.fsu.edu/~dommelen/quantum/style_a/semicz.html
- EE SEMI. (Julio de 2008). *EE SEMI Semiconductor Manufacturer*. (EESemi) Obtenido de EE SEMI: <https://eesemi.com/ic-package-types.htm>
- Electronic Components KEMET. (Junio de 2015). *Not all caps are created equal*. Obtenido de KEMET: https://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/not_all_capacitors_are_created_equal.pdf
- EMST Marketing PVT. LTD. (Enero de 2018). *PCB Assembly and Wire Processing Equipments*. (EMST Marketing PVT. LTD.) Obtenido de EMST: <https://emstonline.com/>
- Essentra. (Febrero de 2020). *Your PCB substrate: a guide to materials*. (Essentra Components) Obtenido de Essentra Components: <https://www.essentracomponents.com/en-gb/news/guides/your-pcb-substrate-a-guide-to-materials>
- Feranec, R. (Octubre de 2020). *What Every PCB Designer Should Know - Return Current Path (with Eric Bogatin)*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=icRzEZF3eZo>
- Franco, S. (2015). Basic Op Amp Configurations. En *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits* (págs. 7-10). EUA: Mc Graw Hill.
- Gong, L. (Diciembre de 2018). *Differences Between SMT and Through-Hole Technology*. (Seed Fusion) Obtenido de Seed Studio: <https://www.seedstudio.com/blog/2018/01/16/differences-between-through-hole-and-smt/>
- Hedden, R. P. (1987). Printed Circuit Board Terminology. En *Cost Engineering in Printed Circuit Board Manufacturing* (págs. 28-36). EUA: Marcel Dekker, Inc.
- Henninger, T. (2012). *PCB surface finishes*. EUA: Viasystems Group Inc.
- Hirosaki Akihiro, T. T. (2018, Julio). *Importance of wave height control in Wave Soldering*. (OMRON Corporation) Retrieved from OMRON: <https://www.omron.com/global/en/technology/omrontechnics/vol51/019.html>
- IPC Association Connecting Electronics Industries. (2003). *IPC-2221A. Generic Standard in Printed Board Design*. EUA: IPC.
- IPC Designers Council. (2016). Physical Board Principles. In *IPC PCB Designers Certification* (pp. 76-84). EUA: IPC International Inc.

JB Capacitors Company. (Abril de 2019). *JB Capacitors*. (JB Capacitors Company) Obtenido de JB Capacitors Company: <https://www.jbcapacitors.com/>

Kanbanize. (Marzo de 2020). *Kanban: explicación para principiantes*. (Kanbanize) Obtenido de Kanbanize: <https://kanbanize.com/es/recursos-de-kanban/primeros-pasos/que-es-kanban>

Koji, Y. (Diciembre de 2007). *High aspect ratio solder printing technology enabling mixed mounting from 0402M components to large components*. (OMRON Corporation) Obtenido de OMRON: <https://www.omron.com/global/en/technology/omrontechnics/vol51/015.html>

Lewis, J. (Marzo de 2013). *Low side vs. High side transistor switch. Why do these both exist, how do they work, and when do you use them?* Obtenido de Baldengineer. Electronics stuff for enginerds: <https://www.baldengineer.com/low-side-vs-high-side-transistor-switch.html>

Littelfuse. (2016). *LED Lightning SPD Module Design and Installation Guide*. EUA: Littelfuse.

Littelfuse. (2017). *Electronics Circuit Protection Product Selection Guide*. EUA: Littelfuse.

Littelfuse. (Junio de 2020). *Gas Discharge Tube (GDT) Products*. Obtenido de Littelfuse: https://www.littelfuse.com/~media/electronics/product_catalogs/littelfuse_gdt_catalog.pdf.pdf

Malvino, A. P. (2000). MOSFET, Transistores bipolares. En A. P. Malvino, *Principios de electrónica* (págs. 231, 513-514). España: Mc Graw Hill.

Mankiw, G. (2002). La conducta de la empresa y la organización de la industria. En *Principios de economía* (págs. 167-181). EUA: McGraw Hill.

Microchip. (2017). *AN2587 - EMI, EMC, EFT, and ESD Circuit Design Consideration for 32-bit Microcontrollers*. EUA: Microchip Technology Inc.

Mittal, A. (Agosto de 2015). *PCB Substrates: Knowing your Dielectric Material's Properties*. (Sierra Circuits) Obtenido de Sierra Circuits: <https://www.protoexpress.com/blog/pcb-substrates-knowing-dielectric-materials-properties/>

Mitzner, K. (2007). Introduction to PCB design and CAD. En *Complete PCB design usign OrCAD capture and layout* (págs. 1-6). EUA: Newnes Elsevier.

Nan Ya Plastics Corporation. (Enero de 2014). *Glass cloth and glass mat base epoxy resin flame retardant copper clad laminate CEM-3-09*. Obtenido de Lamintech: <http://lamintech.com/prodotti/CEM-3-09.pdf>

- Nanotech Elektronik. (Agosto de 2019). *Materials for printed circuit boards*. (Nanotech Elektronik) Obtenido de Nanotech Elektronik: <https://www.nanotech-elektronik.pl/index.php/en/info/materials>
- Neamen, D. (2011). The Schottky barrier diode. En D. Neamen, *Semiconductor physics and devices* (págs. 283-287, 332-348). EUA: Mc Graw Hill.
- NXP Semiconductors. (Abril de 2017). *Understanding injection current on NXP automotive microcontrollers*. Obtenido de NXP Semiconductors: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4731.pdf>
- Ott, H. (1988). Cabling, Shielding, Electrostatic Discharge. En H. Ott, *Noise reduction techniques in Electronic Systems* (págs. 4-26, 30-55, 159-180, 322-349). EUA: John Wiley & Sons.
- Panasonic. (2019). *Specification Approval Sheet: Paper phenol resin copper clad laminate*. Retrieved from Panasonic: https://warapcb.com/wp-content/uploads/2018/05/N_FR-1-1.pdf
- Paul Gray, P. H. (2009). Junction breakdown. En P. H. Paul Gray, *Analysis and design of analog integrated circuits* (págs. 6-8). EUA: John Wiley & Sons, Inc.
- Sai Fon Technologies. (Enero de 2010). *International clasification of basic materials*. (Sai Fon Technologies) Obtenido de Sai Fon Technologies: <https://saifontech.com/basic-materials/international-%D1%81assification-basic-materials>
- Sensotec. (2017, Agosto). *Detecting residual oxygen within solder reflow*. (Cambridge Sensotec) Retrieved from Sensotec: <https://www.cambridge-sensotec.co.uk/blog/2017/08/22/detecting-residual-oxygen-within-solder-reflow/>
- Silicon Labs. (Julio de 2010). *Crystal-Less SoC RF Transmitter*. Obtenido de Silicon Labs: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si4010.pdf>
- Smith, J. (Junio de 2009). *Gigabyte factory tour: see how 3 million motherboards are made*. (Hexus) Obtenido de Hexus: <https://m.hexus.net/tech/features/mainboard/18759-gigabyte-factory-tour-see-3-million-motherboards-made/?page=5>
- Sparkfun. (Agosto de 2006). *Solder Paste Stenciling*. (Sparkfun Start Something) Obtenido de Sparkfun: <https://www.sparkfun.com/tutorials/58>
- Surface Mount Process. (Octubre de 2010). *Component Placement Process*. (Surface Mount Process) Obtenido de Surface Mount Process: <https://www.surfacemountprocess.com/component-placement-process.html>

Tempo Automation. (Diciembre de 2016). *How to select your best printed circuit material for your design*. (Tempo Automation) Obtenido de Tempo Automation: <https://www.tempoautomation.com/blog/how-to-select-the-best-printed-circuit-board-material-for-your-design/>

Texas Instruments. (2017). *LAUNCHXL-F28379D Gerber Files Rev. 2.0*. EUA: Texas Instruments.

Thierauf, S. (2004). Characteristics and construction of Printed Wiring Boards, Ceramic Surface Mount Capacitors. En S. Thierauf, *High-speed circuit board signal integrity* (págs. 3-15, 227-234). EUA: Artech House.


Walsin Technology Corporation. (Noviembre de 2002). *SMT Notes for CHIP-R and MLCC*. Obtenido de Walsin: https://www.ibselectronics.com/pdf/pa/walsin/smt_notes.pdf



Wei, X.-C. (2017). Electromagnetic Compatibility for High-Speed Circuits. En X.-C. Wei, *Modeling and Design of Electromagnetic Compatibility for High-Speed Printed Circuit Boards and Packaging* (págs. 209-218). EUA: Taylor & Francis.


11. Anexos

11.1 Hoja de datos del GDT SL1021 A/B

Vista previa del SL1021, provista por Littelfuse. Parámetros completos y productos relacionados se encuentran disponibles en su catálogo completo (Littelfuse, 2020).

 **Littelfuse**
Expertise Applied | Answers Delivered
Gas Discharge Tubes
SL1021A/B Series

SL1021A/B Series
RoHS  



Description

GDT circuit protection devices dissipate electrical surge energy safely within a contained plasma gas. Commonly used to help protect sensitive telecom and networking equipment and lines, GDTs protect from damage that may result from lightning strikes and equipment switching operations.

The Littelfuse GDT series described in this document are available in a variety of leaded and surface mount forms and offered with and without optional fail-safe clip. Please refer to the electrical specifications, dimension and packaging options section of this document for additional information.


SL1021A/B Series:

SL1021A/B series GDTs are designed to offer high levels of performance on fast rising transients in the range of 100V/μS to 1KV/μS, which are those most likely created by induced lightning disturbances.

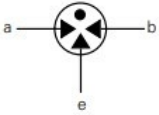
These devices feature ultra low capacitance (typically 1.5pF or less) and are extremely robust with SL1021A devices able to divert a 10,000 Amp pulse without destruction, and SL1021B suffix devices able to divert a 20,000 Amp pulse without destruction.

These series offer optimized internal geometry which provide low insertion loss at high frequencies, ideal for the protection of broadband and other high speed transmission equipment.

Agency Approvals

AGENCY	AGENCY FILE NUMBER
	E128662

3 Electrode GDT Graphical Symbol



a = TIP
b = RING
e = GROUND
(center electrode)

Features

- RoHS compliant
- Low insertion loss
- Excellent response to fast rising transients
- Ultra low capacitance
- 10KA (A suffix devices) / 20KA (B suffix devices) surge capability tested with 8/20μs pulse as defined by IEC 61000-4-5
- Available with thermal failsafe option (add 'F' suffix to part number)

Applications

SL1021:

- Broadband equipment
- ADSL equipment
- XDSL equipment
- Satellite and CATV equipment
- Splitters
- General telecom equipment

- Telecom network interfaces
- Telephone line cards
- Repeaters
- Modems
- Line test equipment

Product Characteristics

Materials	Dull Tin Plate 175 ± 12.5 Microns. with ceramic insulator
Product Marking	'LF' mark, voltage& date code: SL1021A - Red/White text SL1021B - Blue/White text
Glow to arc transition current	~ 1Amp
Glow Voltage	-60-200 Volts
Storage and Operation Temperature	-40 to +90°C
Transverse Voltage (Delay Time)	< 0.2μSec (Tested to ITU-T Rec. K.12)
Arc Voltage	-10 to 35 Volts
Holdover Voltage	<150mS (Tested to ITU-T Rec. K.12)

© 2017 Littelfuse, Inc.
Specifications are subject to change without notice.
Revised: 12/12/17

Figura 51. GDT Serie SL1021A/B. Tomado de (Littelfuse, 2020).

11.2 Hoja de datos del circuito integrado SI4010

Vista previa del SI4010, provista por Silicon Labs. Parámetros completos y productos relacionados se encuentran disponibles en su hoja de especificaciones (Silicon Labs, 2010).



Si4010-C2

CRYSTAL-LESS SoC RF TRANSMITTER

Features

- Crystal-less operation
 - Optional crystal oscillator input
- High-Speed 8051 μ C Core
 - Pipeline instruction architecture
 - 70% of instructions in 1 or 2 clocks
 - Up to 24 MIPS with 24 MHz clock
 - 4 kB RAM/8kB NVM
 - 128 bit EEPROM
 - 256 byte of internal data RAM
 - 12 kB ROM embedded functions
 - 8 byte low leakage RAM
- Extensive Digital Peripherals
 - 128 bit AES accelerator
 - 5/9 GPIO with wakeup functionality
 - LED driver
 - Data serializer
 - High-speed frequency counter
 - On-chip debugging: C2
 - Unique 4 byte serial number
 - Ultra low-power sleep timer
- Single Coin-Cell Battery Operation
 - Supply voltage: 1.8 to 3.6 V
 - Standby current < 10 nA
- High-performance RF transmitter
 - Frequency range: 27–960 MHz
 - +10 dBm output power, adjustable
 - Automatic antenna tuning
 - Symbol rate up to 100 kbps
 - FSK/OOK modulation
 - Manchester, NRZ, 4/5 encoder
- Analog Peripherals
 - LDO regulator with POR circuit
 - Battery voltage monitor
- Temperature range -40 to $+85$ °C
- Automotive quality option, AEC-Q100
- 10-pin MSOP/14-pin SOIC

Applications

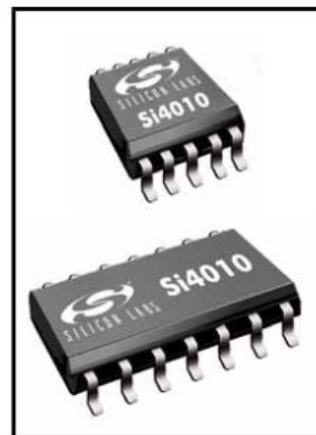
- Garage and gate door openers
- Remote keyless entry
- Home automation and security
- Wireless remote controls

Description

The Si4010 is a fully integrated crystal-less CMOS SoC RF transmitter with an embedded CIP-51 8051 MCU. The device can operate over the -40 to 85 °C temperature range without requiring an external crystal reference source reducing board area and BOM cost. The device includes an 8 kB non volatile memory block for programming the user's application along with a 12 kB ROM of embedded support code for use in the user's application. The Si4010 includes Silicon Laboratories' 2-wire C2 Debug and Programming interface, which allows customers to download their code during the development stage into the on-board RAM for testing and debug prior to programming the NVM.

The Si4010 is designed for low power battery applications with standby currents of less than 10 nA to optimize battery life and features automatic wake on button press support to efficiently move from the standby to active mode state with minimal customer code support. Built in AES-128 hardware encryption along with a 128-bit EEPROM can be used to create robust data encryption of the transmitted packets. A unique 4-byte serial number is programmed into each device ensuring non-overlapping device identifiers.

The RF transmitter features a high efficiency PA capable of delivering output power up to +10 dBm and includes an automatic antenna tuning algorithm. This algorithm adjusts the antenna tuning at the start of each packet transmission for optimal output power minimizing the impact of antenna impedance changes due to the remote being held in a user hand. The devices supports FSK and OOK modulations and includes automatic output power shaping to reduce spectral spreading and ease regulatory compliance. The output frequency can be adjusted via software over the entire 27 to 960 MHz range. The output data rate is software adjustable up to a maximum rate of 100 kbps.

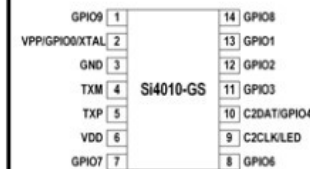


Ordering Information:
See page 15.

Pin Assignments



10-Pin MSOP



14-Pin SOIC

Patents pending

Figura 52. Circuito integrado SI4010. Tomado de (Silicon Labs, 2010).

12. Índice de términos

A

Agujero no platinado (NPTH) · 29
Agujero platinado (PTH) · 29
Agujeros de soporte (tooling holes) · 40
Análisis paramétrico (gap analysis) · 46
AOI · 58
Archivos de fabricación (gerber files) · 34
Arreglo (array) · 39
AXI · 58

B

Blindaje · 4

C

CAD · 34
Cámara anecoica · 59
Capacitores de desacoplo (bypass caps) · 12
Capas de diseño (layers) · 34
CEM-1 · 31
CEM-3 · 31
Colocación de componentes (placement) · 50
Compatibilidad electromagnética (EMC) · 3
Componentes integrados · 38
Componentes SMT · 37
Componentes TH · 37
Costos de producción · 47

D

Descargas de rayos (lightning) · 9
Descargas electrostáticas (ESD) · 9
DFM · 57
DFT · 57
Dibujo para fabricación (fabrication drawing) · 41
Diodo Schottky · 15
Diodo Zener · 14
DRC · 55

E

Efecto avalancha · 14
Efecto túnel · 14
Embalaje · 27
Empaquetado (packaging) · 38
ENIG · 33
ERC · 55

F

Factura de materiales (BOM) · 46
Fiduciales · 40
FR-1 · 31
FR-4 · 31

G

Ganancia del amplificador · 24
Ganancia del circuito · 24

H

HASL · 32
Huella (footprint) · 36

I

ICT · 58
Identificadores (test coupons) · 40
Inductancia equivalente en serie (ESL) · 12
Inmersión de estaño · 33
Inmersión de plata · 33
Inserción de componentes (insertion) · 50
Interferencia electromagnética (EMI) · 3

K

Kanban · 20

P

Panel · 39

PCB · 39

Perfil para soldar (soldering profile) · 52

Pestañas (tabs) · 40

Pila de capas (stackup) · 28

Planos · 28

Poliamida · 31

Preformado · 49

PTFE (teflón) · 31

R

Resistencia equivalente en serie (ESR) · 12

Ruido · 3

Ruido de disparo · 3

Ruido térmico · 3

Ruptura Zener · 14

Rutas · 28

S

Sistema de tierras · 5

Soldadura de ola (wave solder) · 52

Soldadura de refusión o reflujo (reflow solder) · 51

Susceptibilidad electromagnética (EMS) · 3

Sustrato · 30

T

Tecnología de inserción (TH) · 1

Tecnología de montaje superficial (SMT) · 1

Transistor en lado alto · 22

Transistor en lado bajo · 22

Transitorios rápidos (EFT) · 9

Trazos · 28

Tubo de gas para descargas (GDT) · 10

V

Vías · 28