

# • APTIV •

31 Agosto 2020

Dr. Javier Molina Salazar

Coordinador de la Maestría en Ingeniería en Manufactura


**Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura**

**Presente:**

Por medio de la presente, se hace constar que el C. **Ricardo Loya Madrid**, alumno de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez del programa de la Maestría en Ingeniería en Manufactura y matrícula **187083**, cuenta con autorización para realizar una Estancia de Investigación denominada **Reducción de Cobre en tablilla de circuitos impresos**, en el departamento/área/ de la empresa **Connection Systems / Centrales Eléctricas**, en el periodo de **Junio – Diciembre del 2020**. Es de nuestro conocimiento que como parte del proyecto se requerirá del análisis de información de algunos procesos contenidos dentro de la unidad y se autoriza al interesado referido a utilizar la información relevante para el desarrollo del proyecto, con excepción de información sensible propiedad de terceros, tales como marcas y datos técnicos protegidos por derechos de propiedad intelectual. En el proyecto será asesorado por el **Dr. Francisco Javier López Jáquez** docente del Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Por parte de la empresa se asignará como asesor a **Dr. Rodrigo Villanueva Ponce**.

Atentamente

**Nombre de la empresa y sello**

  
Dr. D. Molina N.

**Nombre del responsable**

Puesto del responsable

APTIV CONTRACT SERVICES,  
S. DE R.L. DE C.V.  
R.F.C. DAS060213 8C0  
REG. PATRONAL: A8390469105  
AVE. HERMANOS ESCOBAR No. 5758-A  
COL. FOVISSSTE CHAMIZAL  
CD. JUAREZ, CHIH. C.P. 32310

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE MANUFACTURA



**IMPLEMENTACIÓN DE REDUCCIÓN DE COBRE EN TABLILLA DE CIRCUITOS**

**IMPRESOS RÍGIDA PARA CENTRALES ELÉCTRICAS**

PROYECTO QUE PRESENTA:

**RICARDO LOYA MADRID**

**Matricula 187083 / CVU960005**

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRÍA EN INGENIERIA EN MANUFACTURA ESPECIALIDAD: DISEÑO DE**

**PRODUCTO**

ASESOR: DR. FRANCISCO JAVIER LÓPEZ JÁQUEZ

COASESOR: DR. RODRIGO VILLANUEVA PONCE

**CD. JUÁREZ, CHIH., MÉXICO**

**NOVIEMBRE 2020**

# ÍNDICE

	Pág.
Cuadro de figuras y gráficas	ii
Cuadro de tablas	iii
1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	3
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4 Justificación.....	7
1.5 Alcance y Delimitación.....	10
1.6 Cronograma de Actividades.....	11
2 Marco teórico.....	12
2.1 Concepto.....	13
2.1.1 ¿Qué es una PCB?.....	14
2.1.2 Terminología y estructuras físicas del PCB.....	15
2.1.3 Apilamiento de las capas del PCB.....	18
2.2 Espesor del cobre en el PCB.....	20
2.2.1 Elección del espesor del cobre en el PCB.....	20
2.2.2 Usar el espesor del cobre para optimizar el flujo de corriente.....	22
3 Materiales y metodología.....	24
3.1 Materiales, Sistemas y Software.....	24
3.2 Metodología.....	25
4 Resultados y discusión.....	29
4.1 Generación de propuesta eléctrica para PCB con reducción.....	29
4.2 Prueba preliminar en Hyperlynx.....	30
4.2.1 Parámetros para análisis térmico en Hyperlynx.....	30
4.2.2 Resultados del análisis térmico de Hyperlynx.....	32
4.3 Envío de solicitud de cotización de nuevo diseño de PCB.....	37
4.3.1 Creación de la solicitud de cotización y envió a proveedores.....	37
4.3.2 Revisión de cotizaciones y selección de proveedor final.....	38
4.4 Elaboración de plan de Validación acorde a la SBE1910.....	40
4.5 Construcción de piezas prototipo de validación.....	42
4.6 Ejecución del plan de validación.....	44
4.6.1 Prueba 1: Caída de voltaje en circuitos objetivo.....	45
4.6.2 Prueba 2: Sobrecarga de fusibles.....	46
4.6.3 Prueba 3: Análisis térmico.....	47
4.7 Revisión de resultados.....	49
5 Conclusiones.....	51
6 Referencias.....	52

## CUADRO DE FIGURAS Y GRÁFICAS

	Pág.
Fig. 1.1 Componentes considerados para optimización de reducción de costos.....	2
Fig. 1.2 Componentes considerados para optimización de reducción de costos. Tablilla de circuitos impresos (PCB) seleccionada.....	3
Fig. 1.3 Ensamble de central eléctrica del programa ABXX, objeto de proyecto de reducción de cobre.....	4
Fig. 1.4 Ensamble de PCB utilizado en la central eléctrica del ABXX.....	4
Fig. 1.5 Consumo de PCB a nivel global por tipo de industria.....	8
Fig. 2.1 Corte de sección de PCB con orificios y SMD.....	12
Fig. 2.2 PCB robusto con porciones flexibles.....	14
Fig. 2.3 Terminología y estructuras físicas en el PCB.....	17
Fig. 2.4 Configuración de un PCB de 4 capas.....	18
Fig. 2.5 Ejemplo de construcción de PCB con medidas por sección.....	21
Fig. 2.6 Un software de diseño de PCB nos permite establecer los parámetros de manera automática.....	23
Fig. 3.1 Diagrama de flujo de metodología para el proyecto.....	28
Fig. 4.1 Modelo 3D simplificado utilizado en la simulación en Hyperlynx.....	31
Fig. 4.2 Distribución de temperatura en PCB con configuración 3/4/4/3 Oz. de cobre.....	32
Fig. 4.3 Distribución de temperatura en PCB con configuración 3/3/3/3 Oz. de cobre.....	33
Fig. 4.4 Gráfico de comparación térmica de relés.....	34
Fig. 4.5 Gráfico de comparación térmica de fusibles.....	34
Fig. 4.6 Gráfico de comparación térmica de resistencias.....	35
Fig. 4.7 Gráfico de comparación térmica de diodos.....	35
Fig. 4.8 Gráfico de incremento térmico en terminales.....	36
Fig. 4.9 Vista explotada de la central eléctrica ABXX.....	42
Fig. 4.10 Ensamble final del ABXX para ser enviado a validación.....	43
Fig. 4.11 Centrales eléctricas conectadas al arnés para correr pruebas de sobre voltaje....	45
Fig. 4.12 Temp. Máxima: 33.6°C a 60 segundos.....	48
Fig. 4.13 Temp. Máxima: 81.4°C a 1,860 segundos.....	48
Fig. 4.14 Temp. Máxima: 35.7°C a 3,600 segundos.....	48

## CUADRO DE TABLAS

	Pág.
Tab. 1.1 Cronograma de actividades para el proyecto de implementación de reducción de cobre.....	11
Tab. 4.1 Información general del programa para liberar el RFQ.....	39
Tab. 4.2 Cotizaciones de proveedores y ahorros respecto a precio actual.....	39
Tab. 4.3 Cotizaciones con ahorro real para la empresa y selección final de proveedor.....	40
Tab. 4.4 Plan de validación para proyecto de reducción de cobre.....	41
Tab. 4.5 circuitos objetivo para la validación de reducción de cobre.....	44
Tab. 4.6 Caídas de voltaje para central eléctrica ABXX.....	46
Tab. 4.7 Resultados de prueba de sobrecarga de voltaje.....	47
Tab. 4.8 Plan de validación para proyecto de reducción de cobre actualizada con resultados.....	49

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como propósito documentar el proceso, así como las diferentes consideraciones eléctricas como mecánicas relacionadas a la optimización de las tablillas de circuitos impresos (PCB por sus siglas en ingles). Esta optimización se busca a través de la reducción de la cantidad de cobre utilizado en la tablilla, el cual gracias a sus propiedades conductivas ayuda a distribuir las cargas eléctricas eficientemente a través de la tablilla. La tablilla de circuitos impresos es una tablilla de 4 capas con una configuración actual de 4/3/3/4 onzas de cobre por capa respectivamente. A través de esta optimización se busca moverse a una configuración de 3/3/3/3 onzas de cobre por capa.

El costo del cobre es alto con relación a los demás componentes e incrementa el costo final de la pieza, por lo cual a través de esta reducción se busca volver el producto más competitivo, y que genere una mayor margen de ganancia para la empresa, así como un ahorro en el corto plazo al cliente final.

## 1.1 Antecedentes

Durante los proyectos de Innovación y mejora de costos (I&CIP por sus siglas en ingles) que se hacen anualmente en APTIV como parte de los proyectos de mejora continua, se ha llevado al equipo de ingeniería de producto la tarea de reducir el costo de los ensambles para centrales eléctricas la plataforma ABXX el cual es un programa de producción regular. Esto quiere decir, que se tiene que buscar una manera de dar un ahorro a la empresa y al cliente, con los productos que actualmente se están embarcando a las armadoras y que están siendo ensamblados en los vehículos.

Si bien, en la etapa de diseño se asegura que la central eléctrica cumpla con todas las especificaciones tanto eléctricas como mecánicas del cliente, una vez probado el producto y confirmada la fiabilidad de este, se puede hacer dichas mejoras para eliminar gastos en productos con exceso de ingeniería o cuyo factor de seguridad sea más alto del requerido.

Se comenzó a inspeccionar la central eléctrica en busca de un área de oportunidad para llevar a cabo la optimización de algún componente, tomando en cuenta el impacto en costo que generaría. Los componentes inspeccionados y considerados para la optimización fueron los siguientes:

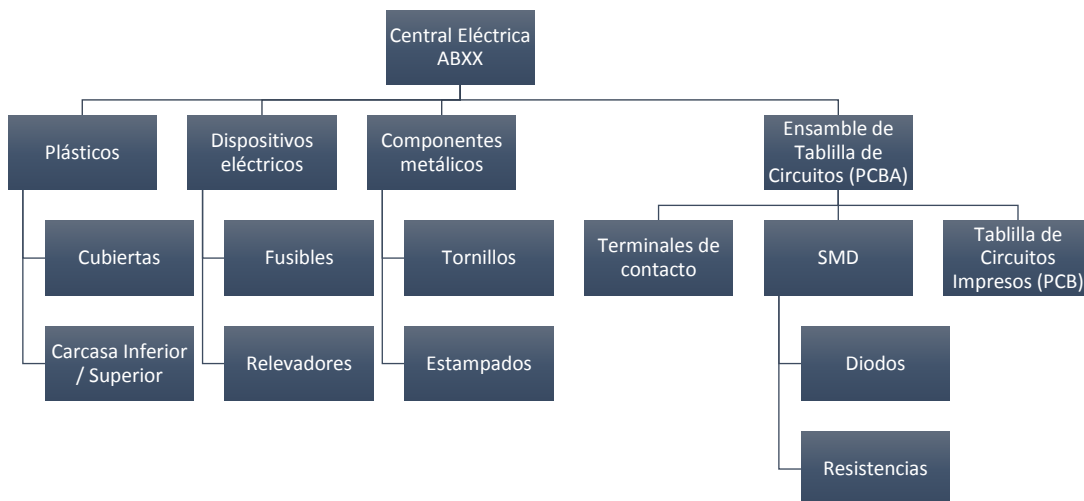


Fig. 1.1 Componentes considerados para optimización de reducción de costos.

Al terminar la evaluación de los componentes, se optó por hacer la optimización en un componente comprado, el cual es el más costoso del ensamble y permite hacer una mejora tanto en diseño, así como en cuestión de negociar por el lado del equipo de compras. Esto llevo al equipo a decantarse por la tablilla de circuitos impresa. La actividad siguiente es buscar la manera de llevar a cabo la mejora.

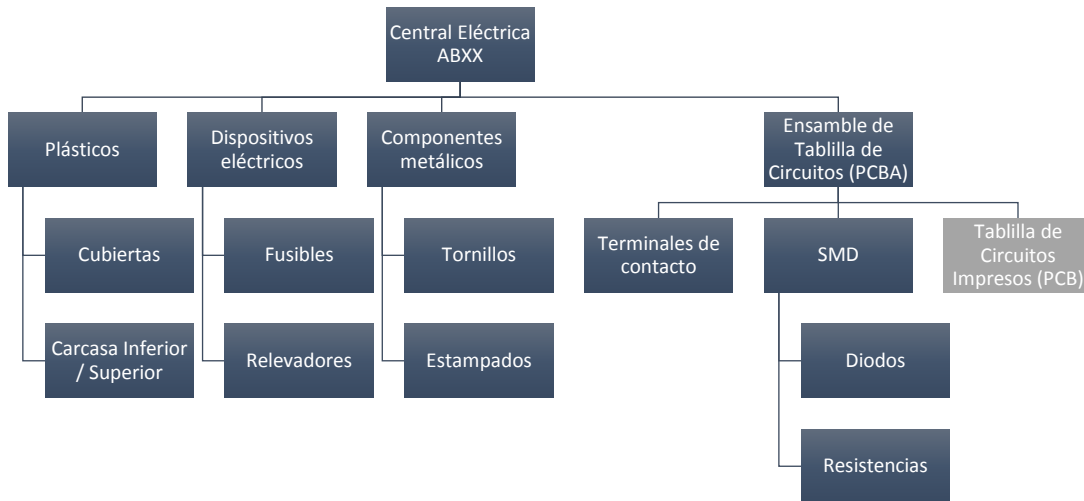
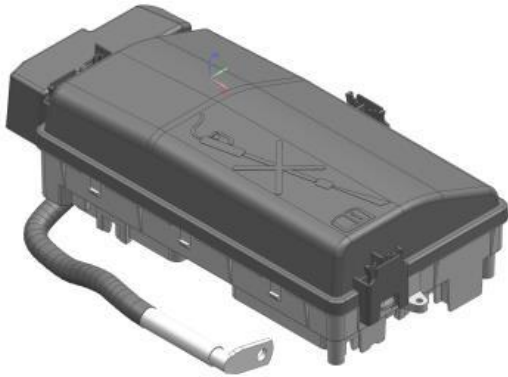


Fig. 1.2 Componentes considerados para optimización de reducción de costos. Tablilla de circuitos impresos (PCB) seleccionada

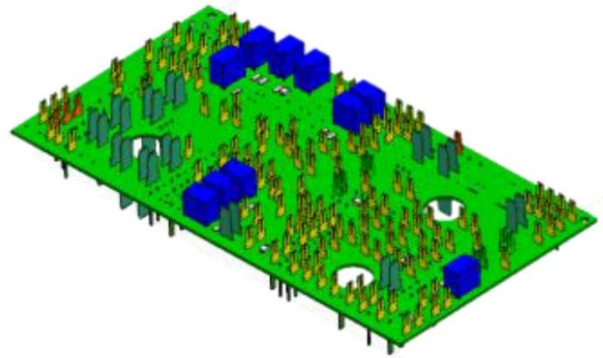
Revisando las limitaciones dentro del componente se estableció que las dimensiones en X, Y de la tablilla no pueden cambiar dado a que los plásticos tienen ya las características para recibir una tablilla de una dimensión determinada. Después de esto se decide comenzar a explorar la posibilidad de reducir el precio de la tablilla reduciendo las onzas de cobre que se utilizan para su construcción, disminuyendo así el costo de la pieza, su peso y por ende su costo total e impacto en precio al producto final.

Dados los requerimientos de la gerencia para los proyectos de reducción de costos, después de un análisis de componentes se coincidió que una reducción de las onzas de cobre en la tablilla de circuitos impresos, utilizada en las centrales eléctricas del ABXX sería la manera más eficiente para lograr las reducciones requeridas sin afectar la forma, ensamble y funcionamiento del ensamble.





*Fig. 1.3 Ensamble de central eléctrica del programa ABXX, objeto de proyecto de reducción de cobre.*



*Fig. 1.4 Ensamble de PCB utilizado en la central eléctrica del ABXX.*

## **1.2 Planteamiento del Problema**

Hoy en día la industria atraviesa por un momento en el cual la mejora continua no es una opción sino una responsabilidad, el desarrollo tecnológico, así como el volver más eficientes los procesos y los productos es una actividad imperativa para poder crear y mantener una ventaja competitiva.

La industria automotriz, siendo una de las más grandes en el mundo no está exenta de tener que seguir este comportamiento, si no por el contrario, es la que más demandante llega a ser en cuestión de la mejora continua. La gran gama de vehículos distribuidos por los diferentes gigantes automotrices, así como las marcas emergentes llevan a los diseñadores a tener que innovar y mejorar lo que antes era “bueno” o “suficiente”. Este mejoramiento no puede ser exclusivo de las ensambladoras automotrices, ya el poder mantener un mejoramiento a ese nivel es poco práctico y caro para una sola empresa. Por lo tanto, estas gigantes contactan a expertos en diseñar productos automotrices específicos quienes pueden cumplir y superar sus expectativas, desarrollando un producto que sea mejor que su

competencia, con buen desempeño, alta tecnología y buen costo. De esta manera estas empresas logran ganar negocios y con esto aseguran la estabilidad de sus operaciones [1].

Estas empresas, además de la mejora continua e innovación en el producto, se deben preocupar por un factor adicional, el cual puede llevar a una empresa a ganar un negocio y asegurar una estabilidad en producción, o puede llevarla a perder su estabilidad financiera. Este factor es el costo de su pieza y el precio final dado al cliente [2].

El costo de la pieza no solo radica en el gasto de manufactura, sino en el diseño de la misma. El costo final de la pieza se divide en 20% gastos de diseño y el 80% restante son los gastos de producción. Sin embargo, aunque el porcentaje de diseño consume menos recursos esta lleva el mayor porcentaje de responsabilidad al momento de dar un costo a la pieza. La selección adecuada de materiales, proveedores y diseño interno pueden llevar a bajar o subir de gran manera el costo final de la unidad por lo que es importante que cada componente sea totalmente eficiente desde su concepción, o en su defecto, que durante la vida del producto pueda ir evolucionando, mejorando y creando ahorros para la empresa [3].

APTIV, siendo una empresa proveedora de partes automotrices se une a esta carrera de mejoramiento continuo. Siendo una de sus líneas de producto las centrales eléctricas, el diseño de las mismas exige un desempeño que cumpla con los estándares de desempeño del cliente, pero también que se mantenga en una mejora continua asegurando que el diseño optimizado crea ahorros para ambas empresas. Uno de los componentes más costosos de la central eléctrica es la tablilla de circuitos

impresos (PCB) el cual lleva diferentes capas de cobre en las cuales hay trazos que direccionan la corriente eléctrica al arnés y esta a su vez a todo el vehículo. Estas capas de cobre están medidas por la cantidad de onzas de cobre que utilizan. Si un programa utiliza una configuración de 4 capas con 4 onzas de cobre por cada capa, tal configuración la representamos de la siguiente manera: 4/4/4/4.

Un ahorro significativo para reducir el costo de esta pieza es la reducción de onzas de cobre por capa en el PCB, esta actividad puede ayudar a generar un ahorro por el ahorro de este material (Cu), siempre y cuando el desempeño de la pieza no se vea afectado por esta reducción de material. Teniendo en cuenta la oportunidad de generar un ahorro en el cual distintos factores se ven beneficiados (costo, peso de la pieza, confirmación de robustez de diseño mecánico/eléctrico) APTIV busca implementar un proyecto de reducción de cobre a un programa de producción regular con una configuración actual de 4/3/3/4 en el PCB para cambiarla a una configuración de 3/3/3/3 que cumpla con los requerimientos de cliente y provea beneficios bilaterales para las empresas.

El equipo de Ingeniería de Producto, en conjunto del equipo de ECAD y el Laboratorio de validación estarán trabajando en conjunto para desarrollar el nuevo diseño del PCB para la creación del diseño, elaboración de prototipos y validación para verificar la factibilidad de dicha reducción. Buscando de esta manera implementar el cambio primero en un programa de producción regular, para después ser llevado a todos los demás programas, así como a los futuros diseños que están por comenzar y tener un precedente para poder diseñar de manera optimizada los siguientes PCB.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

El propósito general de este proyecto es reducir el costo de la central eléctrica del programa ABXX el cual utiliza un PCB con una configuración de actual de 4/3/3/4 y busca llevarla a una configuración de 3/3/3/3. Con esto se lograría una disminución de 2 onzas de cobre utilizadas en los trazos de la tablilla de circuitos impresos. Con esta reducción de material el costo del componente disminuye y proporciona un ahorro a la empresa.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Calcular el beneficio económico para la empresa en la vida total restante del programa
- Crear un plan de validación adecuado para la propuesta de reducción.
- Entender el proceso para la generación de una propuesta de un cambio de ingeniera desde su concepción hasta su liberación de resultados para deliberación de cliente.

## **1.4 Justificación**

Al estar en la época donde los avances tecnológicos son tan agigantados [4] es importante buscar mejoras y optimizar los componentes en los cuales vamos a centrar nuestro trabajo y comunicación de nuestro sistema.

El mercado mundial de PCB superó los \$60.2 billones de dólares en 2014 y se estima que alcanzará los \$79 billones de dólares en 2024.

Siendo las tablas de circuitos impresos un componente de uso general y creciente en todas las industrias con uso de tecnología eléctrico / electrónica [5], es en extremo importante buscar la optimización del diseño de nuestras tablas para con ello asegurar que el uso de los materiales y componentes que utilizamos en su construcción permite obtener de ellos el comportamiento y costo más adecuados para cumplir los requerimientos actuales de la industria.

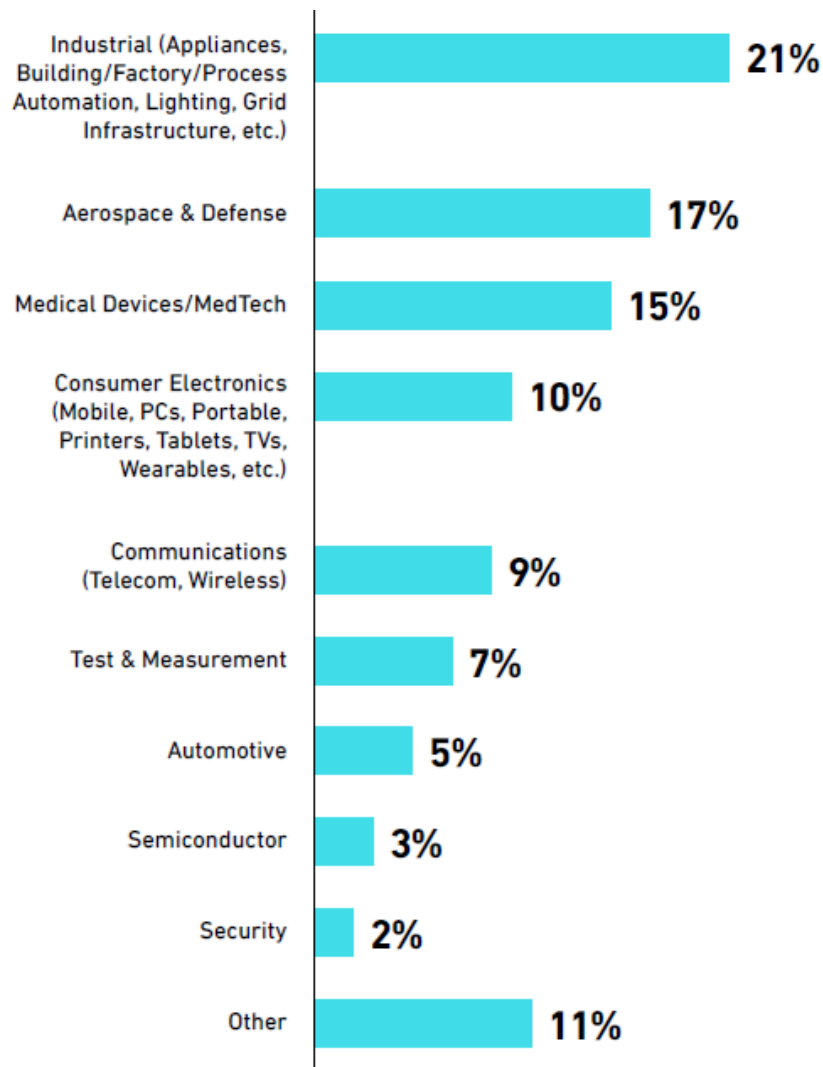


Fig. 1.5 Consumo de PCB a nivel global por tipo de industria [5].

La aportación generada a través de la realización de este proyecto comienza con el ahorro de recursos para la empresa, se sabe que la mejora continua debe de ser constante aun en los ensambles de producción regular en la cual se pueda ofrecer un beneficio para la empresa así como para el cliente [6], con esto se logra crear una ventaja competitiva sobre los demás proveedores ya que se le da un valor agregado al producto cuando se hacen mejoras al diseño durante su vida en producción. Con esto se demuestra que aun cuando un negocio o plataforma ya está asignada a la empresa, esta sigue buscando maneras de mejorar y hacer más eficientes los diseños entregados y por ende sigue dando un beneficio en el largo plazo y la vida del producto. Al ser ensambles que tienen una vida de producción de entre 5 y 7 años se asegura que el diseño se mantiene actualizado y vigente a las nuevas tecnologías e información que se ve relacionada a los componentes que se utilizan en el ensamble. Esto es importante para el producto y para quienes trabajan en ello ya que se convierte en una tarea imperativa el mantenerse actualizado en los procesos y tecnologías.

Como maestros en manufactura debemos de estar conscientes de que no solo los productos y procesos nuevos tienen que ser hechos con la nueva información y tecnología que se va adquiriendo, sino que aun lo que ya está implementado y en producción regular es un área de trabajo útil, que puede proporcionar beneficios para ambas partes siempre y cuando se le siga dando la atención adecuada.

Las tablillas de circuitos impresos deben de ser mejoradas y optimizadas para obtener el desempeño que esperamos, proporcionando una relación costo-beneficio adecuada para ayudarnos a mantener una ventaja competitiva sobre los demás

proveedores de componentes en la industria eléctrica / electromecánica, así como proveer precios que permitan obtener un beneficio económico tanto para el proveedor, así como al cliente que es quien adquiere el ensamble final.

### **1.5 Alcance y Delimitación**

En esta era de la tecnología, el papel de los circuitos impresos resulta imprescindible para desarrollar muchas de las tareas que realizamos a diario. En nuestros hogares contamos con una gran cantidad de aparatos que permiten hacer tareas de forma más cómoda y sencilla. Las industrias tanto de electrónicos caseros, automotrices, aeronáuticas y más, utilizan las tablillas de circuitos impresos [5]. La reducción de las onzas de cobre es una práctica que se puede llevar a cabo en todos los PCB para todas las industrias, por lo cual sabemos que el alcance de este proyecto puede impulsar ahorros en la industria en general.

Aunque los beneficios de una práctica de reducción de cobre pueden ser aplicados a todas las ramas que utilicen tecnología de PCB, en este proyecto el enfoque es en las tablillas del sector automotriz, para centrales eléctricas de uso bajo capo, que sean tablillas de cuerpo rígido, con 4 capas de cobre, bajo los lineamientos y requerimientos dados por la SBE1910 revisión de Noviembre del 2012. Con respecto a los anteriores lineamientos y delimitaciones se procederá a realizar la práctica de reducción de cobre, su validación e interpretación de resultados.

## 1.6 Cronograma de Actividades

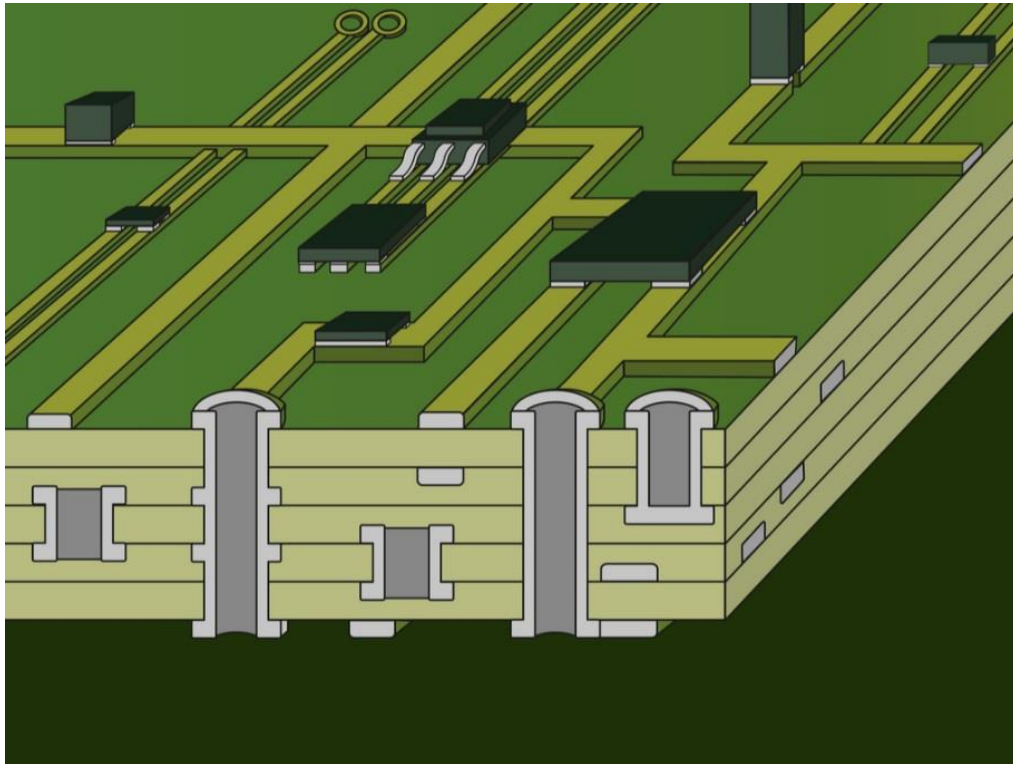
Semestre Enero - Junio 2020 (Semanas)																
Concepto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Estancia en Empresa																
Revisión de Literatura																
Definición de conceptos básicos																
Toma de datos																
Presentación de avances																
Escritura de Reporte Técnico																
Semestre Julio - Diciembre 2020 (Semanas)																
Concepto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Estancia en Empresa																
Revisión de Literatura																
Definición de conceptos básicos																
Toma de datos																
Presentación de avances																
Escritura de Reporte Técnico																

Tab. 1.1 Cronograma de actividades para el proyecto de implementación de reducción de cobre.



## 2 MARCO TEÓRICO

La información disponible en relación con las tablillas de circuitos impresos es abundante, ya que hay diversos estudios y prácticas de mejora en las cuales se ha trabajado en este componente, sin embargo, la información disponible en cuanto a su optimización referente a la reducción de cobre es prácticamente nula por lo cual se pondrá en contexto del funcionamiento y principales características del componente para después pasar a la ejecución de la mejora en el apartado de resultados.



*Fig. 2.1 Corte de sección de PCB con orificios y SMD [13].*

## 2.1 Concepto

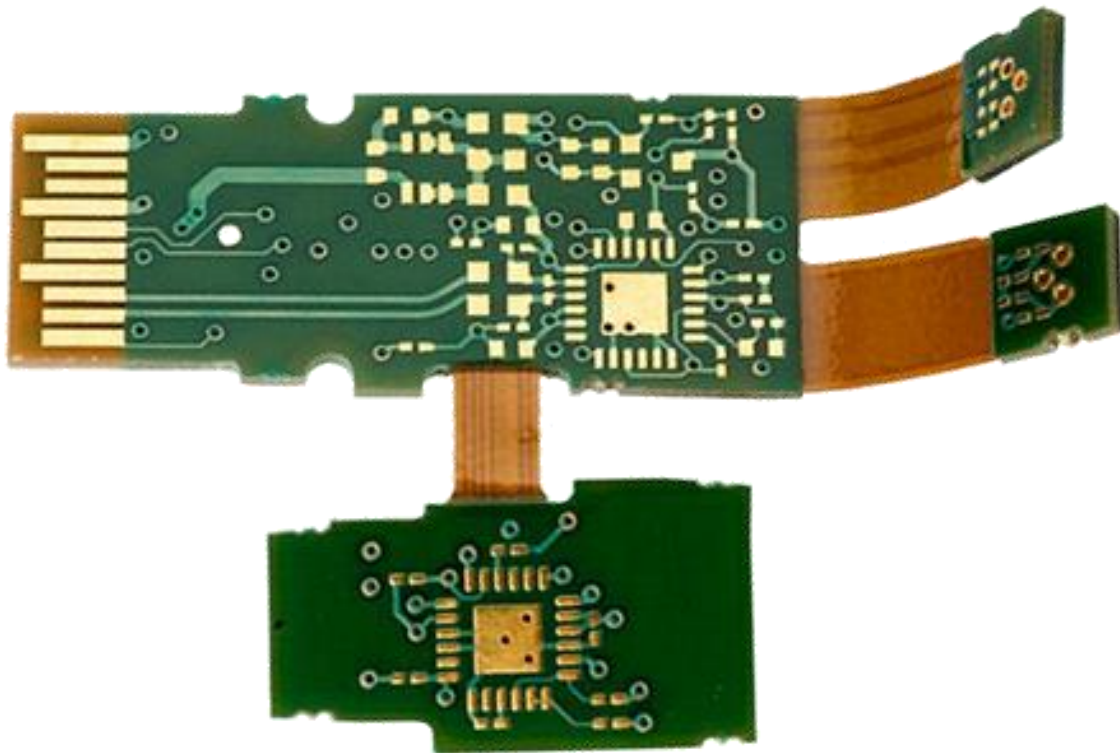
Las tablillas de circuitos impresos (PCB) son el bloque de construcción fundamental de la mayoría de los dispositivos electrónicos modernos. Ya sean tablillas simples de una sola capa utilizadas en el control de la puerta de un garaje, a una tablilla de seis capas de un reloj inteligente, hasta una tablilla de circuitos de 60 capas, de muy alta densidad y velocidad utilizada en supercomputadoras y servidores, las tablillas de circuitos impresos son la base en la cual se ensamblan todos los demás componentes electrónicos [8].

Los semiconductores, conectores, resistencias, diodos, condensadores y dispositivos de radio se montan y “hablan” entre sí a través de la PCB.

Los PCB tienen atributos mecánicos y eléctricos que los hacen ideales para estas aplicaciones. La mayoría de los PCB fabricados en el mundo son rígidos, aproximadamente el 90% de los PCB fabricados en la actualidad son tablillas rígidas. Algunas tablillas de circuitos impresos son flexibles, lo que permite que los circuitos se doblen y adopten una forma requerida, o a veces se utilizan donde el circuito flexible sobrevivirá a cientos de miles de ciclos de doblado, sin ninguna interrupción o daño en los circuitos. Estos PCB flexibles comprenden aproximadamente el 10% del mercado. Un pequeño subconjunto de estos tipos de circuitos se denomina circuitos flexibles rígidos, donde una parte de la placa es rígida, ideal para montar y conectar componentes, y una o más partes son flexibles, lo que brinda las ventajas de los circuitos flexibles [8].

### 2.1.1 ¿Qué es una PCB?

Una tablilla de circuitos impresos, explicada de manera muy básica es un material aislante rígido, plano que tiene estructuras conductoras delgadas adheridas a un lado. Estas estructuras conductoras crean patrones geométricos que consisten, por ejemplo, en rectángulos, círculos y cuadrados. Los rectángulos largos y delgados funcionan como interconexiones (es decir, el equivalente a cables) y varias formas funcionan como puntos de conexión para los componentes [9].



*Fig. 2.2 PCB robusto con porciones flexibles [9].*

Un PCB de una sola capa es muy restrictivo; la realización del circuito no hará un uso eficiente del área disponible y el diseñador puede tener dificultades para crear las interconexiones necesarias [11].

La incorporación de capas conductoras adicionales hace que la PCB sea más compacta y fácil de diseñar. Una placa de dos capas provee una mejora importante con respecto a una tablilla de una sola capa, y la mayoría de las aplicaciones se benefician de tener al menos cuatro capas. Una tablilla de cuatro capas consta de la capa superior, la capa inferior y dos capas internas. ("Superior" e "inferior" pueden no parecer una terminología científica típica, pero no obstante son las designaciones oficiales en el mundo del diseño y fabricación de PCB) [11].

### **2.1.2 Terminología y estructuras físicas del PCB**

Hay bastante vocabulario especializado que surge en las discusiones sobre placas de circuito impreso. Esta sección describe las estructuras físicas que se encuentran en los PCB y le brinda las palabras que usamos para identificarlas [8].

- Una interconexión conductiva se denomina trazo, y los puntos de conexión de los componentes se denominan pads (para los componentes que descansan en la superficie de la tablilla). Además, hay orificios pasantes o through holes por su nombre en inglés (para las terminales que se insertan en los agujeros perforados en la tablilla). El diseño básico de PCB consiste en disponer las pads y los orificios pasantes para que los componentes se puedan instalar correctamente y luego conectar estas pads y los orificios pasantes mediante trazos.

- No todos los orificios perforados son para componentes de orificios pasantes. A menudo necesitamos transferir una señal o voltaje de suministro de una capa de PCB a otra, y esto se logra utilizando pequeños orificios conductores llamados vías.
- Muchas tablillas de circuitos impresos también incluyen orificios de montaje, que tienen una función mecánica en lugar de eléctrica y, por lo tanto, no necesitan ser platinados. El término "platinado" en este contexto se refiere a material conductor que se ha depositado en el interior de un orificio perforado.
- Un vertido de cobre es una sección relativamente grande de una capa de PCB que está llena de material conductor. Los vertidos de cobre se pueden utilizar para proporcionar una conexión de muy baja resistencia o inductancia entre los componentes y para mejorar el rendimiento térmico
- Una capa de PCB que consta completamente de un gran vertido de cobre se llama capa plana. Con frecuencia utilizamos una capa interna como plano de tierra y creamos conexiones a tierra colocando vías junto a los pines de los componentes.
- Un orificio pasante o vía comienza como un círculo de cobre y luego se convierte en un orificio cuando una broca pasa a través del círculo (idealmente a través del centro del círculo). El término anillo anular se refiere al ancho de cobre que queda después de perforar el orificio.
- Las tablillas de circuitos impresos incluyen una variedad de información "complementaria" que no tiene ningún papel en la funcionalidad eléctrica del dispositivo. Por ejemplo, los designadores de referencia identifican de forma

única los componentes, los puntos indican la orientación adecuada de los componentes y los títulos de los proyectos o los números de serie nos ayudan a realizar un seguimiento de las numerosas placas de circuitos que se acumulan en un laboratorio. Nos referimos a esta información como la serigrafía [9].

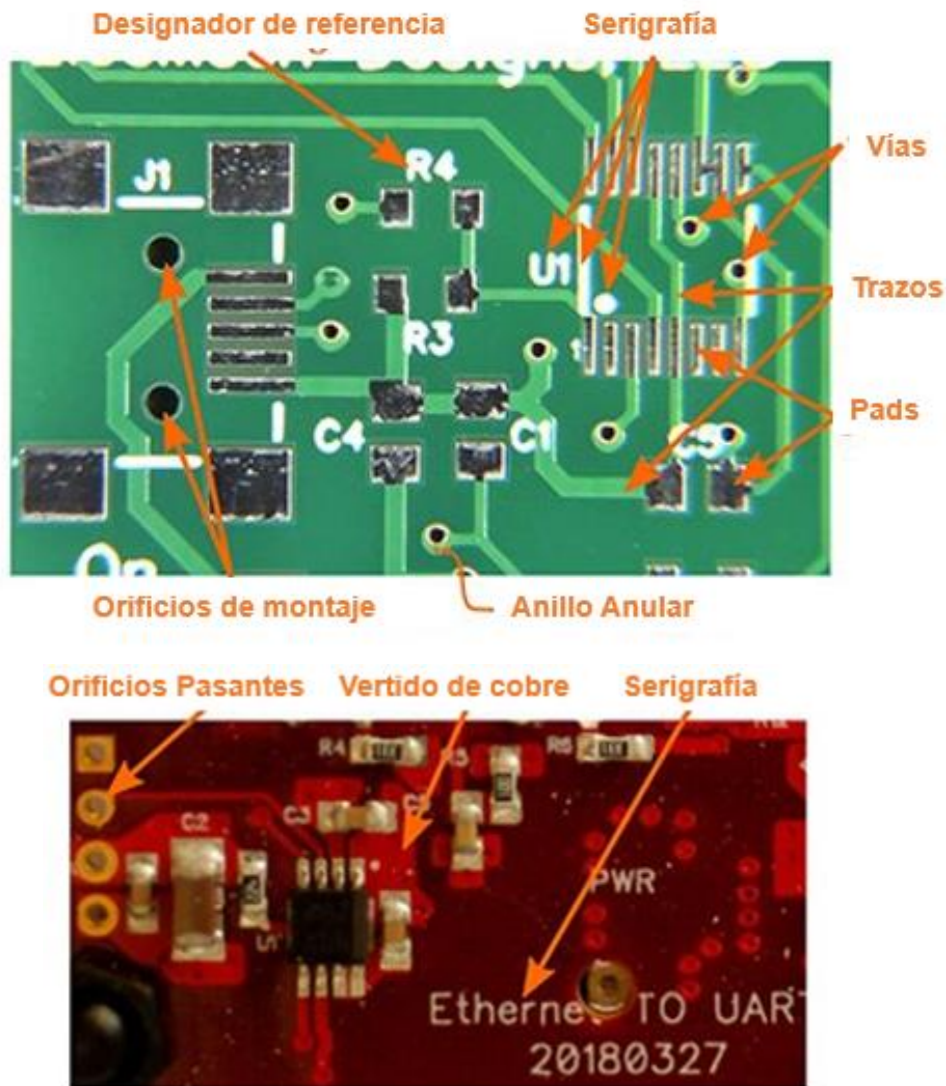


Fig. 2.3 Terminología y estructuras físicas en el PCB [8].

### 2.1.3 Apilamiento de las capas del PCB

El apilamiento es la disposición de capas conductoras y aislantes en un PCB multicapa. El siguiente diagrama de vista lateral muestra el apilado de una placa de cuatro capas.



*Fig. 2.4 Configuración de un PCB de 4 capas [10].*

El material conductor de elección es el cobre. El preimpregnado conocido como prepeg es un material aislante que está preimpregnado (de ahí el nombre) con resina, y el núcleo (también aislante) es similar en composición al preimpregnado [10].

El uso de una estructura de cuatro capas siempre es recomendado. Una tablilla de cuatro capas le permite dedicar una capa interna al potencial de referencia (es decir, tierra) y otra capa interna a los voltajes de alimentación. La parte superior, y si es necesario la parte inferior, será una capa de componente. Esta disposición facilita el diseño de PCB y también le ayuda a lograr un mejor rendimiento del circuito.

Una tablilla de circuitos impresos se compone de varias capas, incluido el sustrato, los trazos, la máscara de soldadura y la serigrafía [9].

Los trazos son un elemento crucial, porque son los que llevan las señales eléctricas a los diferentes componentes a través de la tablilla. Sin los trazos, la PCB no funcionaría [12].

Las placas de circuito impreso (PCB) se han convertido en un elemento básico en prácticamente todas las áreas de la tecnología moderna. Todo, desde teléfonos inteligentes hasta impresoras 3D, utiliza PCB, y la prevalencia de PCB en la vida diaria solo aumentará. De todos los componentes que componen los PCB, el cobre es uno de los más importantes.

El beneficio número uno del cobre es que es altamente conductor. Esto significa que puede transmitir señales fácilmente sin perder electricidad en el camino. También significa que los fabricantes no tienen que usar toneladas de cobre, incluso una pequeña cantidad hará el trabajo. En la configuración más común, una onza de cobre se puede convertir en 35 micrómetros de aproximadamente 1,4 milésimas de pulgada de espesor, que pueden cubrir un pie cuadrado entero del sustrato de PCB. El cobre también está fácilmente disponible y es relativamente económico (en comparación con otros conductores como lo son la plata o el oro) [12].

Los PCB dependen de la electricidad para realizar sus innumerables funciones. Los circuitos titulares en estas placas de circuitos son esencialmente vías que canalizan cargas eléctricas de un lugar a otro, y las vías deben poder transportar las cargas de manera eficiente. Si bien docenas de sustancias pueden transportar cargas eléctricas, el cobre es particularmente conductor, por lo que se ha convertido en la opción estándar [12].



## **2.2 Espesor del cobre en el PCB**

Una de las principales preocupaciones al realizar el diseño del PCB es la integridad de la señal, que es una medida de la variación de una señal transmitida a lo largo de su ruta. Para los PCB, la capacidad de una señal para minimizar la pérdida de corriente depende del grado de impedancia que se encuentre a lo largo de su trazo. Un trazo puede ser una trayectoria plana en una capa externa (superficie), o en una capa interna. Los trazos son conductores generalmente de cobre y se definen por su ancho, largo, peso y grosor. El flujo de corriente se controla en función de la elección de estos parámetros. Para los casos en los que la longitud y el ancho del trazo se fijan debido a la densidad de la placa y las restricciones de espacio, el flujo de corriente se puede optimizar ajustando el grosor o el peso del cobre del PCB [13].

Para utilizar el grosor de cobre de PCB para la optimización del flujo de corriente, debemos comprender la relación entre ellos. Primero se tiene que revisar la fabricación de los trazos de cobre y sus implicaciones para la integridad de la señal [13].

### **2.2.1 Elección del espesor del cobre en el PCB**

La fabricación de los trazos de cobre de su placa ya sea en la superficie o para las capas internas, se realiza mediante grabado. La fabricación de capas comienza con una hoja laminada que está completamente cubierta por cobre. El grabado es el proceso de eliminar el exceso de cobre de los trazos y otras áreas, como los pads de

los componentes y los anillos anulares para las vías, utilizando una solución a base de amoníaco [14].

Normalmente, estas hojas comienzan con espesores de cobre predeterminados. Por ejemplo, para un espesor de cobre de 1 onza (0,0014 pulgadas o 0,035 mm), la hoja tendría una capa de cobre de 0,5 onzas (0,0007 pulgadas o 0,018 mm) en ambos lados. Este grosor se puede grabar, disminuir, platinar o aumentar, según la especificación deseada. Debido al proceso de fabricación de las láminas (laminadas o electrodepositadas), la superficie tiene un grado de rugosidad que ayuda a la unión al material dieléctrico. Sin embargo, esto puede tener un efecto cada vez más adverso sobre la integridad de la señal a frecuencias más altas. A frecuencias superiores a 100 MHz, se produce el efecto piel, donde el flujo de corriente suele estar cerca de la superficie interna del trazo en lugar de a través del centro del conductor, lo que hace que la resistencia efectiva de la traza aumente y se oponga al flujo de corriente [15].

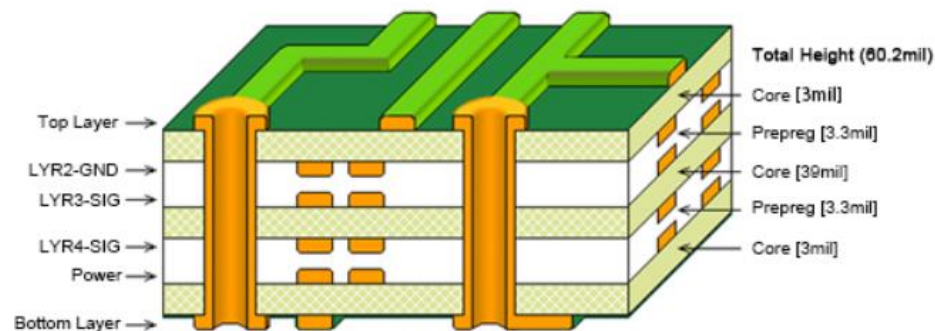


Fig. 2.5 Ejemplo de construcción de PCB con medidas por sección [Taken from the web].

Los trazos para vías platinadas deben agregarse después de perforar los orificios. Un proceso para lograr esto es la electrodeposición donde la placa se coloca en una solución electrolítica que contiene iones de cobre. Se aplica una corriente continua para establecer un potencial a través de la vía y los iones se distribuyen por toda la

vía. La distribución de los iones de cobre a lo largo de la vía o el llenado determina la calidad del flujo de la señal a lo largo de los trazos [14].

### 2.2.2 Usar el espesor del cobre para optimizar el flujo de corriente

Para hacer la optimización se debe de seguir el procedimiento a continuación y utilizando las siguientes constantes [13]:

- Determine la potencia de señal óptima, P (W) y el voltaje, V (Voltios).
  - Esto debe ser cantidades conocidas del diseño de operación del circuito.
- Determine la impedancia de la traza, R ( $\Omega$ ).
  - Esto debe configurarse y puede controlarse durante la fabricación de la placa.
- Determine el flujo de corriente máximo para la traza, I (A).
  - La corriente se puede determinar a partir de cualquiera de las siguientes ecuaciones:
    - $I = V^2 / R$  ó  $I = P / V$  ó  $I = \sqrt{P / R}$
- Determine el aumento de temperatura esperado, T ( $^{\circ}$  C).
  - Esto debe conocerse o estimarse a partir del diseño de funcionamiento del circuito.
- Determine el área de la sección transversal de la traza, A (mils<sup>2</sup>).
  - Utilice las constantes de ajuste de curvas, k, b y c, para aproximar la curva IPC-2152 que relaciona el área con la capacidad de carga actual.

- Para capas internas:  $k = 0.024$ ,  $b = 0.44$ ,  $c = 0.725$
- Para capas externas:  $k = 0.048$ ,  $b = 0.44$ ,  $c = 0.725$

$$A = (I / (k \times T b))^{1/c}$$

- Determine el ancho de la traza,  $w$  (milésimas de pulgada).
  - Esto debería estar configurado.
- Determine el espesor de cobre de la PCB,  $\Delta$  (milésimas de pulgada).
  - $\Delta = A / w$

Un software de diseño de PCB puede permitirnos establecer el grosor del cobre o, en su lugar, puede requerir que utilice un peso de cobre. Estos parámetros son directamente proporcionales y puede convertirlos a peso de cobre utilizando la siguiente ecuación:

- *Peso de cobre (oz) = (espesor de cobre (mils)) / 1.37*

Esencialmente, un pie cuadrado de cobre tiene un peso de 1 onza [7].



Fig. 2.6 Un software de diseño de PCB nos permite establecer los parámetros de manera automática.

## 3 MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 3.1 Materiales, Sistemas y Software

La realización del proyecto se lleva a cabo en las instalaciones del México Technical Center de APTIV ubicado en Av. Hermanos Escobar 5756, Chamizal, 32310 Cd Juárez, Chih. En la división de Connection Systems, departamento de Centrales Eléctricas.

Al ser una tarea asignada al equipo de ingeniería de producto se utilizaron los recursos proporcionados por la empresa, a continuación, se hará un desglose de los sistemas internos utilizados:

- Sistema de Estimados de Ingeniería.
- Sistema de requisiciones eléctricas / mecánicas.
- Sistema de RFQ – Cotización de componentes.
- Sistema de Pruebas de validación

En cuanto al software utilizado se utilizaron los siguientes en la elaboración del diseño del PCB, así como para análisis preliminares del diseño:

- Expedition PCB by Mentor Graphics
- Hyperlynx PI/Thermal v9.3 BETA

Durante el desarrollo y realización del proyecto se llevaron a cabo pruebas físicas en centrales eléctricas ensambladas, a continuación se listan las ubicaciones y laboratorios involucrados:

- Champion Technical Center ubicado en Research Pkwy Warren, Ohio 44483.
  - Electrical Center Validation Center
- Prototype Center ubicado en el México Technical Center.

En cuanto a los materiales utilizados se pueden encontrar listados a continuación:

- Ensamble de Central Eléctrica del ABXX
  - Incluyendo PCB con configuración 3/3/3/3
- Arnés eléctrico para energizar la central eléctrica
- Matriz de cargas de prueba (Test Load Matrix)
  - Especifica que cargas y el periodo de tiempo que se aplica una corriente a un circuito determinado

Teniendo identificados los recursos y herramientas disponibles para la realización del proyecto de optimización en el PCB podemos empezar a generar el método con el cual vamos a trabajar.

### **3.2 Metodología**

La metodología por seguir para la realización del proyecto de reducción de cobre será de la siguiente manera:

- *Reducción de cobre:* En este paso se establecen los primeros parámetros para la realización de la reducción. Tenemos una tablilla con una configuración actual de 4/3/3/4 oz de cobre; si seguimos la recomendación vista durante el marco teórico, sabemos que las 2 capas internas deben de tener la misma cantidad de onzas de cobre para confirmar su durabilidad, por lo cual se decide que la reducción será llevar al PCB a una configuración de 3/3/3/3 oz de cobre por capa. Esta configuración nos lleva a la necesidad de hacer un nuevo ruteo y cambiar los trazos en el PCB para poder manejar la corriente y distribuirla de

la manera que mejor nos convenga. Para esto debemos de generar una solicitud al sistema de ECAD para que nos genere este nuevo diseño.

- *Generación de propuesta eléctrica para PCB con reducción:* Durante esta etapa el equipo de Ingeniería de ECAD (Electrical Computer Aided Design) genera un diseño de PCB que cumpla con todas las pautas de desempeño requeridas por el cliente utilizando la configuración de 3/3/3/3 oz de cobre. De manera paralela, genera y revisa la matriz de cargas para prueba, la cual determina cuanta corriente y durante que cantidad de tiempo será aplicada a cada determinado circuito.
- *Prueba preliminar en Hyperlynx:* HyperLynx es una familia completa de herramientas de análisis para diseño electrónico de alta velocidad que incluye verificación de reglas de diseño eléctrico, integridad de señal, integridad de potencia con modelado electromagnético integrado. HyperLynx permite descubrir y corregir problemas al principio del ciclo de diseño utilizando técnicas de simulación avanzadas para predecir cómo se comportará el diseño. En esta etapa se realiza una comparación entre el diseño actual de 4/3/3/4 oz de cobre contra el 3/3/3/3 oz de cobre.
- *Envío de diseño de PCB a Cotización (RFQ):* De ser exitoso el resultado del Análisis en Hyperlynx se procede a enviar el diseño de la tablilla a diferentes proveedores de PCB para buscar la opción que provea mejores ahorros manteniendo la calidad requerida por la especificación del cliente. De la misma manera se envía un estimado de ingeniería al sistema para que se pueda

- calcular correctamente el ahorro dependiendo del proveedor seleccionado y tomando en cuenta los gastos de implementación.
- *Elaboración de plan de Validación acorde a la SBE1910:* Mientras se espera una respuesta por parte de los proveedores de PCB se comienza a trabajar con el plan de validación adecuado para confirmar que el desempeño eléctrico de la pieza no se vea afectado por la optimización. La especificación dada por el cliente la cual es SBE1910 declara los parámetros de validación y la robustez de estos.
  - *Selección de proveedor de PCB:* En este momento se revisan las cotizaciones enviadas por los proveedores y se selecciona la mejor opción a través del departamento de compras. En este momento se crea una orden de compra para adquirir piezas prototipo de los PCB para construir ensambles completos para validación.
  - *Construcción de piezas prototipo para validación:* En este momento se tienen los PCB en el Centro de prototipos donde se monta la central eléctrica completa, se le corre una prueba de continuidad para asegurar que todos los componentes estén correctamente ensamblados. Después la confirmación de conexión en la prueba de continuidad y se envía el ensamble al centro de validación el Warren, Ohio.
  - *Ejecución del plan de validación:* El laboratorio del Champion Technical Center toma las piezas y lleva a cabo las pruebas de validación de acuerdo con el plan creado por el equipo de ingeniería de producto en conjunto con el ingeniero de validación del cliente. Las pruebas toman un tiempo de 6 meses



para llevar a cabo las pruebas, generar el reporte y compartirlo. Los resultados incluyen análisis térmicos, caídas de voltaje y resultados de pruebas de voltajes más allá de los esperados en una vida útil del vehículo.

- *Revisión de Resultados y Conclusión:* En esta última etapa se reciben los resultados de la validación se interpretan contra la especificación del cliente. La revisión de la información debe de ser consciente y debe de dar confianza a las partes involucradas. En caso de haber alguna duda en cuanto los resultados se revisa la configuración de la validación en caso de todo estar correcto y los resultados no sean los adecuados se regresa a la etapa de generación de propuesta eléctrica para PCB y se repite el proceso hasta tener los resultados deseados.

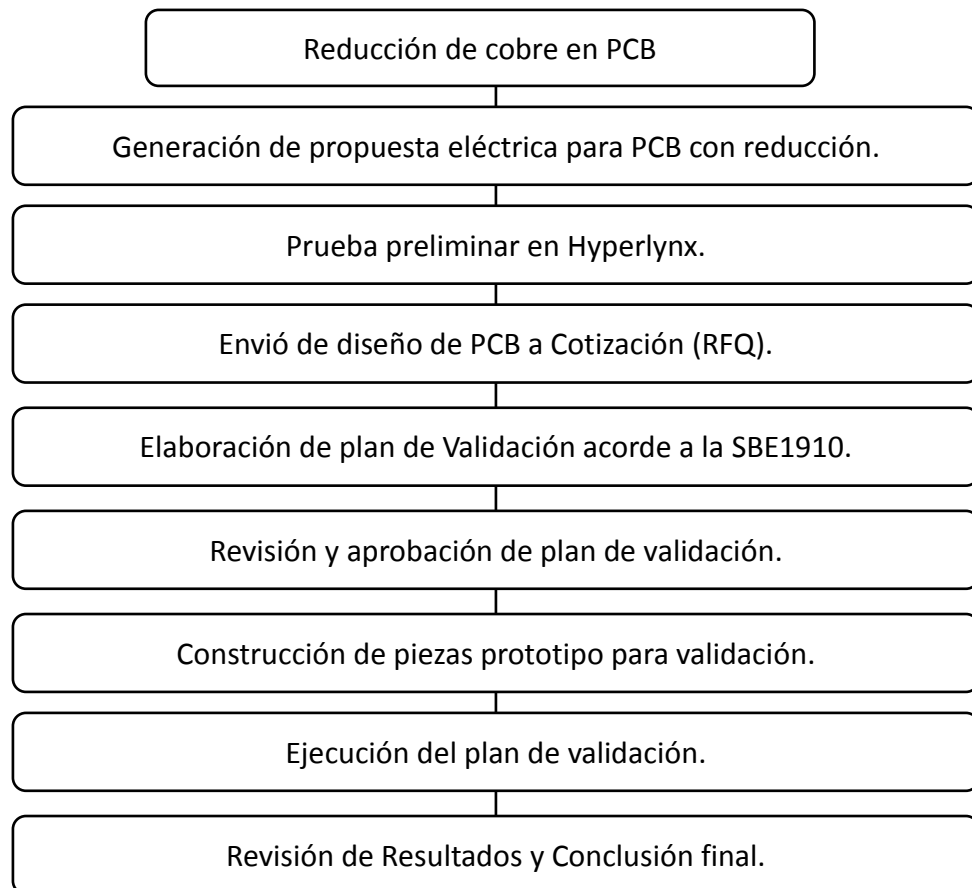


Fig. 3.1 Diagrama de flujo de metodología para el proyecto.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Generación de propuesta eléctrica para PCB con reducción

El equipo de ingeniería electrónica comienza a analizar que configuración puede tener el PCB manteniendo suficiente nivel de confianza para asegurar su desempeño en la central eléctrica utilizando el software Expedition PCB el cual ayuda a mantener las guías de diseño y recomendaciones de seguridad. Actualmente la tablilla de circuitos impresos utilizada en la central eléctrica del ABXX tiene una configuración de 4 capas con una configuración de 4/3/3/4 onzas de cobre.

Se introducen las condiciones operacionales de la central eléctrica al software para permitir al programa dar una solución que cumpla con las especificaciones provistas por el cliente. En este apartado se declara el tamaño de la tablilla el cual es de 244mm x 128.5mm, además de su temperatura de operación que es de 105C. Con esta información y el ruteo de los trazos generado por el ingeniero el software determina que el PCB que cumple con esas especificaciones y con el factor de seguridad adecuado es un PCB de 4 capas con una configuración de 3/3/3/3 onzas de cobre en cada capa respectivamente. Con este sabemos que el diseño del PCB nos permite tener un ahorro de 2 onzas de cobre removiendo 1 onza en las capas internas.

Con esta información se procede a realizar un análisis de elemento finito para corroborar a nivel simulación que el resultado del software es correcto.

## 4.2 Prueba preliminar en Hyperlynx

Los análisis térmicos nos permiten tener acceso al comportamiento del PCB en un diseño determinado permitiéndonos corroborar el correcto funcionamiento de la propuesta, o en su defecto, conocer los fallos y crear mejoras en una etapa temprana para evitar gastos en el futuro por no tener información de que nuestro diseño no era el óptimo.

### 4.2.1 Parámetros para análisis térmico en Hyperlynx

Mediante análisis térmico se investigará si la caja es capaz de soportar el calor generado por las corrientes definidas en el escenario de carga. En esta investigación, todas las corrientes aplicadas a fusibles y relés dependen del tiempo.

Las simulaciones térmicas se basan en los siguientes parámetros y supuestos:

- *Software de análisis térmico: Hyperlynx PI / Thermal v9.3 BETA*
- *La temperatura ambiente se ajusta a 105C considerando que se consideró que el diseño actual tenía 125C como temperatura ambiente.*
- *Se han considerado la conducción y la convección de calor.*
- *Para reducir el número de elementos, no se simularon piezas como palancas, tornillos de montaje, juntas, etc. Todas las piezas tienen geometría simplificada. Los circuitos de control de los relés y los circuitos conectados con fusibles y relés sin carga se eliminan del modelo térmico.*
- *Los modelos y simulaciones se basan en información y modelos CAD.*

- Como parte eléctrica (generador de calor) se tuvieron en cuenta los siguientes elementos:
  - Estampado metálico
  - Fusibles
  - Terminales de contacto
  - Mini, micro y PCB relés
  - Relé de estado sólido
  - Terminales hembra y terminales de anillo
  - Cables
  - Trazos de PCB

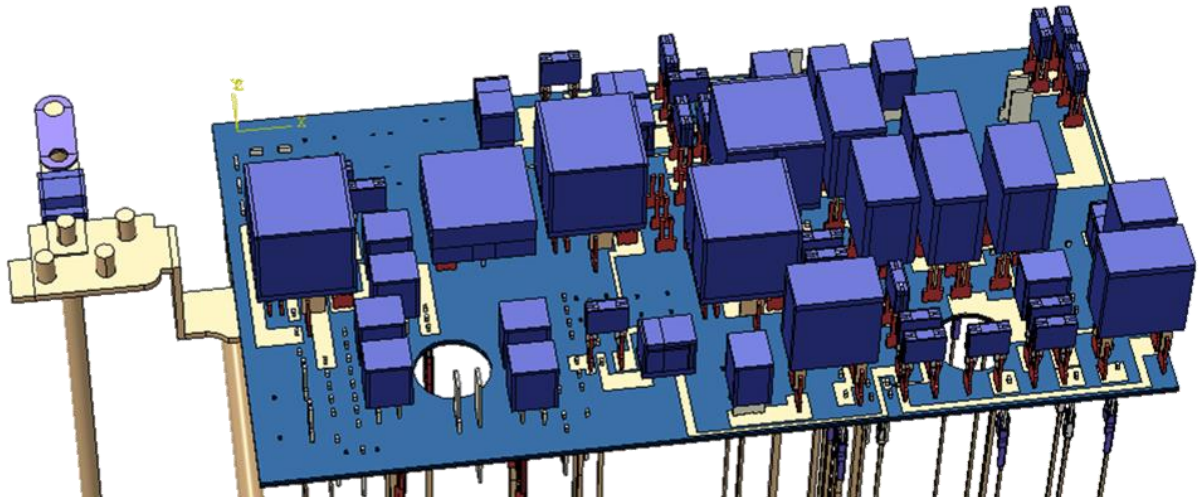


Fig. 4.1 Modelo 3D simplificado utilizado en la simulación en Hyperlynx.

## 4.2.2 Resultados del análisis térmico de Hyperlynx

Para poder tener un parámetro de comparación del incremento de temperatura generado en la tablilla con la reducción de material, es necesario correr el análisis térmico tanto en la configuración actual (4/3/3/4 oz. de cobre), así como en la configuración nueva (3/3/3/3 oz. de cobre). Los resultados la simulación realizada se presentan a continuación:

La distribución de temperatura en el PCB con una configuración de 4/3/3/4 onzas de cobre por capa respectivamente, se observa de la siguiente manera:

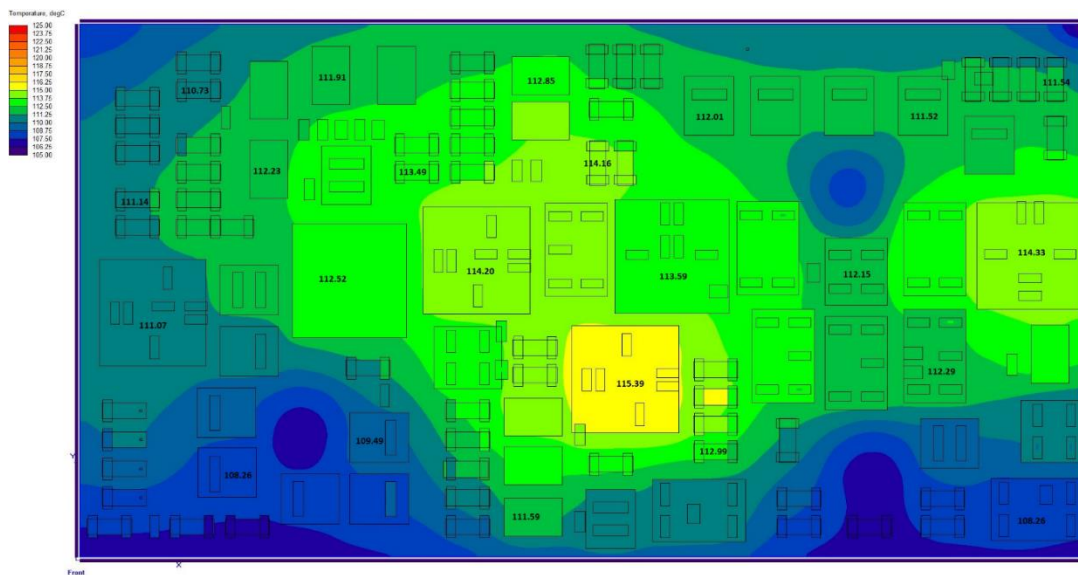


Fig. 4.2 Distribución de temperatura en PCB con configuración 4/3/3/4 Oz. de cobre.

La distribución de temperatura en el PCB con una configuración de 3/3/3/3 onzas de cobre por capa respectivamente, se observa de la siguiente manera:

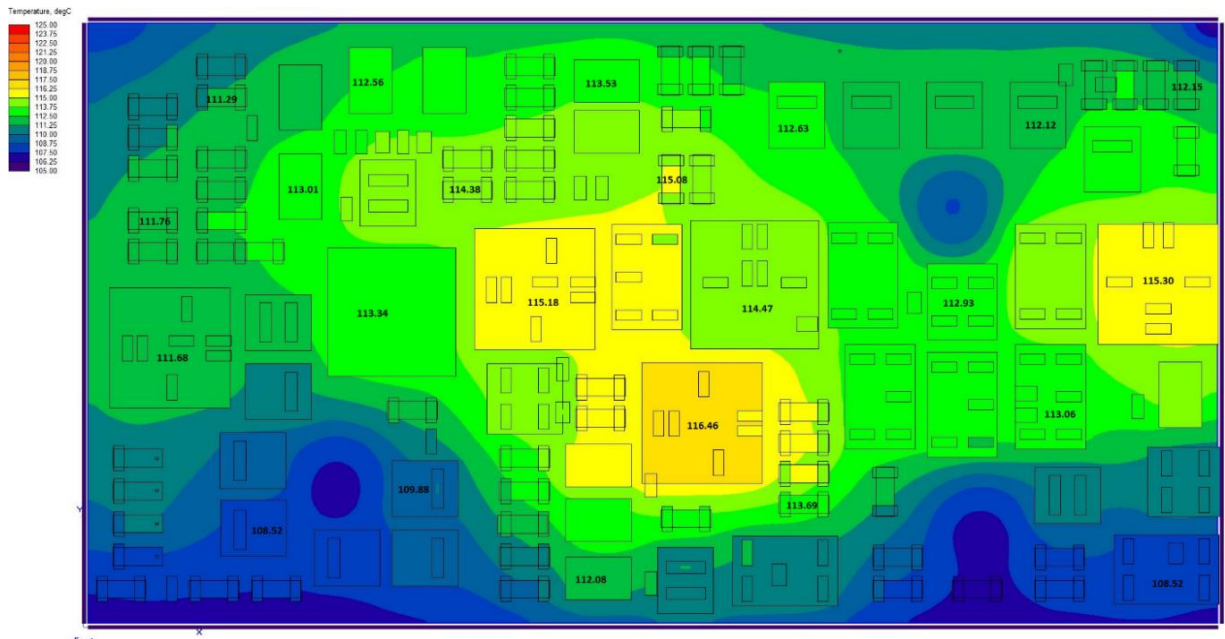


Fig. 4.3 Distribución de temperatura en PCB con configuración 3/3/3/3 Oz. de cobre.

Como se puede esperar se puede observar en las imágenes, el PCB con una configuración de 3/3/3/3 onzas de cobre muestran una temperatura mayor a la del PCB con una configuración 4/3/3/4. Esto se debe a que al haber una menor cantidad de material la disipación de calor es menor.

En las gráficas siguientes se puede observar también los incrementos de calor en los dispositivos tales como los fusibles, los relés, las terminales y los diodos.

- **Gráfico de comparación térmica de relés**

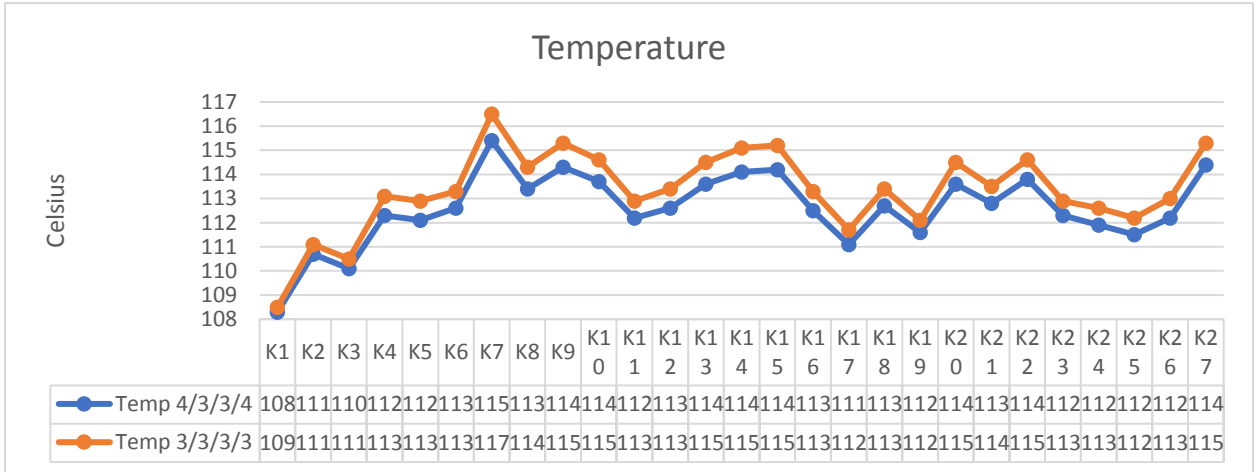


Fig. 4.4 Gráfico de comparación térmica de relés

- Diferencia de temperatura promedio = 0,751 grados Celsius
- Diferencia máxima de temperatura = 1,1 grados Celsius
- Diferencia mínima de temperatura = 0,2 grados Celsius

- **Gráfico de comparación térmica de fusibles**

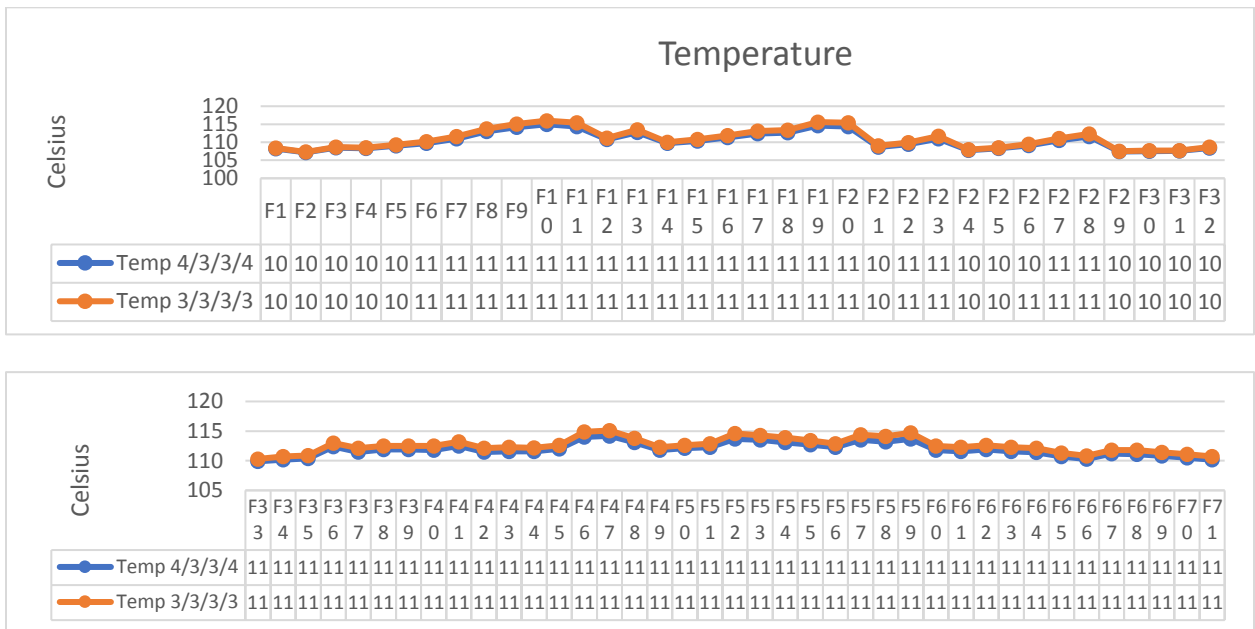


Fig. 4.5 Gráfico de comparación térmica de fusibles

- Diferencia de temperatura promedio = 0.587 grados Celsius
- Diferencia máxima de temperatura = 1 grados Celsius
- Diferencia mínima de temperatura = 0,1 grados Celsius

- **Gráfico de comparación térmica de resistencias**

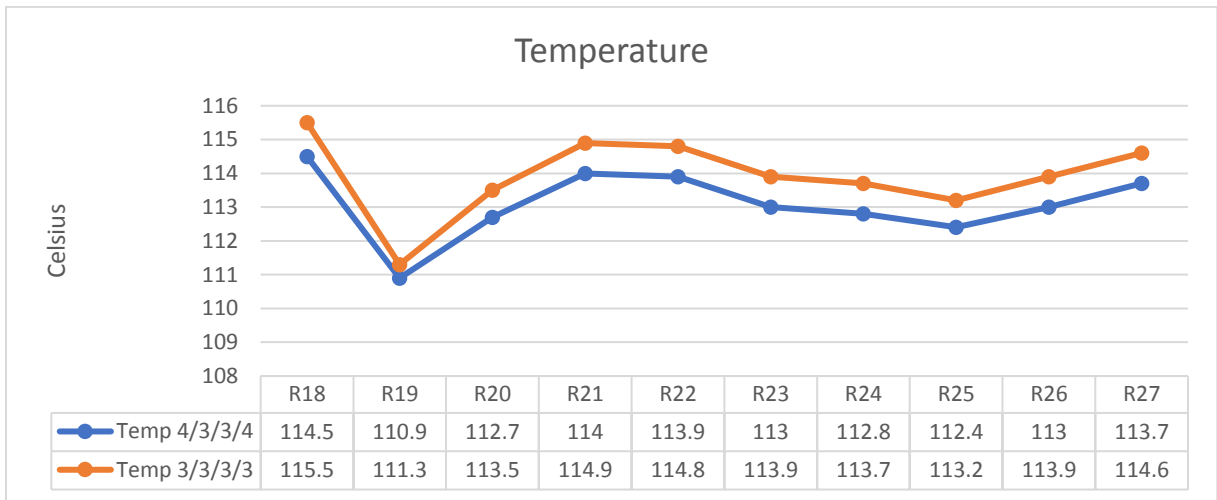


Fig. 4.6 Gráfico de comparación térmica de resistencias

- Diferencia de temperatura promedio = 0,84 grados Celsius
- Diferencia máxima de temperatura = 1 grados Celsius
- Diferencia mínima de temperatura = 0,4 grados Celsius

- **Gráfico de comparación térmica de diodos**

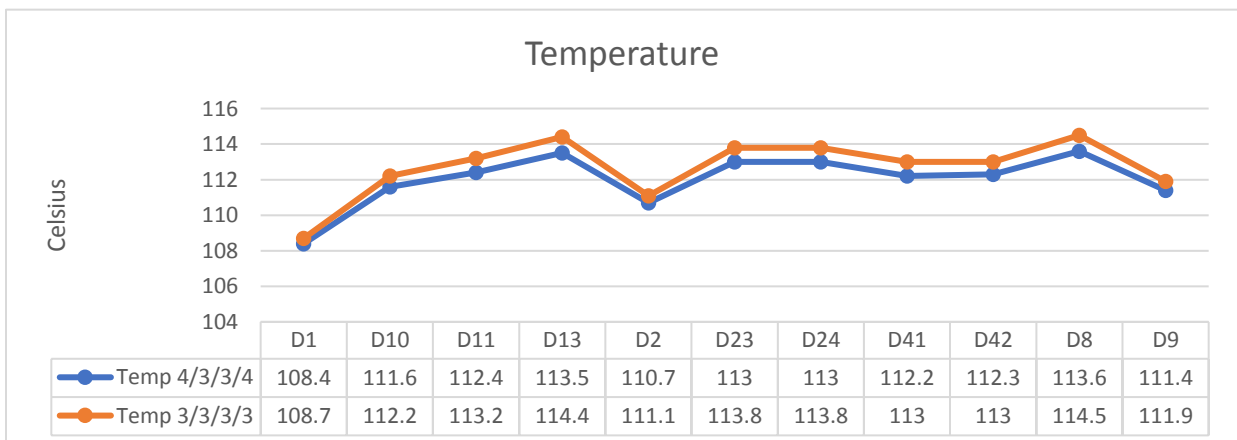


Fig. 4.7 Gráfico de comparación térmica de diodos



- Diferencia de temperatura promedio de 0.681 Celsius
- Diferencia máxima de temperatura = 0,9 grados Celsius
- Diferencia mínima de temperatura = 0,3 grados Celsius

- **Gráfico de incremento térmico en terminales**

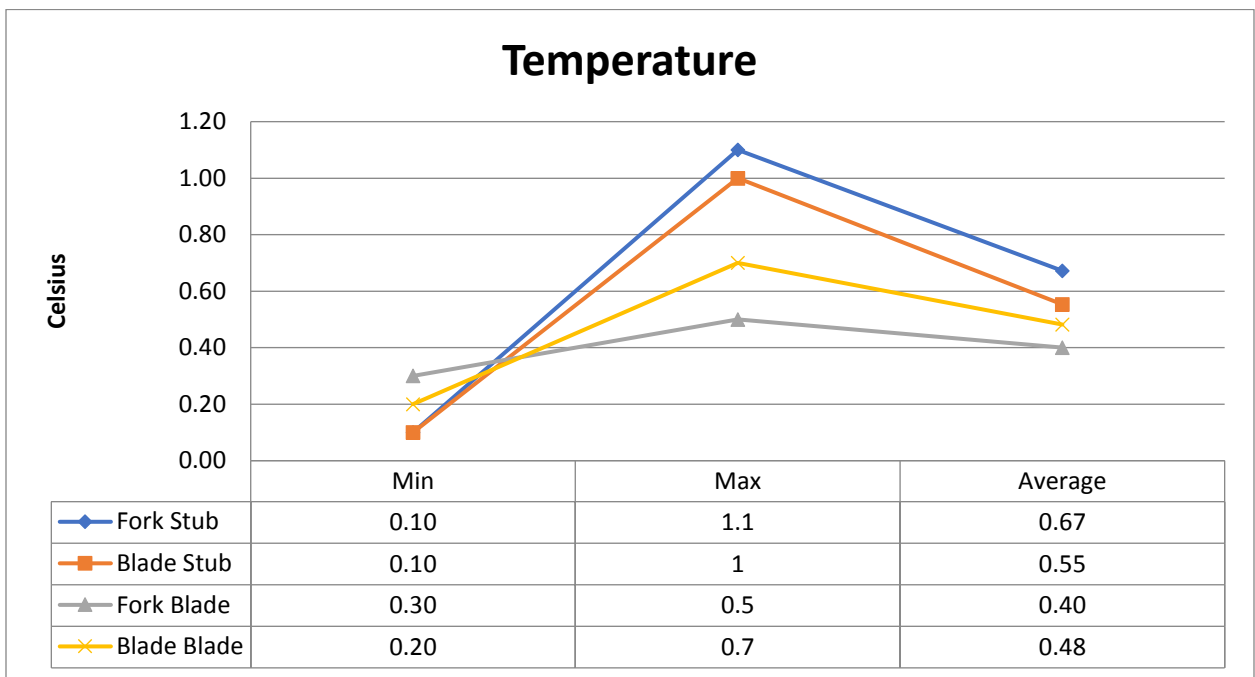


Fig. 4.8 Gráfico de incremento térmico en terminales

Como se puede observar los incrementos de temperatura generados en la central eléctrica dada la reducción de las onzas de cobre no tienen un impacto significativo por lo cual podemos proceder a la cotización y compra de piezas prototipo para la validación física de las centrales eléctricas.

### **4.3 Envío de solicitud de cotización de nuevo diseño de PCB**

En la sección anterior se pudo observar como el análisis térmico realizado en Hyperlynx nos demuestra un resultado positivo para el diseño del PCB con la reducción de cobre de 2 onzas. Al mostrarse un incremento de temperatura de entre 1°C – 2°C tanto en la tablilla como en los demás componentes del ensamble podemos considerar que la optimización es viable y podemos continuar con la solicitud de cotización (RFQ por sus siglas en ingles) y requerimiento de piezas al proveedor.

#### **4.3.1 Creación de la solicitud de cotización y envío a proveedores**

Para la creación del RFQ se utiliza un formato interno de APTIV el cual requiere de información relevante a el programa, esta información no es referente a cuestiones de diseño sino va enfocada la información general del programa. A continuación, se presenta un desglose de la información general del programa incluida en la solicitud de cotización:

- *Nombre del programa:* ABXX
- *Volumen anual:* 152,750 piezas anuales
- *Fin de producción:* Diciembre 2025
- *Fecha de PPAP:* Enero 2021
- *Fecha de quiebre para inicio de producción:* Abril 2021
- *Cantidad de piezas prototipo requeridas:* 300 Piezas

Información técnica y especificaciones de diseño referentes a platinados, dimensiones y diferentes aplicaciones específicas se adjuntan de igual manera en el RFQ, sin embargo, no nos enfocaremos en esos detalles. El detalle importante para nosotros es la clarificación de la configuración de la tablilla la cual se especifica tener una configuración de 3/3/3/3 onzas de cobre.

Una vez listo el formato del RFQ es enviado a diferentes proveedores a través del departamento de compras de la empresa los cuales se encargan de llevar a cabo las discusiones con cada uno de los proveedores para obtener así el mejor beneficio económico posible para el programa. La petición de cotización se envió a un total de 9 proveedores, a los cuales nos referiremos como proveedor 1, proveedor 2, ..., proveedor 9.

#### **4.3.2 Revisión de cotizaciones y selección de proveedor final**

Se recibieron las cotizaciones de 9 proveedores dentro del plazo especificado y se empezaron a revisar. Las variables para tomar en cuenta para la selección del proveedor son primordialmente que genere un costo verdadero a la empresa, que tenga un nivel de confianza adecuado dentro de la empresa siendo 3 el mayor nivel de confianza y 1 el menor nivel de confianza. El nivel de confianza lo provee el departamento de compras utilizando diferente información que tiene el departamento disponible. A grandes rasgos los parámetros para la asignación del nivel de confianza serían los siguientes:

- Se tiene actualmente un negocio con ese proveedor

- Se han presentado problemas de calidad con el proveedor
- Se ha dado respuesta eficaz a los problemas de calidad

Con conocimiento de los parámetros para la selección, se presenta a continuación la información general del proyecto junto con las tablas de cotizaciones. (Todos los precios mostrados son en Dólares Americanos USD).

Programa	Fin de producción		Años remanentes	Volumen anual	Precio actual con 3/4/4/3
ABXX	Dec	2025	4	152,750	\$ 4.064

Tab. 4.1 Información general del programa para liberar el RFQ

Proveedor de PCB	Nivel de confianza	Precio para PCB 3/3/3/3	Delta en precio	Ahorros anuales	Ahorros totales
Proveedor 1	3	\$ 3.9630	\$ 0.1011	\$ 15,443.03	\$ 61,772.10
Proveedor 2	3	\$ 3.5963	\$ 0.4678	\$ 71,456.45	\$ 285,825.80
Proveedor 3	2	\$ 4.7200	\$(0.6559)	\$(100,188.73)	\$(400,754.90)
Proveedor 4	2	\$ 3.8400	\$ 0.2241	\$ 34,231.28	\$ 136,925.10
Proveedor 5	1	\$ 3.8500	\$ 0.2141	\$ 32,703.78	\$ 130,815.10
Proveedor 6	1	\$ 4.8200	\$(0.7559)	\$(115,463.73)	\$(461,854.90)
Proveedor 7	1	\$ 5.0925	\$(1.0284)	\$(157,090.50)	\$(628,361.99)
Proveedor 8	1	\$ 5.0000	\$(0.9359)	\$(142,958.73)	\$(571,834.90)
Proveedor 9	1	\$ 3.0260	\$ 1.0381	\$ 158,569.78	\$ 634,279.10

Tab. 4.2 Cotizaciones de proveedores y ahorros respecto a precio actual.

Como se puede observar en la tabla X.X los proveedores 3, 6, 7 y 8 tienen precios que están por arriba del costo actual del PCB, el cual cuenta con una configuración de 2 onzas arriba del modelo cotizado, por lo cual se descalifican de la participación del proyecto ya que no generan un ahorro. Esto nos deja con los proveedores 1, 2, 4, 5 y 9.

Al observar la tabla 4.3 con los proveedores 1, 2, 4, 5 y 9 podemos notar que el proveedor 9 tiene el precio más bajo para el PCB, con lo cual genera un ahorro total

al programa de \$634,279.10 USD. Sin embargo, podemos observar que su nivel de confianza es de 1, esto puede ser porque no se tiene un programa actual con el proveedor o ha presentado problemas de calidad sin resolver.

Esto nos lleva a revisar nuestra segunda opción la cual sería el proveedor 2 el cual genera un ahorro total al programa de \$285,825.80 USD y tiene un nivel de confianza de 3 por lo cual se decide irse por el proveedor numero 2 como el proveedor para las piezas de prototipo y para las piezas de producción regular una vez sea implementado el cambio formalmente.

Proveedor de PCB	Nivel de confianza	Precio para PCB 3/3/3/3	Delta en precio	Ahorros anuales	Ahorros totales
Proveedor 1	3	\$3.9630	\$0.1011	\$ 15,443.03	\$ 61,772.10
Proveedor 2	3	\$3.5963	\$0.4678	\$ 71,456.45	\$285,825.80
Proveedor 4	2	\$3.8400	\$0.2241	\$ 34,231.28	\$136,925.10
Proveedor 5	1	\$3.8500	\$0.2141	\$ 32,703.78	\$130,815.10
Proveedor 9	1	\$3.0260	\$1.0381	\$158,569.78	\$634,279.10

Tab. 4.3 Cotizaciones con ahorro real para la empresa y selección final de proveedor.

#### 4.4 Elaboración de plan de Validación acorde a la SBE1910

El plan de validación para una central eléctrica se define por la especificación provista por cada cliente para su ensamble, para la central eléctrica del ABXX la especificación dada es la SBE1910 la cual contiene diferentes secciones de pruebas tanto eléctricas como mecánicas a las cuales es sometida la central. Cada vez que se realiza un cambio de ingeniería se realiza una evaluación para determinar qué tipo de prueba será aplicada al ensamble, en el caso de la reducción de cobre en la cual estamos trabajando el impacto a la central es del tipo eléctrico ya que no se están modificando

las dimensiones de la misma, no se está agregando peso, no se están modificando las geometrías de los plásticos ni se están cambiando los materiales de construcción. Tomando las consideraciones anteriores en cuenta el equipo de ingeniería de producto en conjunto con el ingeniero de validación del cliente genera el plan de validación que consiste en una validación eléctrica además de una prueba térmica la cual nos ayudara a confirmar los resultados obtenidos en el estudio de Hyperlynx. A continuación, se presenta el plan de validación para la central eléctrica ABXX para el proyecto de reducción de 2 onzas de cobre:

No pasa	Pasa parcialmente	Pasa
Nombre de la prueba	Requerimiento	Evaluación
Caída de voltaje en circuitos definidos	La comparación entre la medición de voltaje inicial y final no deben exceder las mediciones de resistencia tomadas antes de la prueba de acuerdo a la especificación dada.	A ser determinado.
Sobrecarga de fusibles	Todos los circuitos: se realiza a la temperatura especificada. Las corrientes respectivas se incrementan durante un período de permanencia de acuerdo a la especificación para cada tipo de fusible y nivel de corriente de sobrecarga.	A ser determinado.
Prueba Termica	Determina si el punto de interés se calienta espontáneamente como se esperaba o si se sobrecalienta más allá de los requisitos de rendimiento o materiales.	A ser determinado.

*Tab. 4.4 Plan de validación para proyecto de reducción de cobre.*

Como muestra la tabla 4.4 el plan de validación llevara a cabo 3 evaluaciones diferentes, cada una con su requerimiento y su procedimiento específico. Una vez acordado y aceptado el plan de validación se procede a la construcción de las piezas para posteriormente ser enviadas al centro de validación en el CTC.

## 4.5 Construcción de piezas prototipo de validación

Una vez recibidos en el Prototype Center los PCB con la reducción de cobre que fueron requeridos a el Proveedor 2, se procede a realizar el ensamble de la central eléctrica. El ensamble comienza por el armado del ensamble de PCB, en esta etapa se agregan las terminales de contacto, los SMD (Resistencias y Diodos) y los relés de PCB. Este subensamble es el más importante de la central eléctrica ya que es el que realiza toda la comunicación y manejo de corrientes a través de las funciones del vehículo. Completado el ensamble de PCB se continua por montar toda la central eléctrica, tanto plásticos, tornillos y demás componentes patentados por APTIV para el correcto funcionamiento de la central, a continuación, se puede observar una vista explotada de la central donde se puede apreciar cada uno de sus componentes:

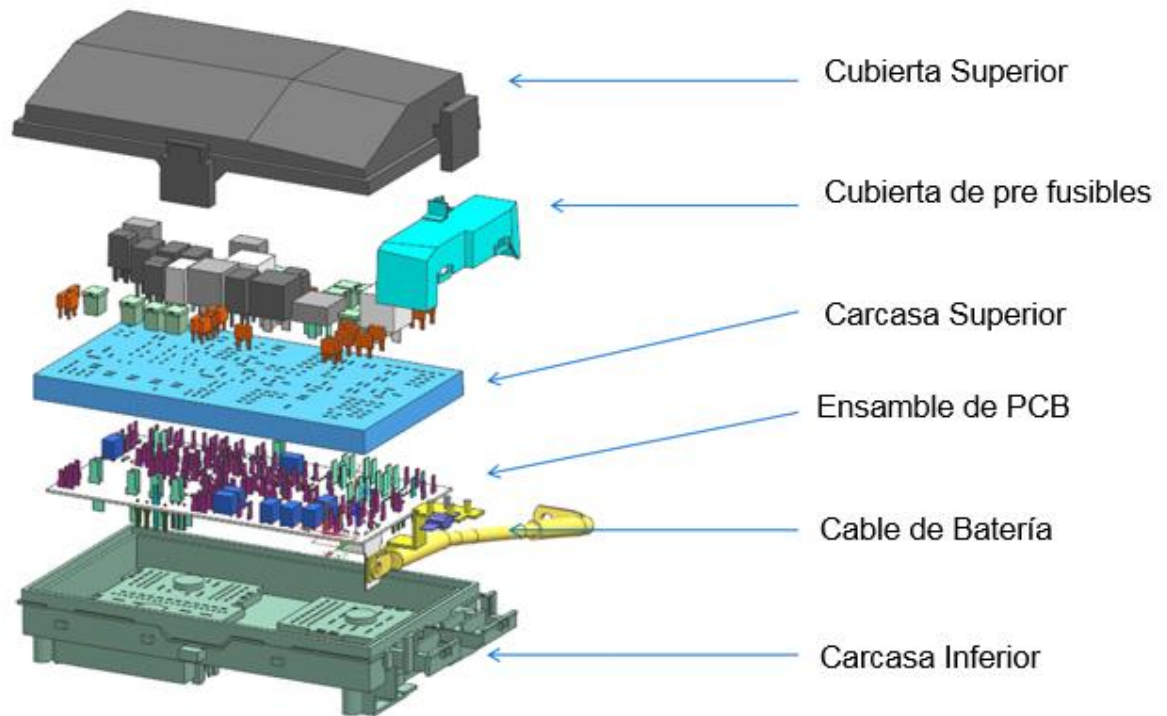


Fig. 4.9 Vista explotada de la central eléctrica ABXX.

Una vez completo el ensamble se realiza una inspección visual del mismo, si no se observa ninguna anomalía, se procede a realizar una prueba de continuidad de acuerdo con los planos eléctricos. Esta actividad es importante antes de enviar las muestras ya que nos ayuda a detectar que todas nuestras terminales, así como SMD y PCB relés estén poblados y tengan un contacto adecuado con el PCB, Esta prueba, además, nos ayuda a confirmar que todos nuestros fusibles están correctamente asentados y con un adecuado contacto contra las terminales.

Una vez que el ensamble pasa la prueba de continuidad, se empaca y se envía al CTC el cual es el centro de validación ubicado en Ohio para realizar las pruebas de validación vistas y descritas en el capítulo 4.4



*Fig. 4.10 Ensamble final del ABXX para ser enviado a validación.*



#### 4.6 Ejecución del plan de validación

Una vez recibidos los ensambles de centrales eléctricas en las instalaciones del CTC en Warren, Ohio. Se procede a con la preparación de los ensambles para su validación.

Primero se determina cuáles son los circuitos objetivo a validar, estos son los circuitos que se ven afectados por la reducción de material en el PCB. Esto puede ser porque se redujo el tamaño del trazo, o se movió ligeramente su posición en el diagrama de circuitos. En la tabla 4.5 se muestran los circuitos objetivo para la validación de reducción de cobre:

No. de referencia	Nombre del Circuito	Numero de Fusible	Tamaño de fusible
1	A/C CLTCH	F3	10
2	WPR HI	F6	30
3	FRT AXLE ACT	F17	10
4	ABS VALVES	F22	30
5	TRAILER BRAKE CNTRL	F27	30
6	CHMSL	F36	10
7	RR DIFF LOCK ACT	F39	15
8	FRT DIFF LOCK ACT	F40	15
9	FUEL HTR	F44	40
10	DIESEL EXH FLUID CTRL	F45	30
11	TRAILER CONN	F50	20
12	TRAILER CONN	F64	10
13	TRAILER CONN	F65	10
14	TRAILER CONN	F66	10

Tab. 4.5 Circuitos objetivo para la validación de reducción de cobre.

Una vez identificados los circuitos objetivo se procede a conectar las terminales de los circuitos correspondientes al arnés, que a su vez está conectado a una computadora que se encarga de enviar las corrientes adecuadas dependiendo de la prueba.



*Fig. 4.11 Centrales electricas conectadas al arnes para correr pruebas de sobre voltaje.*

#### **4.6.1 Prueba 1: Caída de voltaje en circuitos objetivo**

Cada componente de un circuito, cada longitud de cable, cada interruptor, cada terminal, ofrece cierta resistencia al flujo de corriente. Cada una de estas resistencias causa una caída de voltaje pequeña pero medible. El cliente cuánta caída de voltaje se considera normal y aceptable.

En esta sección se condensan la medición de voltaje de cada uno de los circuitos antes y después de realizadas las demás pruebas de validación programadas y se evalúa si los valores obtenidos son aceptables de acuerdo con la especificación del cliente.

A continuación, se muestran los valores obtenidos de las pruebas de caída de voltaje obtenidas en los circuitos.

Caídas de voltaje				Inicial		Final	
No. de referencia	Nombre del Circuito	Numero de Fusible	Tamaño de fusible	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
				(mV)			
1	NC CLTCH	F3	10	73.7	73.0	72.7	73.7
2	WPR HI	F6	30	41.6	41.3	43.4	43.2
3	FRT AXLE ACT	F17	10	61.0	61.4	61.7	63.0
4	ABS VALVES	F22	30	20.1	19.6	19.4	19.9
5	TRAILER BRAKE CNTRL	F27	60	19.4	19.8	19.3	19.2
6	CHMSL	F36	10	95.2	95.1	93.8	96.5
7	RR DIFF LOCK ACT	F39	15	79.7	80.7	78.8	81.4
8	FRT DIFF LOCK ACT	F40	15	75.1	75.5	74.7	75.2
9	FUEL HTR	F44	40	23.5	24.5	26.3	23.6
10	DIESEL EXH FLUID CTRL	F45	30	18.6	19.2	18.8	18.5
11	TRAILER CONN	F50	20	38.5	38.0	38.1	38.7
12	TRAILER CONN	F64	10	73.7	72.9	72.5	73.1
13	TRAILER CONN	F65	10	83.6	81.3	31.3	82.8
14	TRAILER CONN	F66	10	70.2	70.2	70.5	70.3

Tab. 4.6 Caídas de voltaje para central eléctrica ABXX.

Los valores de caída de voltaje mostrados en la tabla anterior no son significativos y por ende cumplen con la especificación del cliente.

#### 4.6.2 Prueba 2: Sobrecarga de fusibles

Esta prueba debe verificar la capacidad de un componente que contiene características de protección de circuito, como un fusible o disyuntor, utilizado para la distribución de energía al vehículo para soportar la corriente máxima permitida por la característica de protección de circuito interno.

Todos los componentes que contienen características de protección de circuito interno, como un fusible o un disyuntor. Las salidas de potencia equipadas con protección de sobrecarga interna (electrónica) incorporada están exentas de esta prueba.

A continuación, se muestran los resultados de la sobrecarga de fusibles en la central eléctrica con reducción de cobre:

Sobrecarga de voltaje					
No. de referencia	Nombre del Circuito	Numero de Fusible	Tamaño de fusible	Muestra 1	Muestra 2
				Tiempo en abrir (segundos)	
1	A/C CLTCH	10	12	4	4
2	WPR HI	30	36	65	600
3	FRT AXLE ACT	10	12	2	15
4	ABS VALVES	30	36	100	100
5	TRAILER BRAKE CNTRL	30	36	102	311
6	CHMSL	10	12	3	4
7	RR DIFF LOCK ACT	15	18	9	2
8	FRT DIFF LOCK ACT	15	18	48	9
9	FUEL HTR	40	52	2	317
10	DIESEL EXH FLUID CTRL	30	36	232	83
11	TRAILER CONN	20	24	5	15
12	TRAILER CONN	10	12	3	3
13	TRAILER CONN	10	12	1	2
14	TRAILER CONN	10	12	2	2

Tab. 4.7 Resultados de prueba de sobrecarga de voltaje.

Terminada la prueba, se realiza una inspección visual de la central, no se observa degradación del aislamiento, aumento de la resistencia de paso ni signos de sobrecalentamiento.

#### 4.6.3 Prueba 3: Análisis térmico

Esta prueba especifica métodos estándar de medición térmica de termopares e imágenes infrarrojas para componentes con contenido eléctrico / electrónico que se utilizarán para evaluaciones térmicas, a menos que se especifique lo contrario.

Esta norma se aplica a componentes con contenido eléctrico / electrónico para medir propiedades térmicas. La medición de imágenes térmicas se utiliza para medir la respuesta térmica de circuitos, áreas o piezas específicas en la placa de circuito o

componente. Las imágenes se capturan cada determinada cantidad de segundos y se muestra el punto más caliente y su temperatura.

A continuación, se muestra un resumen de imágenes a 60 segundos (inicio de la prueba), 1,860 segundos (mitad de la prueba) y 3,600 segundos (final de la prueba).



Fig. 4.12 Temp. Máxima: 33.6°C a 60 segundos.



Fig. 4.13 Temp. Máxima: 81.4°C a 1,860 segundos.



Fig. 4.14 Temp. Máxima: 35.7°C a 3,600 segundos.

No se observó ningún comportamiento inusual durante la prueba. Las temperaturas están dentro de las condiciones operacionales estándar. Las temperaturas observadas no representan un problema para los componentes de la central eléctrica.

#### 4.7 Revisión de resultados

La interpretación de los datos es una de las tareas más importantes del proyecto, sin una referencia adecuada sobre la cual hacer una comparación no se puede saber con certeza si se tuvo éxito o no.

En esta ocasión la comparación de los resultados se puso en contraste contra la SBE1910, la cual es la especificación del cliente y nos proporciona un parámetro de valores y resultados sobre los cuales basarnos.

En la siguiente tabla podemos observar el plan de validación actualizado con los resultados y los comentarios para cada una de las pruebas de realizadas a la central eléctrica.

No pasa	Pasa parcialmente	X	Pasa
Nombre de la prueba	Requerimiento	Evaluación	
Caída de voltaje en circuitos definidos	La comparación entre la medición de voltaje inicial y final no deben exceder las mediciones de resistencia tomadas antes de la prueba de acuerdo a la especificación dada.	La caída de voltaje no es significativa y no representa ningún riesgo para el sistema.	
Sobrecarga de fusibles	Se realiza a la temperatura especificada. Las corrientes respectivas se incrementan durante un período de permanencia de acuerdo a la duración específica para cada tipo de fusible y nivel de corriente de sobrecarga.	No hubo degradación del aislamiento, aumento de la resistencia al paso o cualquier signo de sobrecalentamiento.	
Análisis térmico	Determina si el punto de interés se calienta espontáneamente como se esperaba o si se sobrecalienta más allá de los requisitos de rendimiento o materiales.	Las temperaturas observadas no son un problema para el sistema de la central eléctrica.	

Tab. 4.8 Plan de validación para proyecto de reducción de cobre actualizada con resultados.

Los resultados de la validación de la central eléctrica del ABXX con el proyecto de la tablilla de circuitos impresos con reducción de 2 onzas de cobre se consideran satisfactorios ya que cumplen los requerimientos establecidos por el cliente en la especificación de la SBE1910 revisión del 2012.

## 5 CONCLUSIONES

Es imperativo mantenerse actualizado y eficiente en la época industrial que vivimos, la optimización de los productos debe de ser constante y debe aportar resultados reales y benéficos a la empresa [2]. La implementación de la reducción de cobre en la tablilla del ABXX como respuesta del requerimiento de reducción de costos, nos muestra que es posible obtener beneficios de productos ya en nivel de producción, a través de una revisión detallada de los componentes y de aplicar ideas de innovación al producto.

La reducción de cobre en las tablillas de circuitos impresos es una opción factible para la reducción de costos, dando beneficios de ~\$71,456 USD anuales a la empresa y abriendo la posibilidad a su implementación en otras plataformas creando un precedente importante para constatar que es un área de oportunidad real.



## 6 REFERENCIAS

- [1] McCarthy, I., & Anagnostou, A. (2004). The impact of outsourcing on the transaction costs and boundaries of manufacturing. *International journal of production economics*, 88(1), 61-71.
- [2] Kimelberg, S. M., & Williams, E. (2013). Evaluating the importance of business location factors: The influence of facility type. *Growth and Change*, 44(1), 92-117.
- [3] Holloway, L. (1998). Materials selection for optimal environmental impact in mechanical design. *Materials & Design*, 19(4), 133-143.
- [4] Young, P. (1993). Technological growth curves: a competition of forecasting models. *Technological forecasting and social change*, 44(4), 375-389.
- [5] Automation T. (2020). State of the market report – Printed circuit board assembly and manufacturing
- [6] Elmuti, D., & Kathawala, Y. (1997). An overview of benchmarking process: a tool for continuous improvement and competitive advantage. *Benchmarking for Quality Management & Technology*.
- [7] Automation, T. (2018, November 13). Using PCB Copper Thickness to Optimize PCB Current Flow. *Tempo*. <https://www.tempoautomation.com/blog/using-pcb-copper-thickness-to-optimize-pcb-current-flow/>
- [8] D'Arcio, J. (2020, November 2). What is a Printed Circuit Board (PCB)? Printed Circuits LLC. <https://www.printedcircuits.com/what-is-a-pcb/>
- [9] What Is a Printed Circuit Board (PCB)? - Technical Articles. (2020, April 12). What Is a Printed Circuit Board. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/what-is-a-printed-circuit-board-pcb/>
- [10] Montrose, M. I. (1996). Printed circuit board design techniques for EMC compliance (Vol. 1, p. 996). Piscataway, NJ: IEEE press.
- [11] A. (2019, March 12). Benefits of Multilayer Printed Circuit Boards. Hitech Circuits Co., Ltd. <https://hitechcircuits.com/benefits-of-multilayer-printed-circuit-boards/>
- [12] Yun Industrial and ACME PCB Assembly, Y. (2020, June 10). Why Do We Use Copper to Make PCB Traces? Why Do We Use Copper to Make PCB Traces? <https://yic-assm.com/why-do-we-use-copper-to-make-pcb-traces/>
- [13] Automation, T. (2018, November 13). Using PCB Copper Thickness to Optimize PCB Current Flow. *Tempo*. <https://www.tempoautomation.com/blog/using-pcb-copper-thickness-to-optimize-pcb-current-flow/>
- [14] John, J. (2011, November 22). PCB Manufacturing Process. *Electronic Projects and Design*. <https://www.circuitstoday.com/pcb-manufacturing-process>
- [15] Wright, A. (2013, December 31). How to Select Proper PCB Copper Thickness. EPEC Engineered Technologies. <https://blog.epectec.com/how-to-select-proper-pcb-copper-thickness>