

Amplificadores Doherty y cómo se aplican a la TDT

Fred Stefanik

Hitachi Kokusai Electric Comark LLC
Southwick MA, USA
fstefanik@comarktv.com

Preámbulo

Este artículo analizará los amplificadores Doherty y cómo se aplican a la televisión digital. En los últimos 10 a 15 años ha habido avances en la tecnología de los amplificadores de estado sólido LDMOS resultando siempre en mejoras de los transmisores de televisión digital. En los últimos años, los fabricantes de equipos transmisores han venido aplicando la antigua técnica Doherty a los transmisores de estado sólido para TDT (Televisión Digital Terrestre), aumentando así la eficiencia del transmisor que, en tiempos más recientes, empiezan a acercarse a la alta eficiencia de los transmisores de TDT de alta potencia con válvulas MSCD IOT. ¿Qué es Doherty y cómo funciona? Este artículo explicará el principio básico de Doherty, diferentes metodologías para la aplicación de este principio, los pros y los contras de estas distintas metodologías, y cómo afectan al rendimiento del amplificador. También hay propuestas a fin de mejorar/actualizar el estándar de modulación original usado, de ATSC1.0 (8VSB) a ATSC3.0 (OFDM). Esto tiene un impacto de RF sobre los transmisores como la relación pico a promedio (PAR), en el nuevo estándar es aproximadamente 3dB más alta, afectando el rendimiento del transmisor y/o la capacidad para generar la misma potencia promedio de salida. El artículo discutirá algunas técnicas y métodos para tratar con esta actualización.

Historia

Durante las últimas seis décadas, las válvulas de vacío han sido el dispositivo amplificador de elección utilizado en transmisores de televisión. Especialmente, para los radiodifusores en UHF, la eficiencia del transmisor ha sido cada vez más crítica para el costo de operación de estos sistemas de alta potencia. En los últimos 25 años los transmisores de TV en VHF y UHF de estado sólido han ido ganando popularidad y sus niveles de potencia, densidades de potencia y eficiencia del transmisor siguen aumentando. Además, los transmisores de estado sólido poseen otras cualidades inherentes tales como; mecanismos de falla leves, no emplean altos voltajes potencialmente letales y requisitos menos estrictos en el mantenimiento y del personal necesario para realizar este mantenimiento y reparación.

Los fabricantes de transistores de RF LDMOS han hecho grandes progresos en los últimos 5 a 7 años aumentando dramáticamente los niveles de potencia y robustez de los dispositivos, junto con el aumento de su eficiencia operativa. Esto, junto con un concepto inventado hace unos 80 años por William H. Doherty para incrementar la eficiencia, ha hecho de los transmisores de TDT de estado sólido de alta potencia la tecnología ac-

tual y previsible como la opción de futuro. ATSC 1.0 fue adoptado por la FCC y puesto en uso hace 20 años (1996), pero el tiempo y la tecnología, especialmente la tecnología digital, avanzan inexorablemente. Los radiodifusores están a punto de alcanzar un nuevo estándar con el que trabajar, el ATSC 3.0. A diferencia de ATSC 1.0, que usa modulación 8-VSB con una relación de potencia pico/promedio de unos 7 dB, ATSC 3.0 está basado en OFDM y tiene una relación de potencia pico/promedio de aproximadamente 10dB. Esto significa que los transmisores necesitarán producir aproximadamente el doble de potencia pico con esta nueva modulación para mantener el mismo nivel de potencia promedio de salida licenciada anteriormente. Hay muchas maneras de ayudar a afrontar este cambio incluyendo pero no limitando a la configuración del amplificador final y los puntos de operación, así como algunos "trucos digitales" que se pueden lograr en los moduladores, todos tratando de no tener un impacto negativo en el rendimiento y/o la eficiencia del transmisor.

Amplificadores de clase AB tradicionales

Los transmisores de estado sólido de TV modernos emplean FETs LDMOS como su dispositivo amplificador activo. Los FETs funcionaban en modo lineal clase AB. Este modo de operación era un buen compromiso entre linealidad, eficiencia y capacidad de potencia pico. Los FETs LDMOS operaban inicialmente a 24-28 VCC y tenían una capacidad de potencia de <100W pico por FET. Algunos avances se hicieron con la tecnología LDMOS logrando llegar a 32VCC y esto permitió que fueran empujados a niveles de potencia hasta un nivel máximo de 150 vatios por FET. Este nivel de operación resultó el "estándar" en los transmisores desde mediados de los años 90 a principios de los 2000. Los fabricantes de FETs LDMOS continuaron empujando la tecnología de 32VCC y para 2005 conseguían niveles de pico de 300 watts por cada FET. Para 2006 los fabricantes de transmisores fueron introduciendo FETs LDMOS que ya operaban en 50VCC. Esto permitió que los niveles de potencia aumentaran otra vez desde unos 450 vatios pico a pico a aproximadamente 600 vatios por FET. Una vez que llegaron a este nivel de potencia se notó rápidamente que necesitaban mejorar las características térmicas de estos nuevos dispositivos de alta potencia. Entre 2007 y 2008 lo consiguieron y así la industria ahora tenía FETs de alta potencia de buena calidad para construir transmisores.

TV digital y el amplificador de clase AB

En 1996, llegó el estándar de transmisión digital ATSC 8-VSB en los Estados Unidos. A los radiodifusores se les concedió un segundo canal para "emitir simultáneamente" lo que estaban transmitiendo en su formato

analógico original (NTSC). En formato NTSC analógico, la potencia de la portadora de video se mide como la potencia de pico durante el impulso de sincronización horizontal. Con el cambio a TV digital, ya que la señal modulada era banda ancha y constante por el diseño, la medida de la potencia ahora iba a estar referida a la potencia promedio. Esto hizo la medición de la potencia relativamente fácil, pero debido a la naturaleza de la señal ATSC, el sistema de amplificación debía ser capaz de reproducir los picos de modulación o factor de cresta de RF que creó. Estos picos, en una señal pura 8-VSB, son aproximadamente 8.3dB por encima del nivel promedio de potencia de la señal. La Figura 1 muestra un gráfico CCDF de una señal ATSC 8-VSB justo a la salida de un excitador con toda la corrección desactivada. Debido a que los excitadores de TV digital emplean diversos esquemas de técnicas de linealización, y la FCC permitió la distorsión de intermodulación fuera del canal, siempre y cuando encajara en una máscara espectral de cumplimiento, esto habilitó que los sistemas de amplificación operaran en compresión de potencia de pico. Lo que significa que el factor de cresta en lugar de ser 8,3 dB podría reducirse, aumentando de este modo la capacidad de potencia media de un amplificador particular. Desde el punto de vista de un amplificador no importaba, ya que el amplificador operaría simplemente en saturación en los picos de la señal y crearía productos de distorsión que debían filtrarse, corregirse o ambos. Desde una perspectiva de calidad de señal y la perspectiva de cumplimiento espectral FCC, uno realmente podría excitar a un sistema amplificador tan fuerte antes de que la calidad de la señal se degradara más allá de un nivel útil, incluso con la linealización y filtrado. Este nivel de compromiso para ATSC/8-VSB resultó en un factor de cresta típico de 6,5 a 7dB. Lo que significa, desde la perspectiva de amplificador, es que para un factor de cresta de 7dB, el amplificador tendría que ser "degradado" en el nivel de potencia *promedio* desde su capacidad máxima de potencia saturada pico de 7dB o 20% de su capacidad total. Esto significa que uno de los últimos dispositivos FET LDMOS de 600 vatios pico operará a aproximadamente 120 vatios de potencia promedio en ATSC/8-VSB.

El otro resultado de operar un amplificador de clase AB en aproximadamente el 20% de su potencia de salida nominal máxima es que la eficiencia del amplificador es bastante baja. La Figura 2 muestra la curva de eficiencia vs la potencia de salida de un BLF888A de Ampleton operando en clase AB y siendo accionado con una señal modulada ATSC/8-VSB.

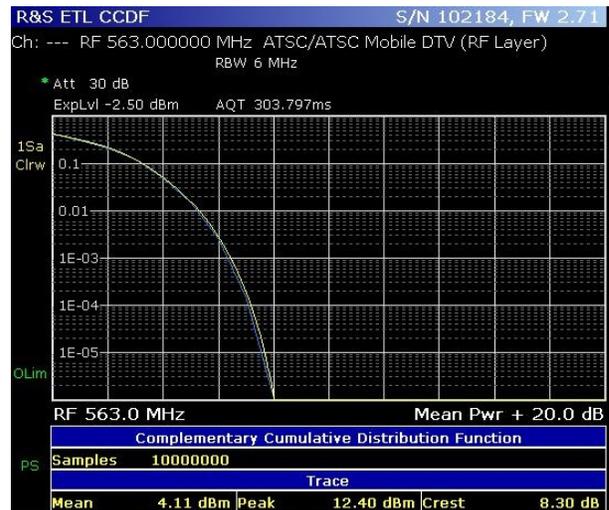


Fig. 1: Curva CCDF de una señal de RF ATSC/8-VSB

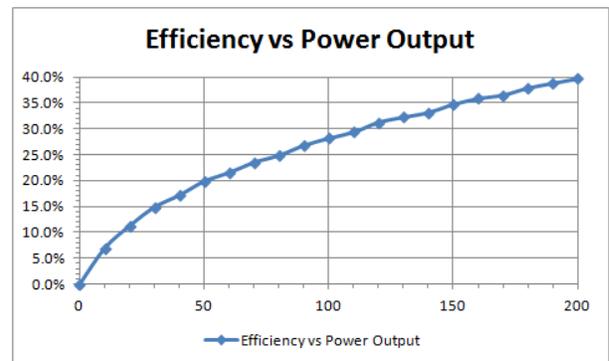


Fig. 2: BLF888A Clase AB Eficiencia vs Potencia

Como se muestra en la Figura 2, la eficiencia a 120 vatios de potencia de salida es de aproximadamente 31%.

Los otros elementos de rendimiento a considerar, como se mencionó anteriormente, es la capacidad de los amplificadores para reproducir la señal modulada digitalmente. En un amplificador de clase AB tradicional, hay una "degradación graciosa" del rendimiento de la señal cuando el amplificador es "empujado" más fuerte. En la Figura 3 se muestran las curvas de potencia de entrada vs salida del amplificador BLF888A. La potencia de entrada está en vatios promedio, mientras que la potencia de salida muestra tanto vatios promedio como vatios pico calculados. El cálculo se realizó utilizando la potencia media y factorizando el factor de cresta según se lee en el analizador de señales R&S ETL. Como puede verse, la curva de potencia promedio es bastante lineal y recta mientras que la curva de potencia de pico muestra no linealidades de compresión y saturación. Estos datos se tomaron sin ninguna linealización aplicada para mostrar el rendimiento "natural" del amplificador bajo prueba.

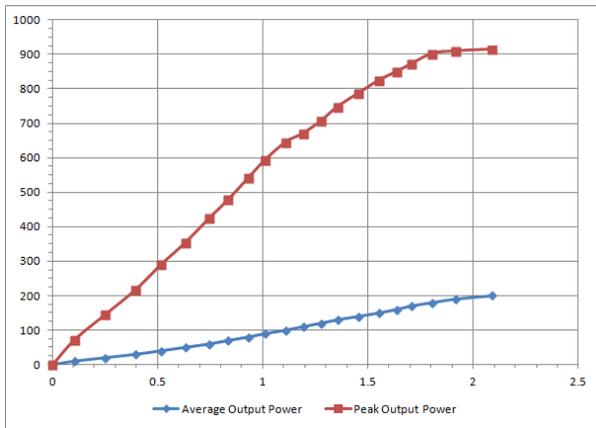


Fig. 3: BLF888A Clase AB Potencia de Entrada vs Salida

También podemos ver cómo el rendimiento de la señal (hombros y MER) se ven afectados por el nivel de potencia de salida del amplificador. La Figura 4 a continuación es el mismo amplificador que compara el nivel de los hombros y el MER vs la potencia de salida promedio. Otra vez, no se está usando ninguna linealización para permitir mostrar el rendimiento natural del amplificador.

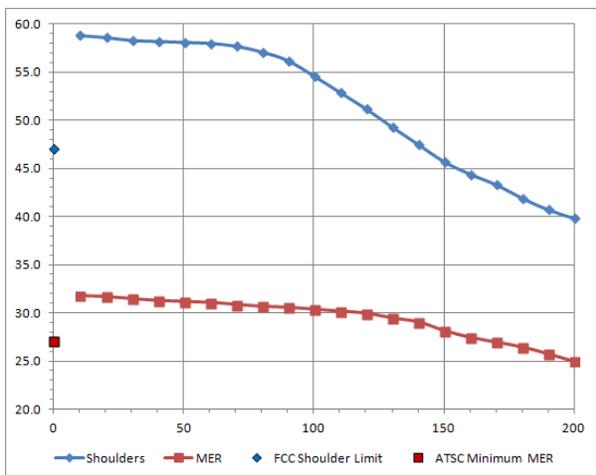


Fig. 4: BLF888A Potencia vs Calidad de Señal

Como puede verse, cuando el amplificador se lleva a niveles de potencia más altos produce distorsiones en la señal que dan como resultado un rendimiento degradado. Este amplificador sin linealización cumple con los criterios de rendimiento de la FCC hasta aproximadamente 140 vatios de potencia promedio de salida, donde los niveles de hombro son los primeros en acercarse al límite de rendimiento en 47.5dB.

Mediante el uso de técnicas de linealización digital en el ATSC Digital Exciter, este amplificador puede ser "corregido" a niveles aceptables de rendimiento de señal de hasta 170 vatios de potencia promedio de salida. Las Figuras 5, 6 y 7 muestran el rendimiento "corregido" de este amplificador en el nivel de potencia de 170 vatios.

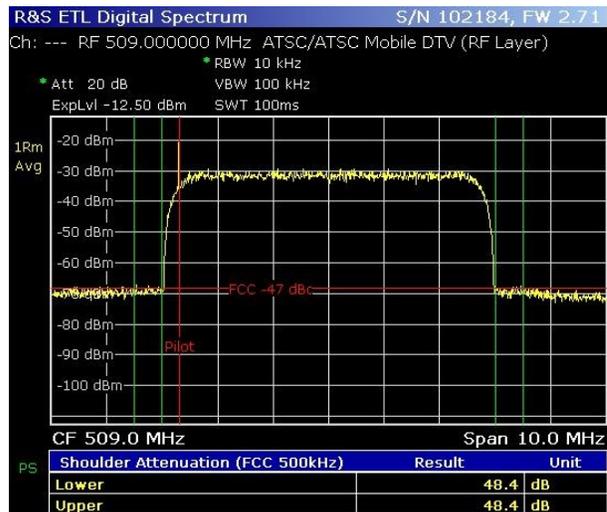


Fig. 5: BLF888A Hombros Corregidos a 170 vatios

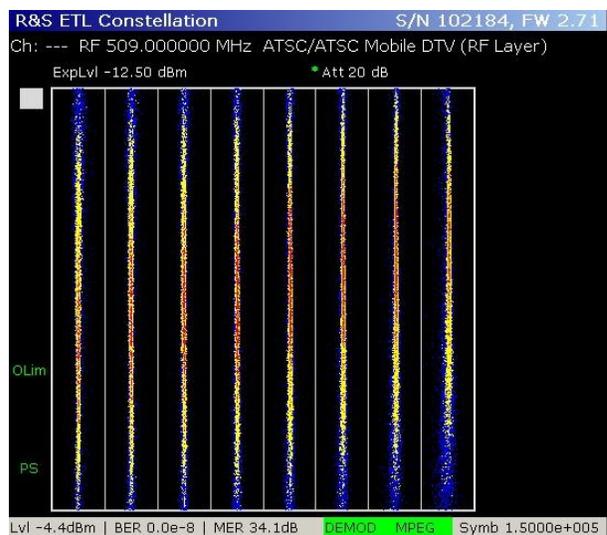


Fig. 6: BLF888A Constelación Corregida a 170 vatios

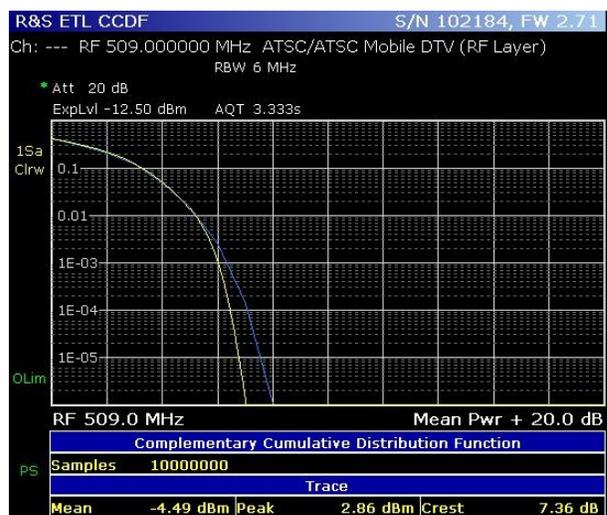


Fig. 7: BLF888A Curva CCDF Corregida a 170 vatios

Como se muestra en la Figura 7 anterior, este amplificador, cuando se corrige, tiene ahora un factor de

cresta de 7,36dB que da como resultado un nivel de potencia de salida pico de 921 vatios, que por comparación en la curva mostrada anteriormente en la Figura 3 está bien dentro de la región de compresión del amplificador. Mediante el uso de "corrección" este amplificador es llevando ahora a mayor potencia, el otro beneficio es una mayor eficiencia. Mientras que este amplificador cumplió con las especificaciones FCC a 140 vatios de salida, la eficiencia del mismo fue de 33%. En el nivel de 170 vatios la eficiencia es ahora de 36,5%. Este aumento de 3,5 puntos porcentuales puede parecer pequeño, pero para el radiodifusor que opera una gran planta de transmisión con una enorme factura de electricidad mensual, se alegrará de la reducción de más del 10% en esa factura.

¿Qué pasa con el ATSC 3.0?

Hasta ahora, toda la modulación digital utilizada ha sido ATSC 1.0 u 8-VSB. La industria está a punto de lanzar un nuevo estándar de televisión digital llamado ATSC 3.0. El estándar ATSC 3.0 usa modulación tipo OFDM. La modulación OFDM tiene una relación de pico a promedio o factor de cresta de aproximadamente 10dB. Como se ha comentado anteriormente, cualquier amplificador no puede entregar tanta potencia. Además, incluso si se utilizan técnicas de linealización para mejorar el rendimiento de la señal, hay un límite en la capacidad de un amplificador particular para producir potencia con especificaciones de señal aceptables. Parece que el factor limitante para esto, de nuevo, será una especificación de hombros; como parece que la FCC no cambiará los requisitos de máscara espectral para los transmisores cuando el estándar de modulación cambie de ATSC 1.0 a ATSC 3.0, dejando la especificación de hombros tal como se medía originalmente.

Para mostrar el efecto de esta modulación y el cambio del factor de cresta, vamos a tomar ese mismo amplificador BLF888A y ver a qué niveles de potencia tendrá un rendimiento aceptable sin y con corrección utilizando una modulación OFDM DVB-T2 con características de señal RF muy similar a ATSC 3.0. Sin corrección este amplificador ahora sólo es capaz de entregar 90 vatios de potencia de salida, siendo los hombros el primer parámetro para acercarse a las especificaciones mínimas. Al nivel de potencia promedio de 90 vatios, el factor de cresta es de 9,8 dB, resultando en una potencia pico de 852 vatios de este amplificador. Ahora, si usamos las capacidades de "linealización" digital de los excitadores, podemos forzar este amplificador hasta 120 vatios de potencia promedio de salida con resultados de rendimiento de señal aceptables. Las Figuras 8, 9 y 10 a continuación muestran el comportamiento de la señal corregida por DVB-T2 de este amplificador.

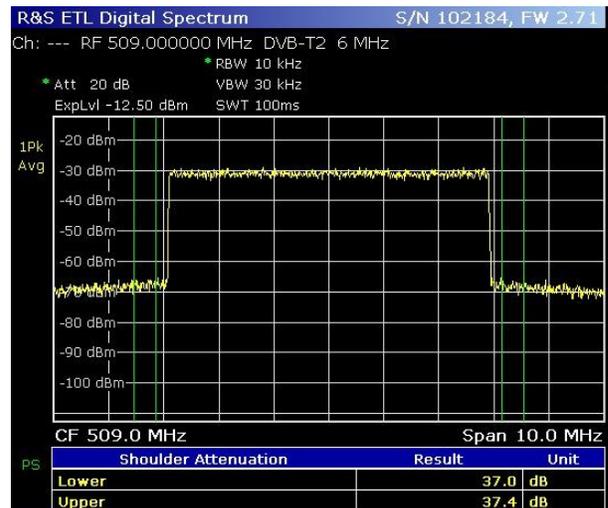


Fig. 8: BLF888A Hombros Corregidos DVB-T2

Puesto que utilicé una señal DVB-T2 para representar una señal basada en OFDM tal como ATSC3.0, la técnica de medición para los hombros de esta señal difiere de la requerida por la FCC para la señal ATSC1.0 actual. La medición actual de los hombros de la señal se basa en medir los hombros en una "banda de potencia" de 500kHz de ancho en comparación con la señal de canal en una "banda de potencia" de 6MHz. La especificación FCC para esto es 47dB. Cuando se mide una señal DVB-T2, esta medición se realiza comúnmente mediante el simple uso de marcadores tanto en banda como en cada hombro. Estos 2 tipos de medidas dan como resultado una diferencia medida en la misma señal de aproximadamente 11dB haciendo que la especificación actual de 47dB para los hombros aparezca como 36dB medida con marcadores en las señales DVB-T2.

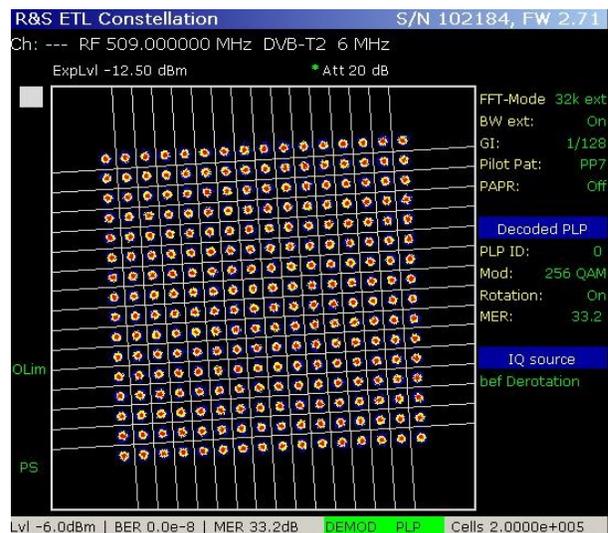


Fig. 9: BLF888A Constelación Corregida DVB-T2

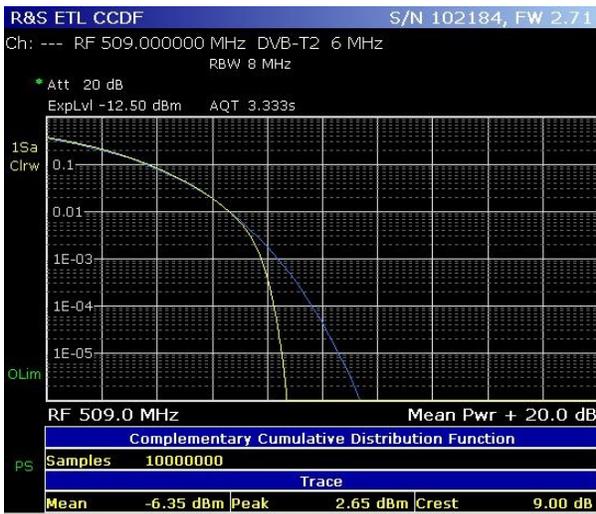


Fig. 10: BLF888A Curva CCDF Corregida

Como se muestra en la Figura 10 anterior, este amplificador, cuando se corrige, tiene ahora un factor de cresta de 9 dB, resultando en un nivel máximo de potencia de salida de 953 vatios. Mediante el uso de "corrección" y ahora forzando este amplificador a mayor potencia, de nuevo esto coloca la operación más arriba de la curva de eficiencia. Desafortunadamente, debido a que el factor de cresta o la relación pico a promedio son 2dB más altos que con ATSC 1.0/8-VSB, el amplificador debe ser degradado en el nivel de potencia promedio con el resultado de estar más abajo en las curvas de potencia y eficiencia, con la eficiencia siendo ahora 31,6% o 4,9 puntos porcentuales menor. La buena noticia es que incluso con la menor eficiencia, la reducción de potencia requerida para satisfacer el rendimiento de la señal con la corrección aplicada resulta en una disminución del consumo de energía del 23%, lo que resultará en menores costos de electricidad. Sin embargo, el radiodifusor ahora tiene que mirar esto y considerar las opciones de aumentar el tamaño del transmisor para mantener la potencia licenciada por la FCC y sufrir el mayor costo de operación, o aplicar para cambiar el nivel de potencia licenciada a la nueva potencia inferior renunciando a la cobertura, pero a menores costos de electricidad.

¿Qué es un amplificador Doherty?

Un amplificador Doherty, nombrado después de su inventor William H. Doherty en 1936, fue diseñado originalmente para aumentar la eficiencia de la válvula de vacío de alta potencia en transmisores de radiodifusión de AM y de onda corta. Un diagrama de bloques básico de un amplificador Doherty se muestra en la Figura 11.

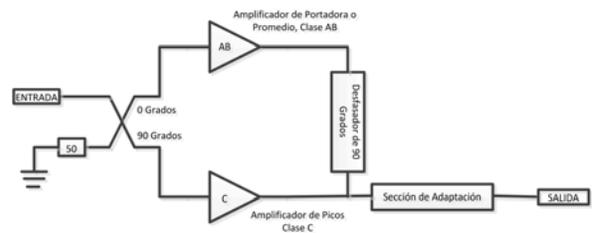


Fig. 11: Diagrama de Bloque de un Amplificador Doherty

El funcionamiento básico de esta configuración de amplificador es que la señal de entrada se divide con un desfaseador de 90 grados que se aplica a la señal que va al amplificador de pico de Clase C. Para compensar este desplazamiento de fase, la combinación de los amplificadores tiene una línea de 90 grados insertada a la salida del amplificador de portadora o promedio. Cuando se combinan los 2 amplificadores, esta combinación no representa una salida de 50 ohmios, por lo que se requiere una sección de acoplamiento para adaptar la impedancia al punto de 50 ohmios. En cuanto a la operación, el amplificador promedio de clase AB es utilizado en gran parte por la forma de onda de RF modulada. Como se ha mostrado anteriormente, cuanto más fuerte se conduce un amplificador en clase AB, mayor es la eficiencia que se puede alcanzar de él. El inconveniente es la compresión de potencia máxima y los productos de distorsión que a altos niveles de potencia se vuelven "no corregibles" con modernas técnicas de linealización digital. Al hacer funcionar el amplificador promedio más arriba de su curva, la ganancia de eficiencia operativa es sustancial. En el otro lado del par de amplificadores Doherty está el amplificador de pico. Este es un amplificador clase C. Los amplificadores clase C tienen 2 buenas cualidades para esta parte del amplificador. En primer lugar, son inherentemente eficientes y también tienen menor ganancia a bajos niveles de entrada, ya que no son en absoluto lineales cuando se hace referencia a la curva de transferencia de potencia de entrada vs salida. Tienen una mala calidad y es debido a que su curva de transferencia no es lineal ya que generan más productos de distorsión que su contraparte clase AB. Debido a la diferencia de ganancia de "pequeña señal", esto permite que el lado de clase AB (promedio) sea accionado por la señal de RF modulada digital hacia arriba en el área de la curva de transferencia donde se aproximan a la saturación y estar operando muy eficientemente dejando a la clase C (Pico) amplificar los picos de la señal, esencialmente "compensando" lo que el lado de la clase AB (promedio) no puede reproducir por sí solo. Con la modulación digital, a medida que los picos se hacen más grandes en amplitud éstos se vuelven más infrecuentes, el amplificador clase C está realmente "apagado" más de lo que está "encendido". Esto, junto con la capacidad de potencia de pico y la alta eficiencia, permite que cuando estos dos amplificadores se combinan adecuadamente, reproducir la señal digital de RF modulada con una eficiencia mucho mayor de la que estaría disponible si sólo se usara un amplificador clase AB. Una de las "desventajas" de los amplificadores configurados por Doherty es la combinación de "sobre" conducción del lado Promedio en clase AB y luego la combinación con

la inherentemente no lineal clase C del lado Pico. La salida resultante, aunque se reproduce razonablemente bien en amplitud, contiene una gran cantidad de productos de distorsión que, sin el uso de técnicas modernas de corrección, prácticamente hace que la salida de este tipo de amplificador sea inutilizable en casi todos los niveles de potencia. Esto no es, en absoluto, como el amplificador de clase AB cubierto anteriormente, donde a niveles de potencia más bajos el amplificador puede realmente cumplir con las especificaciones requeridas para una señal de radiodifusión.

Hay muchas configuraciones de amplificadores Doherty. Un número de éstos se explican detalladamente en la aplicación producida por Ampleon [1]. A efectos de este artículo vamos a discutir 2 tipos básicos que se configuran como se muestra en el diagrama de bloques en la Figura 11. Estos 2 tipos son: Simétrica y Asimétrica.

La configuración Simétrica tiene los amplificadores tanto en el lado promedio como el de pico compuestos del mismo amplificador básico con la misma capacidad de potencia, y es simplemente una cuestión de cómo cada uno de los lados están polarizados y operados.

La configuración Asimétrica es cuando un lado del amplificador está configurado para tener una capacidad de potencia más o menos dependiente de la señal para la que se va a utilizar y de las características de la señal. En el caso de la televisión digital, esto se logra tradicionalmente aumentando el tamaño o la capacidad del amplificador de pico.

Doherty Simétrico

Para este artículo, se ensayó el BLF888D de Ampleon como una paleta en el circuito de demostración de Ampleon, como se muestra en la Figura 12.



Fig. 12: Ampleon BLF888D - Doherty Simétrico

Como comparación, la hoja de datos del BLF888A califica a este FET LDMOS como un dispositivo de 600 vatios. La hoja de datos del BLF888D califica este FET LDMOS también como un dispositivo de 600 vatios. He realizado las mismas pruebas en este amplificador que en el amplificador BLF888A de clase AB que se discutió anteriormente en este artículo. La Figura 13 muestra la eficiencia vs la potencia de salida de los amplificadores BLF888A clase AB y BLF888D simétricos de Doherty.

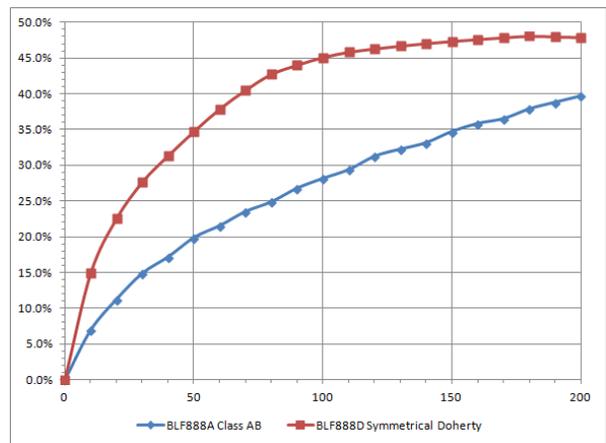


Fig. 13: Clase AB and Doherty Simétrico
Eficiencia vs Potencia de Salida

La curva de eficiencia versus potencia para la configuración simétrica de Doherty es notablemente diferente de la curva del amplificador clase AB tradicional. No sólo esta configuración de Doherty ha mejorado sustancialmente la eficiencia a lo largo de la curva, la curva es mucho más "escarpada" con un incremento rápido de la eficiencia dentro de sólo unos pocos puntos porcentuales del máximo con el amplificador sólo en el nivel de 100 vatios. Por encima del nivel de 100 vatios sólo se ganan unos pocos puntos porcentuales más a medida que aumenta la potencia.

En la figura 14, las curvas de potencia de entrada vs la potencia de salida no son sustancialmente diferentes entre los dos distintos tipos de amplificador comparados con los amplificadores clase AB que muestran aproximadamente 3dB más ganancia. Sin embargo, las curvas de potencia de pico, aunque ambas terminan en el mismo nivel de potencia, muestran una degradación de ganancia mucho más graciosa en el amplificador simétrico de Doherty, mostrando que hay potencialmente más potencia de pico disponible desde este amplificador, ya que aún no ha alcanzado saturación como en amplificador clase AB.

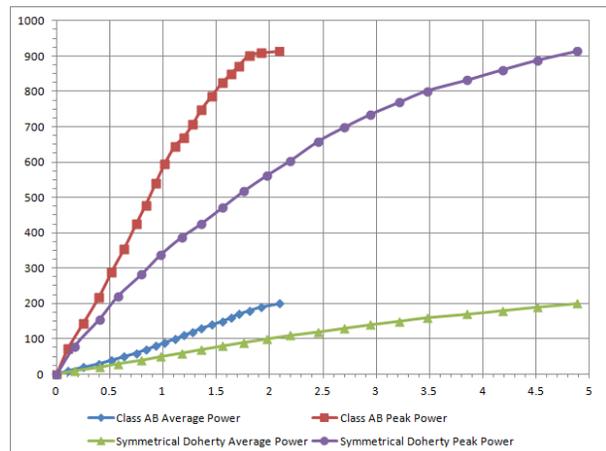


Fig. 14: Potencia de Entrada vs. Potencia de Salida para Clase AB y Doherty Simétrico

Al observar el rendimiento de la señal del amplificador Doherty simétrico y compararlo con el amplificador clase AB tradicional, el rendimiento de la señal natural (no corregida), como se mencionó anteriormente, parece ser pobre en comparación con el rendimiento del amplificador clase AB. La Figura 15 a continuación muestra los niveles de hombro y MER no corregidos de los amplificadores clase AB y Doherty Simétricos.

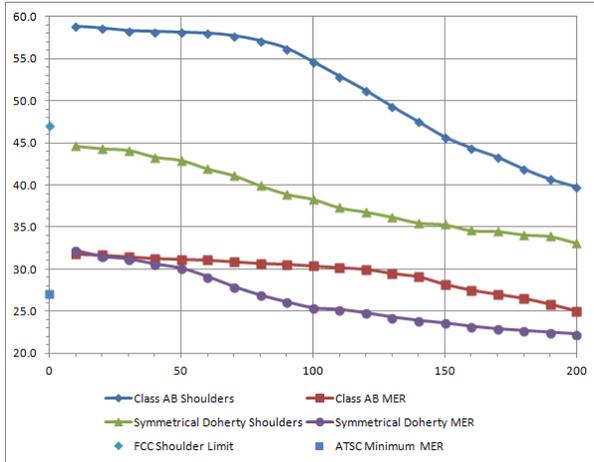


Fig. 15: Rendimiento de la Señal no Corregida de los Amplificadores Clase AB y Simétrico de Doherty

Como se puede ver, el rendimiento natural no corregido del amplificador simétrico Doherty en realidad nunca cumple el requisito de las especificaciones mínimas de hombros de la FCC y sólo es aceptable para el rendimiento del MER por debajo del nivel de salida de 70 vatios. La buena noticia es que este amplificador es bastante "corregible" con modernas técnicas de linealización digital. Se muestra a continuación en las Figuras 16, 17 y 18 el rendimiento del amplificador simétrico de Doherty cuando se corrige en el nivel de 150 vatios para ATSC 1.0 / 8-VSB.

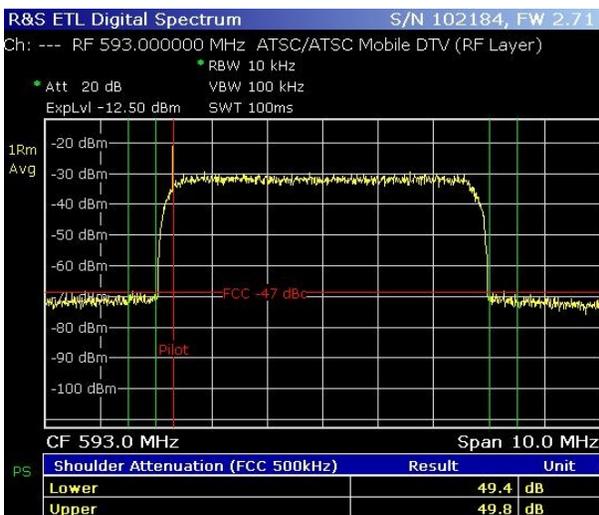


Fig. 16: BLF888D Doherty Simétrico - Hombros Corregidos a 150 vatios de Potencia de Salida

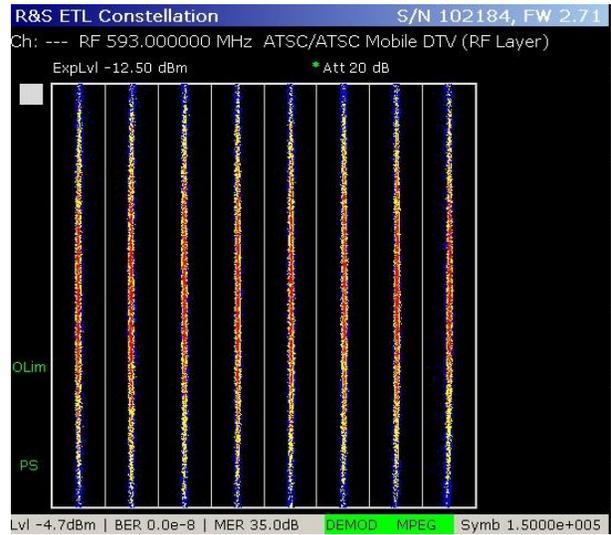


Fig. 17: BLF888D Doherty Simétrico - Constelación Corregida a 150 vatios de Potencia de Salida

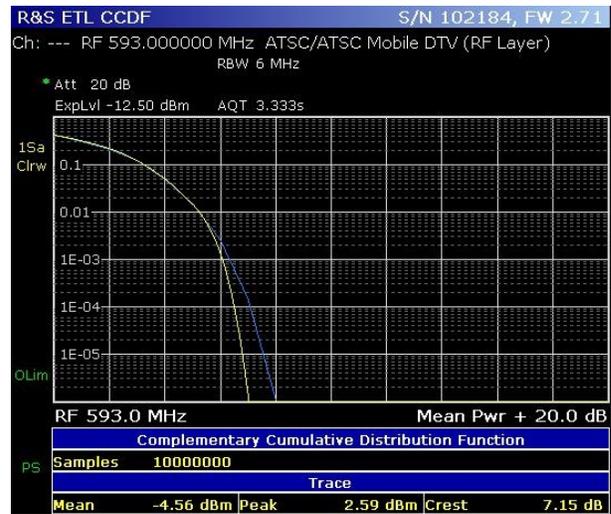


Fig. 18: BLF888D Doherty Simétrico Curva CCDF Corregida a 150 Vatios de Potencia de Salida

Como se muestra en la Figura 18 anterior, este amplificador, cuando se corrige, tiene un factor de cresta de 7,15 dB. Esto da como resultado un nivel de potencia de salida pico de 778 vatios, que en la curva mostrada anteriormente en la Figura 14 se observa que el amplificador no está funcionando en su límite de potencia de pico a este nivel de potencia. Los hombros siguen siendo el factor limitante y están en un mínimo de 2,4 dB por encima del límite mínimo. Este amplificador debe ser capaz de dar una potencia de salida un poco más alta si fuera necesario. Sin embargo, al mirar la curva de eficiencia vs potencia en la Figura 13, se observa que a una potencia de 150 vatios la eficiencia es inferior a 1 punto porcentual desde el máximo para este amplificador. Forzando este amplificador más allá no se gana ninguna ventaja sobre la operación en este punto ya que a 150 vatios tiene un buen funcionamiento corregido con techo para las especificaciones mínimas de funcionamiento

requeridas al estar esencialmente en su eficiencia máxima, y no estar "forzado" a su nivel máximo de potencia.

Entonces, ¿cómo se comporta esto con una señal OFDM? Como antes, con el amplificador de clase AB, debido al factor de cresta más alto, este amplificador necesitará ser degradado del nivel usado en ATSC 1.0 / 8-VSB. El amplificador de clase AB necesitó ser degradado de 170 a 120 vatios o 1.51dB. En el caso del amplificador Doherty simétrico, debido a la curva de compresión de pico "más suave", este amplificador necesitaba ser degradado de 150 vatios a 130 vatios o menos de 1dB para alcanzar un rendimiento de señal corregido aceptable. En el nivel de 130 vatios, la eficiencia del amplificador había caído de 47.3% a 45.9% o solamente 1.4 puntos porcentuales comparado a la clase AB que era casi 5 puntos porcentuales menos. Como se puede ver, esto haría un buen sistema amplificador para ATSC 1.0 / 8-VSB y una modulación basada en OFDM como el nuevo ATSC 3.0. En las Figuras 19, 20 y 21 se muestran las gráficas de rendimiento de este amplificador que funciona en formato DVB-T2 OFDM y se corrigen a 130 vatios de salida.

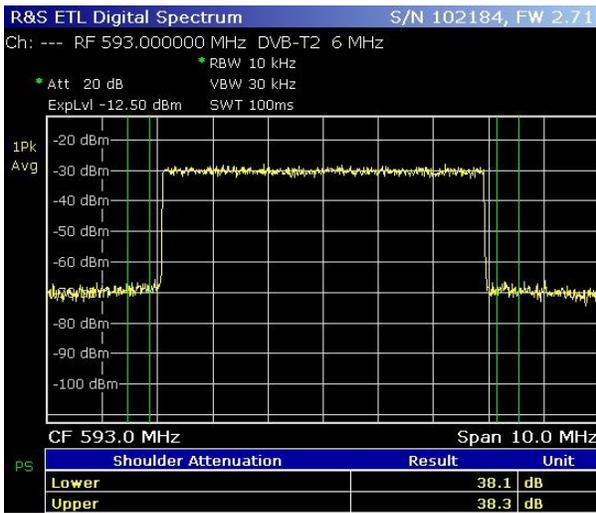


Fig. 19: BLF888D Hombros Corregidos - DVB-T2

La Figura 19 muestra los hombros medidos a 38dB. El requisito actual de la FCC para hombros es de 47dB, sin embargo, se supone que se miden usando una banda de potencia de 500kHz para los hombros frente a una banda de potencia de 6 MHz para el nivel en banda. Cuando se mide en DVB-T o DVB-T2 la convención de medición es simplemente medir entre el nivel de banda y el hombro mediante un marcador tal como se ve directamente en la pantalla del instrumento. El método de medición de banda de potencia frente al método de marcador da como resultado aproximadamente una diferencia de 11dB en lecturas, es decir, los hombros medidos a 47dB con medidas de banda de potencia medirán 36dB con un método de medición de marcador directo. Para los propósitos de este artículo, todas las mediciones DVB-T2 usarán el método con marcador haciendo que algo mejor que 36dB esté "dentro de especificación".

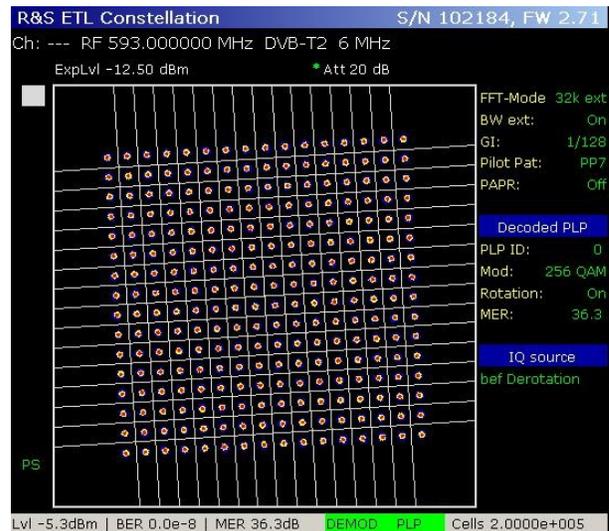


Fig. 20: BLF888D Constelación Corregida - DVB-T2

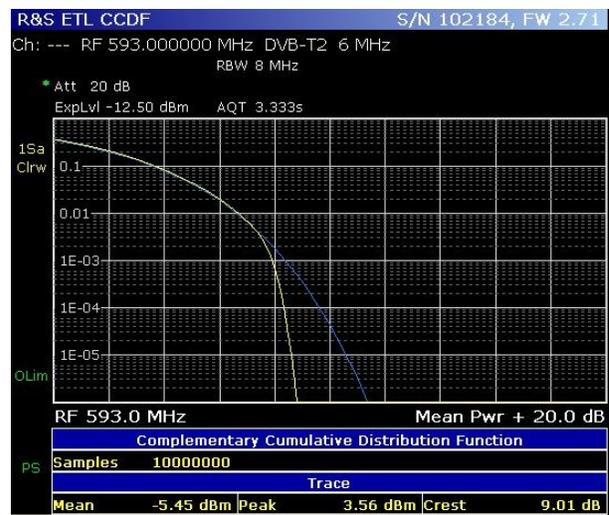


Fig. 21: BLF888D Curva CCDF Corregida

De nuevo, como se muestra en la curva CCDF en la Figura 21, se indica un factor de cresta de 9,01dB. Con este amplificador operando a 130 vatios esto pone el nivel de potencia de pico de éste a 1035 vatios. Esto es ciertamente más alto en la curva que se representa en la Figura 14 anterior, mostrando nuevamente la curva de "compresión suave" de un amplificador de Doherty debido al amplificador de pico de clase C.

Doherty Asimétrico

Para este artículo, el BLF888E de Ampleon fue probado como pallet en el circuito de demostración de Ampleon mostrado en la Figura 22.

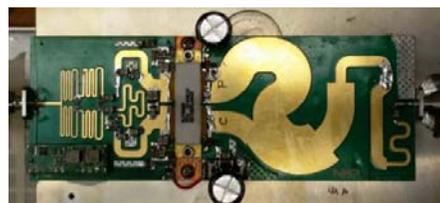


Fig. 22: Ampleon BLF888E Doherty Asimétrico

Nuevamente, como comparación, la hoja de datos BLF888A califica a este FET LDMOS como un dispositivo de 600 vatios. La hoja de datos BLF888D Doherty Simétrico califica a este FET LDMOS también como uno de 600 vatios, sin embargo la hoja de datos para el BLF888E califica a este FET LDMOS como un dispositivo de 750 vatios. Esto se debe a la naturaleza asimétrica del dispositivo en que la capacidad de amplificación de cresta se ha incrementado con respecto a la del BLF888D. He realizado las mismas pruebas en este amplificador que se ejecutaron en el amplificador BLF888A de clase AB que se discutió anteriormente en este artículo. La Figura 23 muestra la eficiencia en función de la potencia de los amplificadores BLF888A clase AB, el BLF888D Doherty Simétrico y el BLF888E Doherty Asimétrico.

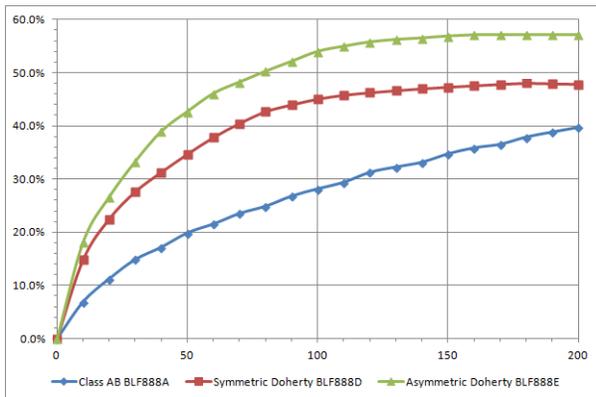


Fig. 23: Clase AB, Doherty Simétrico y Doherty Asimétrico - Eficiencia vs Potencia de Salida

La curva de eficiencia versus potencia para la configuración Doherty Asimétrica es diferente incluso para la configuración Doherty Simétrica, como se mostró anteriormente. Ambos tipos de Doherty son marcadamente diferentes a la curva de amplificación clase AB tradicional. Reiteradamente, no sólo la configuración asimétrica de Doherty ha mejorado sustancialmente la eficiencia a lo largo de la curva sobre los otros 2 tipos, la curva es mucho más "escarpada", con el aumento rápido de la eficiencia y estar dentro de sólo unos pocos puntos porcentuales del máximo nuevamente con el amplificador sólo a un nivel de 100 vatios. Por encima del nivel de 100 vatios sólo se ganan unos pocos puntos porcentuales más a medida que aumenta la potencia.

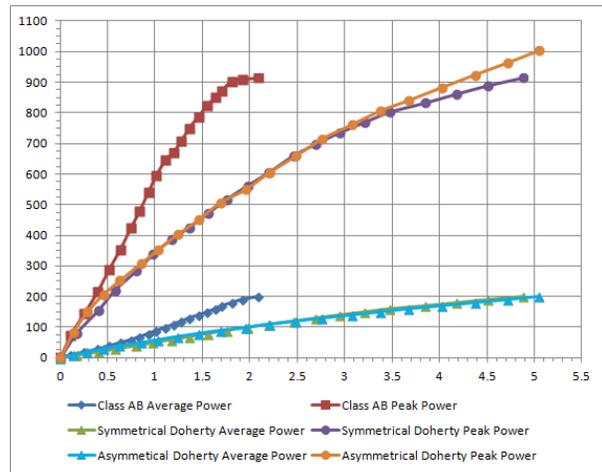


Fig. 24: Potencia de Entrada vs. Potencia de Salida de Clase AB, Doherty Simétrico y Doherty Asimétrico

En la Figura 24, las curvas de potencia de entrada versus promedio de salida son esencialmente las mismas entre el Doherty Simétrico y el Doherty Asimétrico como se esperaría sabiendo que el lado medio del par de amplificadores Doherty no ha cambiado. Sin embargo, la curva de potencia pico para el Doherty Asimétrico muestra el mismo tipo de degradación de ganancia graciosa como el amplificador Doherty Simétrico, pero con mayor capacidad de potencia de pico y nuevamente no muestra ningún signo de compresión o saturación severa incluso en el nivel de salida pico de 1kW. Esto, junto con el aumento de la eficiencia, debería significar que esta parte es aún más adecuada para reproducir una señal del tipo OFDM que tiene un alto factor pico a promedio / factor de cresta que la configuración simétrica del Doherty.

Al observar el rendimiento de la señal del amplificador Doherty Asimétrico y compararlo con el Doherty Simétrico y los amplificadores tradicionales clase AB, el rendimiento natural de la señal (no corregida), como se mencionó anteriormente, parece ser pobre en comparación con el rendimiento del amplificador clase AB. La Figura 25 a continuación muestra los niveles de hombros y el MER no corregidos de los amplificadores clase AB, Doherty simétrico y asimétrico. Como se puede ver, tanto el desempeño natural sin corregir de los amplificadores Doherty simétrico y asimétrico nunca cumplen con el requisito de las especificaciones FCC mínimas de hombros y sólo es aceptable para el rendimiento del MER en el nivel de 50 vatios haciéndolo inferior al Doherty Simétrico cuando no se le corrige como Doherty Simétrico La especificación MER por debajo del nivel de salida de 70 vatios. La buena noticia es que este amplificador es también bastante "corregible" con modernas técnicas de linealización digital. En las figuras 26, 27 y 28 se muestra el rendimiento del amplificador simétrico de Doherty cuando está corregido. La otra buena noticia es que la capacidad de potencia de pico añadida permite corregir las especificaciones de calidad de la señal, cumpliéndolas ahora al nivel de potencia de salida de 200 vatios para ATSC 1.0 / 8-VSB.

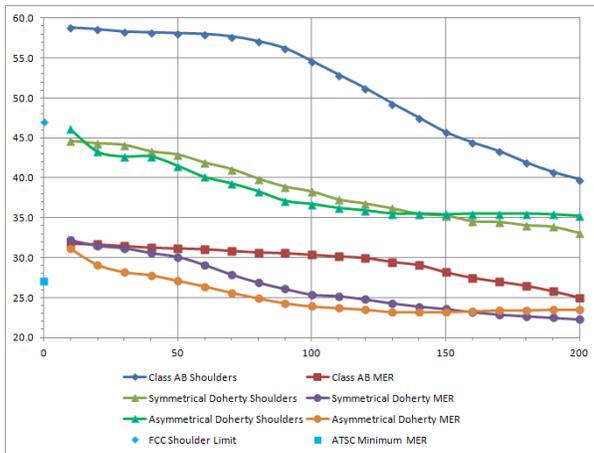


Fig. 25: Rendimiento de Señal NO Corregida - Amplificadores Clase AB, Doherty Simétrico y Asimétrico

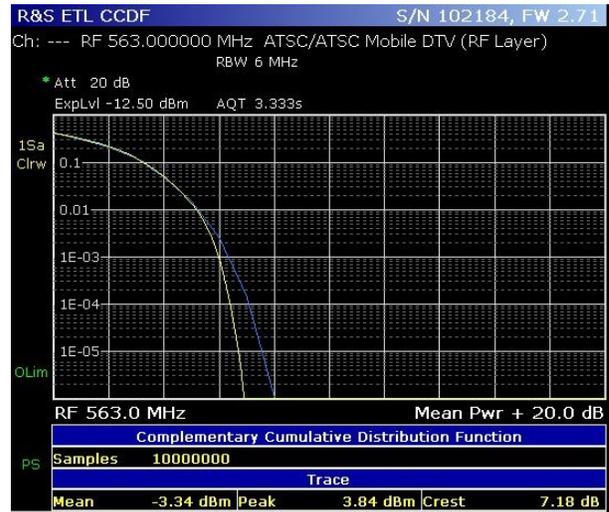


Fig. 28: BLF888E Doherty Asimétrico Curva CCDF Corregida a 200 Vatios de Potencia de Salida

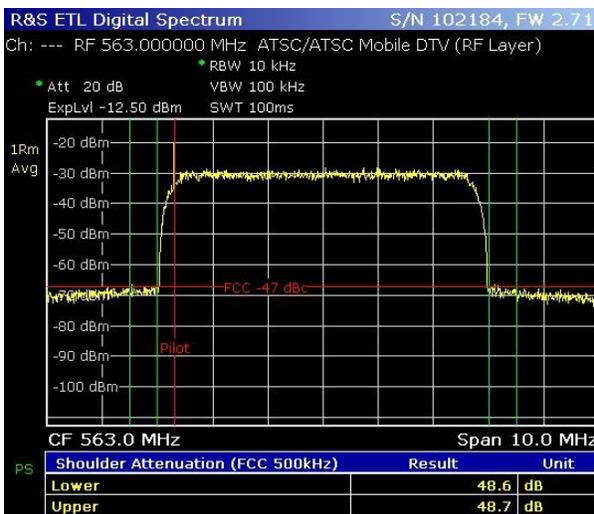


Fig. 26: BLF888E Hombros de Doherty Asimétrico Corregidos a 200 Vatios de Potencia de Salida

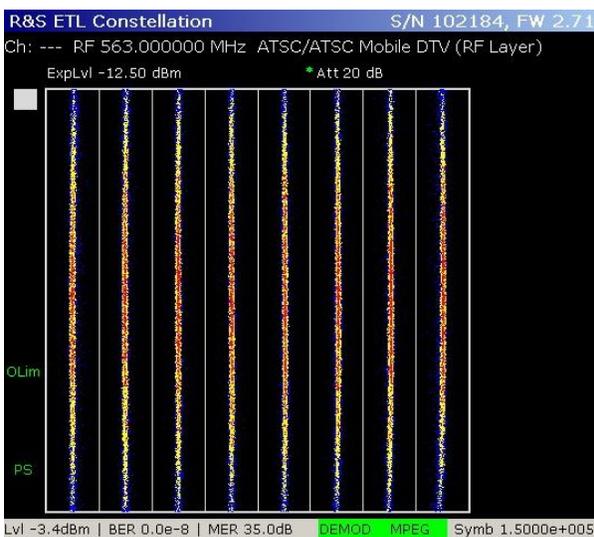


Fig. 27: BLF888E Doherty Asimétrico - Constelación Corregida a 200 Vatios de Potencia de Salida

Como se muestra en la Figura 28, este amplificador, cuando se corrige, tiene un factor de cresta de 7,18dB. Esto da como resultado un nivel máximo de potencia de salida de 1045 vatios, que en la curva mostrada anteriormente en la figura 24, se observa que el amplificador no está operando en su límite de potencia pico a este nivel de potencia. Los hombros siguen siendo el factor limitante y están en un mínimo de 1,6 dB por encima del límite mínimo. Observando la curva de eficiencia frente a potencia en la Figura 23, se muestra que a una potencia de 200 vatios la eficiencia es máxima para este amplificador. La ventaja agradable de esta configuración asimétrica de Doherty es que no sólo es corregible a 200 vatios y la eficacia máxima cuando se le degrada para la operación en OFDM donde el funcionamiento corregible es aceptable éste está en el nivel de salida de 150 vatios. Cuando se degrada a este nivel, la eficiencia disminuye de 57,1% a 200 watts a 56,9% a 150 vatios, o sólo 0,2 puntos porcentuales. ¡Prácticamente nada en absoluto! De hecho degradarlo hasta el nivel de 100 vatios sólo disminuye la eficiencia a 54,1% o 3 puntos porcentuales. Esta es una característica muy agradable de este amplificador especialmente cuando se enfrenta a un cambio de formato de modulación de ATSC 1.0 / 8-VSB a ATSC3.0 / OFDM. El rendimiento OFDM corregido en el nivel de 150 vatios se muestra a continuación en las Figuras 29, 30 y 31.

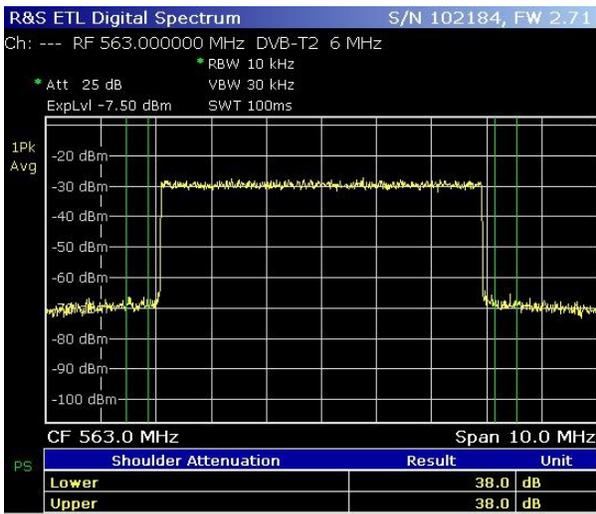


Fig. 29: BLF888E Hombros Corregidos - DVB-T2

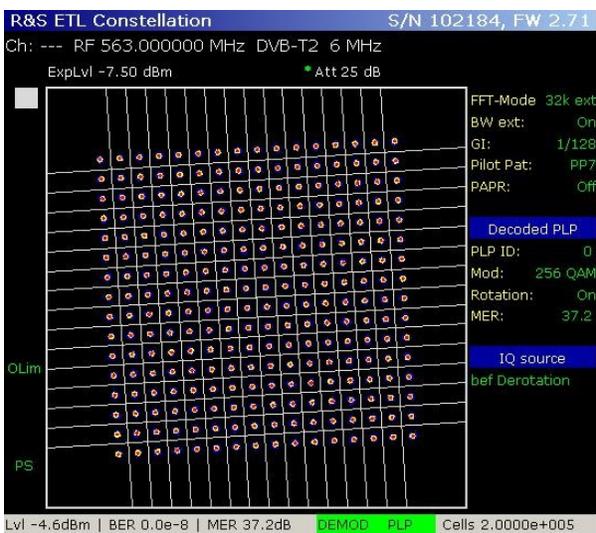


Fig. 30: BLF888E Constelación Corregida - DVB-T2

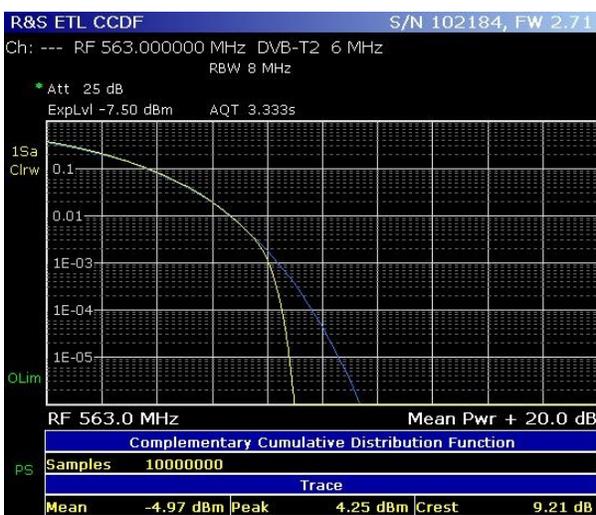


Fig. 31: BLF888E Curva CCDF Corregida DVB-T2

Nuevamente, como se muestra en la curva CCDF en la Figura 31, tiene un factor de cresta de

9,21dB. Con este amplificador operando a 150 vatios, esto pone el nivel de potencia máxima de este a 1251 vatios. Esto está ciertamente más arriba de la curva que se representa en la Figura 24 anterior, demostrando nuevamente la curva de "compresión suave" de un amplificador Doherty debido al amplificador de picos clase C y demostrando también la mayor capacidad del amplificador de picos en el Doherty asimétrico, es la potencia pico más alta disponible de cualquiera de estos amplificadores.

¿Cómo se aplica esto a la emisora?

Con el reordenamiento de los canales por la FCC que se avecina, junto con el cambio de formato de modulación de ATSC 1.0 / 8-VSB a ATSC3.0 / OFDM los radiodifusores tendrán que buscar la mejor manera de lidiar con su equipo viejo actual, algunos de los cuales se están acercando a la marca de 20 años. También se les puede requerir que migren de frecuencia y que su planta de transmisión sea capaz de proporcionar la potencia necesaria para el nuevo estándar de modulación. El mejor caso desde la perspectiva de la emisora es 2 de 3 ... sólo tiene que tomar el equipo antiguo y adaptarlo al nuevo estándar de modulación. Si su planta transmisora actual fue construida inicialmente con suficiente techo de potencia de pico para acomodar el nuevo estándar de modulación ATSC 3.0, entonces se reduce a adaptar los equipos antiguos y/o cambios de canal. En cualquier caso, el tiempo y la tecnología avanzan y con la eficiencia y los avances de nivel de potencia en la tecnología de estado sólido descrita anteriormente es probable que el radiodifusor esté buscando nuevos equipos transmisores. Esto hace que la elección de la tecnología y sus características sean críticas para permitir cambios futuros.

Los transmisores de alta potencia más eficaces desde el punto de vista operativo todavía emplean amplificadores finales de válvulas de vacío, específicamente el L3 CEA (*Constant Efficiency Amplifier*), que es un IOT (*Inductive Output Tube*) multietapa de colector deprimido. Aunque es el transmisor más eficiente, requiere mantenimiento periódico de equipos que emplean voltajes de hasta 40kVCC. Esto requiere individuos altamente calificados para hacer el trabajo. Los transmisores basados en LDMOS de estado sólido que emplean configuraciones de amplificador basadas en Doherty, aunque no son tan eficientes, prácticamente no requieren mantenimiento y pueden ser mantenidos y reparados por personal menos especializado. Estos serán el transmisor de elección en la mayoría de los casos.

Como se evidencia a lo largo de este artículo, existen formas de configurar y tratar la optimización de los amplificadores LDMOS y la configuración Doherty para aprovechar al máximo sus características para proporcionar un transmisor eficiente que pueda utilizarse con el mismo nivel de potencia para ATSC 1.0 / 8-VSB así como lo hará para ATSC 3.0 / OFDM sin tener que renunciar a la potencia o la eficiencia. A lo largo de este artículo, se habla de degradación para formatos de modulación de relación de pico a promedio más altos. Esto se debe a que aunque medimos la potencia media de la señal, la limitación de los amplificadores es la potencia máxima que puede producir. El otro factor es que típica-

mente ha sido el caso de operar el amplificador tan "fuerte" como sea posible para cumplir las especificaciones de la señal ya que esto dará lugar a una mejor eficiencia. En el caso de la configuración asimétrica de Doherty para las modulaciones de interés, los datos de prueba muestran que cualquier nivel de potencia por encima de 120 vatios hace poca o ninguna diferencia en la eficiencia operativa. Esto significa que si uno opera los FET LDMOS en el nivel de 150 vatios como se muestra arriba, ellos se corregirán fácilmente para cumplir con las especificaciones de señal requeridas incluso para la señal de tipo ATSC 3.0 / OFDM. Uno puede también operar este mismo amplificador en el mismo nivel de 150 vatios con ATSC 1.0 / 8-VSB y alcanzar el mismo nivel de eficiencia con el techo adicional en el nivel por el departamento de energía. Esto simplemente resultará en aún mejores especificaciones de señal corregidas con ATSC 1.0 / 8-VSB sin ninguna penalización por eficiencia / consumo de energía. Debajo, en las Figuras 32, 33 y 34 se muestran los resultados del funcionamiento del amplificador Doherty asimétrico corregido al nivel de 150 vatios con ATSC 1.0 / 8-VSB.

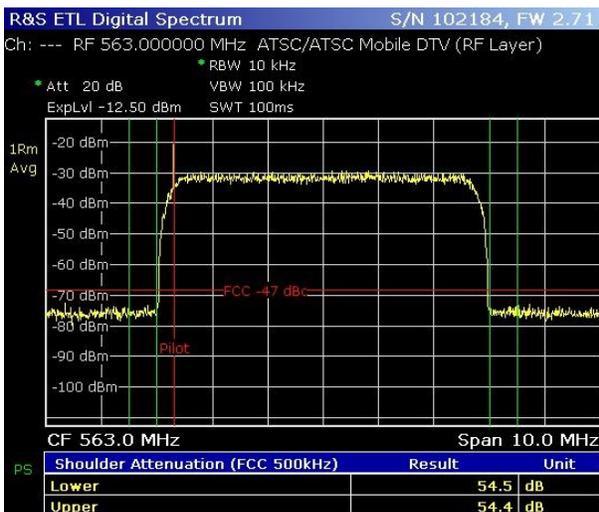


Fig. 32: BLF888E Doherty Asimétrico - Hombros Corregidos a 150 Vatios de Potencia de Salida

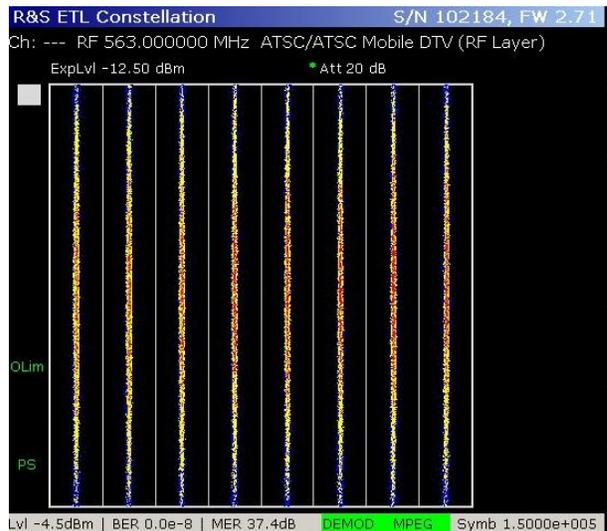


Fig. 33: BLF888E Doherty Asimétrico Constelación Corregida a 150 Vatios de Potencia de Salida

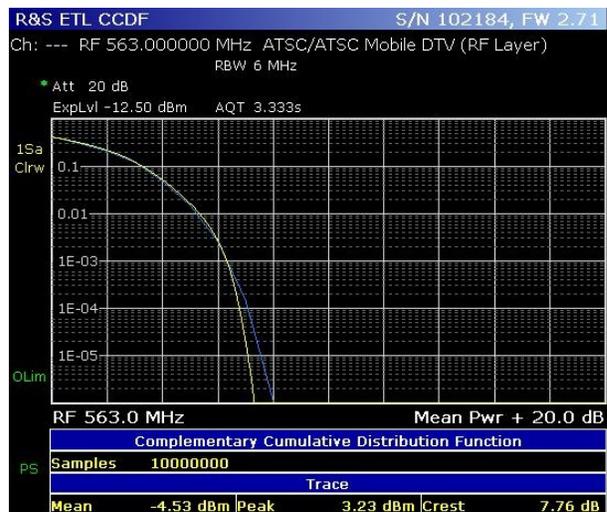


Fig. 34: BLF888E Doherty Asimétrico Curva CCDF Corregida a 150 Vatios de Potencia de Salida

Como se muestra en este artículo, el avance de la tecnología de amplificadores de estado sólido ha permitido la producción de transmisores de estado sólido de alta potencia eficientes para la emisión de televisión digital. El avance realizado dentro de los FET LDMOS junto con una idea de 80 años de antigüedad puede producir algunos números impresionantes de eficiencia operativa, pero son inútiles sin emplear un esquema moderno de linealización digital de algún tipo que se utiliza en la mayoría de los excitadores de televisión digital.

Cuando se ponen en práctica estas tecnologías, se puede construir un transmisor de alta potencia con excelente rendimiento y eficiencia. Como ejemplo, el Hitachi Comark ParallaxTM utiliza el BLF888E diseñado como amplificador Doherty Asimétrico dentro de los amplificadores de potencia. La Figura 35 mostrada a continuación es una imagen de uno de estos amplificadores y la Figura 36 muestra una configuración de 4 amplificadores con sus fuentes de alimentación asociadas.



Fig. 35: Hitachi Comark Parallax - Amplificador Doherty Enfriado por Líquido



Fig. 36: 4 Amplificadores en Paralelo con Fuentes de Alimentación Asociadas

Debajo en la Figura 37, es una curva de potencia versus eficiencia de uno de los amplificadores Hitachi Comark Parallax. Como puede verse, tiene la misma forma de curva básica pero a un nivel de eficiencia total menor. La "pérdida" de eficiencia se puede explicar en una serie de áreas. Primero es que este amplificador es de alta ganancia, aproximadamente 62dB. Las etapas de amplificación previas son de clase A y AB afectando así a la eficiencia global. En segundo lugar, la red de combinación utilizada para paralelizar 16 módulos amplificadores no está exenta de pérdidas, lo que también afecta la eficiencia. Por último, esta eficiencia también incluye las ineficiencias que ocurren en las fuentes de alimentación de conmutación de CA a CC, ya que esta curva de eficiencia se mide desde el consumo de CA a la potencia de salida de RF.

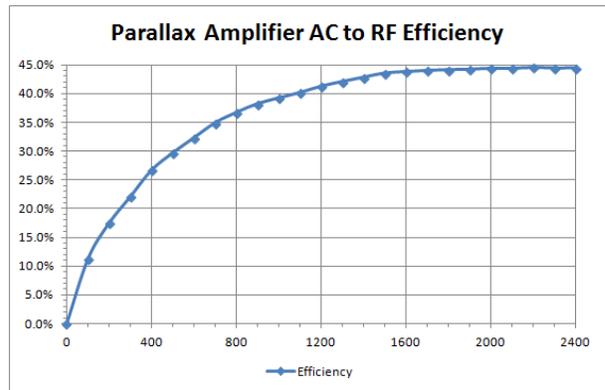


Fig. 37: Amplificador Parallax - Curva de Eficiencia CA a Potencia de RF

El amplificador entrega una potencia de 2000 vatios tanto en formato ATSC 1.0 / 8-VSB u OFDM, como ATSC 3.0, DVB-T o DVB-T2. Como se puede ver, incluso si la potencia se reduce a 1500 vatios la disminución de la eficiencia es inferior a 1 punto porcentual. Esto permite adquirir un transmisor que tenga un techo holgado de operación sin tener que pagar una penalización por la operación normal debajo de la potencia máxima del equipo. Esto permitirá que un transmisor mantenga el funcionamiento de plena potencia incluso en el caso de un fallo en un componente del sistema mientras se mantiene la máxima eficiencia operativa.

“Trucos” Digitales

Como se demostró anteriormente, el factor limitante de la capacidad de un amplificador de entregar potencia al producir una señal que cumpla determinadas especificaciones para los hombros y el MER está muy relacionado con la capacidad de potencia de pico del amplificador y la capacidad del corrector digital para linealizar la señal. Lo más común es el caso donde el primer criterio para que la señal pueda acercarse al límite de la especificación son los hombros. Dentro de los excitadores / correctores digitales más modernos está la capacidad de limitar y/o cortar los picos digitales de la señal RF. Esto se hace típicamente en el dominio digital mediante la eliminación de estos bits. El efecto de esto es una reducción del factor de cresta natural de las señales o de la relación pico a promedio. Al hacer esto, el amplificador a un nivel de potencia dado tendrá más techo y la especificación de los hombros corregidos se incrementará. Hay un inconveniente en esto porque cuando estas partes de la señal son recortadas o eliminadas, el proceso de demodulación ve esto como distorsión y se muestra en una reducción del MER. La figura 38 a continuación muestra los niveles de hombros del amplificador Doherty asimétrico que funciona a 150 vatios con el "recorte" aplicado. La Figura 39 muestra el diagrama de constelación en las mismas condiciones, y la Figura 40 muestra la curva de CCDF. Éstos se pueden comparar directamente con las Figuras 29, 30 y 31 anteriores que no se aplicaron "recortes".

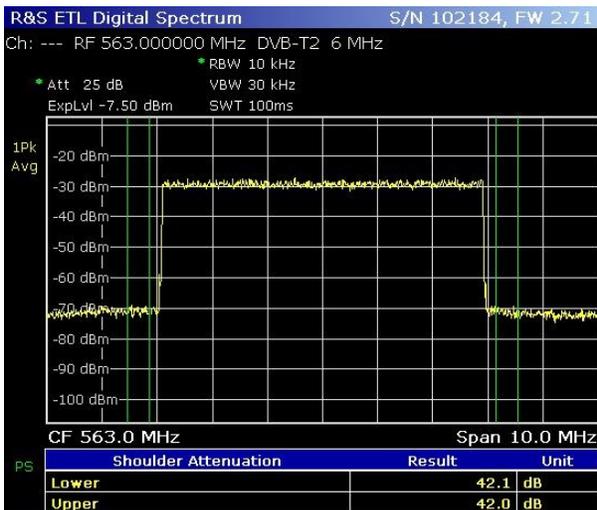


Fig. 38: BLF888E Hombros Corregidos - DVB-T2 con el Recortador de Picos Digital Activado

Con la activación del recortador digital de picos, como se puede ver, los niveles de hombros pasaron de 38dB a 42dB. Para obtener estos 4dB de margen de hombros se sacrificó 1.9dB de MER al pasar de 37.2dB a 35.3dB. Sin embargo, sigue siendo muy aceptable. La clave es que la potencia de pico que se produce sin el recorte digital fue de 1251 vatios con un factor de cresta de 9,21dB y con él se redujo en poco más de 0,5dB a 8,69dB siendo la potencia máxima ahora de 1109 vatios. Esto sólo muestra una de las muchas maneras en que un transmisor puede ser "optimizado" para obtener el rendimiento requerido con la máxima eficiencia y rango libre.

REFERENCIAS

[1] AMPLEON, Doherty Architectures in UHF, Walter Snejers, RF Applications Engineer, 2016

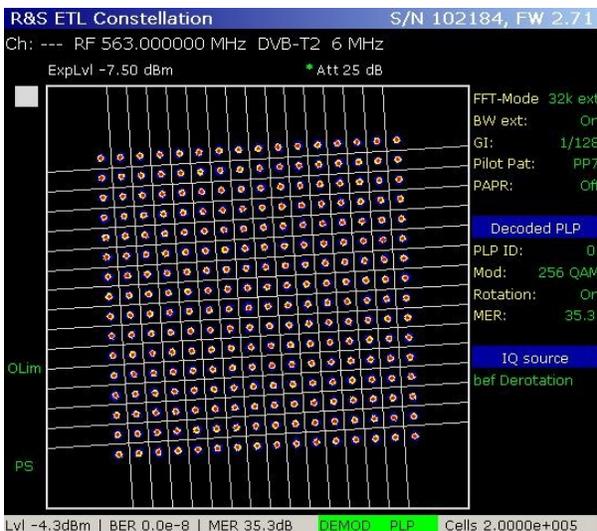


Fig. 39: BLF888E Constelación Corregida - DVB-T2 con el Recortador de Picos Digital Activado

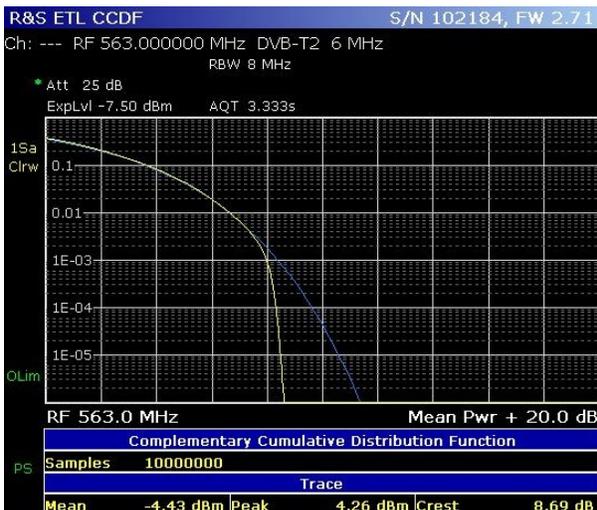


Fig. 40: BLF888E Curva CCDF Corregida - DVB-T2 con el Recortador Digital de Picos Activado