

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN REPETIDOR DE TELEFONÍA CELULAR EN LA BANDA DE 850 MHZ PARA ZONA RURAL

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

Luis Antonio Lazo Llancachagua

ASESOR: Dr. Manuel Yarlequé Medina

Lima, noviembre del 2014

Resumen

El presente trabajo de tesis tiene por objetivo diseñar y simular un repetidor de telefonía celular para área rural, el cual trabajará en la banda de 850 MHz y tendrá una ganancia mínima de 45 dB.

Inicialmente se hace una breve reseña acerca de las tecnologías celulares en el mundo, luego se presentan las características de la banda de frecuencias en el Perú, posteriormente se indican los problemas de cobertura que podrían existir y se presenta a los repetidores celulares como una posible solución.

El diseño de sistemas en alta frecuencia, como es el caso, involucra algunos conceptos adicionales tales como: parámetros-S, figura de ruido, intermodulación, etc. Por ello una parte de este trabajo es abordar esos conceptos.

El diseño y la implementación del sistema se realizan usando el software ADS de Agilent. Primero se miden los parámetros-S de todos los dispositivos a utilizar, luego esta información se carga en el software y se realizan las correcciones necesarias. Por último se construye el repetidor y se realizan las pruebas necesarias.

Índice

Resumen	2
Índice.....	3
Introducción	6
1 Tecnología celular	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Tecnología celular 1G, 2G, 3G, 4G.....	7
1.2.1 Primera Generación	7
1.2.2 Segunda Generación.....	7
1.2.3 Tercera Generación.....	8
1.2.4 Cuarta generación	8
1.3 Despliegue de la red celular en el Perú	8
1.4 Canalización de frecuencias en el Perú	10
1.5 Indicador de Intensidad de Señal de Recepción	11
1.6 Factores que influyen en la intensidad de la señal celular	12
1.6.1 Fluctuaciones por incremento de abonados	12
1.6.2 Pocas estaciones bases en áreas rurales.....	12
1.6.3 Materiales de Construcción y Puntos Muertos.....	13
1.6.4 Frecuencia y Limitaciones Tecnológicas.....	13
1.7 Repetidores Celulares	13
1.7.1 Partes de un Repetidor.....	14
1.7.2 Empresas dedicadas a comercializar repetidores en el Perú.....	15
2 Transmisores y receptores para telefonía celular.....	16
2.1 Introducción.....	16
2.2 Parámetros-S	16
2.2.1 Definición.....	16
2.2.2 Medición de los parámetros-S	17
2.3 Ruido y distorsión en sistemas de RF.....	18
2.3.1 Figura de ruido	18

2.3.2	Figura de ruido en componentes pasivos	20
2.3.3	Figura de ruido equivalente para un sistema de varias etapas	20
2.4	Rango dinámico y distorsión por intermodulación	21
2.4.1	Señal mínima detectable	21
2.4.2	Ganancia de compresión	22
2.4.3	Distorsión por intermodulación	22
2.4.4	Punto de intersección de tercer orden	23
2.4.5	Rango dinámico:.....	24
2.5	Ecuación de Friis	25
2.5.1	Definición:.....	26
3	Diseño y análisis del repetidor	28
3.1	Introducción	28
3.2	Especificaciones de diseño.....	28
3.3	Diagrama de bloques del repetidor	28
3.4	Elección de componentes.....	29
3.4.1	Amplificador de bajo ruido (LNA)	29
3.4.2	Amplificador intermedio (MA).....	30
3.4.3	Amplificador de potencia (PA)	31
3.4.4	Duplexor	31
3.5	Análisis del sistema planteado.....	32
3.5.1	Figura de ruido	32
3.5.2	Señal mínima detectable	33
3.5.3	Diagrama de ganancia y figura de ruido	34
3.5.4	Diagrama de Potencia	34
3.5.5	Radio de cobertura teórico	36
3.6	Diseño y construcción de las placas de evaluación de los dispositivos elegidos.....	36
3.6.1	Parámetros del sustrato.....	36
3.6.2	Advanced Design System (ADS)	37

3.6.3	Diseño y construcción de las placas de evaluación	37
3.7	Medición de los parámetros S	39
3.7.1	Duplexor	39
3.7.2	LNA	41
3.7.3	MA	43
3.7.4	PA	44
3.8	Diseño final del sistema propuesto	45
4	Simulación y Pruebas	46
4.1	Introducción	46
4.2	Simulación del sistema propuesto	46
4.3	Correcciones al sistema	47
4.4	Resultados finales	49
	Conclusiones	52
	Recomendaciones	53
	Bibliografía	54

Introducción

Debido a la baja densidad poblacional que existe en zonas rurales los operadores móviles no incrementan su cobertura celular. Esto se debe a que no les es rentable construir una estación base para dar servicio a muy pocos usuarios. Debido a ello, pequeños poblados no cuentan con el nivel de señal suficiente para establecer una buena comunicación con la estación base, por lo que se presentan problemas de pérdidas de llamadas o en el peor de los casos no existe cobertura.

Se ve la necesidad de desarrollar soluciones que permitan incrementar el área de cobertura a bajo costo. Una solución es utilizar repetidores analógicos en lugares estratégicos que refuercen las señales provenientes de la estación base y así mejorar la comunicación. Estos repetidores amplifican la señal a nivel físico, sin importar la modulación usada.

Inicialmente se propone construir un repetidor que opere en la banda de 850 MHz y provea una ganancia de 45 dB. Para lo cual es fundamental conocer la canalización de frecuencias en el Perú y los niveles de potencia que manejan los dispositivos móviles.

Para el diseño del repetidor se harán mediciones de los parámetros-S a todos los dispositivos que conforman el sistema, se hará un análisis desde el punto de vista de transmisores y receptores celulares, y se afrontarán problemas de inestabilidad. Finalmente se construirá el repetidor y se harán las mediciones necesarias para probar su correcto funcionamiento.

1 *Tecnología celular*

1.1 *Introducción*

Las redes celulares han ido evolucionando constantemente hasta llegar a donde se encuentran ahora. Sin embargo todavía existen problemas relacionados con la cobertura celular, que pueden ser resueltos usando repetidores celulares. Por lo tanto antes de profundizar en el tema de los repetidores es necesario conocer algunas características de la red celular.

1.2 *Tecnología celular 1G, 2G, 3G, 4G*

1.2.1 *Primera Generación*

La primera generación de redes móviles, o 1G empezó alrededor del año 1970. Utilizaban métodos basados en la división del área de cobertura en celdas y en la reutilización de frecuencias. Estos primeros sistemas utilizaban canales de tráfico analógicos. Uno de los estándares más destacado que surgió con esta tecnología fue AMPS. Con la aparición de la red 1G el mercado de telefonía móvil creció en gran medida.

Antes de 1G, si existían equipos, pero estos teléfonos “móviles” se veían restringidos por su limitada movilidad y mal servicio; además, eran pesados y extremadamente caros.

1.2.2 *Segunda Generación*

A inicios de 1990 aparecen las redes 2G, y se diferencian de las primeras por ser digitales. Aquí aparecen las tecnologías IS-54 o D-AMPS, CDMAOne o IS-95 y GSM, siendo esta última la que se expandió por todo el mundo y en la actualidad continua siendo el estándar más utilizado. GSM está basado en FDMA y TDMA, y en la actualidad opera en las bandas de 850, 900, 1800 y 1900 [1].

2G permite una mejor calidad de las transmisiones de voz, mayor capacidad de usuarios, mayor confiabilidad de las conversaciones y la posibilidad de transmitir

mensajes alfanuméricos (SMS). Sin embargo la comunicación de datos continua siendo limitada.

Una paso intermedio hacia la tercera generación son las redes 2.5G (o GPRS). Esta es una extensión de GSM para mejorar la transición de datos por paquetes. Permite envío de MMS, navegación WAP, y servicios IPV4 (internet).

1.2.3 Tercera Generación

Con el crecimiento del internet y las comunicaciones personales, la necesidad de mejor transmisión de datos se hizo evidente. 3G brinda la posibilidad de transferir tanto voz y data de manera simultánea a través de telefónica móvil. Es decir, permite internet, tv móvil y videollamadas.

Alcanza velocidades de hasta 2 Mb/s y utiliza el estándar UMTS, el cual está basado en WCDMA [1].

Al igual que en la generación anterior, aquí también existe una transición hacia las redes 4G. Estos son 3.5G y 3.75G, los cuales son básicamente redes 3G modificadas que alcanzan velocidades de trasmisión más altas. En el caso de 3.5G la actualización de la tecnología de transmisión de datos se conoce como HSDPA, en 3.75G se llama HSUPA.

1.2.4 Cuarta generación

Aquí se encuentran las llamadas redes 4G LTE. Estas redes están basadas en el protocolo IP. La principal diferencia con las tecnologías anteriores es que permiten velocidades de hasta 326,5 Mbps. Estas redes pueden operar en muchas bandas de frecuencias distintas. En el Perú se licitó las bandas de 1710 – 1770 MHz y 2110 – 2170 MH para el funcionamiento de redes 4G [2].

1.3 Despliegue de la red celular en el Perú

Actualmente existen cuatro operadores móviles en el país: Telefónica móviles (Movistar), América móvil (Claro), Entel (Nextel) y Viettel. Cada uno de estos operadores tiene un área de cobertura limitada, los dos primeros ofrecen cobertura en la mayoría de ciudades del país y el último cubre desde Tumbes hasta Tacna, Cusco y Puno. Como se muestra en la Tabla 1.1, ninguna de los operadores cubre

todo el mercado móvil, es más advierten que la cobertura de un distrito no necesariamente significa que se cubran el total de centros poblados del mismo.

Tabla 1.1 Cobertura Celular en el Perú

Cobertura Nacional por Operador* 1/.	jun-10			
	Telefónica Móviles	América Móvil	Nextel	Mercado Móvil
Distritos con cobertura geográfica del servicio móvil				
Total Distritos Atendidos 2/.	1,345	1,396	259	1,584
Tasa de Crecimiento Interanual	17%	1%	1%	7%
(*) Información a fin de período. 1/. Según el censo del 2005. 2/. La indicación de cobertura por distrito, no significa la cobertura total de los centros poblados incluidos en el mismo. Fuente: Empresas Operadoras.				

Por otro lado Osiptel ofrece una herramienta para conocer la cobertura celular que brindan los operadores en las distintas ciudades y lugares del Perú [4]. Para el presente trabajo se eligió al alzar la provincia de Concepción, departamento de Junín. En la Figura 1.1 se muestra la cobertura móvil en esta provincia. En este gráfico los círculos blancos indican que en esa zona no existe cobertura de ningún operador. Panoramas similares al mostrado en este ejemplo se pueden encontrar en las distintas ciudades del país.

Queda en evidencia la necesidad de buscar formas para ampliar el rango de cobertura de las estaciones bases o para mejorar la comunicación en lugares donde exista un nivel de señal muy bajo.

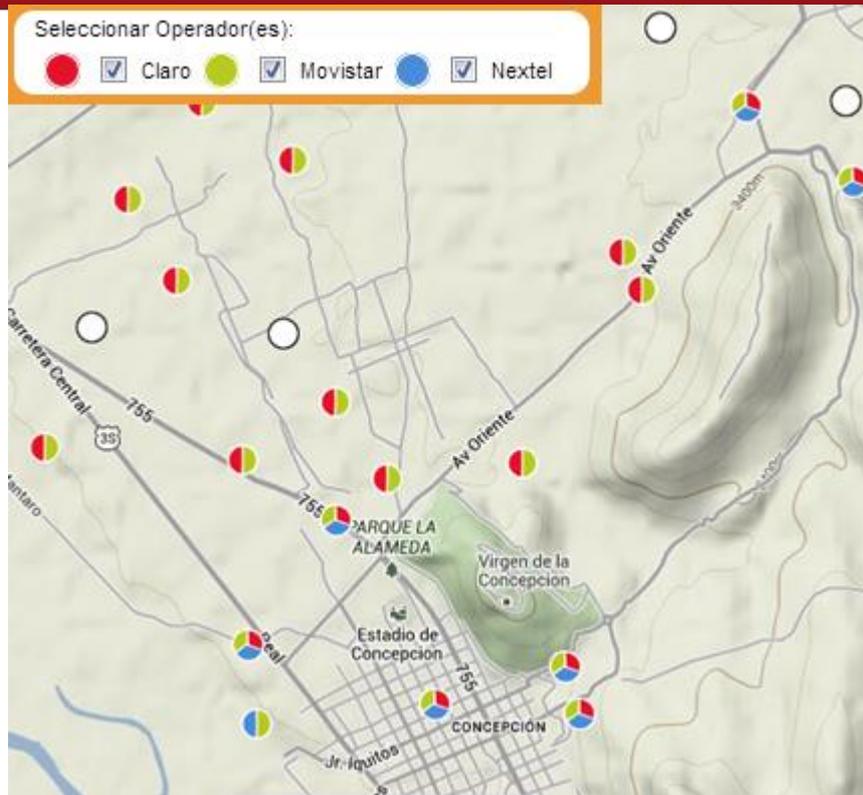


Figura 1.1 Cobertura celular en la provincia de Concepción, distrito de Junín

1.4 Canalización de frecuencias en el Perú

En el Perú los operadores móviles trabajan principalmente en las bandas de 850 MHz y 1900 MHz. Cada una de estas bandas se divide, a su vez, en otras dos; una de subida (Uplink) y otra de bajada (Downlink). La banda de subida es aquella por la cual la información se trasmite desde la estación móvil hasta la estación base, mientras que en la banda de bajada la información viaja desde la estación base hacia la estación móvil, esto se muestra de forma gráfica en la Figura 1.2. En la Tabla 1.2 se muestra la canalización de frecuencias en el Perú.

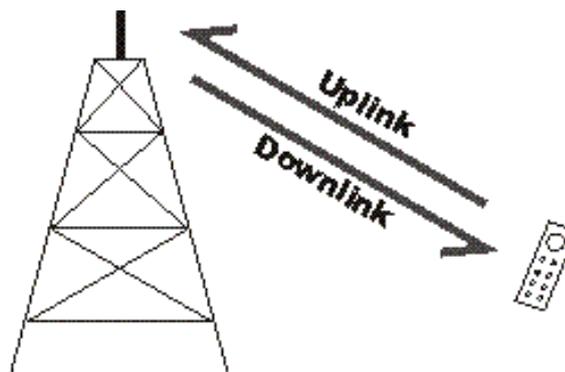


Figura 1.2 Dirección de la banda de subida y bajada

Tabla 1.2 Canalización de Frecuencias Perú [5]

Bandas de 824 – 849 MHz y 869 – 894 MHz (Servicio telefónico móvil)				
Banda	Rango de Frecuencias (MHz)		Empresa	Área de Asignación
	Ida (Uplink)	Retorno (Downlink)		
A	824 - 835	869 - 880	Telefónica Móviles S.A.	A Nivel Nacional
	845 – 846,5	890 - 891,5		
B	835 - 845	880 - 890	América Móvil Perú S.A.C.	A Nivel Nacional
	846,5 - 849	891,5 - 894		
-	902 - 915	947 - 960	Viettel Perú S.A.C.	A Nivel Nacional
Bandas 1 850 – 1 910 MHz y 1 930 – 1 990 MHz (Servicios móviles y/o fijos)				
Banda	Rango de Frecuencias (MHz)		Empresa	Área de Asignación
	Ida	Retorno		
A	1 850 - 1 865	1 930 - 1 945	América Móvil Perú S.A.C.	A Nivel Nacional
D	1 865 - 1 870	1 945 - 1 950	Nextel del Perú S.A.	A Nivel Nacional
B	1 870 - 1 882,5	1 950 - 1 962,5	Telefónica Móviles S.A.	A Nivel Nacional
E	1 882,5 - 1 895	1 962,5 - 1 975	Nextel del Perú S.A.	A Nivel Nacional
F	1 895 - 1 897,5	1 975 - 1 977,5	América Móvil Perú S.A.C.	A Nivel Nacional
C	1 897,5 - 1 910	1 977,5 - 1 990	Viettel Perú S.A.C.	A Nivel Nacional
Bandas 1 710 – 1 770 MHz y 2 110 – 2 170 MHz				
Banda	Rango de Frecuencias (MHz)		Empresa	Área de Asignación
	Ida	Retorno		
A	1 710 - 1 730	2 110 - 2 130	Telefónica Móviles S.A.	A Nivel Nacional
B	1 730 - 1 750	2 130 - 2 150	Americatel Perú S.A.	A Nivel Nacional
C	1 750 - 1 770	2 150 - 2 170	-	-

1.5 Indicador de Intensidad de Señal de Recepción

La unidad para medir la potencia recibida por los celulares es el dBm, esto es la relación de la potencia recibida expresada en decibelios con respecto a 1 mW. La utilidad de usar el dBm como unidad medida se debe a que en RF se trabaja con potencias muy pequeñas, por lo que para no trabajar con demasiados decimales, y simplificar la lectura es que se utiliza una unidad logarítmica como el dBm [6].

El rango en el que operan la mayoría de teléfonos móviles se encuentra entre -50 dBm y -110 dBm [7]. Donde -50 dBm significa que la señal recibida es excelente y -110 dBm, que la señal es pobre y probablemente no se pueda establecer una correcta comunicación con la estación base. En la Tabla 1.3 se muestra los niveles de intensidad que podría tener la señal celular, la calidad que esta representa y finalmente, una descripción del significado de estos niveles.

Tabla 1.3 Niveles de Señal Celular [7]

Potencia (dBm)	Calidad de señal	Descripción
-50	Perfecta	Muy cerca de la estación base
-70 a -60	Muy buena	-
-85 a -80	Normal	Ciudad
-95 a -90	Poco débil	-
-98 a -95	Débil	Pérdida de llamadas
-100 a -98	Mala	Dificultad para mantenerse conectado a la red
-100 o menos	No utilizable	Sin conexión en la mayoría de teléfonos

1.6 Factores que influyen en la intensidad de la señal celular

1.6.1 Fluctuaciones por incremento de abonados

La señal proveniente de las torres celulares puede variar alrededor de 5 dB [7]. Una de las razones principales por las que suceden estas variaciones se debe a la “carga de la torre”. Esto último se refiere a que cuanto mayor sea la cantidad de usuarios conectados con a la torre, menor será la intensidad de señal que esta brinde.

1.6.2 Pocas estaciones bases en áreas rurales

En muchas áreas rurales la densidad poblacional es muy baja, por lo que resulta inviable económicamente para los operadores móviles construir nuevas estaciones base. En estos casos la única opción es utilizar repetidores celulares en los hogares para mejorar la intensidad de la señal. Además debido a que existe muy poca interferencia por recepción simultánea, la calidad de la señal mejorara considerablemente después de la amplificación.

1.6.3 Materiales de Construcción y Puntos Muertos

Muchos materiales de construcción, como el concreto o el metal, pueden reducir la intensidad de la señal celular al interior de las construcciones. Las mallas de alambre, cubiertas metálicas y troncos de gran tamaño también debilitan la señal provocando que la recepción sea muy débil [7].

Fuera de la ciudad: Los bosques densos, acantilados y montañas son factores que debilitan la señal celular. Incluso las áreas bajas alrededor de ríos o lagos suelen tener problemas de señal

En las grandes ciudades, los edificios muy altos suelen tener problemas debido a que la estación base se encuentra transmitiendo a una menor altura.

1.6.4 Frecuencia y Limitaciones Tecnológicas

Las diferentes portadoras utilizadas en las redes celulares también influyen en el rango de cobertura. Por ejemplo una portadora de 850 MHz viajará casi el doble de distancia que una de 1900 MHz.

Otro factor es la tecnología utilizada. Por ejemplo, CDMA puede cubrir mayores distancias que GSM [7].

1.7 Repetidores Celulares

La baja penetración de telefonía celular en zonas rurales, debido a la inviabilidad económica para la implementación de estaciones base obliga al uso de soluciones tipo repetidores celulares que permitan amplificar la señal de la estación base y de esta manera aumentar la zona de cobertura

Un repetidor celular es un dispositivo que funciona a modo de un amplificador bidireccional. Se usa para impulsar la señal celular y se compone de una antena para recibir, un amplificador de señal, y una antena para retransmitir [8].

Adicionalmente de permitir establecer una buena comunicación con la estación base. El uso de repetidores implica una mayor duración de la batería y un menor nivel de radiación emitida por parte del teléfono móvil.

1.7.1 Partes de un Repetidor

El repetidor típico se compone por tres elementos fundamentales. Una antena para el lado de la estación base, otra para el lado de los dispositivos móviles y un amplificador de señal [9].

1.7.1.1 Antena para el lado de la estación base

Es recomendable que esta antena sea de tipo direccional (Antena capaz de concentrar la mayor parte de la energía radiada en una dirección en concreto), ya que así puede ser alineada con la estación base y proveer la mejor señal posible. Si la ganancia del repetidor es muy alta, las antenas de este tipo se hacen necesarias para evitar las interferencias introducidas por fuentes no deseadas.

1.7.1.2 Antena para el lado de los dispositivos móviles

En este caso lo aconsejable es tener una antena omnidireccional o sectorial (Antena que concentra la mayor parte de la energía radiada en área específica) dependiendo del caso. La ventaja de esto es que la señal será distribuida en todo el área de interés. En contrapartida el alcance de estas antenas es menor que el de las antenas direccionales.

1.7.1.3 Amplificador de señal

Todos los repetidores incluyen algún tipo de amplificador de señal. Desde los más baratos, los cuales proveen de 20-50 dB de ganancia; hasta los más caros que proporcionan ganancias por encima de los 50 dB. Es necesario notar que el decibelio es una unidad logarítmica por lo que, por ejemplo, una ganancia de 30 dB significa un aumento de 1000 veces la señal entrante.

Un aspecto fundamental a tener en cuenta es el aislamiento entre las dos antenas. Ya que si el aislamiento es pobre, el amplificador puede entrar en un lazo de realimentación y volver al sistema inestable.

El aislamiento se puede mejorar con el uso de antenas direccionales y sectoriales. Otras opciones serían aislar las antenas por medios físicos que incrementen el aislamiento o aumentar la separación entre las antenas.

1.7.2 Empresas dedicadas a comercializar repetidores en el Perú

En el país existen diversas empresas que se dedican a venta de repetidores y todas ellas ofrecen distintos tipos de soluciones para determinados casos. Los precios varían dependiendo el tipo de aplicación, la ganancia requerida, la cobertura y los accesorios adicionales necesarios. Las principales empresas dedicadas a este rubro son: Opetel Perú, INTECSA, Telecom.

Vale la pena resaltar que estas empresas básicamente se dedican a importar repetidores y a comercializarlos, es decir, ninguna cuenta con tecnología propia para construir sus propios repetidores.

En la tabla 1.4 se muestran las características de uno de los repetidores que comercializan estas empresas. En este caso se presenta un repetidor para iDEN (tecnología todavía es utilizada por Nextel del Perú – Entel)

Tabla 1.4 Características Repetidor CEL800T [10]

GENERALES	
Banda de operación serie CEL800T	800Mhz
Tecnologías soportadas	iDEN
Modo de Operación	Bi-direccional Full Duplex
Consumo en régimen típico	5 W
Alimentación estándar	5 VDC
Temperatura ambiente en operación	-30 a 55 °C
Humedad relativa en operación	< 95%
Dimensiones	Alto: 30 mm / Ancho: 140 mm / Largo: 180 mm

ESPECIFICACIONES	DOWNLINK	UPLINK
	DL	UL
Rango de frecuencias	851-866 MHz	806-821MHz
Ganancia máxima(dB)	50 +/- 2dB	50 +/- 2dB
Potencia de salida (1dB comp.)	10 +/- 2dBm	15 +/- 2dBm
ALC	20 dB	
Ripple	< 8 dB	
Perdida de retorno	>10 dB	
Figura de ruido	< 6 dB	

2 Transmisores y receptores para telefonía celular

2.1 Introducción

Es necesario conocer los conceptos fundamentales del diseño en alta frecuencia, ya que los sistemas de telefonía celular operan en estas frecuencias. Además estos conceptos nos ayudarán a comprender mejor el comportamiento de los dispositivos que serán utilizados posteriormente. Al mismo tiempo servirán para el posterior análisis del repetidor.

2.2 Parámetros-S

Los parámetros-S son importantes en el diseño en RF debido a que, en comparación a otros parámetros, son más fáciles de medir y trabajar a altas frecuencias. Otra ventaja es que las ondas viajeras, a diferencia de los voltajes y corrientes, no varían a lo largo de las líneas de transmisión; por lo que pueden ser medidos a cierta distancia de los equipos de medición siempre y cuando estén conectados por líneas con bajas pérdidas [11].

2.2.1 Definición

Los parámetros-S son un conjunto de parámetros que relacionan las ondas viajeras que se transmiten o reflejan en una red de “n” puertos conectada a líneas de transmisión [11]. En una red de 2 puertos, como la mostrada en la Figura 2.1 parámetros S se definen como:

$$b_1 = s_{11}a_1 + s_{12}a_2 \quad 2.1a$$

$$b_2 = s_{21}a_1 + s_{22}a_2 \quad 2.1b$$

Los parámetros s_{11} , s_{12} , s_{21} , s_{22} son:

$$s_{11}|_{a_2=0} = \frac{\text{Onda de voltaje reflejada en el puerto 1}}{\text{Onda de voltaje incidente en el puerto 1}} \quad 2.2a$$

$$s_{22}|_{a_1=0} = \frac{\text{Onda de voltaje reflejada en el puerto 2}}{\text{Onda de voltaje incidente en el puerto 2}} \quad 2.2b$$

$$s_{21}|_{a_2=0} = \frac{\text{Onda de voltaje transmitida hacia el puerto 2}}{\text{Onda de voltaje incidente en el puerto 1}} \quad 2.2c$$

$$s_{12}|_{a_1=0} = \frac{\text{Onda de potencia transmitida hacia el puerto 1}}{\text{Onda de voltaje incidente en el puerto 2}} \quad 2.2d$$

En otras palabras s_{11} es una medida del coeficiente de reflexión a la entrada e indica la porción de la onda que regresa hacia la fuente. s_{22} indica el coeficiente de reflexión a la salida e indica la porción de onda que retorna a la carga. s_{21} representa la ganancia directa de la red. Finalmente s_{12} es la ganancia inversa de la red. En el caso de un amplificador s_{21} es lo que normalmente le llamamos ganancia y s_{12} idealmente debería ser cero [11].

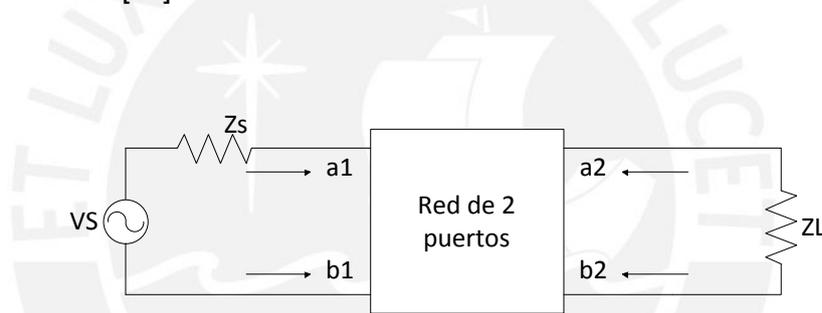


Figura 2.1 Red de dos puertos [11]

2.2.2 Medición de los parámetros-S

Actualmente existen programas sofisticados que pueden simular sistemas complejos de RF a partir de subsistemas. Estos programas requieren contar con los parámetros-S de cada componente. He aquí la importancia en la correcta medición de estos parámetros.

Una forma de hacer estas mediciones es con ayuda de un VNA (Vector Network Analyzer). Este instrumento mide los parámetros-S de una red lineal para un rango de frecuencias. Con la ayuda del VNA se puede caracterizar por completo cualquier tipo de red.

2.3 Ruido y distorsión en sistemas de RF

2.3.1 Figura de ruido

En la actualidad es común trabajar con señales muy débiles y el ruido tiende a distorsionar la señal. Existen parámetros que miden la capacidad del sistema para trabajar con señales débiles, estos son: La sensibilidad, la tasa de error de bit (BER) y la figura de ruido. De estos parámetros la figura de ruido es el único parámetro que no solo sirve para caracterizar el sistema entero, sino también a los componentes de este, por ejemplo la etapa de pre-amplificación, la etapa de amplificación media, y la etapa de amplificación de potencial; que conformarían un repetidor. Es decir la figura de ruido es un parámetro clave que diferencia un componente o un sistema de otro. Adicionalmente si se conoce la figura de ruido de cada componente del sistema es posible hallar la figura de ruido total del sistema.

La figura de ruido se define como la relación entre la “relación señal a ruido a la entrada (SNR_i)” y la “relación señal a ruido a la salida (SNR_o)” [12].

$$F = \frac{SNR_i}{SNR_o} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \quad 2.3$$

Entonces la figura de ruido es la disminución de la SNR_o con respecto a la SNR_i. Un amplificador ideal amplificaría en igual medida a la señal y al ruido, y no variaría la SNR. Por el contrario un amplificador real agrega un ruido interno, disminuyendo la SNR_i.

La figura de ruido es independiente de la ganancia. En la Figura 2.2 (a) se muestra la señal a la entrada de un amplificador y en la Figura 2.2 (b) se muestra la señal a la salida. Se observa que la señal de entrada está 40 dBm por encima del ruido, que la ganancia del amplificador es 20 dBm y que la figura de ruido es 10dBm. Si la potencia de la señal de entrada sería 30 dBm, entonces la potencia de salida sería 50 dBm; y la figura de ruido continuaría siendo 10 dBm. Con esto se quiere mostrar que la figura de ruido es independiente de la señal de entrada.

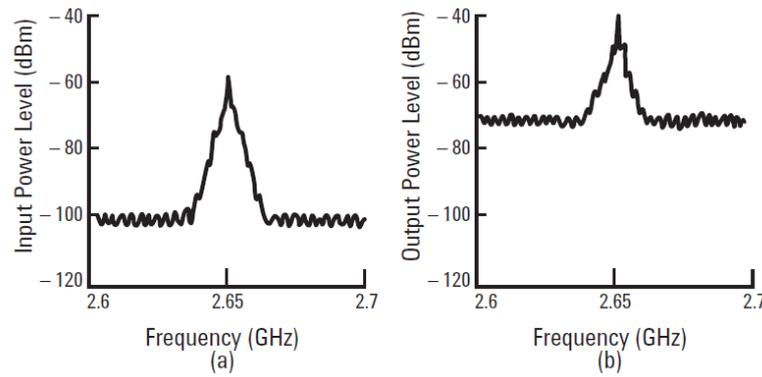


Figura 2.2 Niveles de señal y ruido típicos vs. Frecuencia (a) A la entrada del amplificador (b) A la salida [12].

A partir de la ecuación 1.3 se deduce la siguiente ecuación:

$$F = \frac{Na + kToBG}{kToBG} \tag{2.4}$$

Dónde:

Na: Ruido añadido por el sistema sometido al análisis

kTo: $4 * 10^{-21} \text{ W/Hz}$. Densidad espectral de potencia cuando $To=290 \text{ K}$, y k es la constante de Boltzmann

B: Ancho de banda

G: Ganancia del sistema

La ecuación (2) es la definición estándar de la IEEE, es decir, la figura de ruido se define como la relación entre la potencia total del ruido a la salida y la potencia del ruido a la salida debido a la entrada, donde la temperatura de la fuente de entrada es 290 K.

Por convención a F de la ecuación (2) se le llama “Factor de ruido”, y el término “Figura de ruido (NF)” se utiliza para referirse a F expresado en Decibelios.

$$NF = 10 \log F \tag{2.5}$$

2.3.2 Figura de ruido en componentes pasivos

Usando los conceptos anteriores de parámetros-S y figura de ruido se demuestra que la temperatura equivalente de ruido de un dispositivo pasivo es [13]:

$$T_e = (A - 1)T \quad 2.6$$

Dónde:

A: Atenuación del dispositivo (1/G)

T: Temperatura física

Se puede considerar que la temperatura física (T) será 290 K entonces la figura de ruido será:

$$NF = 1 + \frac{T_e}{T_o}$$

$$NF = 1 + \frac{(A - 1)290K}{290K}$$

$$NF = A \quad 2.7$$

Como se observa la figura de ruido de cualquier componente pasivo será aproximadamente la atenuación del mismo.

2.3.3 Figura de ruido equivalente para un sistema de varias etapas

La figura de ruido total de un sistema puede ser calculada mediante la siguiente ecuación [12]:

$$F_{sys} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_{n-1}} \quad 2.8$$

Dónde:

F_n : Figura de ruido de la etapa n

G_n : Ganancia de la etapa n

n: número de etapas del sistema

De la ecuación se observa que la etapa que más contribuirá a la figura de ruido total será la primera ya que las demás se ven atenuadas por las ganancias.

2.4 Rango dinámico y distorsión por intermodulación

2.4.1 Señal mínima detectable

Para que un receptor pueda identificar una señal a su entrada, es necesario que esta posea una potencia mínima, este nivel de señal es la denominada señal mínima detectable (Por sus siglas en inglés: MDS).

La MDS determina la mínima relación señal a ruido (SNR) que se debe de tener a la entrada de un receptor. En la Figura 2.3 se muestra el diagrama de un receptor.

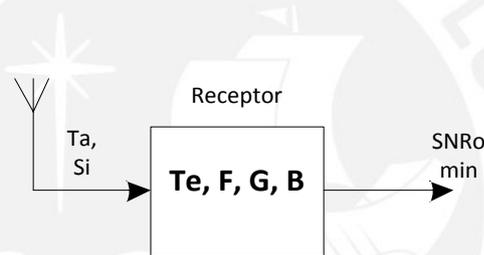


Figura 2.3 Diagrama de un receptor

La SNR varía dependiendo del tipo de aplicación, entonces una vez conocida la mínima SNR es posible hallar, a partir de esta, la potencia mínima detectable mediante la siguiente ecuación [11]:

$$S_{i_{min}} = kB[Ta + (F - 1)T_o] \left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{min} \quad 2.9$$

Dónde:

k: Constante de boltzmann

B: Ancho de banda del receptor

Te: Temperatura equivalente al ruido del receptor

Ta: Temperatura equivalente de la antena

To: 290 K

F: Figura de ruido

2.4.2 Ganancia de compresión

En la mayoría de amplificadores la salida tiende a saturarse cuando la entrada es muy grande, es decir, la ganancia del amplificador se comporta de manera lineal hasta cierto “punto” y a partir de este, la ganancia empieza a disminuir.

Para poder cuantificar la región en la que el amplificador se comporta de manera lineal se define el **punto de 1dB de compresión** como el punto en el cual la potencia de salida ha disminuido en 1 dB con respecto de la respuesta ideal del amplificador. En la figura 2 se muestra esta definición de manera gráfica.

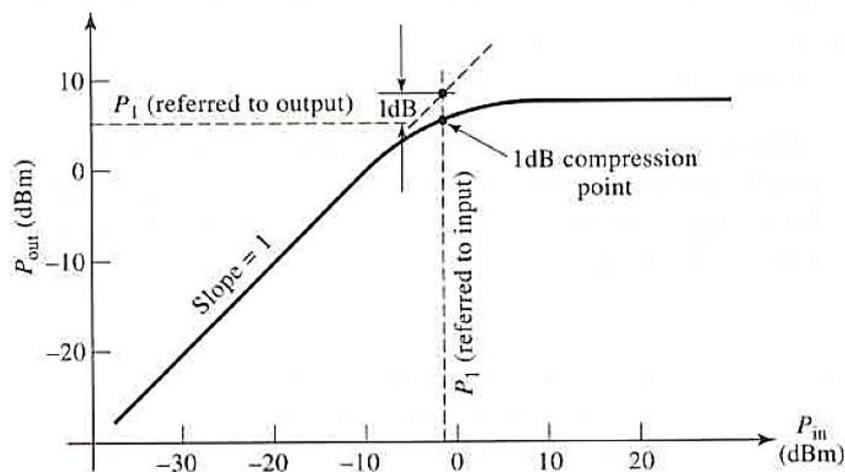


Figura 2.4 Definición del punto de 1dB de compresión para un amplificador [11].

2.4.3 Distorsión por intermodulación

Si se introduce una señal que contiene dos frecuencias w_1 y w_2 a la entrada de un amplificador entonces el espectro que se tendrá a la salida estará compuesto por armónicos de la forma.

$$mw_1 + nw_2$$

2.10

Dónde:

$m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Esta combinación de dos frecuencias es llamada *productos de intermodulación* y el *orden* está dado por $|n|+|m|$. Si se grafica el espectro de los *productos de intermodulación* de segundo y tercer orden entonces se tendrá lo que se muestra en la Figura 2.5.

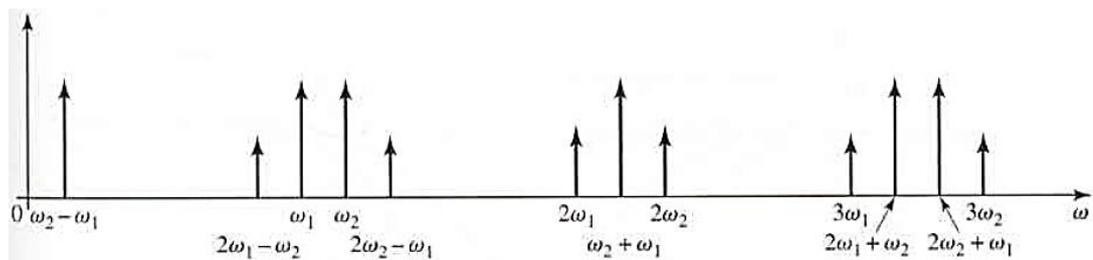


Figura 2.5 Espectro de salida de los productos de intermodulación de segundo y tercer orden para dos tonos [11].

Vale la pena resaltar que en un amplificador se trata de evitar estos armónicos ya que distorsionan la señal de salida.

Generalizando para una señal de entrada arbitraria compuesta por muchas frecuencias de amplitud y fase variable, los armónicos $2\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_2 - \omega_1$ distorsionaran la señal. Este efecto se conoce como distorsión de intermodulación de tercer orden.

2.4.4 Punto de intersección de tercer orden

La potencia de salida de los productos de tercer orden se incrementa proporcionalmente al cubo de la potencia de entrada. Es decir para señales de entrada pequeñas los productos de tercer orden serán pequeños, pero estos se incrementaran rápidamente cuando la potencia de la señal de entrada aumente.

La potencia de salida del producto de primer orden es proporcional a la potencia de entrada y estará representado por una recta con pendiente unitaria. A su vez, la recta que describe el comportamiento de los productos de tercer orden tiene pendiente

igual a tres. Debido a que las rectas poseen pendientes distintas, estas se intersectarán. Esta intersección hipotética es llamada punto de intercesión de tercer orden y en el caso de amplificadores es normalmente especificada con respecto a la salida. En la Figura 2.6 se muestra todo lo anterior de forma gráfica.

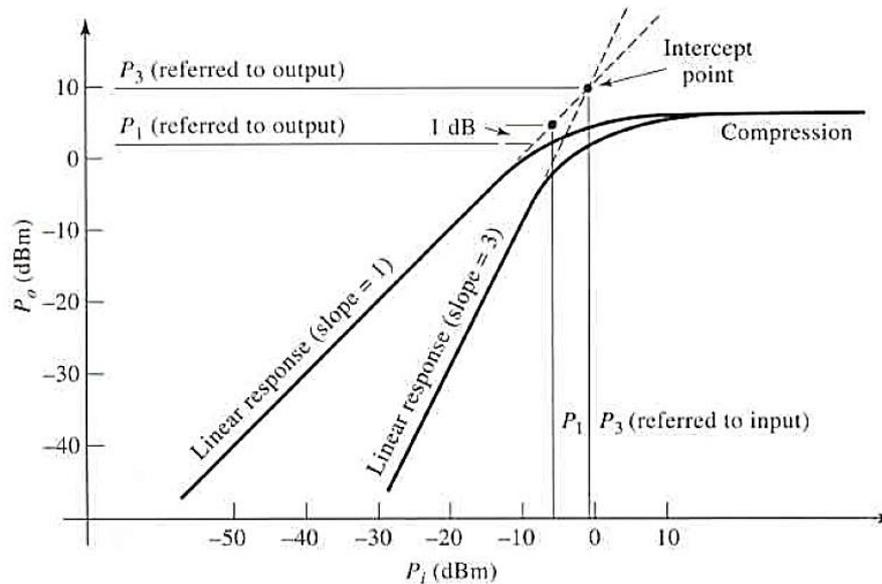


Figura 2.6 Punto de intersección de tercer orden [11].

2.4.5 Rango dinámico:

El rango dinámico define los niveles máximo y mínimo que podrá tener la señal de un dispositivo, para que este se comporte de la manera deseada. Para un amplificador de potencia este rango está limitado en la parte inferior por el ruido y en la parte superior por el punto de saturación. A este rango de operación lineal del amplificador se le llama *rango dinámico lineal* (DR_l). En el caso de amplificadores de bajo ruido el rango está limitado en la parte inferior por el ruido y por la potencia en la cual la distorsión por intermodulación llega a ser inaceptable. A este último rango se le llama *rango dinámico libre de espurios* (DR_f). En la figura 5 se muestran estos rangos.

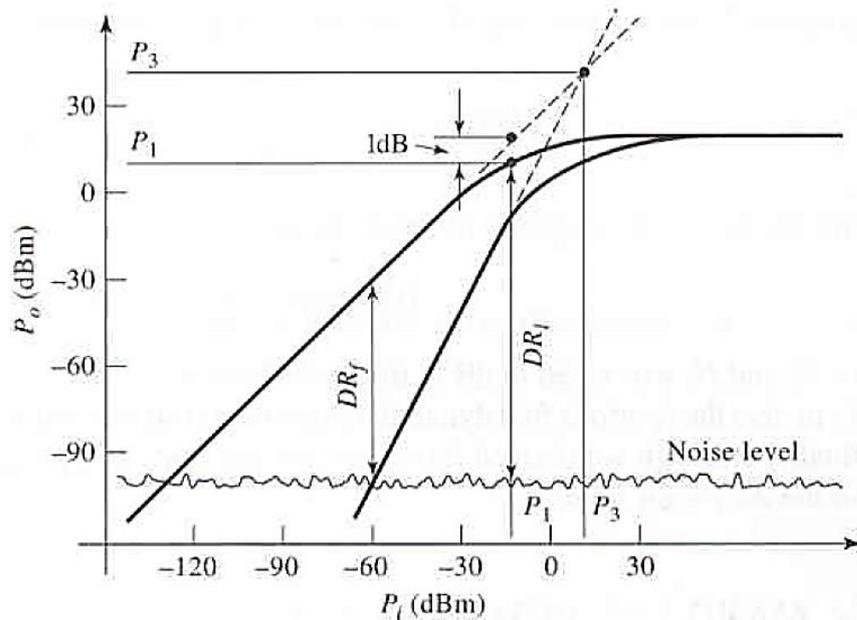


Figura 2.7 Rango dinámico lineal y rango libre de espurios [11].

Como se observa el *rango dinámico lineal* (DR_l) está limitado por el piso de ruido y el punto de 1 dB de compresión. En el caso de sistemas de recepción es conveniente referirse al *rango dinámico lineal* (DR_l) en términos de señal mínima detectable.

En *rango dinámico libre de espurios* (DR_f) se define como la máxima potencia para la cual la potencia de los productos de intermodulación de tercer orden es igual al nivel de ruido. Este rango puede ser calculado como:

$$DR_f(dB) = \frac{2}{3}(P_3 - N_o) \tag{2.11}$$

Para P_3 y N_o expresados en dB o dBm. Finalmente si se conoce la SNR de salida, esta puede ser añadida a N_o para expresar el *rango dinámico libre de espurios* en términos de señal mínima detectable.

2.5 Ecuación de Friis

La ecuación de Friis es un resultado fundamental para enlaces de sistemas de radio. Esta expresa la potencia recibida en términos de la potencia transmitida, las ganancias

de las antenas, la frecuencia y el alcance. En nuestro caso, esta ecuación será de utilidad para calcular el máximo radio de cobertura que tendrá el repetidor.

2.5.1 Definición:

En la Figura 2.8 se muestra un enlace general de radio, donde P_t es la potencia transmitida, G_t es la ganancia transmisora, G_r es la ganancia de la antena receptora y P_r es la potencia recibida entregada a una carga acoplada.

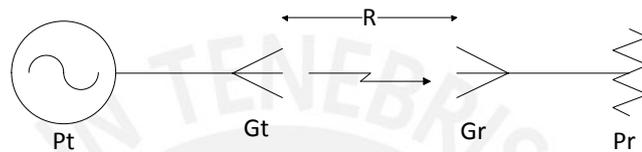


Figura 2.8 Sistema de radio básico.

Por conservación de la energía, la densidad de potencia de una antena isotrópica ($D=0\text{dB}$) a una distancia R es [11]:

$$S_{avg} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \text{ W/m}^2 \quad 2.12$$

Si se considera que la antena transmisora tiene directividad mayor a 0dB , se puede encontrar la densidad de potencia multiplicándola por la directividad. Si la antena posee pérdidas se puede incluir un factor de eficiencia. Entonces, una expresión más general de la densidad de potencia para cualquier antena de transmisión sería:

$$S_{avg} = \frac{G_t P_t}{4\pi R^2} \text{ W/m}^2 \quad 2.13$$

Si la densidad de potencia incide sobre la antena receptora se puede encontrar la potencia recibida, luego se incluye el concepto de apertura efectiva y finalmente se incluye las pérdidas (G_r). El resultado final sería:

$$P_r = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} P_t \text{ W} \quad 2.14$$

Esta es la ecuación de Friis, la cual dice cuanta potencia es recibida por una antena de radio. En la práctica, representa la máxima potencia que se podría recibir (En un entorno ideal), ya que existen otros factores que podrían reducir la potencia recibida en un enlace de radio real. Finalmente, se observa que si se conoce la potencia transmitida y la potencia recibida se puede calcular la distancia de separación entre el transmisor y el receptor.



3 Diseño y análisis del repetidor

3.1 Introducción

Para realizar el correcto diseño del repetidor no basta con seleccionar los componentes correctos. Es necesario caracterizar cada uno de ellos a fin de que el diseño se ajuste a la realidad. Por otro lado, el análisis del sistema planteado indicará si se cumplen los requisitos mínimos para el correcto funcionamiento del repetidor.

3.2 Especificaciones de diseño

El sistema posee dos requerimientos principales: el rango de frecuencias en el que operará y la ganancia que tendrá.

Como se vio en la sección 1.1, una de las bandas en la que trabajan los operadores móviles es la de 850 MHz. En esta banda, la estación base transmite en el rango de 869-894 MHz, y los dispositivos móviles lo hacen en el rango de 824-849 MHz. El repetidor deberá ser capaz de amplificar las señales recibidas en estos dos rangos.

El otro aspecto a considerar es la ganancia del repetidor. De esto dependerá cuán débiles, como máximo, podrán ser las señales recibidas antes de que se pierda el enlace entre la estación base y los dispositivos móviles. Con este objetivo se propone que el repetidor posea una ganancia de 50dB en ambas direcciones.

3.3 Diagrama de bloques del repetidor

Para lograr los requerimientos planteados se propone un sistema como el que se muestra en la Figura 3.1.

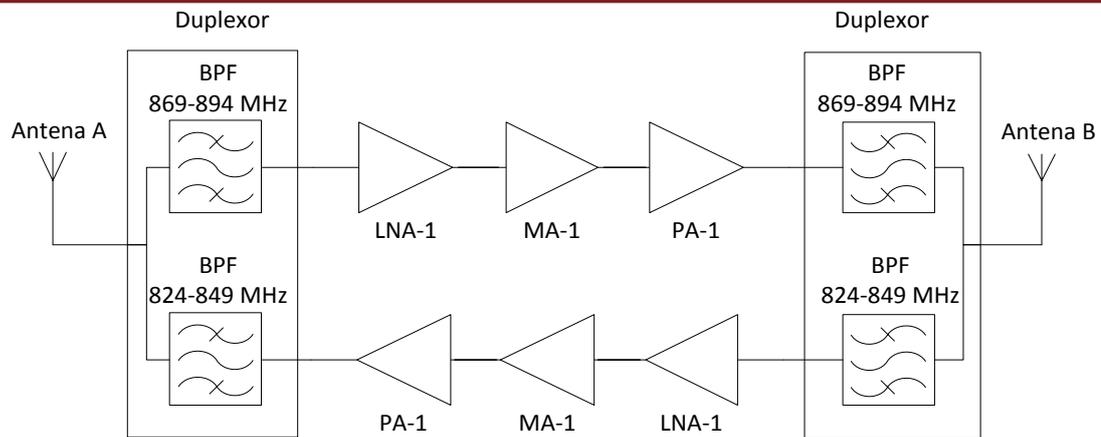


Figura 3.1 Diagrama de bloques del repetidor.

La antena A recibe la señal desde la estación base y la envía por la antena B hacia los dispositivos móviles. De la misma forma, la antena B recibe la señal proveniente de los dispositivos móviles y la envía a la estación base por la antena A. Los amplificadores de la parte superior amplifican la señal proveniente de la estación base mientras que los de la parte inferior amplifican la señal recibida de los dispositivos móviles. El tercer bloque (Duplexor) sirve para acoplar la señal recibida con la entrada a los amplificadores, además aísla la salida de un amplificador con la entrada del otro para evitar así lazos de realimentación que hagan oscilar al sistema. Más adelante se explicará con detalle el funcionamiento de todas estas partes.

3.4 Elección de componentes

La selección de los dispositivos es uno de los pasos más importantes en el diseño del repetidor, ya que el número de etapas de amplificación dependerá del máximo nivel de ganancia que cada dispositivo pueda aportar. Además es necesario contar con un dispositivo que permita enviar y recibir por la misma antena (sistema dúplex).

3.4.1 Amplificador de bajo ruido (Low Noise Amplifier - LNA)

Las señales recibidas por el repetidor serán de muy baja potencia por lo que es necesario que este posea una figura de ruido baja. Como se demostró en la sección 2.3.3 la figura de ruido de un sistema está prácticamente definida por la primera etapa, por lo que lo más conveniente es que el primer amplificador sea un LNA.

En los criterios de selección se tuvieron en cuenta la figura de ruido (como factor principal), la ganancia, la máxima potencia de salida lineal, el punto de intersección de tercer orden, el voltaje de alimentación y el precio.

Tabla 3.1 Comparación entre amplificadores de bajo ruido

Componente	NF (dB)	G (dB)	P1 (dBm)	P3 (dBm)	Voltaje (V)
TAMP-960LN+	0.55	16.5	15.5	30	5
PSA-545+	0.8	17.8	20	35.4	3
PMA-545+	0.8	12.2	18.3	36.3	3

Se eligió el TAMP-960LN+ de MiniCircuits. Este amplificador posee una figura de ruido muy baja (0.55dB). Una ganancia de 16.5 dB en la banda de frecuencias que nos interesa. Salida lineal hasta 15.5 dBm. El punto de intersección de tercer orden es 30dBm. Adicionalmente la entrada y la salida están acopladas a 50 Ω lo cual facilita la conexión con el resto de componentes.

3.4.2 Amplificador intermedio (*Medium Amplifier - MA*)

La segunda etapa será de amplificación propiamente dicha, es decir, la característica principal del amplificador a usar será su alta ganancia. Además deberá poseer un buen desempeño en sus características principales como: P1dB, IP3 y figura de ruido. Otro aspecto deseable es que posea la menor cantidad de componentes externos.

Tabla 3.2 Comparación entre amplificadores de ganancia

Componente	NF (dB)	G (dB)	P1 (dBm)	P3 (dBm)	Voltaje (V)
YSF-122+	3.4	20	20	31	5
Gali 74+	2.7	20	18	33	5
PMA-545+	6.7	11.8	17	29	3 o 5

El amplificador elegido es el YSF-122+ de MiniCircuits. Este amplificador cumple con todas las características antes mencionadas. Posee una ganancia de 20dB, salida lineal hasta 20dBm e IP3 igual a 31dBm

3.4.3 Amplificador de potencia (Power Amplifier - PA)

Esta última etapa será la que se conecte con la antena por lo cual el amplificador deberá ser capaz de manejar grandes potencias a su salida.

Tabla 3.3 Comparación entre amplificadores de potencia

Componente	NF (dB)	G (dB)	P1 (dBm)	P3 (dBm)	Voltaje (V)
ADL5322	3.4	20	27	45	5
RFPA3800DS	5	18	36.7	49	6
HMC450QS16G	8	23	23	40	5

Para esta etapa se midieron los dos amplificadores mencionados en el cuadro anterior y además de los parámetros medidos se tomó en cuenta la disipación de calor por lo que se eligió el HMC450QS16G de Hittite, el cual ofrece una salida lineal de hasta 26dBm. Además posee una ganancia de 26 dBm e IP3 igual a 40dBm.

3.4.4 Duplexor

Las dos antenas que forman parte del repetidor reciben y transmiten señales al mismo tiempo, por ello es necesario un circuito de acoplamiento que aisle estas etapas de recepción y transmisión. Es decir el circuito de acoplamiento debe evitar que la señal de salida de los amplificadores de transmisión no se realimente a las entradas de los de recepción. Además el circuito debe permitir “dirigir” correctamente las señales provenientes de la antena a la etapa correspondiente (recepción o transmisión).

Un duplexor o un circulador podrían cumplir las funciones antes mencionadas. Un circulador es un dispositivo de tres puertos que solo permite que las señales fluyan en un solo sentido. Mientras que un duplexor actúa como dos filtros pasabanda centrados a diferentes frecuencias.

Para este diseño se eligió trabajar con un duplexor con tecnología SAW. Este tipo de duplexores tienen las características de tener baja pérdida en la banda de paso y una gran atenuación en la banda de rechazo, además, pueden trabajar en bandas de frecuencias cercanas debido a que el orden de los filtros es muy alto. El duplexor a usar será el 856356 de TriQuint Semiconductor. Este dispositivo trabaja en las

bandas de frecuencias que nos interesan (Tx: 824-849 MHz y Rx: 869-894 MHz), la pérdida máxima en la banda de paso transmisión es 2.3 dB y en la de recepción es 3 dB, la atenuación mínima en la banda de rechazo es 45 dB. Además el aislamiento mínimo entre los puertos Tx y Rx es de 45 dB.

3.5 Análisis del sistema planteado

Antes de continuar con el diseño es necesario analizar los principales parámetros del repetidor y verificar que con los dispositivos elegidos se cumple con las especificaciones planteadas. Este análisis también servirá para conocer las limitaciones del repetidor.

Debido a que el diseño del repetidor es simétrico la señal recibida/enviada atravesara los mismo elementos para ambos lados (de la estación base al celular y viceversa). Es decir, el sistema analizado en esta parte es el que se muestra en la Figura 3.2.

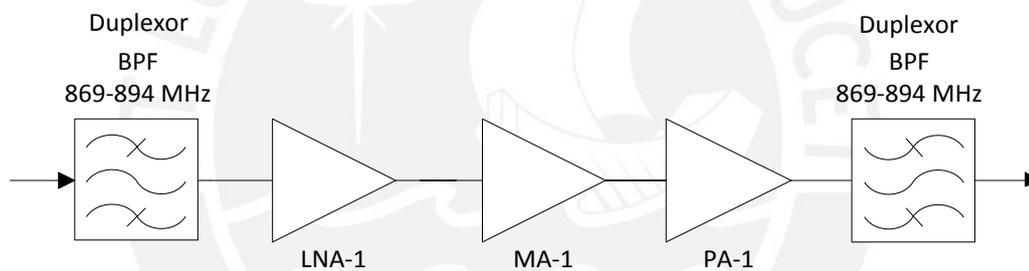


Figura 3.2 Repetidor visto en una sola dirección

3.5.1 Figura de ruido

Primero es necesario convertir los datos del fabricante dados en dB a valores numéricos.

Tabla 3.4 Conversión de dB a valores numéricos

	G (dB)	G (Numérico)	F (dB)	F (Numérico)
Duplexor	-3.2	0.4786	3.2	2.0892
LNA	16.5	44.6684	0.8	1.2022
MA	18.1	64.5654	4.4	2.7542

PA	23	199.5262	8	6.3095
Duplexor	-3	0.5012	3	1.9953

Para calcular la figura de ruido podemos usar la ecuación 2.8:

$$F_{sys} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_{n-1}}$$

$$F_{sys} = 2.0892 + \frac{1.2022 - 1}{0.4786} + \frac{2.7542 - 1}{0.4786 * 44.6684} + \frac{6.3095 - 1}{0.4786 * 44.6684 * 64.5654} + \frac{1.9953 - 1}{0.4786 * 44.6684 * 64.5654 * 199.5262}$$

$$F_{sys} = 2.5978 = 4.1460 \text{ dB}$$

Este resultado es fundamental para el análisis y será utilizado en las demás secciones.

3.5.2 Señal mínima detectable

Como se vio en el capítulo 2, para que exista una buena comunicación es necesario que la señal recibida sea mayor que cierto umbral. En esta parte se realiza dicho cálculo.

La relación señal a ruido mínima típica para un sistema celular es:

$$SNR_{min} = \left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{min} = 18 \text{ dB} \approx 69.1$$

La figura de ruido es la calculada en la sección 3.5.1:

$$F = 2.5978$$

Usando la ecuación 2.9 la señal mínima detectable será:

$$S_{i_{min}} = kB[Ta + (F - 1)To] \left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{min}$$

$$S_{i_{min}} = [(1.38 * 10^{-23})(200 * 10^{-3})(600 + (2.5978 - 1) * 290)] * 69.1$$

$$S_{i_{min}} = -97.33 \text{ dBm}$$

3.5.3 Diagrama de ganancia y figura de ruido

En la Figura 3.3 se muestra la ganancia y la figura de ruido a la salida de cada etapa, versus las etapas a través del sistema. Para su construcción se usaron las fórmulas de figura de ruido para elementos en cascada.

Observar que la figura de ruido es aproximadamente 4 dB y se mantiene constante a lo largo de todas las etapas.

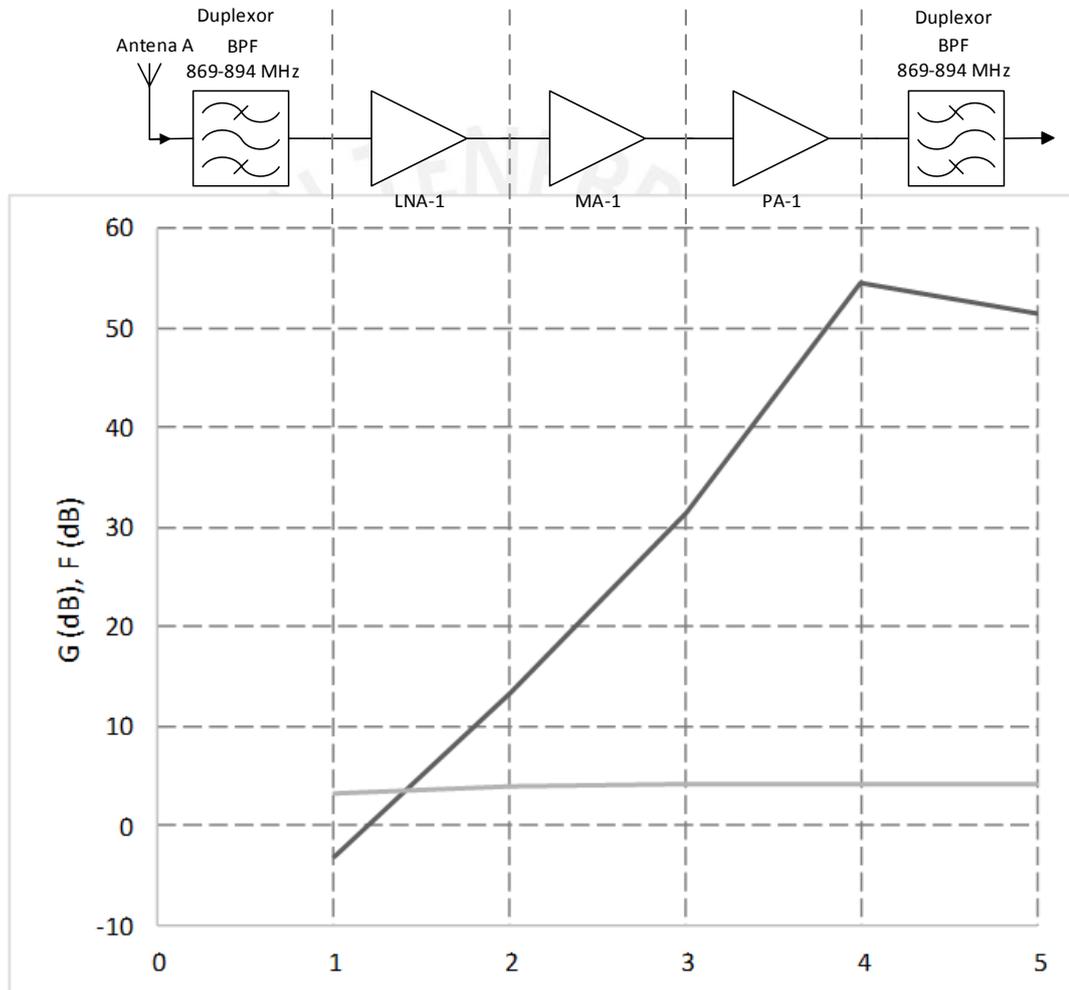


Figura 3.3 Ganancia y la figura de ruido a la salida de cada etapa

3.5.4 Diagrama de Potencia

Como se vio en la sección 2.4.2, los niveles de potencia que excedan el punto P1 (punto de compresión de 1 dB) saturan al amplificador y causan distorsión. Es por ello que es importante hacer un seguimiento de los niveles de potencia a través de

las etapas del sistema y verificar que no se exceda dicho punto. La Figura 3.4 muestra dicho seguimiento.

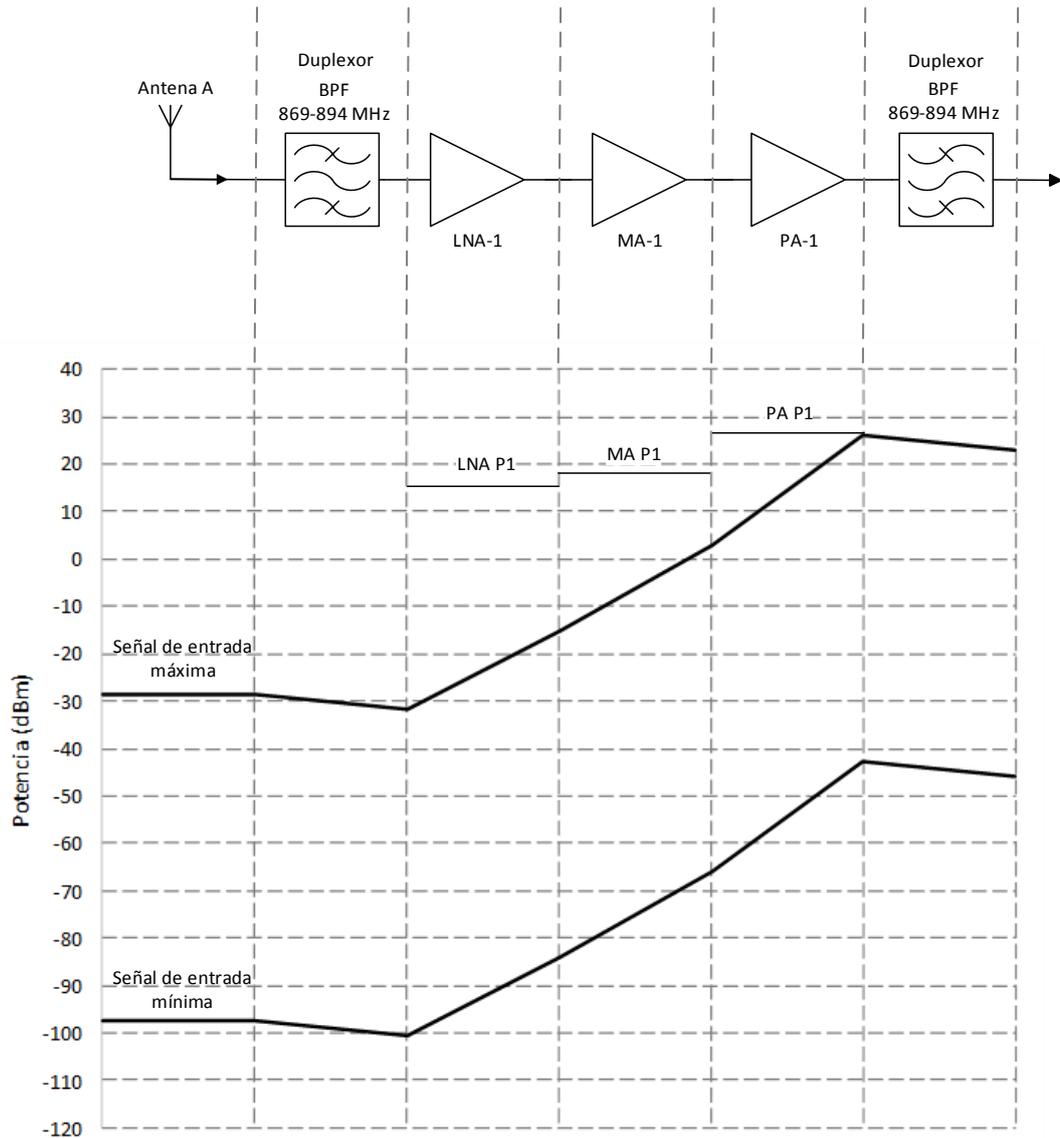


Figura 3.4 Diagrama de potencia para el nivel máximo y mínimo de la señal recibida.

Este diagrama muestra los niveles de potencia para la máxima y mínima señal de entrada a lo largo de las diferentes etapas. Los gráficos de este tipo facilitan la tarea de ver si se exceden los límites y determinar los efectos de cambiar las especificaciones de los componentes o su posición en el sistema.

3.5.5 Radio de cobertura teórico

El máximo radio de cobertura teórico que tendrá nuestro repetidor para el lado de los teléfonos móviles estará dado por la ecuación 2.14. Si se considera que las antenas poseen ganancia unitaria (1 dBi) y que la potencia recibida, desde la estación base, por el repetidor es -86 dBm; entonces podemos calcular el radio de cobertura:

$$P_r = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} P_t$$

$$R = \frac{\left(10^{\frac{-36+90}{20}}\right) * \lambda}{4 * \pi} = 17.71 \text{ m}$$

Por lo tanto, el repetidor podrá cubrir una distancia máxima aproximada de 17 m.

3.6 Diseño y construcción de las placas de evaluación de los dispositivos elegidos

Antes de continuar con el diseño del repetidor es necesario conocer el comportamiento de cada uno de los dispositivos que lo conforman, es decir, hallar sus parámetros-S.

El fabricante brinda información con los parámetros-S y los diseños de las placas de evaluación de los componentes que se usaran, sin embargo, estos están dados para condiciones distintas a las cuales se realizara el diseño. Entonces para poder describir el comportamiento correcto que tendrán los componentes se deben de realizar los cambios necesarios considerando estas condiciones.

3.6.1 Parámetros del sustrato

Una de las condiciones más importantes es la diferencia entre el sustrato usado por el fabricante y el que se usara en este diseño.

El fabricante usa como material para sus placas de evaluación el RO4350. En este diseño se usara el sustrato más común en el mercado local. Este último es de fibra de vidrio, pero se desconoce sus características eléctricas.

En el laboratorio se realizaron las pruebas necesarias para hallar los parámetros de este sustrato. En la Tabla 3.5 se muestra una comparación entre dos sustratos.

Tabla 3.5 Características del sustrato

Material	Permeabilidad relativa	Tangente de pérdidas
Sustrato a usar	4.1	0.02
RO4350	3.48	0.0040

3.6.2 Advanced Design System (ADS)

El ADS es un software especializado utilizado, entre otras cosas, en diseños de RF y microondas, por lo que será de mucha utilidad para nuestros propósitos. Este software ofrece herramientas para creación de esquemáticos, diseño del PCB y simulación de los diseños realizados.

3.6.3 Diseño y construcción de las placas de evaluación

El diseño del PCB se realizó con el Advanced Design System (ADS) de Agilent. Se usaron líneas de transmisión microstrip con impedancia de 50 Ohm, la cual fue calculada usando la herramienta linecalc. Para los terminales de conexión se decidió usar conectores SMA.

A continuación se muestran los resultados obtenidos: En la Figura 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 se muestran los diseños del Duplexor, LNA y MA respectivamente.

En el caso del PA se decidió utilizar el evaluation board del amplificador HMC450QS16G. Este circuito de evaluación fue adquirido por el laboratorio de telecomunicaciones inalámbricas.

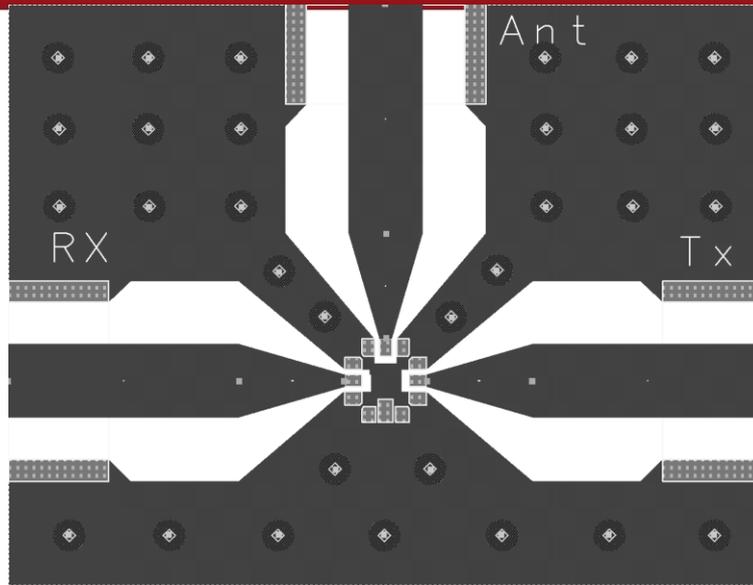


Figura 3.5 Diseño de la placa de evaluación del duplexor.

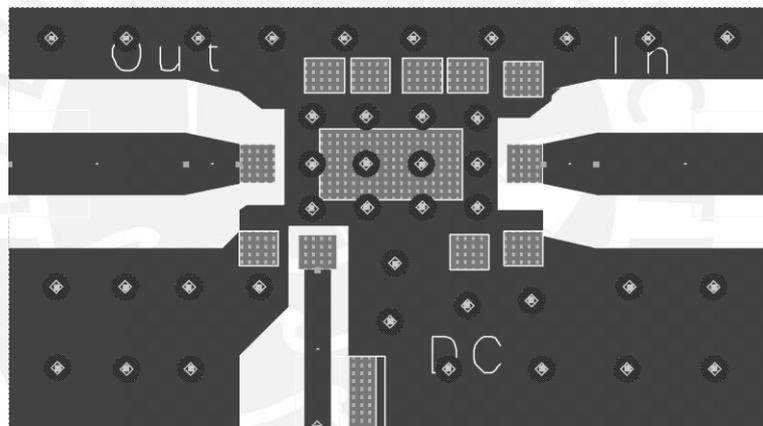


Figura 3.6 Diseño de la placa de evaluación del LNA.

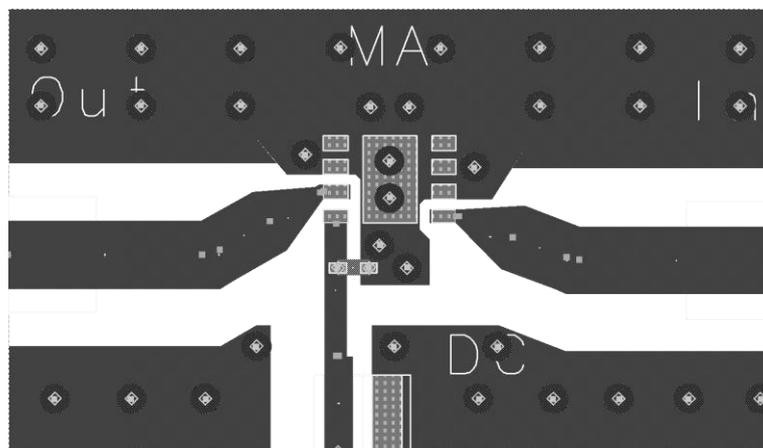


Figura 3.7 Diseño de la placa de evaluación del MA.

Finalmente los diseños realizados fueron construidos y luego se procedió a soldar los componentes elegidos para su posterior medición (Ver anexo A).

3.7 Medición de los parámetros S

Con el fin de entender el comportamiento de cada módulo por separado, se realizaron las mediciones correspondientes utilizando el método indicado en la Sección 2.2.2 . Se eligió un rango de frecuencias de 750 a 950 MHz ya que será en este rango en el que opere el repetidor.

Finalizadas las mediciones con el VNA, se procesó la información obtenida con el software ADS para su mejor visualización.

3.7.1 Duplexor

Como se mencionó en la sección 3.4.4 un duplexor es un dispositivo de 3 puertos, por lo que la matriz de parámetros S tendrá 9 elementos.

En la Figura 3.8 se muestran los parámetros S₁₁, S₂₂, S₃₃ del duplexor. Como se puede apreciar el puerto 1 (transmisión) está acoplado en el rango de 824-849 MHz, el puerto 2 (antena) en el rango de 824 a 894 MHz y el puerto 3 (recepción) en el rango de 869 a 894 MHz. Estos resultados evidencian el correcto funcionamiento del duplexor. Cada puerto está acoplado en el rango que operará.

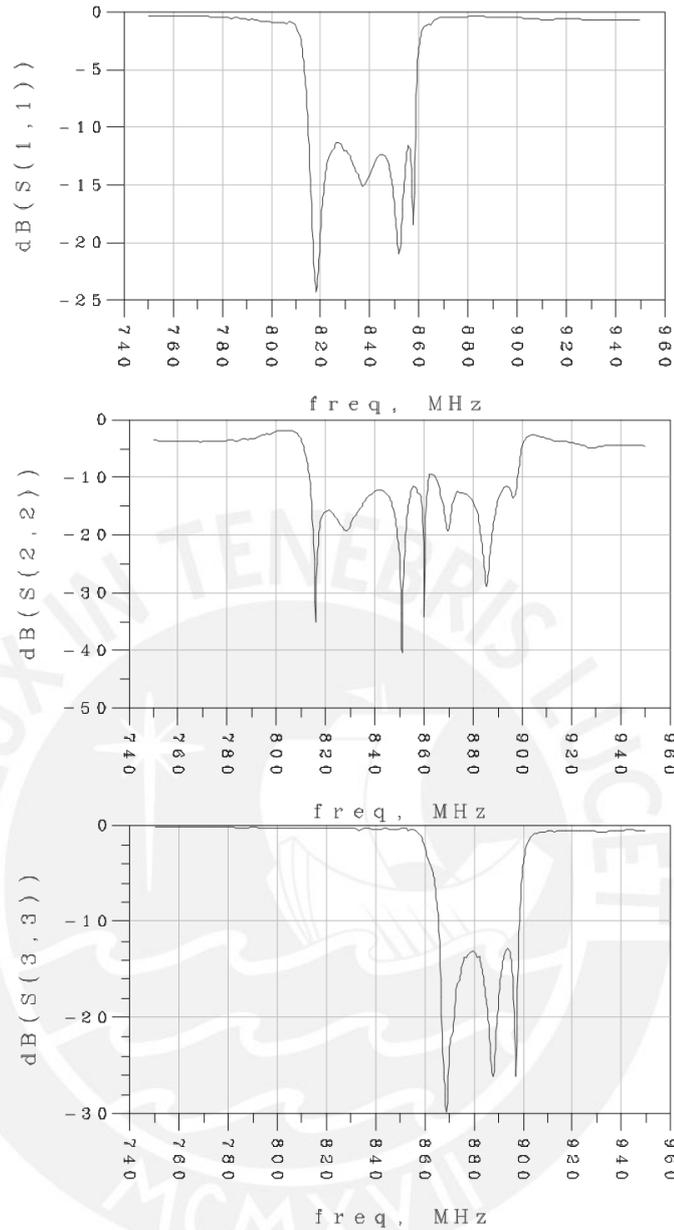


Figura 3.8 Parámetros S11, S22, S33 del duplexor

En la Figura 3.9 se muestran los parámetros S restantes. Como se observa, el duplexor posee una baja pérdida en la banda de paso y una atenuación muy alta en la banda de rechazo. Además se observa que es un dispositivo completamente simétrico, es decir $S_{21} = S_{12}$, $S_{23} = S_{32}$, $S_{13} = S_{31}$. También es necesario notar que el aislamiento entre los puertos 1 y 3 es alto.

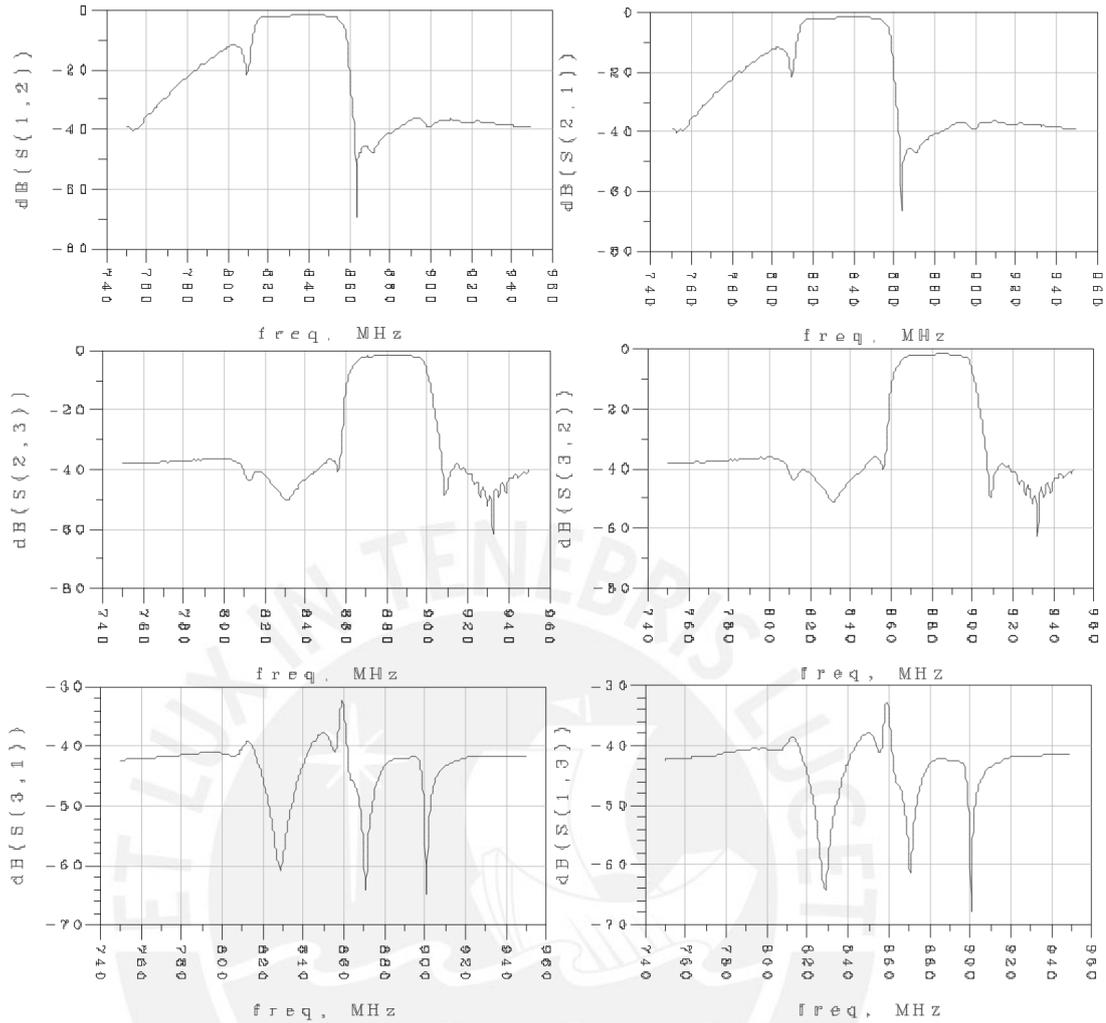


Figura 3.9 Parámetros S12, S21, S23, S32, S31, S13 del duplexor.

3.7.2 LNA

En la Figura 3.10 se observa que este amplificador está acoplado en su rango de trabajo ($S_{11} < 10\text{dB}$). La ganancia puede verse claramente en S_{21} y está dentro del rango de 16.5 y 17.5 dB. La ganancia de retorno es muy baja, lo cual es deseable para cualquier amplificador.

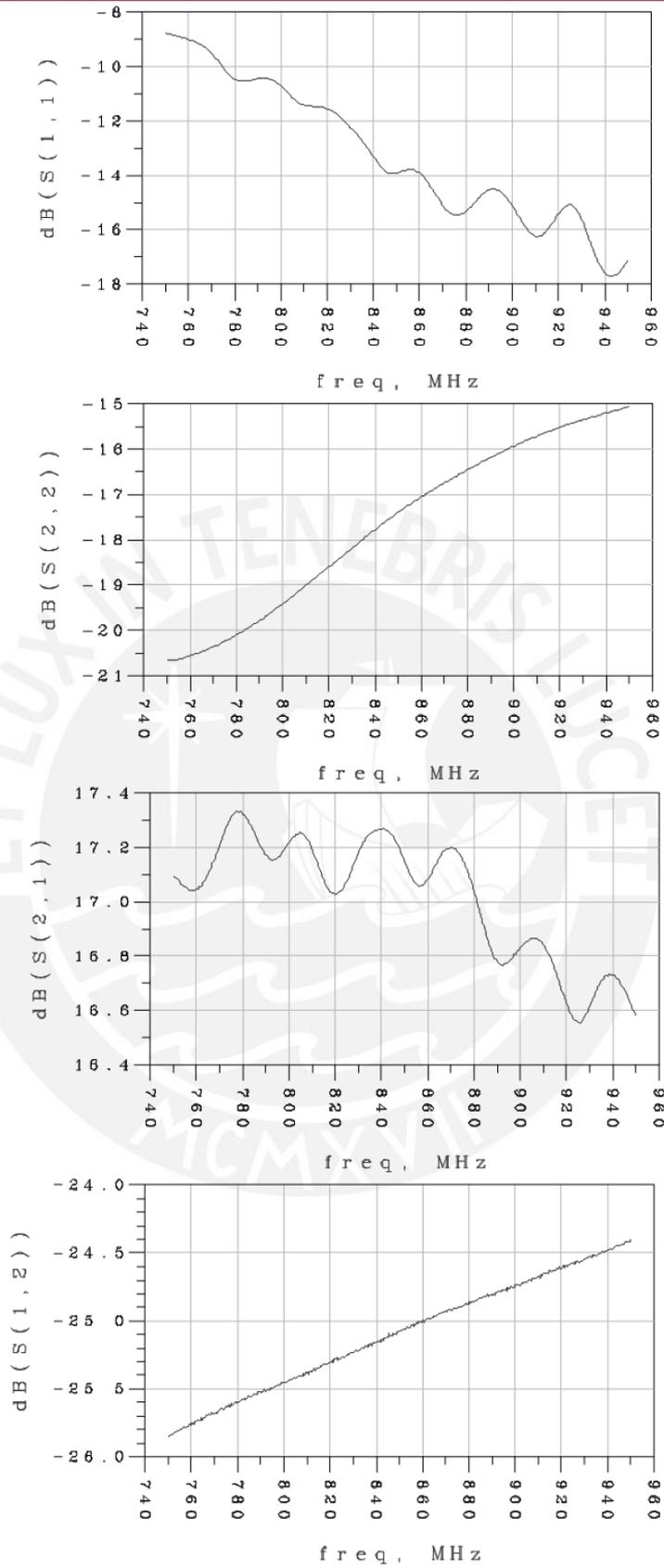


Figura 3.10 Parámetros S del LNA.

3.7.3 MA

Al igual que en el caso anterior, este amplificador se encuentra acoplado a 50 Ohm. Tiene una ganancia aproximada de 19 dB y su ganancia de retorno es muy baja.

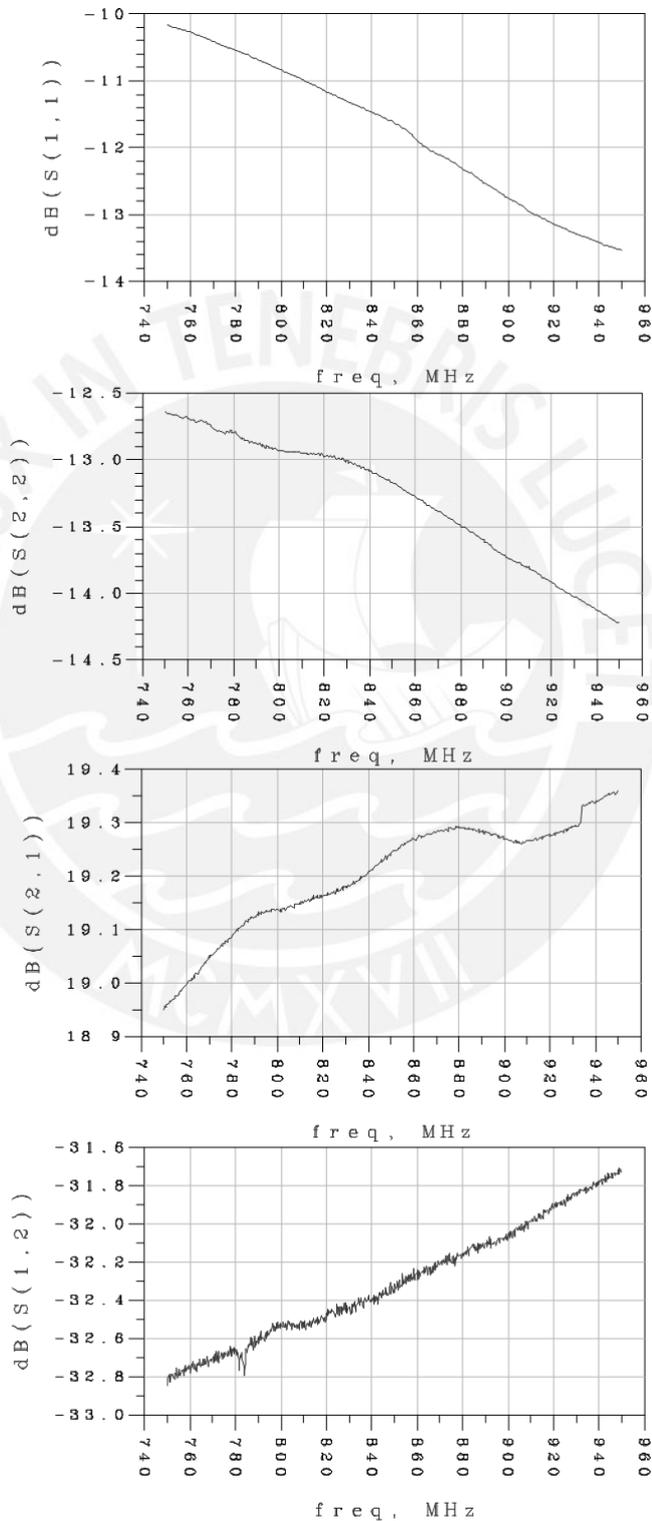


Figura 3.11 Parámetros S del MA.

3.7.4 PA

Nuevamente podemos notar que el amplificador esta acoplado en el rango de trabajo, la ganancia es 19 dB aproximadamente y la ganancia de retorno está por debajo de los -35 dB.

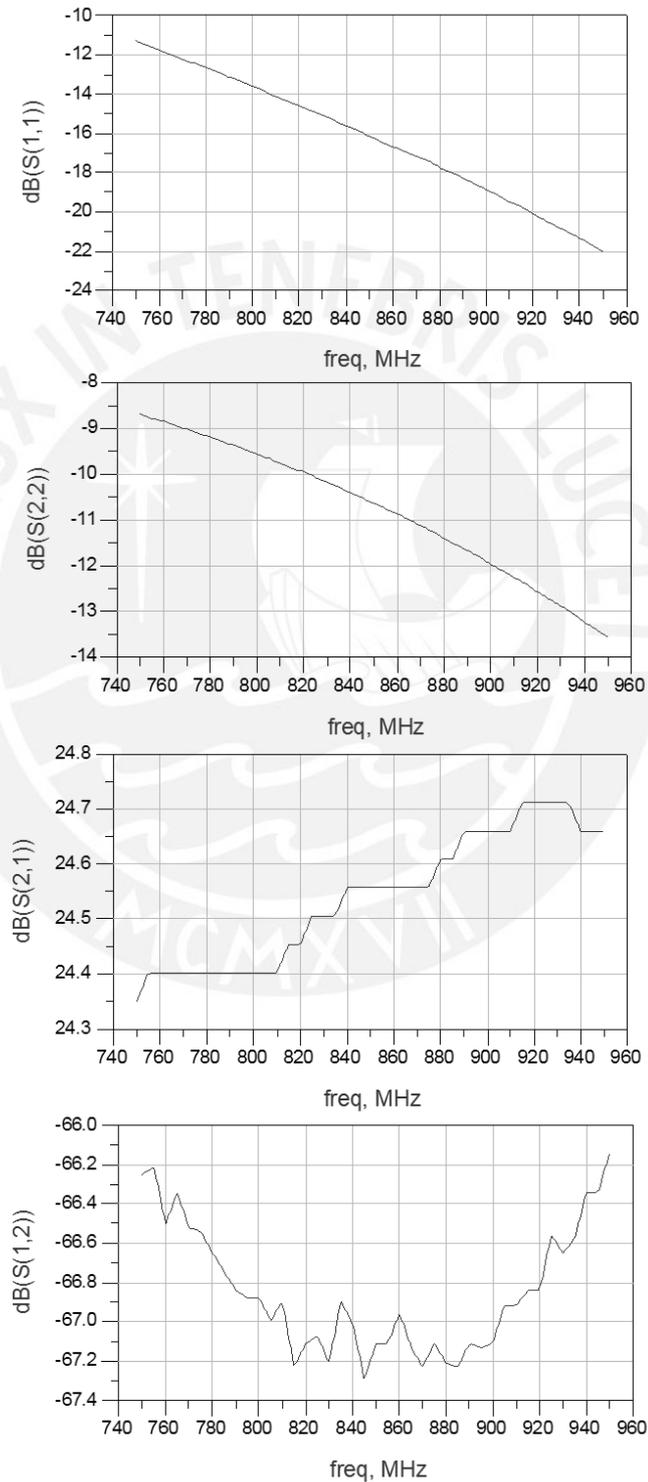


Figura 3.12 Parámetros S del PA.

3.8 Diseño final del sistema propuesto

El ADS permite caracterizar componentes como redes de “n” puertos usando sus parámetros S. Para el diseño final se usó esta característica y se planteó el diagrama de bloques mostrado en la Figura 3.13 (Grafico realizado usando el ADS)

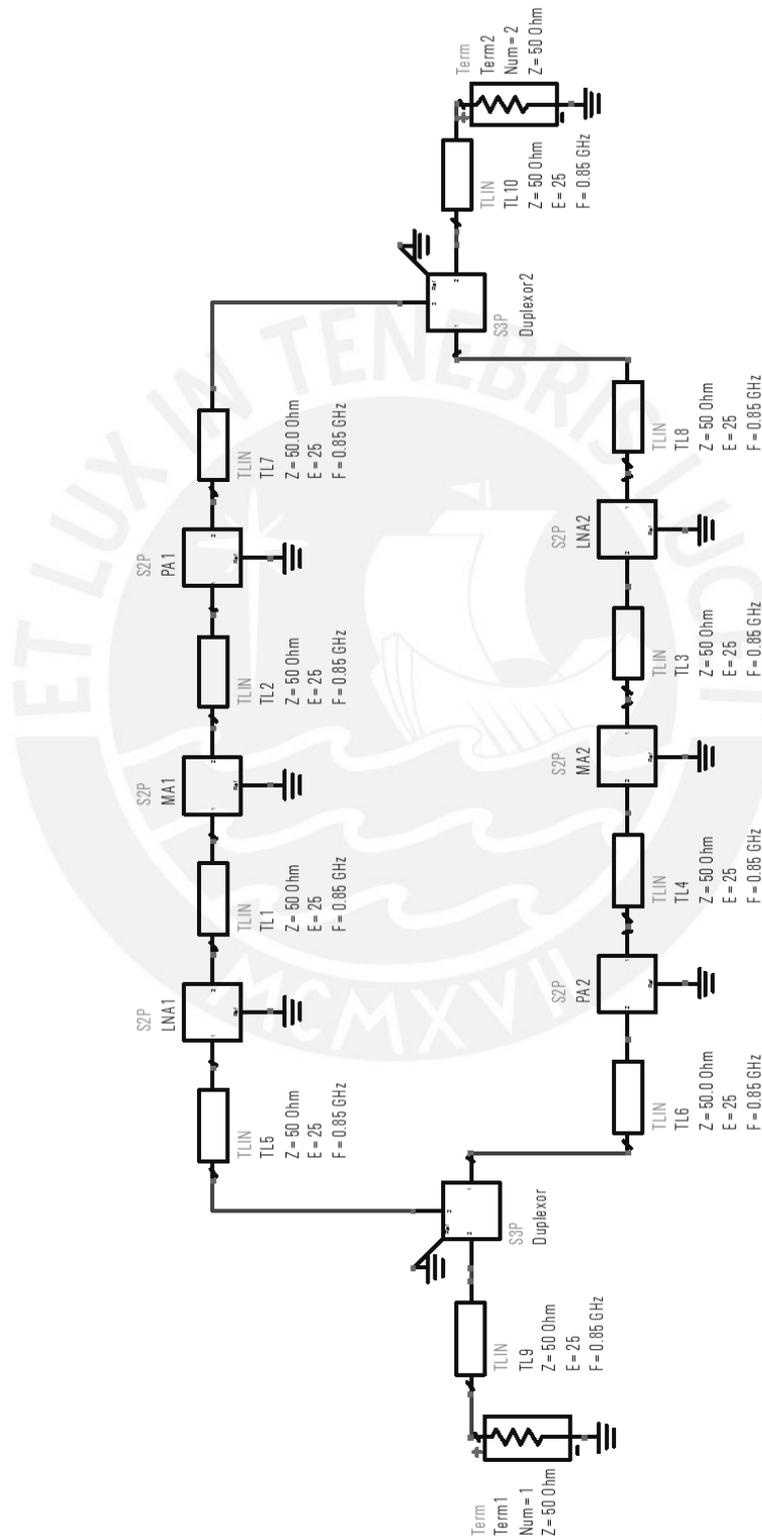


Figura 3.13 Diagrama de bloques del repetidor en el ADS.

4 Simulación y Pruebas

4.1 Introducción

Lo que resta en el desarrollo del repetidor es la simulación y la realización de las pruebas necesarias, la cuales verifiquen que el diseño es correcto y cumple con las especificaciones planteadas inicialmente.

En este capítulo se muestra que el sistema planteado presenta problemas de estabilidad. Después de analizar el diseño, se corrigen estos problemas y finalmente se comprueba que el repetidor funciona correctamente.

4.2 Simulación del sistema propuesto

Para verificar que el diseño planteado funciona de manera adecuada y cumple con los requerimientos es conveniente, antes de implementarlo, simular el sistema. El sistema usado para la simulación es el que se mostró en la sección 3.8. Para esta parte se graficará los parámetros S_{21} , S_{12} , S_{11} , S_{22} y la constante de estabilidad μ , el resultado se muestra en la Figura 4.1

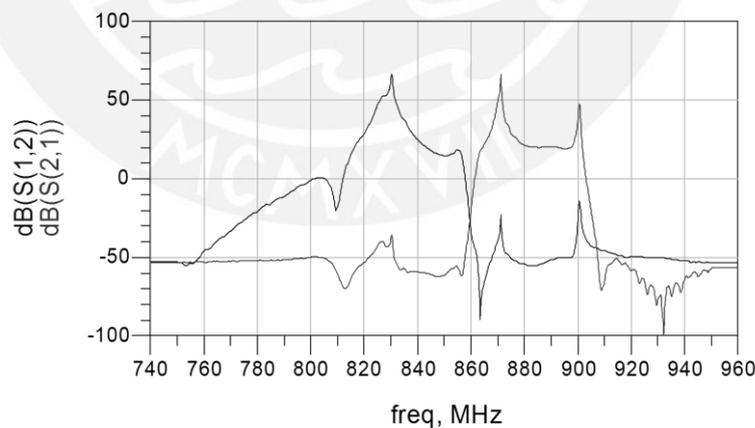


Figure 4.1 (a) S_{12} y S_{21} del sistema propuesto

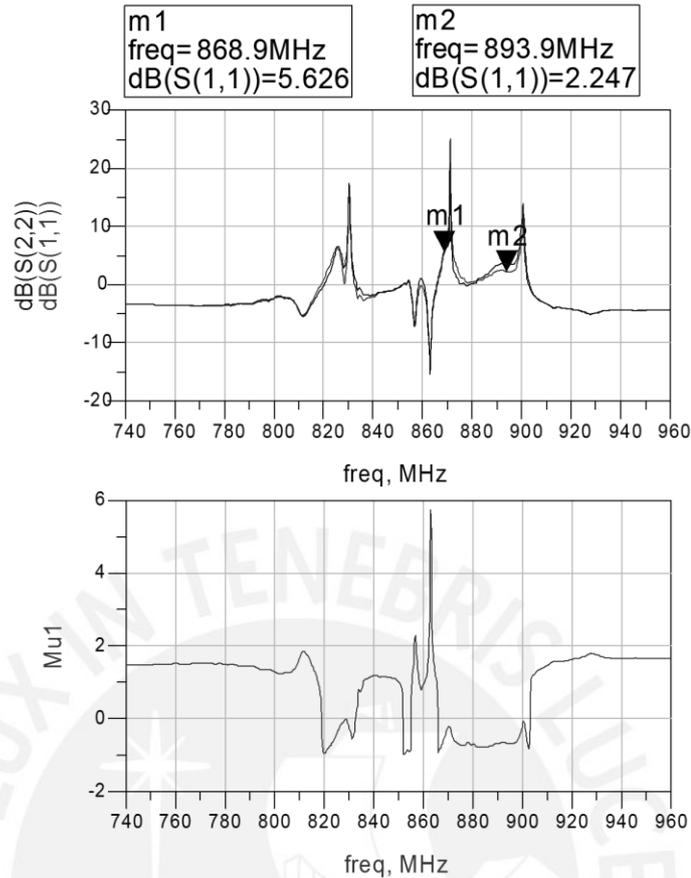


Figura 4.1 (b) S11, S22 y μ del sistema propuesto.

Se observa que el sistema es inestable ($\mu < 1$) para el rango de frecuencias en el que trabajará, por lo que es necesario realizar algunas modificaciones para corregir este error.

4.3 Correcciones al sistema

Luego de volver a analizar cada componente y simular diferentes configuraciones se llegó a la conclusión de que el problema se encuentra en el aislamiento entre los puertos 1 y 3 del duplexor. Debido a la gran ganancia del sistema (Aproximadamente 50 dB), el aislamiento que existe parece no ser suficiente. Entonces es necesario incluir una mayor atenuación en las bandas de rechazo. Esto se puede realizar por medio de filtros pasabanda centrados en la frecuencia de interés.

En nuestro caso, debido a que no se cuenta con los filtros pasabanda necesarios, se utilizará a los duplexores como filtros pasabanda. El resultado se muestra en la Figura 4.2.

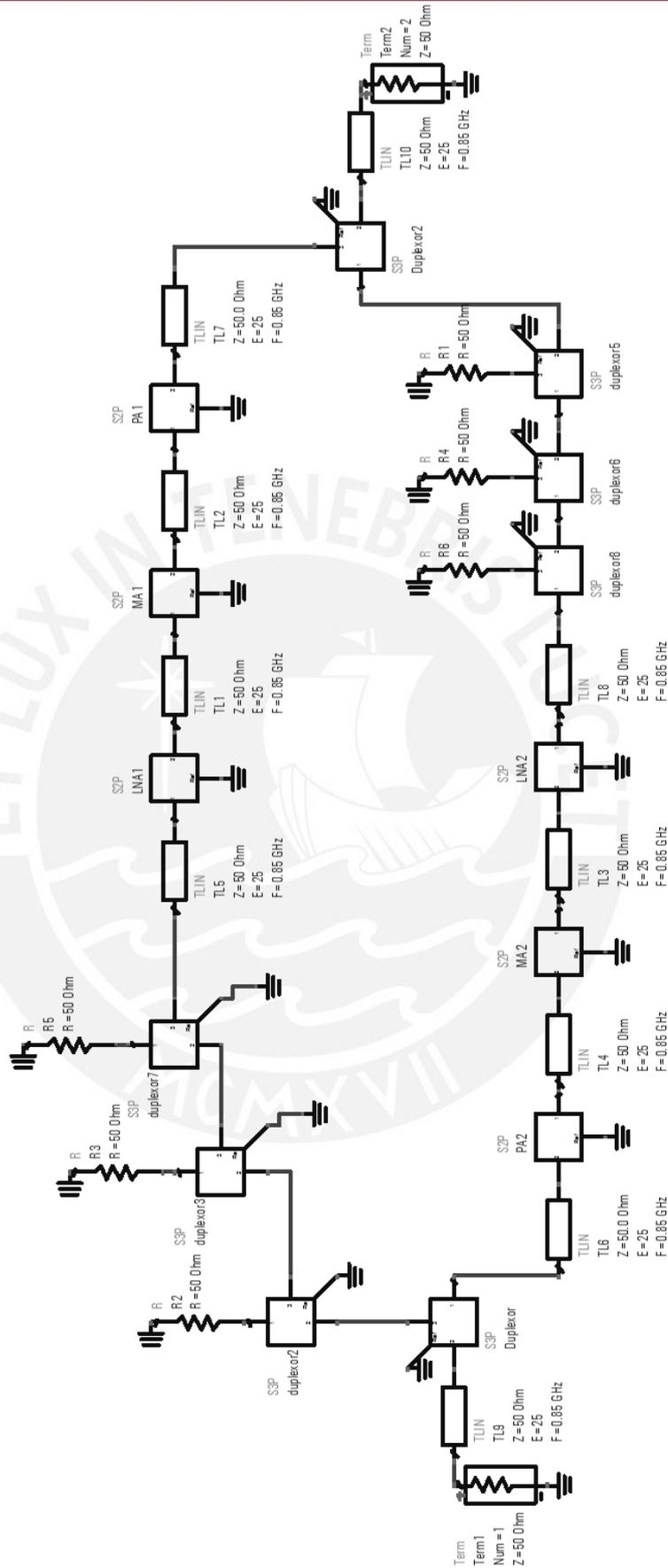


Figura 4.2 Diagrama de bloques corregido del repetidor.

4.4 Resultados finales

Después las correcciones realizadas se verifica que el sistema es estable ($\mu > 1$), esto se puede apreciar gráficamente en la Figura 4.3

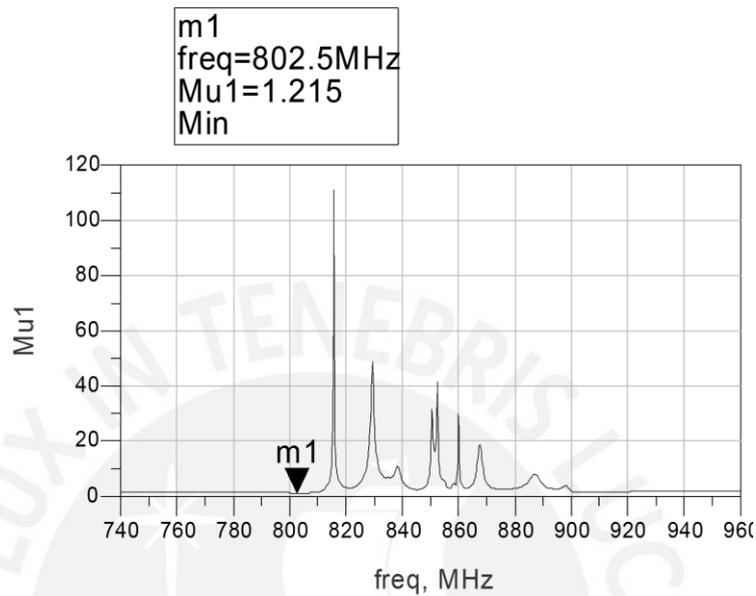


Figura 4.3 Parámetro de estabilidad μ del sistema corregido.

Por otro lado se verifica que el sistema cumple con los requerimientos necesarios.

En la Figura 4.4 se puede observar que la ganancia es aproximadamente 47 dB en ambas direcciones. Mientras que en la Figura 4.5 se puede apreciar que la entrada y la salida del sistema están acopladas a 50 Ohm.

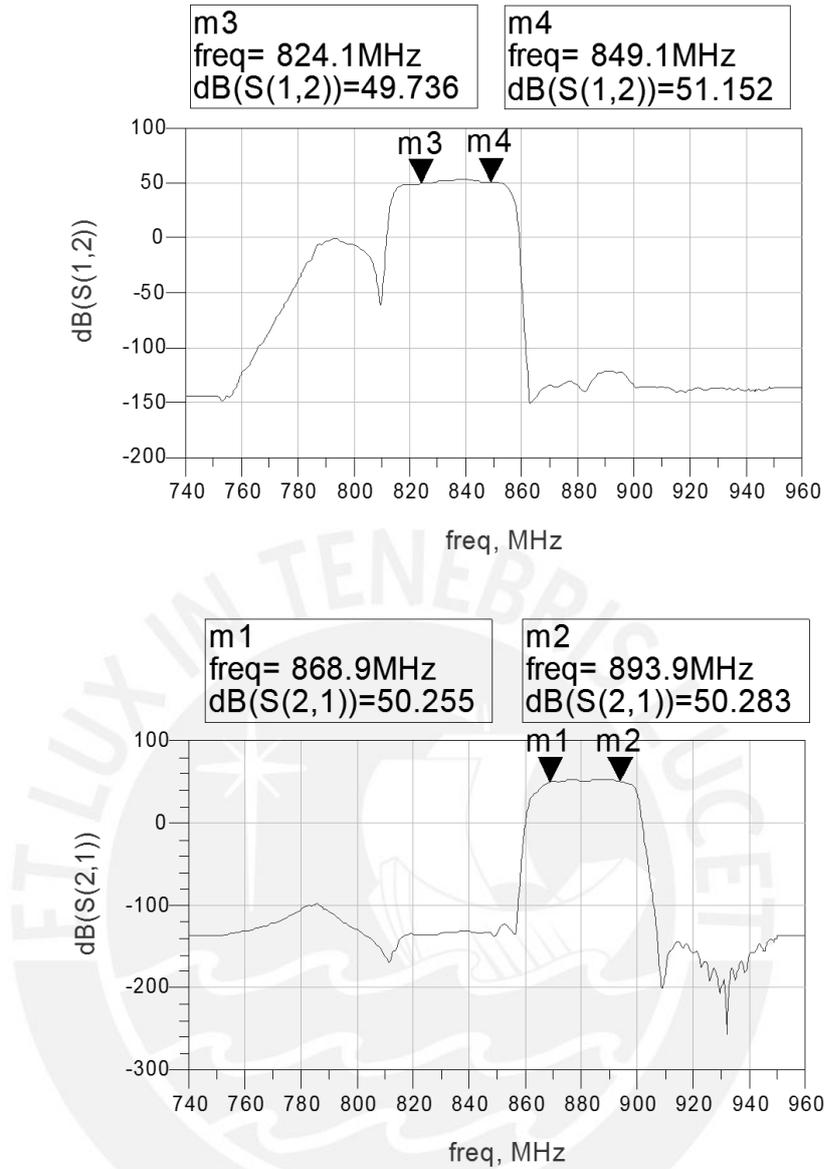


Figura 4.4 Parámetros S21 y S12 del repetidor.

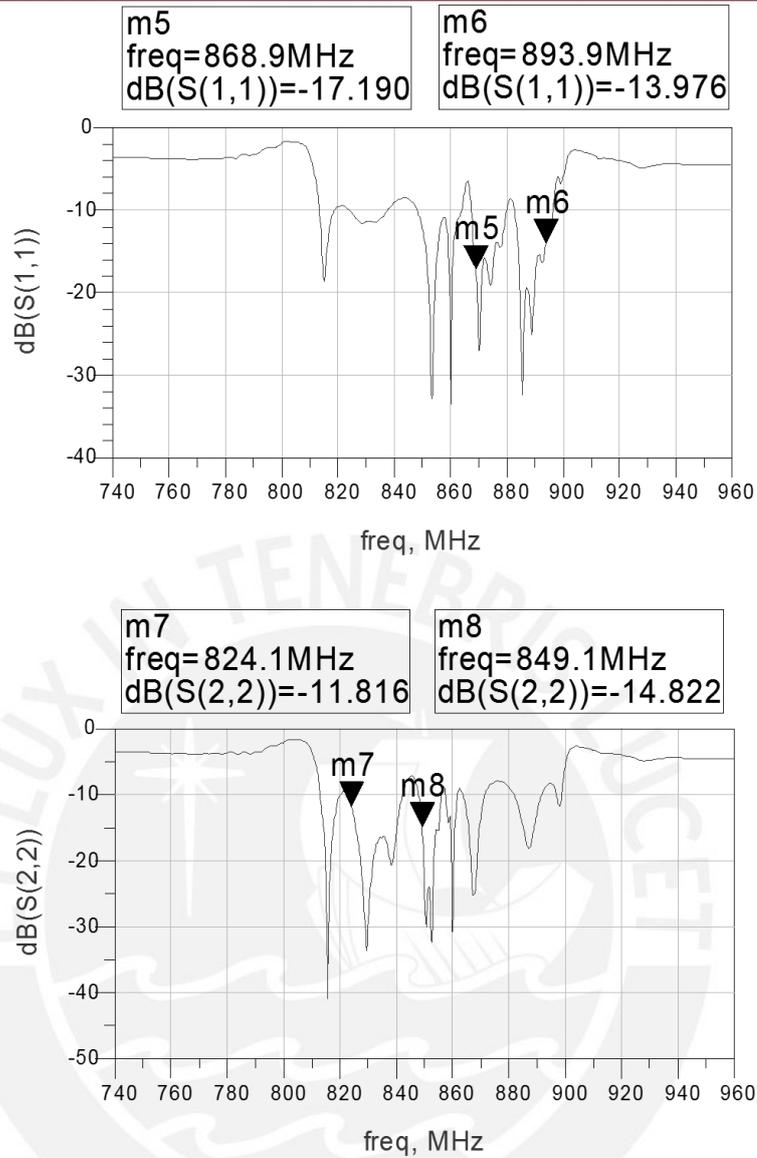


Figura 4.5 Parámetros S11 y S22 del repetidor.

Conclusiones

1. El análisis, diseño y simulación del repetidor para la banda celular de 850 MHz, a partir de las mediciones de los parámetros-S de cada componente, permitió sintonizar correctamente el repetidor, así como solucionar potenciales problemas de inestabilidad.
2. Se obtuvo un repetidor con las siguientes características:
 - a. Ganancia: 50 dB en las bandas de 824 a 849 MHz y 869 a 894 MHz
 - b. Señal mínima detectable: -97dBm
 - c. Potencia máxima: -27dBm
 - d. Figura de ruido: 2.6 dB
3. Con ayuda del software de simulación y el análisis individual de los componentes se concluyó que la inestabilidad del sistema se producía por un lazo de realimentación en el circuito del repetidor, esto debido a que en comparación con la ganancia del repetidor, el aislamiento del duplexor entre los puertos uno (transmisión) y tres (recepción) es bajo.
4. La medición de los parámetros-S de los dispositivos empleados fue fundamental ya que permitió describir correctamente el comportamiento global del sistema. Sin estas mediciones (usando solo los valores dados por el fabricante) se hubiera llegado a resultados erróneos.
5. Uno de los componentes críticos en la construcción del repetidor es el amplificador de potencia ya que éste es el que soporta el mayor nivel de potencia e incrementa su temperatura rápidamente. Si se requiere una operación continua es necesario incluir un disipador extra para este amplificador.

Recomendaciones

1. Para evitar que el sistema se vuelva inestable sería conveniente conseguir un duplexor con un mayor aislamiento, o en su defecto, filtros pasabanda con una atenuación muy alta en la banda de rechazo.
2. Cuando se trabaje con amplificadores es necesario verificar la estabilidad de cada uno de ellos y del conjunto (si fuera el caso). Muchas veces la inestabilidad puede deberse a problemas de acoplamiento, o como en este caso, a problemas de aislamiento.
3. En la construcción de los circuitos de evaluación para integrados de radiofrecuencia es necesario excluir el efecto de los elementos externos al integrado que se desea caracterizar, tales como líneas de transmisión o condensadores de desacoplo. Una forma práctica de hacer esto es utilizando líneas de transmisión cortas. Sin embargo si se necesita de mayor precisión existen formas para suprimir dichos efectos como por ejemplo los métodos SOLT o TRL.



Bibliografía

- [1] HowStuffWorks, Inc. (2011) How Cell Phones Work. [Online].
<http://electronics.howstuffworks.com/cell-phone.htm>
- [2] Ministerio de Transportes y comunicaciones. (2014) Registro Nacional de Frecuencias. [Online].
http://www.mtc.gob.pe/portal/comunicacion/concesion/registros/rnf/Bandas_17_10-1770_2110-2170.html.
- [3] RPP. (2011, Noviembre) Claro lanza tecnología 4G en el Perú. [Online].
http://www.rpp.com.pe/2011-11-15-claro-lanza-tecnologia-4g-en-el-peru-noticia_422703.html
- [4] (2013, Setiembre) Señal OSIPTEL. [Online].
<http://www.osiptel.gob.pe/coberturamovil/>
- [5] Ministerio de Transportes y comunicaciones. (2011) Registro Nacional de Frecuencias. [Online].
<http://www.mtc.gob.pe/comunicaciones/frecuencias/index.asp>
- [6] WildPackets. (2002, Noviembre) Converting Signal Strength Percentage to dBm Values. [Online].
http://www.wildpackets.com/elements/whitepapers/Converting_Signal_Strength.pdf
- [7] Powerful Signal LLC. (2011) Powerful Signal, LLC. [Online].
<http://powerfulsignal.com/cell-signal-strength.aspx>
- [8] wpsantennas.com. (2011) Cell phone repeater explained. [Online].
<http://www.wpsantennas.com/cell-phone-repeater.aspx>
- [9] OPETELPERU. (2011) Repetidores Celulares. [Online].
<http://www.opetelperu.com/repetidores-celulares.php>
- [10] (2009) MANUAL DEL USUARIO CEL800T/a. [Online].
<http://www.opetelperu.com/productos/CEL800Ta.pdf>
- [11] David M. Pozar, *Microwave and RF Wireless Systems.*: John Willey & Sons, Inc, 2001.

- [12] Agilent Technologies. (2010) Fundamentals of RF and Microwave Noise Figure Measurements.
- [13] Jim Stiles. (2005, Abril) Noise Figure of Passive Devices. [Online].
<http://www.ittc.ku.edu/~jstiles/622/handouts/Noise%20Figure%20of%20Passive%20Devices.pdf>
- [14] William H. Hayt, *Teoría electromagnética*.: McGraw-Hill, 2007.
- [15] EIA/IBIS Open Forum. (2003) Touchstone® File Format Specification. [Online].
http://vhdl.org/ibis/connector/touchstone_spec11.pdf
- [16] Sasidar Vaja. (2002) AGILENT ADS TUTORIAL. [Online].
<http://cegt201.bradley.edu/resources/tutorials/source/AgilentADSTutorial.pdf>

