

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería  
Dirección de Posgrado  
Campus Mexicali

Proyecto de Ingeniería e Innovación

**Desarrollo de modelo estratégico de análisis para selección comparativa de  
cables de RF**

para obtener el grado de

**Maestro en Ingeniería e Innovación**

Presenta

**Héctor Josué García Magaña**

Director de proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de proyecto: Dr. Miguel A. Salinas Yáñez

Asesor Industria: MBA. Zelman Hernández

Mexicali, Baja California. Junio del 2018.

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería  
Dirección de Posgrado  
Campus Mexicali

Proyecto de Ingeniería e Innovación

**Desarrollo de modelo estratégico de análisis para selección comparativa de cables de RF**

para obtener el grado de

**Maestro en Ingeniería e Innovación**

Presenta

**Héctor Josué García Magaña**

Director de proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de proyecto: Dr. Miguel A. Salinas Yáñez

Asesor Industria: MBA. Zelman Hernández

Comité evaluador

---

MC. Cristóbal Capiz Gómez

---

Dr. Miguel A. Salinas Yáñez

---

Dr. Miguel A. Ponce Camacho

Mexicali, Baja California. Junio del 2018.

## Agradecimientos

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, que siempre me han brindado su ayuda y nunca dudaron de mí, sin su apoyo no sería la persona que soy hoy en día,

Gracias Papa por creer en mí,  
Gracias Mama, por estar siempre ahí,  
Gracias Braian, por tu confianza,  
Gracias Andrés por tu determinación,

También quiero agradecer y dedicarle este trabajo a Cristina, una persona muy importante,

Agradezco a Pablo Rodríguez por su dedicación e importantes aportes a este proyecto,

Un agradecimiento especial a mi asesora la Dra. Dania Licea por su ayuda y dirección,

Gracias a mis compañeros y amigos de Skyworks que me han enseñado mucho estos años, han contribuido fuertemente en mi crecimiento profesional,

Por ultimo agradezco a Dios por permitirme vivir este día y acompañarme a lo largo de este camino, El forma parte importante de quien soy el día de hoy.

Con Cariño,

Héctor Josué García Magaña



SKYWORKS SOLUTIONS DE MEXICO S. DE R.L. DE C.V.  
CALZADA GOMEZ MORIN 1690 COL. RIVERA  
MEXICALI B.C  
TEL. (686)564-2100

Mexicali B.C. Junio del 2018

Estimados miembros del Colegio de ingeniería, Dirección de Posgrado y Campus  
Mexicali:

Por medio del presente hago constatar que el proyecto:

**“Desarrollo de modelo estratégico de análisis para selección comparativa de  
cables de RF”**

El cual fue desarrollado por el empleado:

**Héctor Josué García Magaña**

Matrícula: **M033022**

Que cursa la maestría de **Ingeniería e Innovación**, fue implementado de manera satisfactoria en Skyworks Solutions de México dentro del departamento de pruebas, logrando resultados relevantes para la empresa.

ATENTAMENTE

**MBA. Zelman Hernandez Castro**

DIRECTOR DE INGENIERIA DE PRUEBAS



## Índice de contenido general

Capítulo 1: Introducción.....	1
Antecedentes.....	1
Planteamiento del problema.....	3
Justificación.....	5
Enunciado del problema.....	6
Preguntas de investigación.....	6
Objetivos.....	6
Hipótesis.....	7
Capítulo 2: Marco Teórico y Referencial.....	8
Conceptos.....	8
Radio Frecuencia (RF).....	8
Líneas de transmisión y cables RF.....	8
Parámetros de dispersión.....	9
Decibeles y Decibeles mili Watt.....	10
Analizador de redes.....	10
Documentación relacionada.....	11
Capítulo 3: Metodología.....	14
Metodología del proyecto.....	14
Plan de trabajo.....	16
Work Breakdown Structure (WBS).....	16
Actividades del proyecto.....	16
Recursos del proyecto.....	18
Capítulo 4: Resultados.....	19
Etapa 1: Definición.....	19
Lista de parámetros principales.....	19
Lista de condiciones eléctricas.....	20
Lista de cables candidatos.....	22
Etapa 2: Medición.....	24
Etapa 3: Análisis.....	27
Etapa 4: Implementación.....	30
Etapa 5: Propuesta.....	34
Capítulo 5: Conclusiones.....	36
Referencias.....	38

## Índice de figuras

Figura 1.1 Diagrama de flujo de los procesos productivos de Skyworks. ....	1
Figura 1.2 Departamentos que conforman el proceso de prueba eléctrica. ....	2
Figura 1.3 Producto final Skyworks. ....	3
Figura 1.4 Cables RF con terminación SMA. ....	3
Figura 1.5 Puente de Skyworks que interconecta planta de ensamble y pruebas. ....	4
Figura 2.1 Espectro electromagnético .....	8
Figura 2.2 Cable coaxial utilizado en aplicaciones RF.....	9
Figura 2.3 Representación de parámetros S. ....	10
Figura 2.4 Analizador de redes.....	11
Figura 2.5 Gráfico de pérdida por inserción.....	12
Figura 3.1 Desglose de actividades del proyecto.....	16
Figura 3.2 Red de actividades del proyecto.....	17
Figura 4.1 Gráfica de volumen por número de parte .....	20
Figura 4.2 Gráfica de frecuencias de prueba por número de parte.....	21
Figura 4.3 Parámetros $S_{21}$ y $S_{22}$ del cable Megaphase.....	24
Figura 4.4 Parámetros $S_{21}$ y $S_{22}$ del cable Huhber Suner. ....	25
Figura 4.5 Parámetros $S_{21}$ y $S_{22}$ del cable Chip Shine. ....	25
Figura 4.6 Parámetros $S_{21}$ y $S_{22}$ del cable P1dB. ....	26
Figura 4.7 Parámetros $S_{21}$ y $S_{22}$ del cable Teledyne.....	26
Figura 4.8 Comparación de parámetro $S_{21}$ entre los 5 tipos de cable.....	28
Figure 4.9 Comparación de parámetro $S_{22}$ entre los 5 tipos de cable.....	29
Figura 4.10 Comparación de distribuciones de muestra.....	31

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Relación de VSWM con pérdida por retorno .....	12
Tabla 2.2 VSWR con respecto a la frecuencia .....	13
Table 2.3 Especificaciones de cable MegaPhase .....	13
Tabla 3.1 Lista de actividades del proyecto .....	16
Tabla 4.1 Lista de frecuencias principales .....	22
Tabla 4.2 Características de cables candidatos .....	23
Tabla 4.3 Tabla de valores del parámetro $S_{21}$ .....	27
Tabla 4.4 Tabla de valores del parámetro $S_{22}$ .....	27
Tabla 4.5 Lista de precios de cables .....	29
Tabla 4.6 Tabla comparativa de datos de muestra .....	31
Tabla 4.7 Datos de prueba de hipótesis.....	32
Tabla 4.8 Parámetros históricos con mayor cantidad de fallas .....	33

## Lista de Abreviaturas

RF	Radio frecuencia
SMA	Sub Miniatura versión A
DUT	Dispositivo bajo prueba por sus siglas en inglés ( <i>Device under test</i> )
WBS	Desglose de actividades de trabajo por sus siglas en inglés ( <i>Work Breakdown Structure</i> )
CETYS	Centro de Enseñanza Técnica y Superior.

## Resumen

Este documento presenta el desarrollo de un análisis comparativo entre distintas marcas de cables coaxiales con terminación SMA dedicados a aplicaciones de prueba eléctrica de semiconductores en equipos de radio frecuencia. El objetivo fue que a través del diseño de un modelo estratégico de análisis se encontraran alternativas de cables que satisfagan los requerimientos que los sistemas de la empresa exigen a un costo competitivo. Para lograrlo se definieron 5 etapas: definición, medición, análisis, implementación y resultados.

Durante la primera fase se realizó un estudio de los parámetros clave para la evaluación de cables RF, a la par de los requerimientos que los equipos de prueba internos.

En la segunda fase se seleccionaron cables provenientes de distintos proveedores los cuales fueron probados bajo los mismos criterios y condiciones utilizando un analizador de redes con el fin de calificar la respuesta de cada uno.

Durante la tercera etapa se analizaron los resultados obtenidos en las pruebas, además se realizó un estudio costo-efectivo de los cables candidatos eligiendo uno de ellos como propuesta tentativa.

Para la cuarta etapa se llevó a cabo una prueba piloto en producción utilizando el cable propuesto y el cable actual. A través de un estudio estadístico se comparó el rendimiento de ambos cables.

Finalmente se presenta una propuesta que no solo satisface los requerimientos eléctricos requeridos sino que también ahorra al menos 93,000 dólares anuales aproximadamente, reduciendo los gastos en cables RF en al menos un 65%.

## Capítulo 1: Introducción

### Antecedentes

Skyworks Solutions es una empresa que se dedica al ensamble y prueba eléctrica de componentes hechos a base de semiconductores para comunicaciones inalámbricas, con diversas aplicaciones en mercados como aeroespacial, automotriz, televisión por cable, casas inteligentes, electrónicos, medico, dispositivos móviles, infraestructura de telecomunicaciones entre otras (Skyworks Inc, 2018).

De manera general podemos dividir los procesos productivos de la empresa en 6 categorías: Compra de obleas, prueba de obleas, ensamble, prueba final, empaque y envío como se muestra en la Figura 1.1.

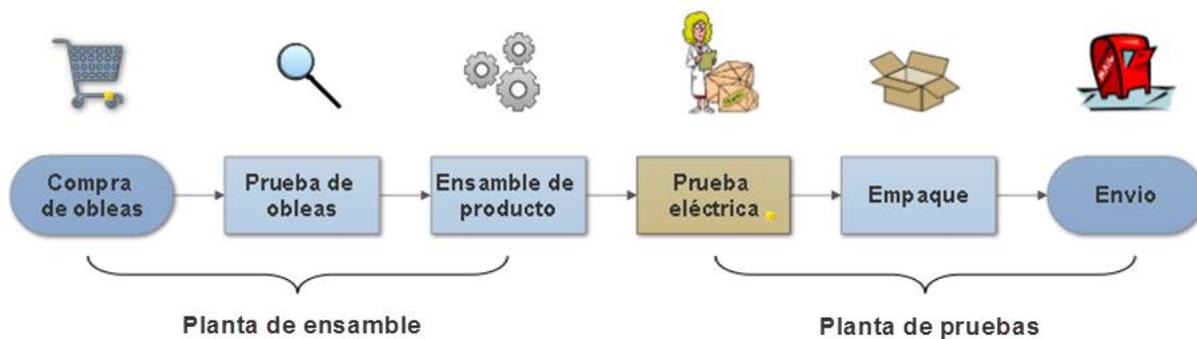


Figura 1.1 Diagrama de flujo de los procesos productivos de Skyworks.

Fuente: Elaboración propia

En Mexicali se cuenta con dos plantas dentro de las cuales están distribuidos los 6 procesos productivos de la empresa. La planta de ensamble se encarga de recibir la materia prima para posteriormente probarla, así como del ensamble del producto; mientras que la planta de pruebas se ocupa de probar el producto final ensamblado, empaquetarlo y enviarlo a cliente.

El proyecto de mejora que aquí se presenta se desarrolla dentro del proceso de prueba eléctrica del componente ensamblado, el cual a su vez lo podemos subdividir en los departamentos principales de manufactura, calidad e ingeniería como se ejemplifica en la Figura 1.2. De este último se desprende el departamento de hardware el cual será el foco de esta investigación.

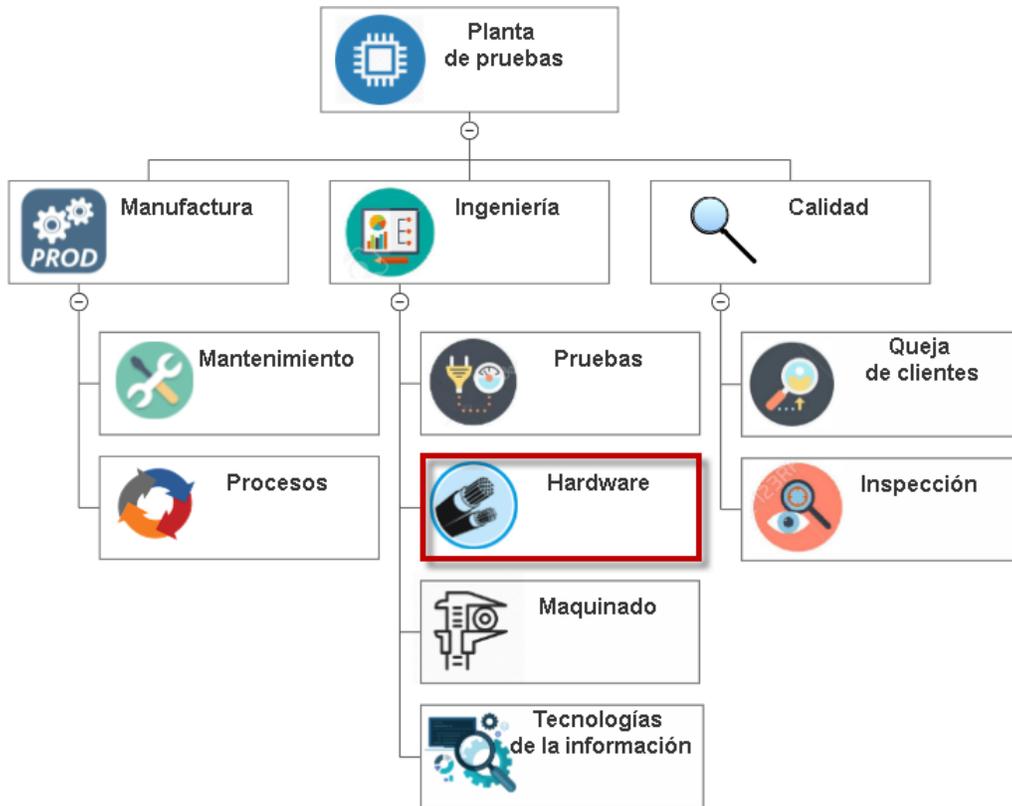


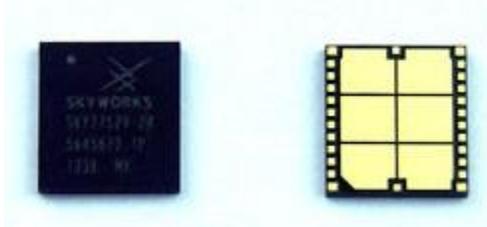
Figura 1.2 Departamentos que conforman el proceso de prueba eléctrica.

Fuente: Elaboración propia

El departamento de hardware es el responsable de proveer las partes que componen la interface eléctrica entre el dispositivo bajo prueba (*DUT*, por sus siglas en inglés) y las máquinas probadoras (*Tester*, por su nombre en inglés).

## Planteamiento del problema

Para realizar la prueba eléctrica del producto final (DUT) es necesario utilizar equipos e instrumentos capaces de trabajar con señales eléctricas en el rango de frecuencia de microondas y radio frecuencias (RF). En la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de producto final Skyworks.



*Figura 1.3 Producto final Skyworks*

Obtenido de Mouser Electronics (2018)

Parte del equipo utilizado en las pruebas que realiza Skyworks a sus componentes son los cables tipo coaxial con terminales Sub Miniatura versión A (SMA) mostrado en la Figura 1.4. Estos pueden ser rígidos o flexibles dependiendo el producto a probar. Los cables rígidos tienen un valor aproximado de 80 dólares cada uno, mientras que el precio de los flexibles rodea los 127 dólares.



*Figura 1.4 Cables RF con terminación SMA*

Obtenido de Digikey Electronics (2018)

Actualmente se cuenta con el proveedor\_X que satisface la demanda de cables rígidos, también se hacen pedidos al proveedor\_Y que es el encargado de suplir los cables flexibles. Siendo estos últimos el punto focal de esta investigación.

Sin embargo, en los últimos 5 años la compañía ha atravesado por una fuerte expansión, como consecuencia se tiene la construcción de la segunda planta y a su vez un incremento en la cantidad de equipos, maquinaria y consumo de cables de RF. La Figura 1.5 muestra el puente que interconecta ambas plantas.



*Figura 1.5 Puente de Skyworks que interconecta planta de ensamble y pruebas*

Fuente: Elaboración propia

Debido a esto, durante el año fiscal 2017 el departamento de hardware de la empresa compró aproximadamente 500 cables rígidos y 930 cables flexibles, haciendo un gasto cercano a los 158,000 dólares. Se estima que el gasto total en cables incrementará a 188,000 dólares durante el año fiscal 2018.

A pesar de que no existe un antecedente registrado de análisis en cuanto a la selección de cables por sus características eléctricas, aproximadamente en el 2013 se intentó sustituir parcialmente los cables flexibles por un producto del proveedor\_Z, el cual con el paso del tiempo fue descartado por su bajo rendimiento en producción.

Actualmente no existe un método técnico de selección de cables, la empresa se mantiene comprando los mismos cables a los mismos proveedores cada año abriendo paso a un área de oportunidad para mejorar

## Justificación

Este proyecto promueve la aplicación de conocimientos técnicos para llevar a cabo un análisis de las características eléctricas de los cables de RF que sirva como sustento comparativo al momento de hacer las compras en alto volumen de este aditamento necesario para la prueba eléctrica.

Los cables de RF son un consumible de alto costo, por lo que cada dólar que se ahorre en el precio por unidad representa un ahorro importante en los gastos totales del departamento. El monto estimado para la compra de cables flexibles y rígidos este año es de 188,000 dólares, cantidad a reducir con el fin de mitigar el crecimiento de gastos.

Los resultados contribuyen de manera innovadora a realizar una selección de cables compatibles con nuestros procesos basado en datos eléctricos comprobados internamente, anteriormente no se contaba con un proceso técnico de selección, al tener un proveedor estable para cada tipo de cable la empresa se mantiene comprando los cables a la tarifa que maneja el vendedor. La parte principalmente beneficiada es el departamento de hardware de pruebas quien es el responsable de invertir el presupuesto para la compra de hardware de manera eficiente.

Para lograr el modelo estratégico de análisis se empleó el conocimiento empírico desarrollado en Skyworks así como los fundamentos teóricos adquiridos a lo largo de la maestría en ingeniería e innovación con enfoque en sistemas de radio frecuencia en CETYS, en asignaturas tales como:

- Diseño de circuitos RF
- Mediciones y pruebas de RF
- Principios y aplicaciones de RF
- Innovación y desarrollo
- Administración de proyectos
- Metodología de la investigación

## Enunciado del problema

El rendimiento de los cables rígidos y flexibles de RF es crítico para la prueba eléctrica en Skyworks Mexicali, durante el año fiscal 2017 el departamento de hardware gastó más de 175,000 dólares en cables de ambos tipos y se estima que durante el presente año 2018 el gasto incrementará a los 188,000 dólares, es necesario reducir el gasto anual estimado sin sacrificar el rendimiento eléctrico del cable.

## Preguntas de investigación

De acuerdo a la problemática presentada anteriormente, dio lugar a plantear las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuáles son las características críticas necesarias para realizar una comparación entre alternativas de cables que son utilizados para prueba eléctrica de componentes electrónicos?

- ¿Qué características contribuyen al desempeño eléctrico de cables RF?
- ¿Cómo influyen esas características en el desempeño?
- ¿Cómo puedo medir esas características?

## Objetivos

Dichas preguntas dirigieron a formular el siguiente objetivo general:

Proponer un modelo estratégico de análisis para la evaluación de alternativas de cables de RF que logre un ahorro anual en el gasto estimado del año fiscal 2018 sin sacrificar el rendimiento eléctrico de los cables actuales.

Parar lograrlo, subdividimos lo siguientes objetivos específicos:

- Determinar los parámetros que afectan el rendimiento de los cables para prueba eléctrica de RF
- Conocer la influencia de cada parámetro en el rendimiento eléctrico del cable.
- Desarrollar un modelo de análisis que me permita comparar entre diversas opciones de cables.
- Proponer la mejor alternativa que cumpla con los requerimientos eléctricos de Skyworks y a la vez logre ahorros en el gasto estimado anual.

## Hipótesis

Partiendo de ésta información se formuló la siguiente hipótesis:

Con un análisis de las características principales de cables RF es posible encontrar un cable alternativo que cumpla con las especificaciones eléctricas y compita en precio.

## Capítulo 2: Marco Teórico y Referencial

### Conceptos

#### Radio Frecuencia (RF)

De acuerdo con Stoehr (2012) las señales de radiofrecuencia son una forma de onda electromagnética que tiene lugar en el espectro electromagnético. Las señales de RF van desde los 3KHz hasta los 300 GHz como se muestra en la Figura 2.1. Dentro de las cuales hay aplicaciones como radio AM y FM, canales de televisión, señales de comunicaciones móviles, entre otras.

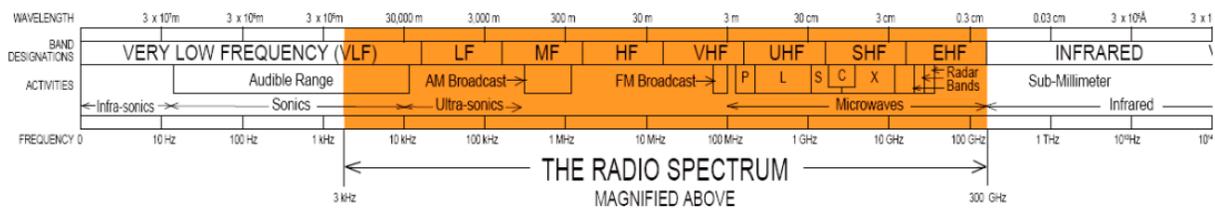


Figura 2.1 Espectro electromagnético

Obtenido de Stoehr (2012)

#### Líneas de transmisión y cables RF

Las ondas electromagnéticas viajan en el aire a la velocidad de la luz, sin embargo para ser transmitidas entre circuitos es necesario un sistema conductor que las guíe de un punto a otro, estos elementos son conocidos como líneas de transmisión (Teppati, Perrero, & Sayed, 2013).

Un ejemplo común de una línea de transmisión usada en aplicaciones RF es el cable coaxial ejemplificado en la Figura 2.2. Es muy utilizado como aditamento externo en sistemas de prueba a frecuencias que van hasta los 10 GHz. Consta de 2 conductores aislados por una capa dieléctrica, usualmente el conductor externo es conectado a tierra con el fin de minimizar pérdidas y señales de interferencia (Ludwing & Bretchko, 2000).

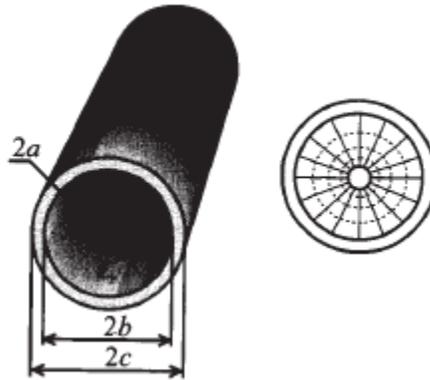


Figura 2.2 Cable coaxial utilizado en aplicaciones RF.

Obtenido de Ludwing y Bretchko (2000)

### Parámetros de dispersión

Cualquier sistema, dispositivo o circuito de alta frecuencia con 2 terminales por las cuales entran o salen señales puede ser analizado como una red de 2 puertos (Nocedal, 2006).

El análisis de parámetros de dispersión (Parámetros S) es una herramienta que mide las microondas transmitidas o reflejadas en una línea de transmisión de impedancia característica conocida. Son importantes en diseño RF ya que en altas frecuencias son más sencillos de medir y trabajar en comparación con otros tipos de parámetros de medición de redes. (Tule & Gamez, 2016)

De acuerdo con Sayre (2008) los parámetros S son descritos como:

- $S_{21}$  – Coeficiente de transmisión directa.- representa ganancia o pérdidas.
- $S_{12}$  – Coeficiente de transmisión inversa.- representa ganancia inversa (aislamiento).
- $S_{11}$  – Coeficiente de reflexión en la entrada.- representa la perdida por retorno en la entrada.
- $S_{22}$  – Coeficiente de reflexión en la salida.- representa la perdida por retorno en la salida.

En la Figura 2.3 se muestra su representación gráfica en el DUT.

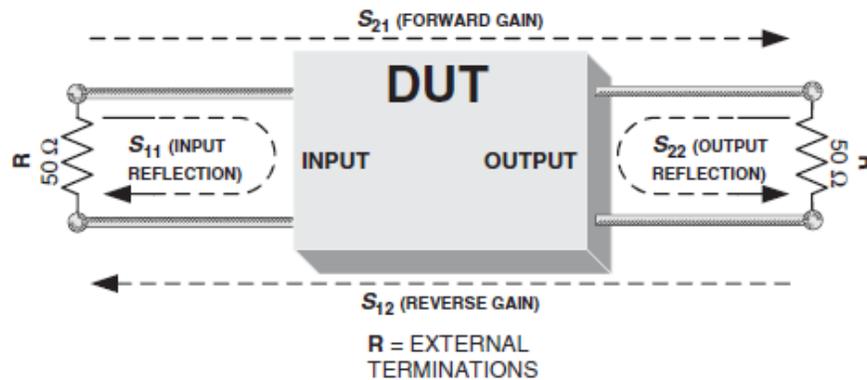


Figura 2.3 Representación de parámetros S

Obtenido de Sayre (2008)

### Decibeles y Decibeles mili Watt

Los decibeles (dB) son unidades relativas de comparación entre 2 magnitudes, comúnmente utilizadas para señales eléctricas y de audio. Reciben su nombre gracias a Alexander Graham Bell. De manera general los decibeles son una representación logarítmica de modo que el logaritmo de 100 en escala 10 corresponde a 2 bels, el logaritmo de 1000 en escala 10 a 3 bels (Avionics Department, 2013).

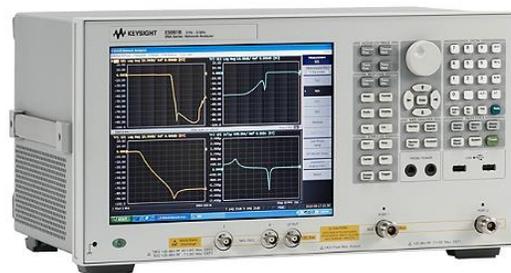
La característica logarítmica vuelve muy conveniente expresar magnitudes y relaciones eléctricas en dB, de esta manera los decibeles referentes a mili watts (dBm) siguen el mismo patrón pero siempre están referenciados a 1mW, haciendo posible representar magnitudes con la comparativa de potencia a 1mW (Grini, 2006).

### Analizador de redes

Es un instrumento que consiste en una configuración de medición automatizada controlada por computadora, contiene un generador, acopladores direccionales e interruptores internos que permiten direccionar y medir las ondas incidentes y reflejadas de uno o dos puertos (Beser & Gilmore, 2003).

Es una herramienta grafica que mide el comportamiento de elementos o sistemas RF en función de la frecuencia desplegando el resultado de las señales reflejadas y transmitidas a través de distintas maneras como parámetros S, Smith chart, SWR, pérdidas por retorno, ganancias, pérdidas por inserción, entre otras (Froelich & Frobenius, 2015).

La Figura 2.4 muestra un analizador de redes marca Keysight.



*Figura 2.4 Analizador de redes*

Obtenido de Keysight Technologies (2018)

## Documentación relacionada

La empresa de cables para aplicaciones RF HuberSuhner (2017) establece la atenuación expresada en dB/m ( $S_{21}$ ) como un parámetro clave para el desempeño del cable, además presenta gráficas en sus catálogos que detallan el nivel de pérdida con respecto a la frecuencia para cada uno de sus productos. La Figura 2.5 nos muestra un ejemplo que corresponde a uno de sus productos:

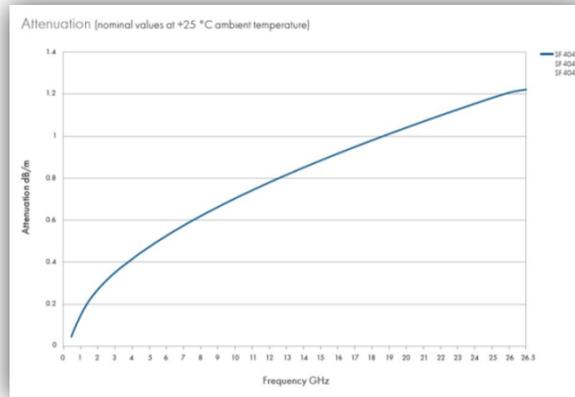


Figura 2.5 Gráfico de pérdida por inserción

Obtenido de HuberSuhner (2017)

Por otra parte, su competidor Teledyne Storm Microwave (2018) presume el valor de los parámetros asociados VSWR y Perdida por retorno ( $S_{22}$ ) en sus cables como una ventaja competitiva, añade tablas de conversión y tablas de datos que reflejan el comportamiento de sus productos con respecto a la frecuencia. La Tabla 2.1 nos muestra un ejemplo de las tablas de conversión que presenta Teledyne Storm Microwave (2018) en su sitio web.

Tabla 2.1 Relación de VSWM con pérdida por retorno

VSWR TO RETURN LOSS CONVERSION	
VSWR	RETURN LOSS
1.05:1	-32.25
1.10:1	-26.45
1.15:1	-23.12
1.20:1	-20.83
1.25:1	-19.09

Obtenido de Teledyne Storm Microwave (2018)

En la Tabla 4.2 se muestra un ejemplo de tabla de comportamiento del parámetro VSWR de un producto marca Teledyne.

Tabla 2.2 VSWR con respecto a la frecuencia

FREQUENCY (GHz)	2 STRAIGHT CONNECTORS	1 STRAIGHT / 1 ANGLED	2 ANGLED CONNECTORS
Up to 3	1.10:1	1.12:1	1.15:1
3 to 18	1.15:1	1.20:1	1.25:1
18 to 26.5	1.25:1	1.25:1†	1.30:1†
26.5 to 50	1.30:1	1.35:1†	1.40:1†

Obtenido de Teledyne Storm Microwave (2018)

La empresa proveedora de cables MegaPhase (2018) presenta las especificaciones en la hoja de datos de cada uno de sus productos, estos datos son resumidos en la Tabla 2.3, la cual concentra información de parámetros eléctricos como VSWR, el cual está asociado a la pérdida por retorno ( $S_{22}$ ), y atenuación del cable ( $S_{21}$ ).

Table 2.3 Especificaciones de cable MegaPhase

Frequency		Part No.	Attenuation		Conn. Loss dB	VSWR
GHz	Band		dB/ft	dB/m		
0.3	UHF	CM4	0.092	0.302	0.006	1.10
0.5			0.119	0.391	0.009	
0.8			0.152	0.497	0.012	
1.0			0.170	0.558	0.014	
2.0	S		0.243	0.798	0.024	1.15
2.4			0.267	0.877	0.027	
3.0			0.300	0.985	0.032	
4.0	C		0.349	1.146	0.040	1.20
6.0			0.433	1.420	0.055	
8.0	X		CM8	0.505	1.656	0.070
10.0		0.569		1.867	0.084	1.30
12.4		CM18	0.639	2.098	0.101	1.35
15.0			0.710	2.328	0.118	
18.0			0.785	2.574	0.139	
20.0			0.832	2.729	0.152	
22.0	K	CM26	0.877	2.877	0.165	
24.0			0.921	3.021	0.178	
26.5			0.973	3.193	0.194	

Obtenido de MegaPhase (2018)

Se realizó una búsqueda de investigaciones similares en bases de datos de carácter científico como IEEE, Springer y Knovel sin identificar alguna con una aplicación, alcance y propósitos afines.

## Capítulo 3: Metodología

### Metodología del proyecto

La metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto fue basada en el método científico, el cual de acuerdo con Rojas (2010) consta de 3 partes generales:

- 1) Observación
- 2) Planteamiento de la hipótesis
- 3) Comprobación

Partiendo de aquí, se propusieron 5 etapas para el desarrollo de la investigación:

- 1) Definición
- 2) Medición
- 3) Análisis
- 4) Implementación
- 5) Resultados

**La etapa de definición** tiene como propósito obtener los factores críticos del rendimiento del cable. Consiste en una investigación exploratoria basada en el análisis de literatura técnica de radio frecuencia, así como documentos de empresas dedicadas a la fabricación y prueba de cables RF. También presenta las frecuencias principales a las que prueban los productos Skyworks a través de la revisión de documentos internos de la empresa. Finalmente, se busca identificar cables candidatos que cumplan con los requerimientos definidos previamente.

**La etapa de medición** tiene por intención probar los cables RF obtenidos de la etapa 1 bajo las mismas características y condiciones internas que surgieron de la investigación exploratoria utilizando un analizador de redes, con el fin de recolectar los datos con los que se alimentará la etapa 3.

**La etapa de análisis** pretende realizar comparaciones del rendimiento eléctrico de los cables candidatos haciendo uso de los datos obtenidos en la fase 2. El fin es seleccionar un candidato cuyo rendimiento sea capaz de competir con el del cable actual.

**En etapa de implementación**, el cable candidato seleccionado en la fase de análisis es instalado en un equipo de producción que opera bajo los estándares y condiciones que requiere la empresa. Se utiliza una muestra de un producto Skyworks, la cual se prueba con el cable candidato y una vez finalizada la prueba, se remplazan los cables candidatos por los cables actuales y corre la misma muestra con el fin de obtener datos de ambos cables bajo condiciones idénticas y así facilitar la comparación de resultados.

Una vez terminado el análisis de la etapa 4, se realizó una propuesta formal del cable sustituto capaz de competir en rendimiento eléctrico y precio con el cable actual, lo cual concluye con la **etapa de propuesta** y con el proyecto.

## Plan de trabajo

### Work Breakdown Structure (WBS)

Para realizar el proyecto se realizó el desglose de entregables por etapa descrito en la Figura 3.1:

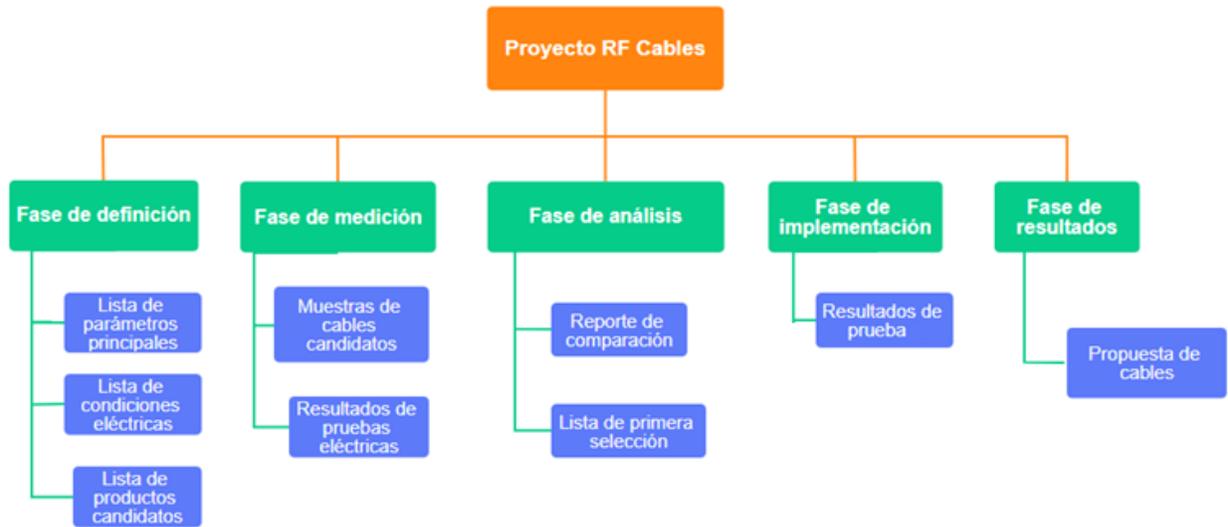


Figura 3.1 Desglose de actividades del proyecto

Fuente: Elaboración propia

### Actividades del proyecto

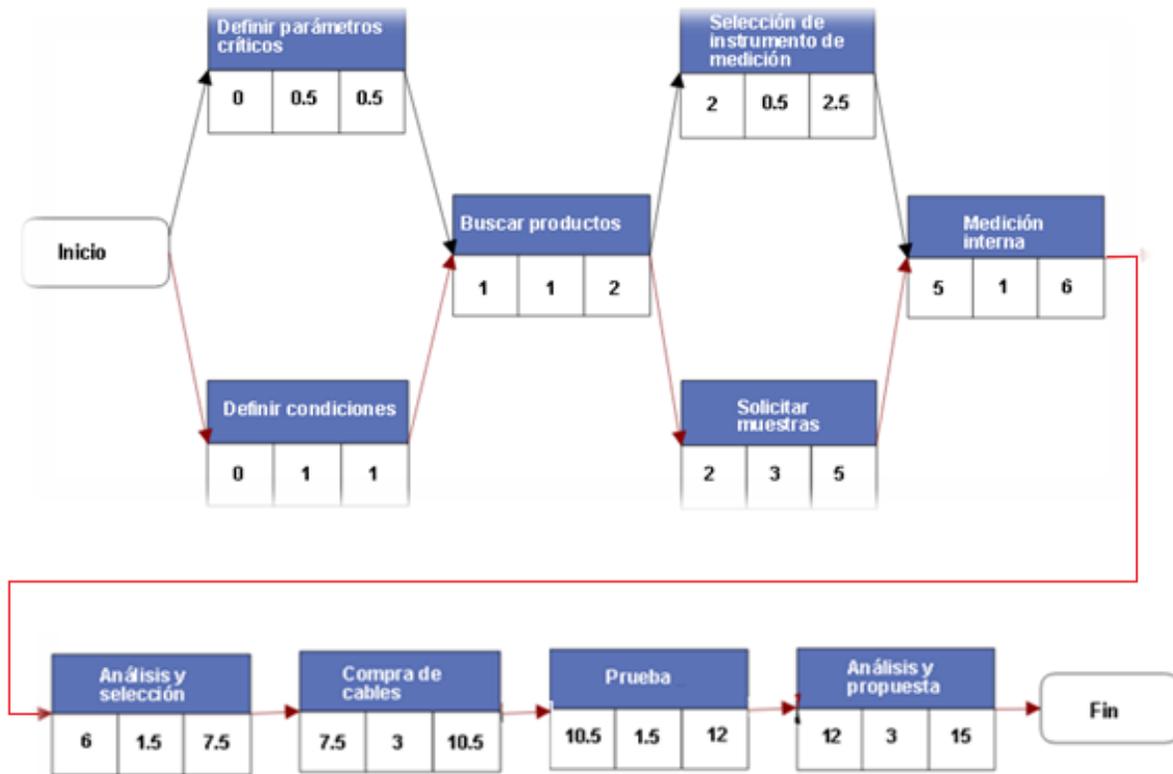
Del desglose de entregables se definió la lista de actividades y sus duraciones mostradas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Lista de actividades del proyecto

	Task Name	Duration
1	Definir parametros criticos	3 days
2	Definir condiciones de prueba en Skyworks	7 days
3	Buscar productos que cumplan esas características	7 days
4	Selección de instrumentos de medición	4 days
5	Solicitar muestras	21 days
6	Medición interna de los productos (Bench)	7 days
7	Análisis y selección	10 days
8	Compra de cables para evaluación en producción	21 days
9	Prueba en producción	11 days
10	Análisis y propuesta	20 days

Fuente: Elaboración propia

La red de actividades mostrada en la Figura 3.2 describe la secuencia en que cada actividad será realizada, así como sus actividades predecesoras.



*Figura 3.2 Red de actividades del proyecto*

Fuente: Elaboración propia

En la red de actividades se marca en color rojo la ruta crítica en la cual no hay holgura para las actividades. El proyecto está planeado para ser terminado en 15 semanas a partir de la fecha de inicio.

## Recursos del proyecto

Dentro de los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto se encuentra el equipo de trabajo descrito a continuación:

Ing. Hector Josué Garcia Magaña  
Ingeniero de prueba eléctrica de radio frecuencia  
Departamento de ingeniería de producto

Ing. Pablo Rodriguez Santoscoy  
Ingeniero de prueba eléctrica de radio frecuencia  
Departamento de ingeniería de producto

Hector Alejandro Rubio  
Ingeniero de prueba eléctrica de radio frecuencia  
Departamento de ingeniería de producto

Jonathan Castro  
Planeador de compras  
Departamento de planeación y procedimientos

Se requieren 4 horas de utilización de un analizador de redes concentradas en la etapa de medición.

Otro recurso importante es el tiempo de utilización de la probadora, necesario para realizar pruebas y verificaciones al rendimiento de los productos con los cables actuales y los nuevos provenientes de las propuestas. El tiempo de utilización son 30 horas enfocadas en la etapa de implementación.

Por último se requieren 1500 dólares para la compra de los cables candidato que surgen de la etapa de análisis.

## Capítulo 4: Resultados

El presente capítulo describe los resultados obtenidos al seguir la metodología presentada en el capítulo 3, la cual consta de 5 etapas, cada una con entregables puntuales descritos en la Figura 3.1.

### Etapa 1: Definición

La primera fase tiene como propósito determinar los parámetros con los cuales podemos medir y comparar el rendimiento de cables para prueba eléctrica en Radio Frecuencia, así como la determinación de las condiciones bajas las que se someten los cables en producción con el fin de satisfacer los requerimientos de la empresa. Basado en esto se identifican cables capaces de satisfacer dichas necesidades.

De acuerdo a la metodología y plan de trabajo descritos en el capítulo 3, se elaboraron los siguientes entregables para esta fase:

- Lista de parámetros principales
- Lista de condiciones eléctricas
- Lista de cables candidatos.

### Lista de parámetros principales

Para elaborar la lista de parámetros principales se realizó una investigación exploratoria basada en el análisis de libros de contenido técnico en RF, así como documentos de experimentadas empresas proveedoras de cables RF, dicha información se detalla en el capítulo 2 Marco Teórico Referencial.

A continuación se listan los parámetros utilizados para la medición y comparación de rendimiento de cables obtenidos del análisis previamente mencionado:

- $S_{21}$  – Coeficiente de transmisión directa.- representa ganancia o pérdida de señal.

- $S_{22}$  – Coeficiente de reflexión en la salida.- representa la perdida por retorno en la salida.

Se encontró que los parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  son utilizados por importantes empresas de cables RF tales como Megaphase, Teledyne y HuberSuhner para calificar sus productos y resaltar sus ventajas competitivas, esto se encuentra en las hojas de datos de cada producto.

### Lista de condiciones eléctricas

Para determinar la lista de condiciones eléctricas se realizó un análisis a la demanda de partes solicitadas a la empresa durante los cuartos 3 y 4 del año fiscal 2018, de los cuales se obtuvieron los números de parte con más volumen en un tipo de máquina. Por motivos de confidencialidad se nombró plataforma\_C.

Como resultado del análisis antes mencionado en la Figura 4.1 se presenta un diagrama que describe el volumen e impacto por número de parte en los cuartos 3 y 4 del año fiscal 2018. En el eje horizontal se encuentran los diez números de parte con mayor demanda, mientras en el eje vertical la cantidad de piezas requerida y sobre las barras el porcentaje de impacto con respecto a la demanda total.

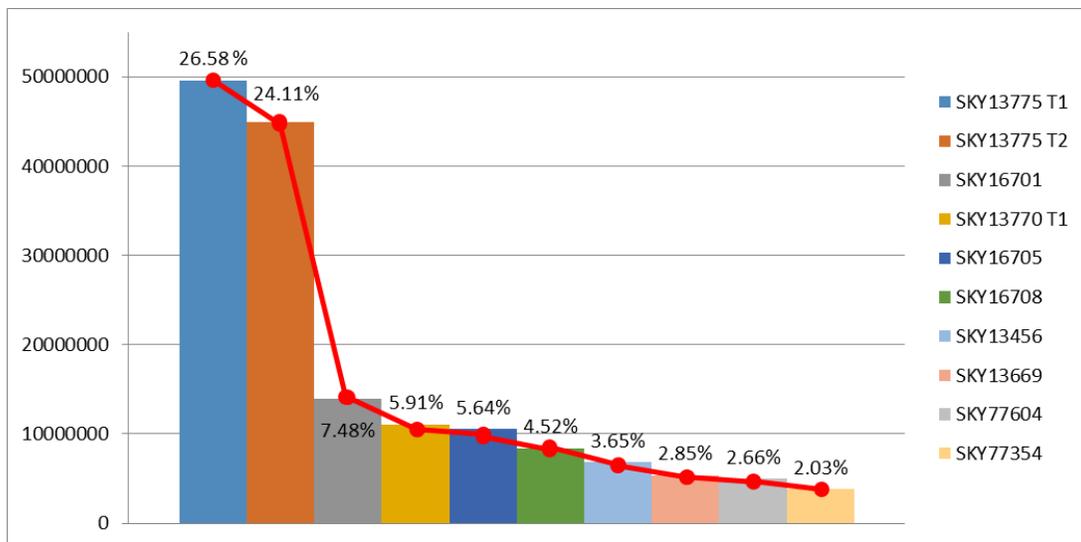


Figura 4.1 Gráfica de volumen por número de parte

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados se tomaron los 7 productos con más volumen del año fiscal de manera que la suma de sus impactos acumulados representa cerca del 80% de la demanda de productos. De dicha selección se extrajeron las frecuencias de prueba eléctrica de cada material, para obtener la relación frecuencia-producto mostrada en la Figura 4.2.

De la relación entre frecuencias de prueba en Mega Hertz y productos seleccionados, se presenta la Figura 4.2, la cual muestra en su eje vertical los productos con mayor demanda de los cuartos 3 y 4 del año fiscal 2018, el eje horizontal contiene frecuencias de prueba que van desde 0 hasta los 6000 MegaHertz. Valores que representan el rango de operación de los equipos internos de prueba. Se excluyeron los productos SKY13669, SKY77604 y SKY77354 ya que para realizar la prueba eléctrica no utilizan los cables requeridos para el propósito de esta investigación.

De este análisis se identificaron frecuencias con alta concentración de incidencias como 915 y 2690 MHz.

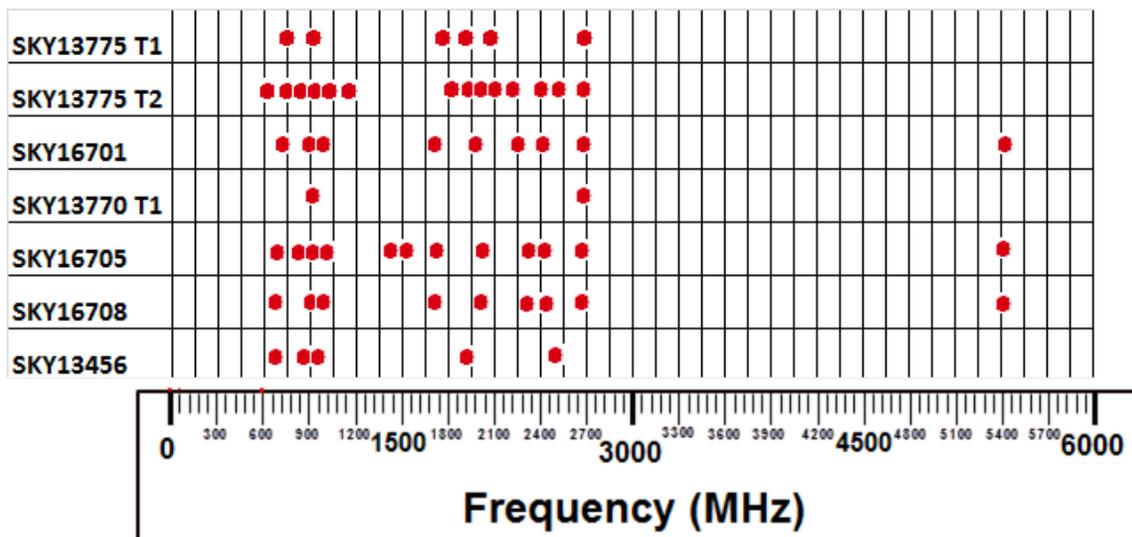


Figura 4.2 Gráfica de relación frecuencia - número de parte

Fuente: Elaboración propia

Para elaborar la lista de frecuencias presentada en la Tabla 4.1 se tomaron cinco de las frecuencias con mayor incidencia: 915, 960, 1511, 2170 y 2690 MHz. Además se agregaron las frecuencias de 3820, 4000, 4900, 5730 y 5900 con el fin de cubrir toda la capacidad para generar y medir señales de los equipos de prueba, anticipándonos a posibles productos futuros con requerimientos en frecuencias mayores.

*Tabla 4.1 Lista de frecuencias principales*

Plataforma	Frecuencia
Plataforma_C	915 MHz
	960MHz
	1511MHz
	2170MHz
	2690 MHz
	3820MHz
	4000MHz
	4900MHz
	5730MHz
	5900MHz

Fuente: Elaboración propia

### Lista de cables candidatos

Para establecer la lista de cables candidatos se llevó a cabo un análisis de las especificaciones eléctricas de los productos que ofrecen 5 proveedores. Basados en la capacidad eléctrica de los equipos de prueba en Skyworks, así como las condiciones requeridas por los productos de alto volumen, lo cual dio lugar a la selección de cables candidatos capaces de satisfacer las especificaciones requeridas por la empresa, dichos cables se enlistan a continuación:

- Producto P1CA-SAMSAM-SS141-48 de la marca p1dB.
- Producto MFR-57500 90-069-048 de la marca Teledyne (Cable actual)
- Producto CM8-S1S7-48 de la marca MegaPhase
- Producto CL195-AMAM-1.2M de la marca Chip Shine
- Producto ST18-SMAM-SMAM-48 de la marca Huber Suhner

En la Tabla 4.2 se muestra un resumen de las características principales de los cables candidatos basado en el análisis de sus hojas de datos. Se consideraron algunos aspectos generales como número de parte, marca, longitud en pulgadas, precio, rango de frecuencias de operación, impedancia, Perdida por retorno ( $S_{22}$ ) y pérdida por inserción ( $S_{21}$ ).

*Tabla 4.2 Características de cables candidatos*

Part number	Manufacturer	Lengths (in)	Price	Frequency	Impedance	Return Loss (dB)	Insertion Loss (dB/m@GHz)
90-069-048	Teledyne	48	\$153.48	DC to 18GHz	50 ohms	16.3	0.89@18 1.82@5 2.55@10 3.46@18
CM8-S157-48	Megaphase	48	\$127.50	DC to 8GHz	50 ohms	19.1 @8GHz	1.656 @8
						20.8 @6GHz	1.42 @6
ST18/SMAm /SMAm/48in	Huber Suhner	48	\$101.00	0.018GHz to 18GHz	50 ohms	30 @2GHz 28 @4GHz 25 @6GHz 21 @12GHz 19 @18GHz	0.61 @2 0.88 @4 1.09 @6 1.57 @12 1.95 @18
CL195-AMAM-1.2M	ChipShine	48	\$53.00	DC to 26.5 GHz	50 ohms	23.1 @26GHz	2.9 @26
P1CA-SAMSAM-SS141-48	p1dB	48	\$97.00	DC to 18GHz	50 ohms	20.1	0.24 @ 0.4
							0.36 @ 1
							0.87 @ 5
							1.29 @ 10
							1.83 @ 18

Fuente: Elaboración propia

Las especificaciones de los 5 cables candidatos afirman que todos son capaces de trabajar con las frecuencias listadas en la Tabla 4.1. El modelo que presenta el rango de frecuencia más limitado es el de la marca Megaphase con capacidad de trabajar con señales de hasta 8GHz, mientras que el modelo capaz de trabajar a mayores frecuencias es el del proveedor Chip Shine con un alcance de hasta 26 GHz.

Un detalle a considerar es que cada proveedor presenta los parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  de sus cables de maneras diversas, a veces lo hacen para frecuencias específicas que pueden no ser las mismas entre competidores, otras veces en unidades dB o dB/ft. Es posible hacer una comparación aproximada entre productos pero al no haber una

manera universal de expresar el valor de sus parámetros  $S$ , la comparación no es directa en sus hojas de datos.

Por la parte económica se aprecia que el cable con mayor costo es el de la marca Teladyne, con un valor de \$153.48 dólares por cable, por otra parte el cable de la marca Chip Shine es el de menor precio con un valor en el mercado de \$53.00 dólares.

## Etapa 2: Medición

Una vez identificados los cables candidatos, se pidieron muestras a los proveedores, un cable de cada marca. Utilizando un analizador de redes marca Agilent modelo N5230A se midieron los parámetros  $S_{22}$  y  $S_{21}$  de cada cable para cada una de las frecuencias encontradas en la lista de la Tabla 4.1.

La Figura 4.3 muestra las mediciones de los parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  respectivamente del cable Megaphase medido entre 100KHz y 6000MHz.

Se encontró que la medición del parámetro  $S_{21}$  luce estable a baja frecuencia, pero a medida que la frecuencia aumenta, su variación incrementa también. El parámetro  $S_{22}$  tiene cambios muy drásticos ante pequeños incrementos de frecuencia.

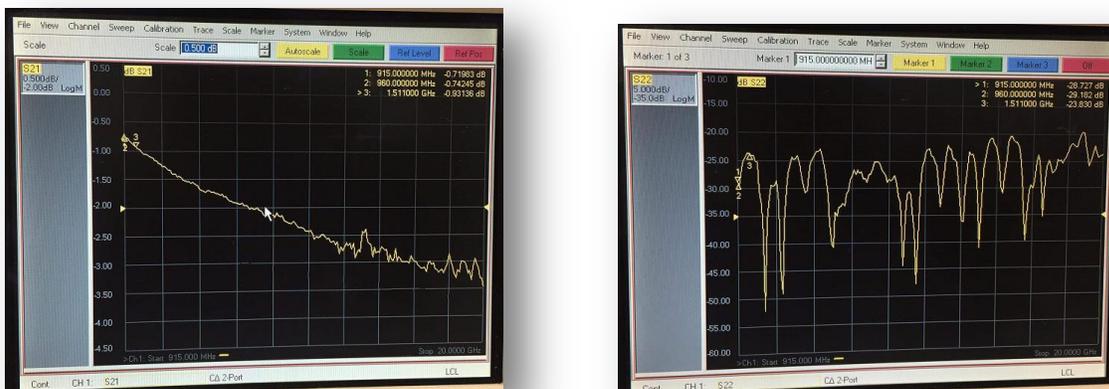


Figura 4.3 Parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  del cable Megaphase

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.4 muestra las mediciones de los parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  respectivamente del cable Huber Suhner medido entre 100KHz y 6000MHz. Aquí se identificó que el parámetro  $S_{21}$  presenta un comportamiento estable a lo largo de todo el rango de frecuencias, caso similar al del parámetro  $S_{22}$  que muestra poca variación.



Figura 4.4 Parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  del cable Huber Suhner

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.5 muestra las mediciones de los parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  respectivamente del cable Chip Shine medido entre 100KHz y 6000MHz. El parámetro  $S_{21}$  luce estable a lo largo de todo el rango de frecuencias, sin embargo, para el parámetro  $S_{22}$  se notó que adquiere inestabilidad a medida que la frecuencia aumenta.

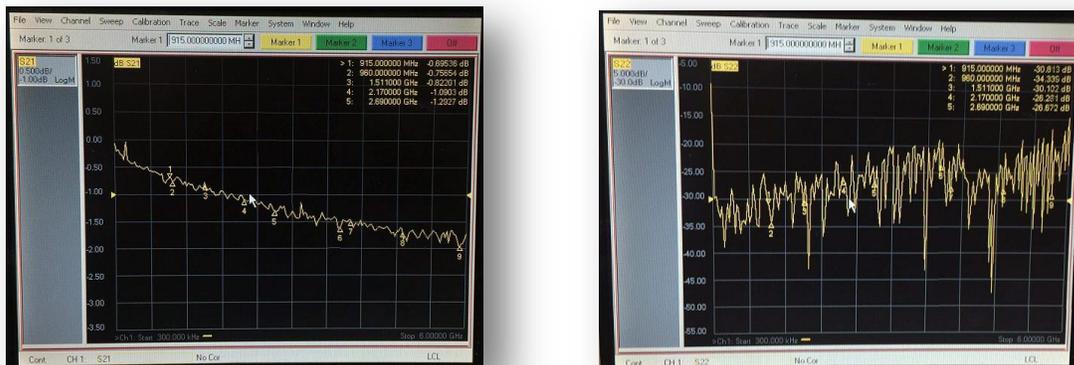


Figura 4.2 Parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  del cable Chip Shine

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.6 muestra las mediciones de los parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  respectivamente del cable p1dB medido entre 100KHz y 6000MHz. Aquí la pérdida por inserción luce bastante estable, similar a la perdida por retorno tiene también muestra poca variación.



Figura 4.6 Parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  del cable p1dB

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.7 muestra las mediciones de los parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  respectivamente del cable Teledyne medido entre 100KHz y 6000MHz. Se encontró que la perdida por inserción es estable a lo largo del rango de frecuencias sin embargo, la perdida por retorno presenta mucha inestabilidad de forma incremental con respecto a la frecuencia.



Figure 4.7 Parámetros  $S_{21}$  y  $S_{22}$  del cable Teledyne

Fuente: Elaboración propia

Al medir los cables en el analizador de redes se procuró que los datos de medición específicos en las frecuencias importantes fueran visibles en la pantalla a través de marcadores para posteriormente salvarlos. En la Tabla 4.3 se concentran las mediciones del parámetro  $S_{21}$  de los 5 tipos de cables para todas las frecuencias encontradas en la Tabla 4.1.

*Tabla 4.3 Tabla de valores del parámetro  $S_{21}$*

Cable	915 MHz	960 MHz	1511 MHz	2170 MHz	2690 MHz	3820 MHz	4000 MHz	4900 MHz	5730 MHz	5900 MHz
Megaphase	-0.72	-0.74	-0.93	-1.1	-1.22	-1.48	-1.51	-1.7	-1.76	-1.76
Huber Suhner	-0.5	-0.57	-0.58	-0.81	-0.98	-1.2	-1.09	-1.25	-1.17	-1.52
Teledyne	-0.8	-0.89	-0.97	-1.27	-1.46	-1.83	-1.54	-1.97	-2.15	-2.2
Chip Shine	-0.68	-0.74	-0.81	-1.07	-1.27	-1.57	-1.45	-1.66	-1.63	-1.9
P1dB	-0.66	-0.73	-0.79	-1.08	-1.27	-1.52	-1.44	-1.65	-1.67	-1.88

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.4 se enlistan los valores del parámetro  $S_{22}$  rescatados de la medición del analizador de redes para los cinco cables en sus frecuencias importantes basadas en la Tabla 4.1.

*Tabla 4.4 Tabla de valores del parámetro  $S_{22}$*

Cable	915 MHz	960 MHz	1511 MHz	2170 MHz	2690 MHz	3820 MHz	4000 MHz	4900 MHz	5730 MHz	5900 MHz
P1dB	-34.4	-30.9	-26.8	-24.1	-23.7	-26	-28.9	-26.4	-32	-22.7
Megaphase	-28.1	-24.2	-27.7	-32.8	-28.2	-22.6	-29.8	-30.1	-24.2	-23.4
Huber Suhner	-33.3	-34.4	-27.3	-23.4	-23.5	-22.7	-22.8	-26.6	-27.7	-20.9
Teledyne	-30.6	-32	-31.3	-29.9	-30.1	-29.5	-33	-29.4	-23.5	-23.3
Chip Shine	-30.8	-34.4	-30.2	-26.3	-26.7	-23.6	-27.5	-27.9	-28.9	-18.69

Fuente: Elaboración propia

### Etapa 3: Análisis

El propósito de la etapa 3 es realizar una comparación del rendimiento mostrado por los cinco modelos de cables RF para lo cual se utilizaron las frecuencias obtenidas en la etapa 1, mostradas en la Tabla 4.1, así como los resultados de las mediciones descritos en las Tablas 4.3 y 4.4.

Con esta información se elaboró la Figura 4.8 la cual muestra un análisis comparativo del parámetro  $S_{21}$  entre los cinco modelos de cables. En el eje horizontal están listadas las frecuencias descritas en la Tabla 4.1, mientras que en el eje vertical se expresa el valor medido del parámetro  $S_{21}$ . Entre más alto sea este valor, se considera que el cable tiene mejor rendimiento.



Figura 4.8 Comparación de parámetro  $S_{21}$  entre los 5 tipos de cable

Fuente: Elaboración propia

Se encontró que el cable que presenta menor pérdida por inserción dentro del rango de frecuencias de 915 MHz y 6000MHz es el de la marca Huber Suhner, mientras que el cable con mayor pérdida es de la marca Teledyne.

De manera similar la Figura 4.9 compara el parámetro  $S_{22}$  que representa la pérdida por retorno entre los 5 modelos de cables. Entre más bajo sea este valor, se considera que el cable tiene mejor rendimiento. En el eje horizontal se ven listadas las frecuencias obtenidas en la Tabla 4.1, mientras que el eje vertical expresa el valor medido del parámetro  $S_{22}$ .

De los resultados se observó que la marca que alcanzo el valor más alto en el parámetro de pérdida por retorno fue Chip Shine, mientras que el dato con la menor medición fue de p1dB. Los 5 productos muestran inestabilidad con valores que van

desde los -18.6 a los -35.2 dB, sin embargo el cable Huber Suhner presenta menor variación que el resto.

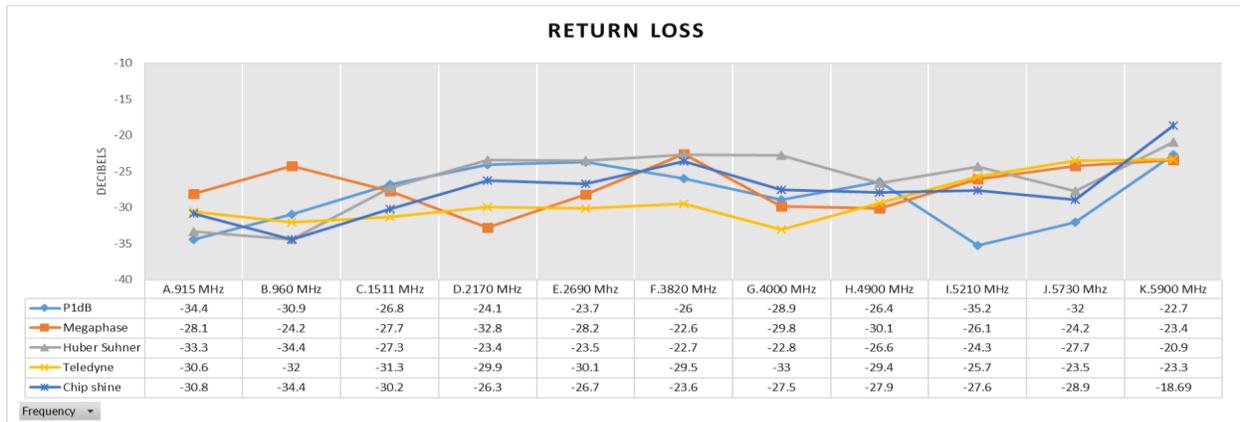


Figure 4.9 Comparación de parámetro  $S_{22}$  entre los 5 tipos de cable

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.5 se especifican los precios de cada cable, destacan Teledyne y Chip Shine. El primero de ellos por ser el más costoso, mientras que el segundo se hace notar por costar una tercera parte del precio de su competidor, siendo así el más económico de los cinco modelos.

Tabla 4.5 Lista de precios de cables

Marca	Precio
Teledyne	\$ 153.48
Megaphase	\$ 127.50
Huber Suhner	\$ 101.00
ChipShine	\$ 53.00
p1dB	\$ 97.00

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.8 se aprecia que, al comparar el rendimiento de los 2 cables previamente mencionados, sus comportamientos son muy similares (Chip Shine en color amarillo y Teledyne en color gris), por otro lado al comprar comportamientos en

Figura 4.9, Chip Shine presenta mejor comportamiento (Chip Shine en color azul oscuro y Teledyne en color gris).

El precio del cable Megaphase supera por más del doble el precio del cable Chip Shine, ambos presentan un comportamiento casi idéntico en el parámetro  $S_{21}$  descrito en la Figura 4.8.

En la Figura 4.9 se aprecian mediciones oscilantes en el parámetro  $S_{22}$  por parte de ambos cables, siendo Chip Shine la marca que de manera general presenta mediciones menores, lo cual representa una ventaja competitiva.

Basado en el rendimiento mostrado en las Figuras 4.8 y 4.9, adicional a su bajo costo, se eligió el cable de la marca Chip Shine como candidato para ser puesto a prueba en producción.

#### **Etapa 4: Implementación**

La etapa de implementación tiene como propósito evaluar el cable candidato en producción al ser utilizado como aditamento que forma parte de un sistema de prueba eléctrica de componentes electrónicos. Para lograrlo se realizó la compra de 10 cables marca Chip Shine y se instalaron en un equipo de producción de la plataforma\_C, probando una muestra de 165 dispositivos pertenecientes al número de parte SKY16708 encontrado en la Tabla 4.1, posteriormente dicha muestra fue probada utilizando los cables marca Teledyne. La configuración de prueba se mantuvo bajo las mismas condiciones, con la única variante de los cables.

El rendimiento del material probado con los cables Chip Shine fue de 100%, mientras que el rendimiento del mismo grupo de piezas probados con cables Teledyne fue de 90.27%. El 80% de las piezas que fallaron se concentraron en un mismo modo de falla, la Figura 4.10 muestra un diagrama que compara las distribuciones de la muestra probada con cables Chip Shine en el lado izquierdo, y los resultados al probar con

cables Teledyne en el lado derecho. En el eje horizontal de la gráfica se posiciona el tipo de cable mientras que el eje vertical se compara el valor de las mediciones. Se utiliza un gráfico tipo box plot y un histograma para representar los datos.

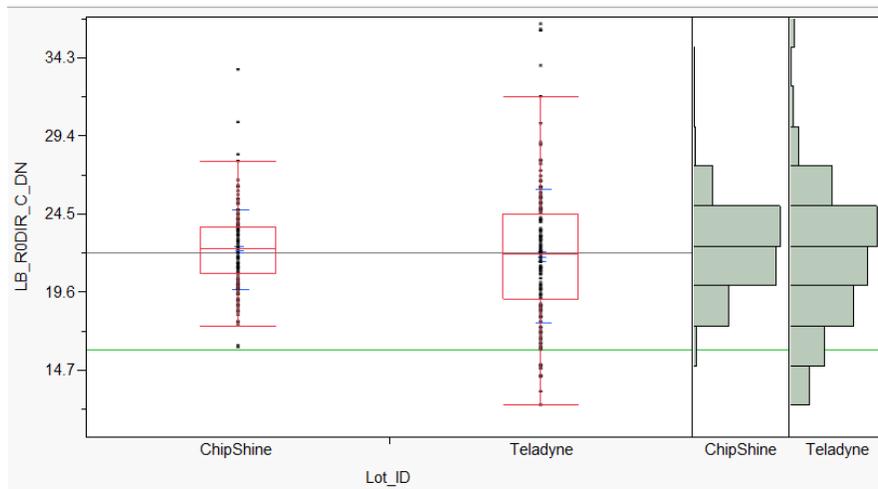


Figura 4.10 Comparación de distribuciones de muestra

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.6 contiene la información estadística de la muestra probada con cables Chip Shine y Teledyne, se incluyeron parámetros como límite inferior de la prueba (LSL), límite superior de la prueba (USL), unidades, media, mediana, valor mínimo, valor máximo, desviación estándar, número de fallas y el índice de capacidad de proceso (CPK).

Tabla 4.6 Tabla comparativa de datos de muestra.

Cable	LSL	USL	Unidades	Media	Mediana	Min	Max	Desv Est	Fallas	Cpk
Chip Shine	16	60	dB	22.26	22.34	16.14	33.53	2.50	0	0.8347
Teledyne	16	60	dB	21.59	21.77	11.81	36.39	4.30	16	0.4331

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran mayor dispersión al utilizar los cables Teledyne, ya que los datos que llegan a puntos más altos y más bajos en la Figura 4.10 pertenecen a la prueba con cables Teledyne (Diagramas de la derecha), adicional a esto, la desviación

estándar de Teledyne mostrada en la Tabla 4.6 confirma la variación, alcanzando un valor de casi el doble con respecto a la desviación estándar de los datos de prueba con Chip Shine.

Se realizó una prueba de hipótesis por análisis T de 2 muestras con 95% de intervalo de confianza para determinar si existe una diferencia significativa entre los datos de la muestra probada con ambas marcas de cables, esto con el fin de asegurar que se puede hacer un cambio transparente entre cables sin afectar en forma negativa el rendimiento en producción.

La Tabla 4.7 contiene la información estadística del análisis, se encontró que el valor de “p” es 0.074. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula que establece que ambas muestras son iguales, confirmando que podemos utilizar indistintamente una marca de cables o la otra sin diferencia estadística significativa.

*Tabla 4.7 Datos de prueba de hipótesis*

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
1.79	301	0.074

Fuente: Elaboración propia

Se revisó documentación interna de Skyworks para identificar los parámetros con mayor cantidad histórica de fallas en el periodo de un año (mayo 2017 a mayo 2018). Esto con el fin de comparar el índice de capacidad de proceso que se obtuvo con los datos de prueba del cable actual y del cable propuesto.

La Tabla 4.8 contiene la lista de parámetros protagonistas en cuanto a incidencia de fallas ordenadas por ocurrencia de mayor a menor, la presente tabla también muestra el valor del índice de capacidad de proceso en cada parámetro obtenido al probar la muestra con ambos tipos de cables

*Tabla 4.8 Parámetros históricos con mayor cantidad de fallas*

Parameter	CPK	
	Chipshine	Teledyne
ACTIVE_IDD_MAV	1.985	2.018
C1O2_R0DIR_0915	1.915	0.625
C1O1_F0DIR_0915	0.629	0.681
LB_RDIR_C_UP_MV	1.425	0.86
C2O2_R0DIR_0915	1.98	1.237
C1O1_F3CPL_1710	2.449	1.924
LB_R0DIR_C_DN	0.835	0.433
C2_IL_2690_MAV	1.8	1.514
LB_RDIR_C_UP_MV	1.425	0.86
C2O2_ROCPL_0915	1.581	2.138
C1_IL_2690_MAV	1.309	2.24
C1O2_R3CPL_1710	2.068	1.849
C1O1_F3DIR_2025	1.019	1.259
LB_F0DIR_C_UP	1.689	1.519
SHTDWN_IDD_MAV	1.771	1.693

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que entre más alto sea el CPK, el proceso se considera mejor controlado y con mayor probabilidad de presentar buen rendimiento, por lo que el objetivo de la Tabla 4.8 es comparar el impacto en los parámetros problemáticos para identificar riesgos al momento de trabajar en producción.

La primer y última prueba de la Tabla 4.8 no son tomadas en cuenta para la comparación ya que para su realización no intervienen los cables RF, es por eso que el CPK con ambos tipos de cable es muy similar.

Se encontró que hubo 9 parámetros con historial de fallas que mejoraron su CPK al ser probados con cables Chip Shine, por otro lado, hubo 4 que presentaron mejoría con cables Teledyne.

Como parte de los hallazgos se identificó que el parámetro C1O2\_R0DIR\_0915 presenta mayor cantidad de fallas históricas que el resto de parámetros asociados a pruebas RF, y el valor de su CPK es 3 veces más alto al utilizar cables Chip Shine, lo cual representaría una ventaja potencial en producción al mejorar el rendimiento y evitar falsos rechazos de material funcional.

## Etapa 5: Propuesta

La etapa 5 tuvo por objetivo presentar un cable RF que basado en el modelo de análisis desarrollado a lo largo de las etapas previas, fuera capaz de mantener el rendimiento actual logrando ahorros. Para lo cual definimos los siguientes puntos clave:

- Capaz de trabajar bajo condiciones requeridas por la empresa.
- Igualar o mejorar rendimiento.
- Contribuir con ahorros anuales.

Luego de 4 etapas de desarrollo se optó por el cable modelo **CL195-AMAM-1.2M** de la marca **Chip Shine** ya que paso de forma satisfactoria todas las pruebas y requerimientos desarrollados a través de las 4 etapas previas.

Es capaz de trabajar dentro del rango de frecuencias que requiere la empresa, y para el parámetro  $S_{21}$  presenta mejor rendimiento que el cable actual marca Teledyne.

En cuestión de rendimiento la muestra probada con cables Chip Shine presenta mejores resultados. 100% de las piezas pasaron la prueba eléctrica, mientras que el mismo material obtuvo 90.27% de rendimiento al ser probados con cables Teledyne. Por lo que la nueva propuesta mejora el rendimiento al reducir el falso rechazo de

material. Además de tener un CPK más alto en los parámetros que históricamente han tenido mayor índice de fallas, lo cual reduce el riesgo de obtener bajo rendimiento en producción.

Otro factor importante es el económico, los cables marca Ship Shine cuestan aproximadamente una tercera parte de lo que se gasta en el cable actual. Durante el año fiscal 2017 se compraron cerca de 930 cables, por lo que a lo largo de un año fiscal completo reemplazando los cables en totalidad se ahorrarían al menos \$93,446.4 dólares. Lo cual reduciría el gasto de \$142,736.4 a \$49,290.0 dólares que representa poco más del 65% de ahorros del gasto anual por cables RF. Estos datos no consideran el crecimiento de la empresa, el cual conlleva incrementos en demanda de cables, por lo que el ahorro total es propenso a incrementar.

## Capítulo 5: Conclusiones

Este capítulo presenta los aspectos más importantes del proyecto, las conclusiones, así como los logros y hallazgos encontrados a lo largo de su desarrollo. También se presentan las aportaciones más importantes, y las posibles líneas de investigación o proyectos futuros relacionados.

En el capítulo 1 se presentaron las preguntas indagatorias que dieron lugar al tema de investigación de este proyecto, cuyo propósito general fue el desarrollo de un modelo comparativo de las características principales y medibles asociadas al rendimiento eléctrico de cables RF, el cual nos permitiera elegir un sustituto que compita en precio y rendimiento para comprobar la hipótesis la cual planteo que era posible realizar un cambio de cables de manera transparente para producción.

De acuerdo a la metodología establecida en la primera fase, se identificaron los parámetros medibles del rendimiento de cables RF en literatura técnica. La mayoría de libros fueron utilizados en materias relacionadas a señales de radio frecuencia a lo largo del módulo de especialidad de la maestría en ingeniería e innovación con enfoque en sistemas de radio frecuencia en CETYS. Con esto se logró el primer objetivo específico que establecía determinar los parámetros que afectan el rendimiento del cable durante las pruebas de RF.

El segundo objetivo planteo la necesidad de conocer la influencia de cada parámetro en el rendimiento del cable, y se cumplió al estudiar los casos presentados en el marco referencial donde importantes empresas presentaban el valor medido de los parámetros  $S$  en sus cables como una ventaja competitiva.

El tercer objetivo específico expuso la necesidad de un modelo de análisis que permitiera comparar entre diversas alternativas de cables RF. El desarrollo de dicho modelo partió del marco teórico referencial. Gracias a la investigación técnica

desarrollada en el capítulo 2 fue posible la planeación de sus etapas, sin embargo, su ejecución se llevó a cabo en el los resultados del capítulo 4.

El cuarto objetivo establecía que se llevara a cabo una propuesta que a través del uso del modelo desarrollado en las primeras cuatro etapas, compitiera en precio y rendimiento, alcanzando ahorros anuales para la compañía. Este objetivo se logra en la propuesta presentada en la etapa 5 en los resultados del proyecto, cumpliéndose de igual forma el objetivo general del proyecto el cual requería la elaboración de un modelo de análisis que nos permitiera encontrar una alternativa de cables con ahorros económicos. De igual forma se comprobó la hipótesis planteada la cual suponía que a través de un modelo de análisis podíamos remplazar el cable actual sin afectar el rendimiento actual.

Finalmente se probó el modelo presentando una alternativa viable, con resultados tangibles, comprobado en producción, con justificación estadística, y con proyecciones de ahorro a futuro. Actualmente el proyecto ha generado un ahorro de \$20,096 dólares en la compra de 200 cables habiendo transcurrido 1 mes desde su implementación en la empresa.

Esta investigación abre paso a replicar este experimento en otros tipos de máquinas, permitiendo estandarizar un tipo de cable en toda la empresa, o encontrar la alternativa más viable para cada plataforma. También abre paso a un futuro proyecto para estudiar la viabilidad de elaborar nuestros propios cables RF y compararlos con las alternativas actuales.

## Referencias

- Avionics Department. (2013). Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook. Point Mugu: Naval Air Warfare Center Weapons Division.
- Beser, L., & Gilmore, R. (2003). Practical RF Circuit Design for Modern Wireless Systems. Norwood: Artech House.
- Bowick, C., Blyler, J., & Ajluni, C. (2008). RF Circuit Design Second Edition. Burlington: Newnes.
- Digikey Electronics. (16 de Febrero de 2018). Digikey Electronics. Recuperado de <https://www.digikey.com/product-detail/en/crystek-corporation/CCSMA18-MM-086F-72/744-1420-ND/2641968>
- Froelich, B., & Frobenius, R. (2015). RF Measurements Principles and Demostration. Mountain View: 2015.
- Grini, D. (2006). RF Basics, RF for Nin-RF Engineers. Dallas: Texas Instruments Inc.
- HuberSuhner. (2017). HuberSuhner. Recuperado de Literatura Hubersuhner: <https://literature.hubersuhner.com/Technologies/Radiofrequency/Microwavecabel/esEN/?page=1>
- Keysight Technologies. (3 de Marzo de 2018). Keysight Technologies. Recuperado de <https://www.keysight.com/en/pcx-x2015001/network-analyzers?cc=MX&lc=eng>
- Ludwing, R., & Bretchko, P. (2000). RF Circuit Design. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc.
- MegaPhase. (2018). MegaPhase. Recuperado de MegaPhase: [https://media-megaphase-production.s3.amazonaws.com/uploads/product/data\\_sheet/8/MP-ChipSet-DataSheet.pdf](https://media-megaphase-production.s3.amazonaws.com/uploads/product/data_sheet/8/MP-ChipSet-DataSheet.pdf)
- Mouser Electronics. (15 de Febrero de 2018). Mouser Electronics. Recuperado de <https://www.mouser.mx/>
- Nocedal, J. M. (2006). RF Jamming. Cholula, Puebla, Mexico: Universidad de las Americas Puebla.
- Pozar, D. M. (2012). Microwave Engineering Fourth Edition. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
- Rojas, R. (2010). El Proceso de la Investigación Científica. Mexico D.F.: Trillas.

Sayre, C. W. (2008). Complete Wireless Design. DOI: 10.1036/0071544526: McGraw-Hill.

Skyworks Inc. (2018, February 15). Skyworks. Recuperado de <http://www.skyworksinc.com/>

Stoehr, M. D. (2012, April 12). RF Basics. Recuperado de Maxim Integrated: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5300>

Teledyne Storm Microwave. (2018). Teledyne Storm Microwave. Recuperado de Teledyne Storm Microwave: <https://www.teledynestorm.com/pdf/VSWRPerformance.pdf>

Teppati, V., Perrero, A., & Sayed, M. (2013). Modern RF and Microwave Measurement Techniques. New York: Cambridge University Press.

Tule, A., & Gamez, A. (2016, Mayo). RF Fundamentals. Mexicali, Baja California, Mexico: Skyworks.