

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE DIPLEXORES

En este capítulo vamos a realizar una breve descripción del elemento fundamental en el entorno de trabajo en que se ha desarrollado este Proyecto, es decir, el Diplexor. El objetivo del mismo será por tanto el ayudar a comprender la utilidad de monitorizar remotamente el funcionamiento de estos dispositivos diplexores.

Realizaremos en primer lugar una pequeña introducción, posteriormente comentaremos de modo resumido los diferentes parámetros asociados a los diplexores, los elementos que los constituyen, sus diferentes tipos, su diseño y una pequeña conclusión.



2.1.- INTRODUCCIÓN

Un Diplexor es un elemento que permite la emisión simultánea de dos frecuencias distintas por una misma antena o sistema radiante. Esto significa por ejemplo, que en las habituales aplicaciones de radiodifusión se tendría la posibilidad de emitir varios programas de radio diferentes al mismo tiempo (cada programa estaría asociado a una frecuencia).

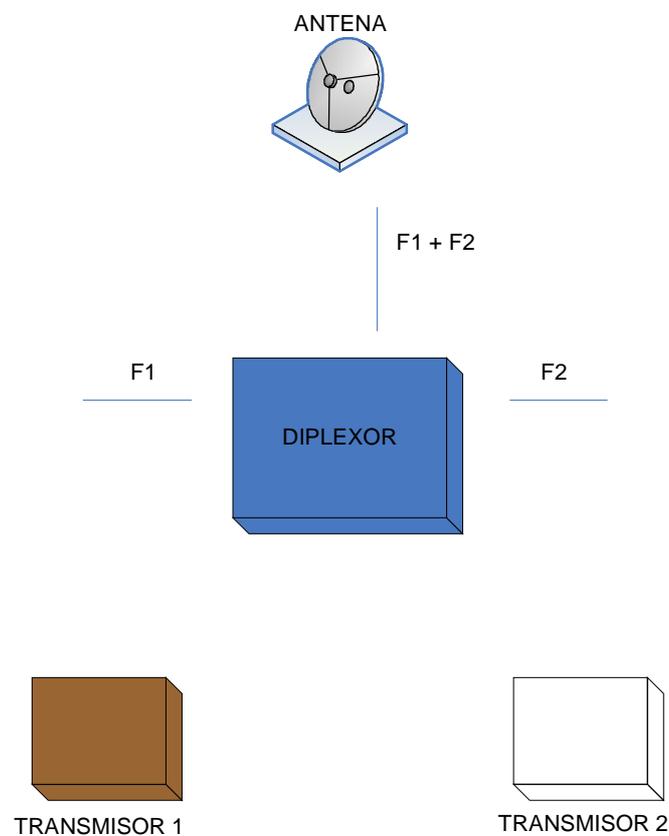


Figura 2.1: Esquema de funcionamiento de un Diplexor.

Es común en los centros de emisión, la existencia de bancos de Diplexores, es decir, la asociación de varios diplexores conectados de tal manera que permitan multiplexar varias frecuencias. Se puede ver en la fotografía de la página siguiente un montaje típico de un Multiplexor de FM en funcionamiento.



Figura 2.2: Multiplexor de FM en funcionamiento.

La “mezcla” de las diferentes frecuencias, debe realizarse conservando las características que tendría la emisión de cada una de ellas, si ésta atacase de manera independiente la antena o sistema radiante.

2.2.- PARÁMETROS DE DIPLEXORES

Los parámetros de los diplexores son las características de los mismos que indicarán su calidad y por tanto, los que condicionarán la elección del tipo de diplexor atendiendo a las condiciones de utilización.

Para su definición nos guiaremos por la siguiente representación del flujo de potencia; cada una de las potencias que aparecerán en el esquema tendrá su correspondiente significado:

P1: Potencia incidente del transmisor 1 a la frecuencia F1.

P2: Potencia incidente del transmisor 2 a la frecuencia F2.

P1i: Potencia entregada por el diplexor a la antena a la frecuencia F1.

P2i: Potencia entregada por el diplexor a la antena a la frecuencia F2.

P1r: Potencia reflejada en el diplexor a la frecuencia F1.

P2r: Potencia reflejada en el diplexor a la frecuencia F2.

P1a: Potencia entregada por el diplexor al transmisor Tx2 a la frecuencia F1.

P2a: Potencia entregada por el diplexor al transmisor Tx1 a la frecuencia F2.

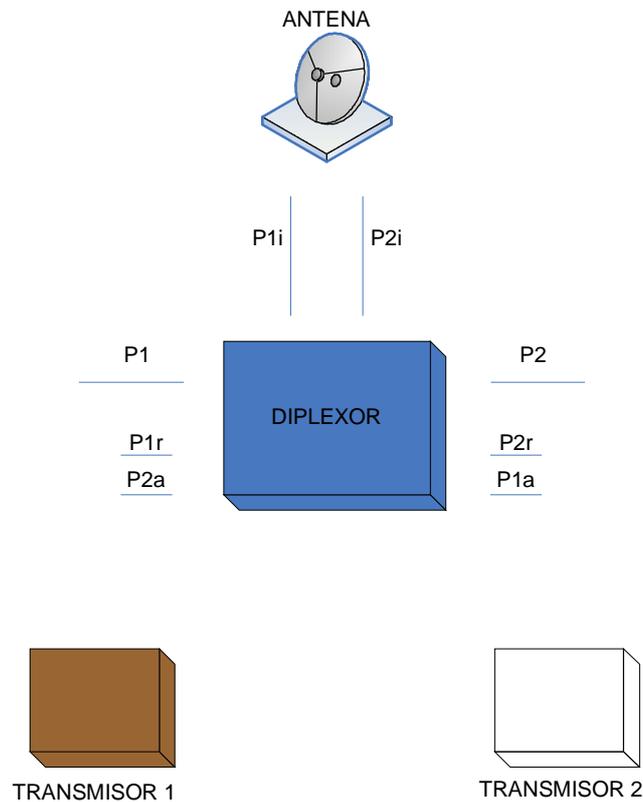


Figura 2.3: Esquema de representación del flujo de potencia en un Diplexor.

Pasemos ahora a describir brevemente, atendiendo al esquema y a la nomenclatura anteriores, los parámetros más importantes de un diplexor, como son los siguientes:

- Aislamientos.
- Pérdidas de Retorno.
- Pérdidas de Inserción.
- Banda de Paso.
- Separación de Frecuencias.
- Posibilidad de Resintonía.

2.2.1.- AISLAMIENTO

El aislamiento entre entradas será la medida de la potencia que procedente de un transmisor, aparece en la salida del otro. Este parámetro se mide en dB (decibelios). Se puede expresar mediante las expresiones siguientes:

$$A_{2 \rightarrow 1} = -10 \log \frac{P_{2a}}{P_2} \quad (2.1)$$



$$A_{1 \rightarrow 2} = -10 \log \frac{P_{1a}}{P_1} \quad (2.2)$$

Un valor práctico de este aislamiento es aquel que sea superior a 35 dB, aunque dado el avance de los equipos de estado sólido, normalmente de banda ancha, últimamente se suele elevar este valor hasta los 40 dB e incluso hasta los 45 dB.

2.2.2.- PÉRDIDAS DE RETORNO

Las pérdidas de retorno será la medida de la potencia que rechaza el diplexor debido a la desadaptación de impedancia en sus entradas, estando la salida cargada por una carga ideal de impedancia igual a la impedancia característica del sistema. Este parámetro se mide en dB (decibelios). Se puede expresar mediante las expresiones siguientes:

$$RL1 = 10 \log \frac{P_{1r}}{P_1} \quad (2.3)$$

$$RL2 = 10 \log \frac{P_{2r}}{P_2} \quad (2.4)$$

Un valor práctico de las pérdidas de retorno es de -26 dB, lo cual sería equivalente a una ROE de 1.1:1

2.2.3.- PÉRDIDAS DE INSERCIÓN

Las pérdidas de inserción será la medida de la potencia que el diplexor no transmite a la antena, bien porque se refleja el transmisor, bien porque se transmite al otro transmisor o bien porque se disipa en forma de calor debido a las pérdidas óhmicas del propio diplexor. Este parámetro se mide en dB (decibelios). Se puede expresar mediante la expresión siguiente:

$$L1 = -10 \log \frac{P_{1i}}{P_1} \quad (2.5)$$

En la práctica este parámetro tiene unos márgenes de variación entre 0.15 dB y 1.5 dB dependiendo del tipo de diplexor empleado.

2.2.4.- BANDA DE PASO

Hasta ahora siempre se ha hablado de frecuencias puras, pero en la práctica esto no es así, ya que la emisión se realiza en un espectro de frecuencia, alrededor de la frecuencia de la portadora, que se conoce como ancho del canal.



La banda de paso será la característica del diplexor que servirá para medir en qué ancho de banda, alrededor de la frecuencia portadora, se mantienen las características del diplexor. Valores típicos de este parámetro podrían ser por ejemplo en la banda FM (donde este parámetro se mide en KHz) sería de ± 150 KHz, y en la de UHF (donde este parámetro se mide en MHz) sería de 8 MHz.

2.2.5.- SEPARACIÓN DE FRECUENCIAS

Será la mínima separación entre portadoras necesaria para que el diplexor pueda seguir manteniendo sus características.

Este parámetro depende en gran medida del tipo de diplexor y de los elementos que lo componen y dada la gran variedad de tipos y elementos, su valor puede variar bastante. Para diplexores de FM los valores típicos podrían estar entre 5 MHz y 0.6 MHz.

2.2.6.- POSIBILIDAD DE RESINTONÍA

Será una característica del diplexor que indicará si con su configuración actual, es decir, sin necesidad de cambiar ningún elemento, sería posible sintonizarlo a otras frecuencias de entrada.

Esta característica dependerá del tipo de diplexor utilizado.

2.3.- ELEMENTOS DE DIPLEXORES

Un diplexor se compone siempre de uno o varios de los siguientes elementos convenientemente agrupados:

- Líneas de Transmisión.
- Acopladores Direccionales.
- Cavidades Resonantes o Resonadores.
- Cargas de Equilibrio.
- Sondas.

El número de elementos y la forma de agrupación dependerá del tipo de diplexor utilizado.

El objetivo de este texto no es el de realizar un estudio muy exhaustivo de estos elementos, por tanto vamos a realizar simplemente una breve descripción de cada uno de ellos, comentando sus características más importantes.

2.3.1.- LINEAS DE TRANSMISIÓN

Serán los elementos encargados de la transmisión entre los transmisores y el propio diplexor, así como en algunos casos, elementos constitutivos del diplexor. En el campo de la radiodifusión en FM, BIII y UHF se emplean casi exclusivamente líneas de transmisión coaxiales, bien en forma de cable coaxial o bien en forma de línea rígida.



2.3.2.- ACOPLADORES DIRECCIONALES

Los acopladores direccionales serán dispositivos de cuatro puertos, capaces de repartir la potencia entrante por uno de ellos a otros dos, permaneciendo el cuarto puerto aislado. Existen varios tipos pero el más interesante será el acoplador directivo de almas acopladas 3 dB.

Los acopladores de 3 dB trabajan de acuerdo con el principio de acoplamiento electromagnético. También están ideados para trabajar como acopladores híbridos y proporcionan una considerable mejora de las características de ancho de banda, en comparación con los híbridos circulares o ranurados. La impedancia de entrada y el aislamiento de los acopladores de 3 dB son virtualmente independientes de la frecuencia. La distribución de potencia es considerablemente menos dependiente de la frecuencia que con cualquier otro circuito comparable. La mayoría de los campos de aplicación son la distribución y combinación de potencia de RF.

2.3.3.- CAVIDADES RESONANTES O RESONADORES

Los resonadores serán elementos sintonizados paso banda, es decir, elementos que permiten el paso de una banda de frecuencias, rechazando el resto. Existen varios tipos, si bien el que presentará mayor interés es la cavidad coaxial. Éste consistirá en una línea coaxial cuya altura tendrá una longitud de $\lambda/4$ de la frecuencia pasante. La energía se introduce y sale de la cavidad por medio de dos acopladores magnéticos consistentes en dos bucles de área efectiva variable.

El caso más importante que se puede comentar será el de los Filtros Paso Banda que serán resonadores coaxiales $\lambda/4$, acoplados entre ellos mediante un iris, siendo los acoplamientos de entrada y salida mediante bucles variables. El acoplo interno se realiza mediante un iris variable exteriormente para obtener la curva de respuesta adecuada del filtro. El acoplamiento de salida y entrada se hace mediante sendos bucles de área efectiva variable. La sintonía se realiza mediante los pistones.

2.3.4.- CARGAS DE EQUILIBRIO

Serán cargas artificiales de impedancia igual a la característica (normalmente 50 Ω) encargadas de absorber la energía procedente de reflexiones indeseadas o malos aislamientos. Su construcción es coaxial y la potencia admisible dependerá de la potencia de los transmisores, aislamiento entre entradas y separación de frecuencias.

Estas Cargas de Equilibrio serán el primer elemento sobre el cual el dispositivo Moremux va a ejercer su control, ya que la temperatura que alcanzan no debe exceder un determinado umbral. Este umbral dependerá del modo de funcionamiento del diplexor, de su tipo, de la potencia a la que se vea sometido etc. Por tanto el umbral de temperatura será un parámetro configurable por el usuario, el cual podrá modificarlo por medio del interfaz dispuesto para tal efecto (teclado que controlará un menú en una pantalla de tipo display). La temperatura a la cual se ve sometida la carga será controlada por un sensor de temperatura, en concreto un Termopar.



Figura 2.3: Carga de Equilibrio de la casa Bird (250 watos).

2.3.5.-SONDAS

Las sondas serán dispositivos encargados de atenuar la potencia que los atraviese; esta atenuación puede ser variable pero normalmente será de 50dB en las entradas de banda ancha y de 60 dB en la salida a antena. Éstas tendrán dos puntos de medida en los que podremos medir el valor de la potencia directa y el valor de la potencia reflejada tras atravesar la sonda, es decir, una vez que la potencia ya haya sido atenuada.

Las sondas serán, junto a las ya mencionadas Cargas de Equilibrio, los otros elementos sobre los que el dispositivo Moremux ejercerá su control. El nivel de ROE de las sondas será el parámetro a controlar en esta ocasión, el cual se obtendrá a partir de las potencias directa y reflejada; dicho nivel de ROE no deberá exceder un valor umbral. Este valor umbral, al igual que en el caso de las Cargas de Equilibrio, dependerá de varios factores. Por otra parte, en un diplexor hay varias sondas diferentes en distintos puntos como se ha mencionado con anterioridad. El umbral no tiene por qué ser el mismo para todas, con lo cual es de nuevo fundamental que el usuario pueda configurarlo para cada una de las sondas que constituyen el diplexor; podrá hacerlo por medio del interfaz dispuesto para tal efecto (teclado que controlará un menú en una pantalla de tipo display). Estas potencias directa y reflejada serán medidas por medio de sensores de Potencia.



Figura 2.4: Sonda de 50dB de atenuación, conectada a sensores de Potencia.

2.4.- TIPOS DE DIPLEXORES

En este apartado estudiaremos los tipos de diplexores más frecuentemente utilizados en la diplexión de programas de FM y UHF. En concreto, vamos a presentar aquí los siguientes cuatro tipos:

- Acopladores Direccionales.
- Línea de Retardo.
- Star – Point.
- Carga Constante.

2.4.1. DIPLEXOR DE ACOPLADOR DIRECCIONAL

Será el tipo de diplexor a utilizar en caso de polarización circular, compuestos por antenas con dos planos ortogonales de polarización. Estos diplexores presentarán el esquema de la figura:

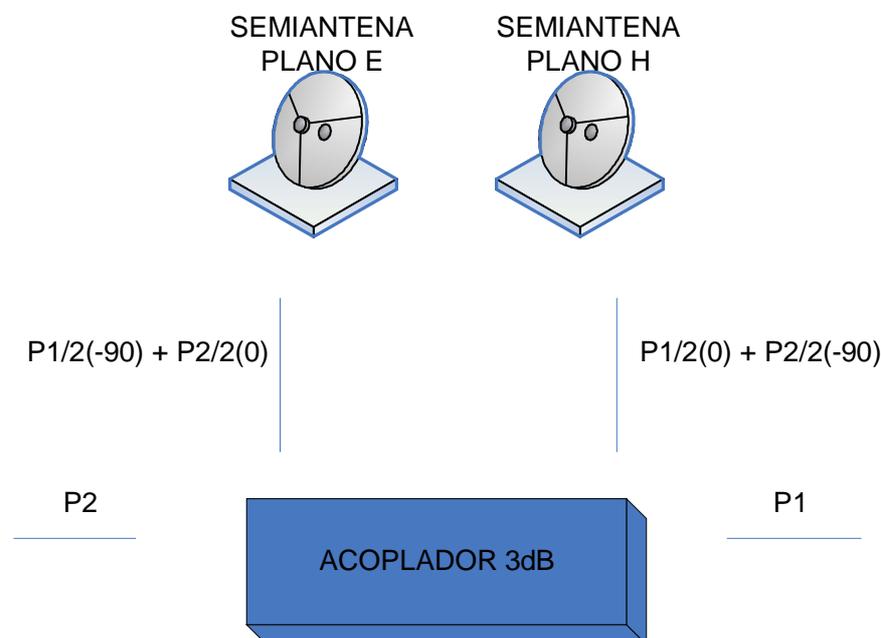


Figura 2.5: Esquema del Diplexor de Acoplador Direccional.

Entre las ventajas que presenta este tipo de diplexor, cabe destacar su sencillez y que las frecuencias a diplexar pueden estar muy próximas. Además presenta como ancho de banda, prácticamente toda la banda de FM y es por supuesto muy económico. Por otra parte, su principal inconveniente será que el aislamiento es función de la adaptación que presente la antena, siendo muy difícil conseguir un aislamiento superior a 26 dB, con lo cual es muy probable la aparición de productos de intermodulación.



Estos diplexores solo se emplearán en instalaciones muy económicas y que no presenten demasiadas exigencias de calidad.

2.4.2. DIPLEXOR DE LÍNEA DE RETARDO

Este diplexor estará compuesto por dos líneas cuya diferencia de longitudes debe ser un múltiplo impar de la media longitud de onda de una frecuencia y a la vez múltiplo par de la media longitud de onda de la otra longitud de onda.

Como ventajas principales de este tipo de diplexores destacan las siguientes: Bajo coste, buen desacoplo (debido a que las reflexiones no deseadas se absorben en la carga de equilibrio) y es indicado para altas potencias con bajas pérdidas de inserción. Como inconvenientes, por un lado es fundamental la necesidad de una separación de las frecuencias a diplexar para obtener una longitud razonable de línea de retardo, y por otro lado, en estos diplexores la sintonía es muy crítica, siendo necesario la sustitución de la línea de retardo en cada ocasión en la que el diplexor sea resintonizado.

Estos diplexores presentarán el esquema de la figura siguiente:

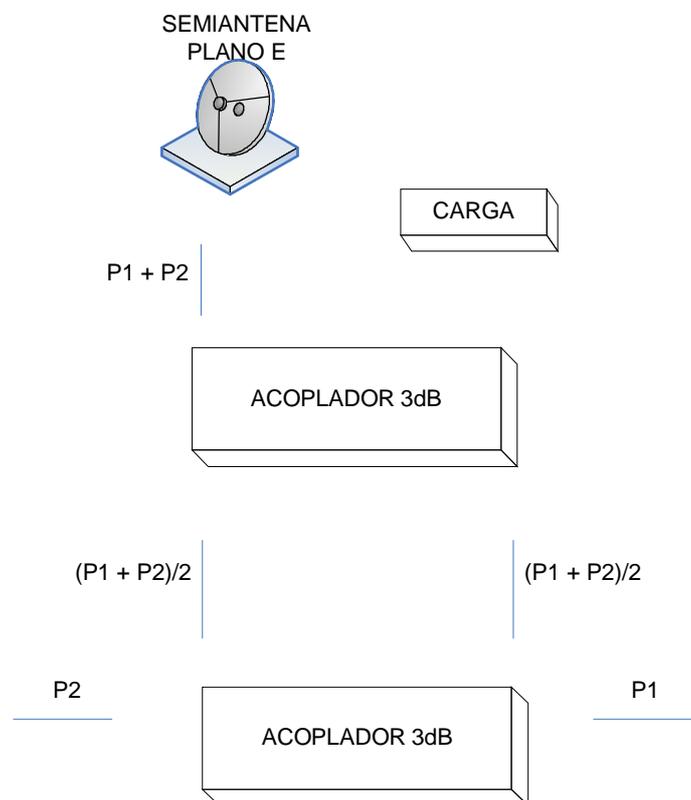


Figura 2.6: Esquema del Diplexor de Línea de Retardo.

Estos diplexores se utilizarán para instalaciones con grandes potencias y de calidad media, principalmente en UHF, aunque en FM también se realizan diplexiones con este dispositivo siempre y cuando las frecuencias estén suficientemente separadas.

2.4.3. DIPLEXOR STAR – POINT

Será sin duda alguna, uno de los diplexores más utilizados en FM y UHF, dada la bondad de sus características y su coste moderado.

El aislamiento entre entradas es debido al rechazo que presenta el filtro a la frecuencia de la otra entrada y por tanto, nos limita la separación mínima entre frecuencias. Para filtros de dos cavidades esta separación debe ser de al menos 5 MHz mientras que para filtros de tres cavidades, son aceptables separaciones mínimas de hasta 1.5 MHz. Por otra parte, para conseguir una buena adaptación es necesario que la longitud de línea que une a cada filtro con el punto de encuentro sea $\lambda/4$ de la otra frecuencia, con lo que presentaría a la otra frecuencia, un circuito abierto. Las pérdidas de inserción podrán variar entre 0.10 dB y 0.5 dB, consiguiéndose así adaptaciones siempre mejores de 26 dB.

Este diplexor estará compuesto por dos Filtros Paso de Banda, dispuestos como se indica en la figura siguiente:

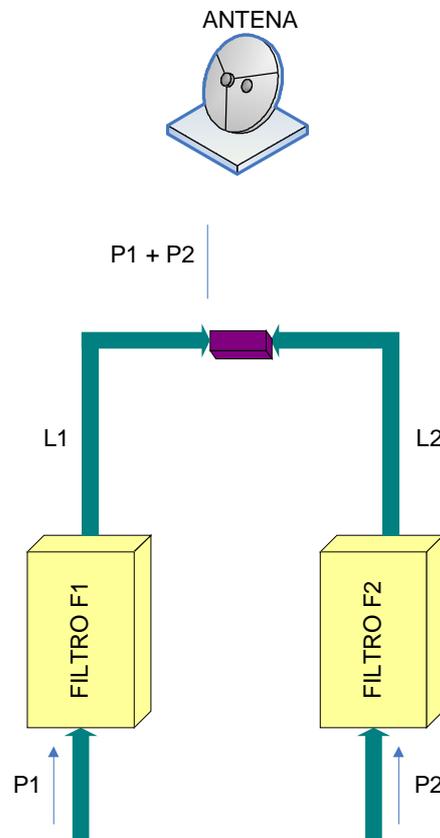


Figura 2.7: Esquema del Diplexor Star - Point.

La ventaja más importante de este diplexor respecto a los dos anteriores, es que será capaz de adaptar impedancias y así se puede lograr que el transmisor vea una estupenda carga en su salida, aunque la adaptación que presente la antena no sea muy buena. El problema del

diplexor Star-Point, es que la resintonía es posible en un margen limitado de frecuencias (± 1.5 MHz), debiendo cambiarse las líneas de transmisión en caso de que esta resintonía fuese de mayor magnitud.

2.4.4. DIPLEXOR CARGA CONSTANTE O PUENTE

Será el diplexor que mejores características presenta y además será el diplexor sobre el que prestaremos mayor atención, ya que es el diplexor sobre el que se han hecho todas las pruebas de campo y sobre el que haremos todas las referencias de aquí en adelante.

Está especialmente indicado para diplexión de frecuencias muy próximas y en instalaciones de alta calidad, donde sea necesario un alto aislamiento entre transmisores y una gran supresión de productos de intermodulación. Se compone de dos Filtros Paso Banda, dos acopladores 3 dB y una carga de equilibrio, interconexiónados entre sí por líneas de transmisión.

Estos diplexores presentarán el esquema de la figura siguiente:

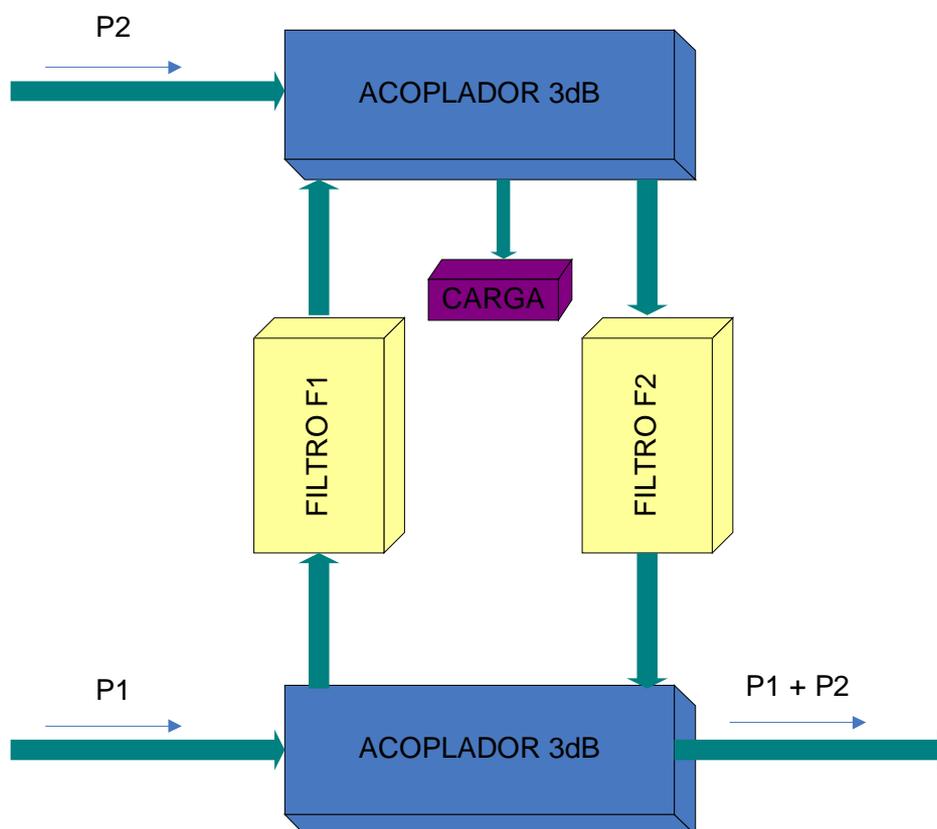


Figura 2.8: Esquema del Diplexor de Carga Constante.

Como se puede comprobar, una de las entradas no estará sintonizada, es decir, P1 puede ser una potencia de cualquier frecuencia dentro de la banda de FM. Esto permite por tanto, que esta entrada (llamada de banda ancha) pueda ser utilizada como entrada de una anterior

diplexión, con lo que la multiplexión sería fácilmente realizable; de hecho éste será, como ya se comentó al comienzo del capítulo, el modo de funcionamiento más habitual que se podrá encontrar en los distintos centros de emisión.

El aislamiento entre la banda ancha y la entrada de banda estrecha será la suma del aislamiento entre bocas del acoplador directivo y del rechazo de las cavidades a la frecuencia de banda ancha. El aislamiento entre la entrada de banda estrecha y la de banda ancha será el proporcionado por el acoplador. En caso de mayores exigencias de aislamiento, en la entrada de banda ancha se colocará un Filtro Paso Banda, con lo cual se sumará el rechazo producido por este filtro a la frecuencia de banda estrecha.

Esta será la configuración más habitual, la cual podemos observar en la figura siguiente:

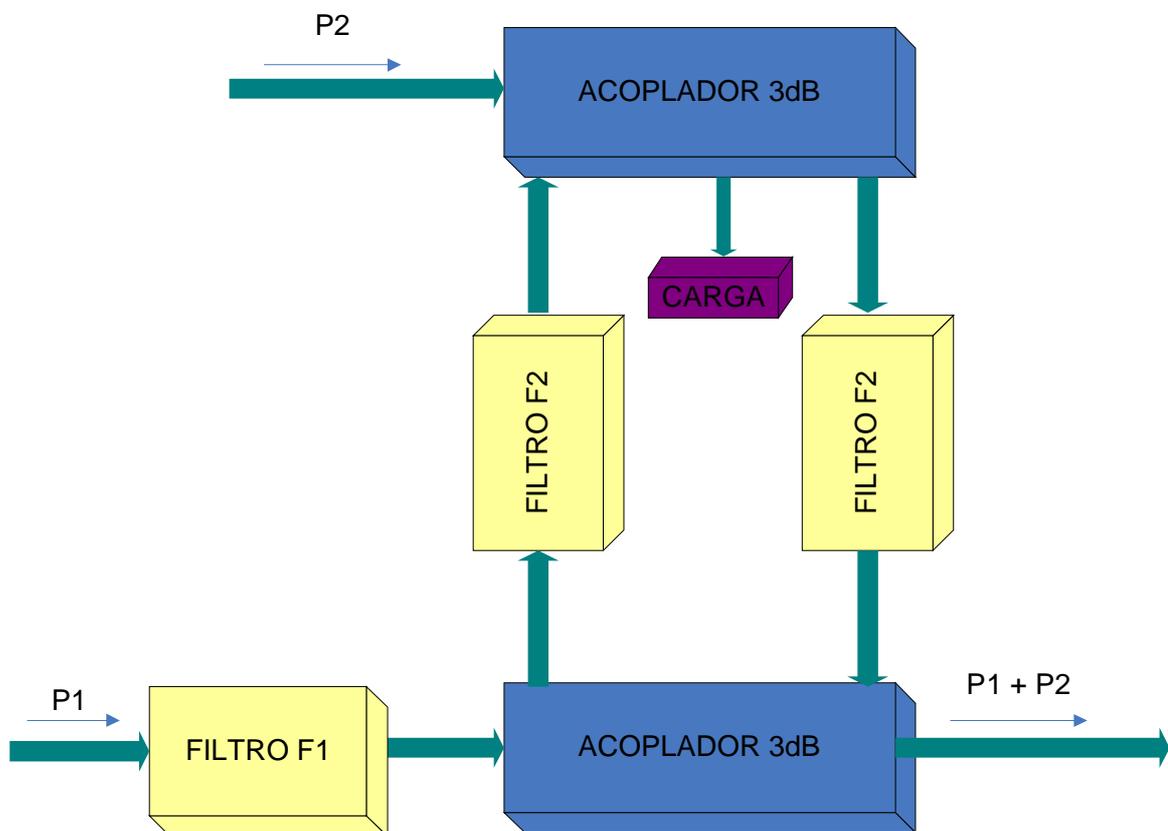


Figura 2.9: Esquema del Diplexor de Carga Constante con Filtro Paso Banda a la entrada.

Con este tipo de diplexor se conseguirán aislamientos superiores a los 40 dB, diplexando frecuencias separadas solamente 1.5 MHz usando Filtros Paso Banda de dos cavidades; con filtros de tres cavidades podemos garantizar este aislamiento con una separación de frecuencias de solo 1 MHz. En casos muy especiales se ha llegado a diplexar frecuencias separadas solo 0.7 MHz, usando Filtros Paso Banda de cuatro cavidades.



2.5.- DISEÑO DE DIPLEXORES

Vamos a ver en este apartado y resumidamente cómo se calcula el tipo de diplexor con el que hemos trabajado en la realización de este proyecto y que no es otro que el Diplexor de Carga Constante. La explicación se va a realizar a modo de ejemplo ya que es la manera más ilustrativa y sencilla de hacerlo.

2.5.1. CÁLCULO DE DIPLEXOR CARGA CONSTANTE

El primer paso que se daría en este cálculo, es la definición de las frecuencias de operación en el orden en que vayan a ser colocadas en el multiplexor. Estas frecuencias se expresarán en Megahercios:

$f_1 = 96.3$ Esta será la frecuencia de sintonía del filtro más próximo a antena.

$f_2 = 90.6$ Esta será la frecuencia de banda ancha.

El paso siguiente sería el de definir el ancho de banda del canal, que normalmente será de 300 KHz excepto para casos muy excepcionales.

$$d = \frac{300}{1000} \quad (2.6)$$

$f = 87.5, 87.55, \dots, 108$ Este será el margen de frecuencias a considerar.

Con estos datos se podrán obtener los factores de disonancia de los filtros.

En el diplexor definido, el canal de $f_1 = 96.3$ será pasante a través de los filtros, mientras que el canal de $f_2 = 90.6$ será rechazado por los mismos.

Las energías de ambos canales tendrán dos encaminamientos distintos:

- a) Hacia Antena:
 - a.1) La energía rechazada deseada del canal f_2 .
 - a.2) La energía pasante deseada del canal f_1 .
- b) Hacia Carga:
 - b.1) La energía pasante indeseada del canal f_2 .
 - b.2) La energía rechazada indeseada del canal f_1 .



Por tanto, para considerar el apartado a), calcularemos los coeficientes de reflexión del canal f_2 y los de transmisión del canal f_1 al encontrarse ambos con el primer filtro.

$$n_1(f) = \frac{f}{f_2} - \frac{f_2}{f} \quad (2.7)$$

La ecuación anterior corresponderá con el Factor de Disonancia del filtro.

El Q óptimo de este primer filtro se obtendría de la siguiente relación:

$$Q_{o1} = \sqrt{\frac{2}{n_1(f_2 + d)n_1(f_1 - d)}} \quad (2.8)$$

$$Q_{o1} = 73.486796 \quad (2.9)$$

La admitancia de entrada normalizada de un filtro compuesto por dos cavidades acopladas por un iris inversor de fase, viene determinada por la expresión siguiente:

$$g_1(f) = \frac{1}{1 + jQ_{o1}n_1(f)} + jQ_{o1}v_1(f) \quad (2.10)$$

De la anterior admitancia, se podría deducir el valor de los coeficientes de reflexión. Estos vendrán dados por la expresión:

$$K_{r1}(f) = \left| \frac{1 - g_1(f)}{1 + g_1(f)} \right| \quad (2.11)$$

Los valores que toma esta ecuación en función de la frecuencia serán:

$$\begin{aligned} K_{r1}(f_1 - d) &= 0.026237 & K_{r1}(f_1) &= 0 & K_{r1}(f_1 + d) &= 0.0226155 \\ K_{r1}(f_2 - d) &= 0.999723 & K_{r1}(f_2) &= 0.999692 & K_{r1}(f_2 + d) &= 0.999656 \end{aligned} \quad (2.12)$$



Los coeficientes de transmisión estarán ligados con los de reflexión por medio de la siguiente expresión:

$$Kt1(f) = \sqrt{1 - Kr1(f)^2} \quad (2.13)$$

Los valores que toma esta ecuación en función de la frecuencia serán:

$$\begin{array}{lll} Kt1(f1 - d) = 0.999656 & Kt1(f1) = 1 & Kt1(f1 + d) = 0.999658 \\ Kt1(f2 - d) = 0.023536 & Kt1(f2) = 0.024832 & Kt1(f2 + d) = 0.026237 \end{array} \quad (2.14)$$

Por último, con estos coeficientes se podrían calcular las atenuaciones de las señales de ambos canales, tanto en su camino hacia antena como en su camino hacia la carga:

Pérdidas en el camino hacia la antena:

$$\text{Frecuencia } f1: \quad Pf1(f) = 20 \log(Kt1(f)) \quad (2.15)$$

$$\text{Frecuencia } f2: \quad Pf2(f) = 20 \log(Kr1(f)) \quad (2.16)$$

Atenuaciones en el camino hacia la carga:

$$\text{Frecuencia } f1: \quad Af1(f) = 20 \log(Kr1(f)) \quad (2.17)$$

$$\text{Frecuencia } f2: \quad Af2(f) = 20 \log(Kt1(f)) \quad (2.18)$$

2.6.- CONCLUSIÓN

Como conclusión a este capítulo, vamos a mostrar como se conectaría el dispositivo Moremux a un diplexor.

Se muestra en la figura siguiente un Diplexor de FM de Carga Constante sintonizado a una frecuencia de 88.1 MHz, en el cual se pueden observar, además de varios de los elementos comentados en este capítulo, algunos de los sensores del dispositivo Moremux conectados a dicho diplexor. Por un lado se observa el sensor Termopar conectado a la carga del diplexor midiendo su Temperatura, y por otro lado los sensores de Potencia conectados a la sonda de entrada de banda estrecha midiendo su ROE:



Figura 2.10: Diplexor de FM de Carga Constante y sensores de Moremux.