

**Estudio de la estabilidad en frecuencia
de sistemas de transmisión de la señal
del máser de Hidrógeno por fibra óptica
y cable coaxial**

D. Cordobés, J.A. López Pérez

Informe Técnico IT - OAN 2006 - 10

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| <i>I. Introducción</i> | <i>1</i> |
| <i>II. Fundamento teórico</i> | <i>3</i> |
| <i>II. Elección del detector de fase</i> | <i>7</i> |
| 3.1.- <i>Contador HP 53131A</i> | <i>8</i> |
| 3.2.- <i>Analizador FFT Agilent 35670A</i> | <i>10</i> |
| <i>IV. Resultados</i> | <i>13</i> |
| 4.1.- <i>Varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 empleando un tramo de fibra óptica de 50 cm</i> | <i>13</i> |
| 4.2.- <i>Varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 empleando un tramo de fibra de 350m (enlace antena 14m - astrógrafo)</i> | <i>17</i> |
| 4.3.- <i>Varianza de Allan en un sistema típico de distribución de la señal del máser por fibra óptica</i> | <i>20</i> |
| 4.4.- <i>Varianza de Allan de un tramo de cable coaxial de 900m de longitud</i> | <i>22</i> |
| 4.5.- <i>Varianza de Allan en un sistema típico de distribución de la señal del máser por cable coaxial</i> | <i>26</i> |
| <i>V. Conclusiones</i> | <i>29</i> |
| <i>VI. Trabajos futuros</i> | <i>31</i> |
| <i>VII. Bibliografía</i> | <i>32</i> |
| <i>Apéndice I: Referencias de los componentes</i> | <i>33</i> |
| <i>Apéndice II: Hojas de características</i> | <i>38</i> |

I. Introducción

La Astronomía es la rama de la ciencia que estudia el Universo a través de la energía que este emite. Esta energía llega fuertemente atenuada a los receptores encargados de capturarla debido a las grandes distancias que generalmente separan a la fuente del receptor, motivo por el cual los equipos de recepción en Astronomía han de tener una alta estabilidad y sensibilidad. Una de las formas de conseguir que los receptores de Astronomía gocen de alta estabilidad es empleando patrones atómicos de frecuencia, siendo los más comúnmente utilizados el máser de Hidrógeno, el resonador de Rubidio y el resonador de Cesio [1].

En el Centro Astronómico de Yebes (CAY) se dispone de un máser de Hidrógeno para generar una referencia muy estable en frecuencia y cuya distribución se proyecta realizar por fibra óptica tal y como se muestra en la **Figura 1**. A la vista de este sistema, sería deseable que la señal originalmente transmitida por el máser sufriese poca (idealmente ninguna) dispersión de fase y/o frecuencia a la salida del conversor fibra óptica – coaxial final.

En este trabajo se pretende explorar la viabilidad de la transmisión de señales de patrones de frecuencia por fibra óptica en aplicaciones de astronomía con altos requisitos de estabilidad. Para ello, se va a calcular la estabilidad en frecuencia de un sistema transmisor (en adelante, *sistema transmisor DA36*) de la señal de 5MHz del máser por fibra óptica formado por un conversor coaxial – óptico modelo Pendulum DA 36, un tramo de fibra óptica multimodo y un conversor óptico – coaxial modelo Pendulum DA 36 y se van a comparar los resultados con los datos que el fabricante nos ha proporcionado.

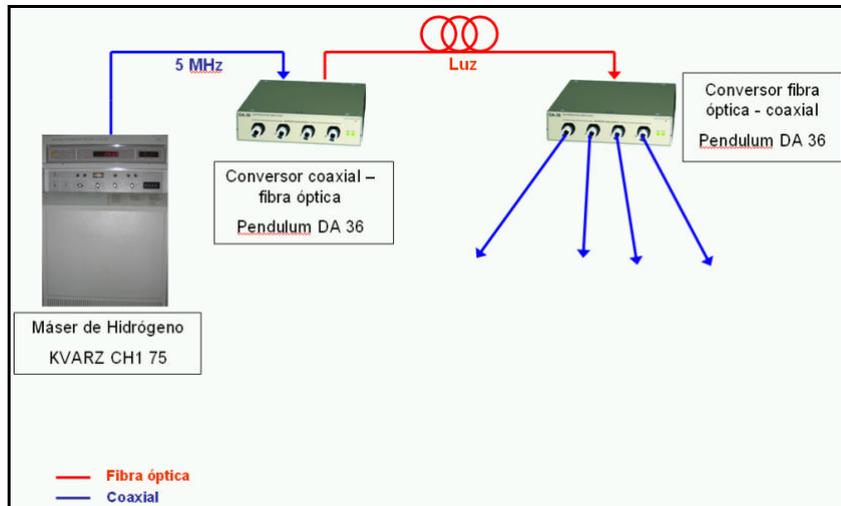


Figura 1. Distribución por fibra óptica de la señal del máser de Hidrógeno

II. Fundamento teórico

Las fluctuaciones en frecuencia de un patrón de frecuencia se pueden caracterizar a partir de la desviación relativa de frecuencia instantánea $y(t)$ [2], definida como

$$y(t) = \frac{1}{2f_0} \frac{df}{dt} \quad (1)$$

donde f_0 es la frecuencia de salida del patrón de frecuencia y F es su fase.

Esta definición es muy interesante porque, al ser relativa, permite la comparación entre patrones / osciladores de frecuencia independientemente de su frecuencia de trabajo.

Para medir la estabilidad en frecuencia del sistema transmisor DA-36, se ha empleado un montaje cuyo diagrama de bloques se muestra en la **Figura 2**. La señal de 5 MHz del máser se divide, de tal forma que un detector de fase calcula el desfase (F) entre la señal directa del máser y la señal del máser que ha atravesado el sistema transmisor DA 36. Una vez que se obtiene (F), la desviación fraccional instantánea de frecuencia se calcula empleando la Ecuación (1).

Calculado $y(t)$, se puede obtener su varianza y, como caso particular, la varianza de Allan (s_{Allan} en la figura), que es un parámetro para medir la estabilidad de frecuencia que se ha generalizado [3] a la hora de caracterizar patrones de frecuencia y que se recomienda por el IEEE.

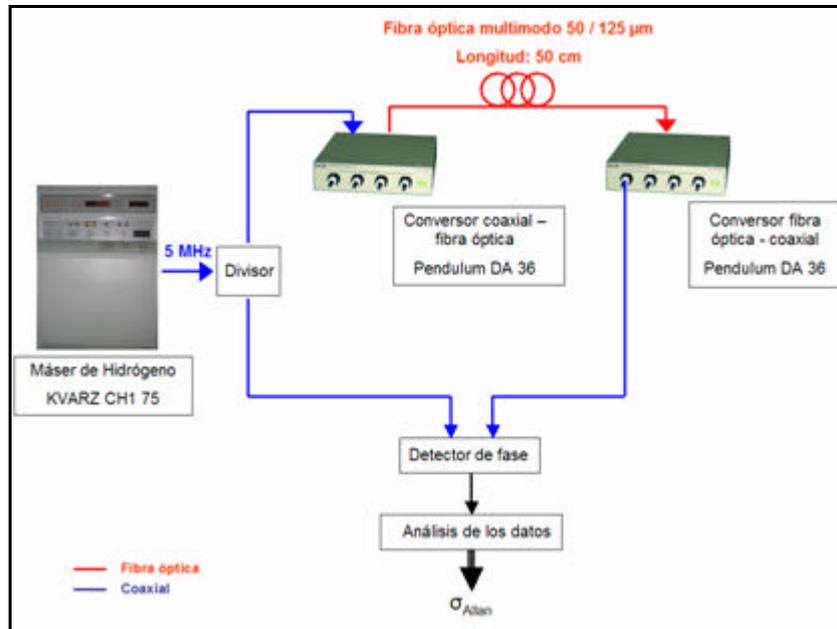


Figura 2. Esquema para la medida de la estabilidad del sistema transmisor DA 36

Según el esquema de medida expuesto en la Figura 2, la varianza de Allan resultante a la salida del detector de fase (S_{Allan} en la figura) va a reunir contribuciones de la varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 a caracterizar, la varianza de Allan del propio detector de fase y la varianza de Allan del máser (esta última se cancela en su mayor parte ya que aparece por igual en las dos entradas del detector de fase). Es decir

$$S_{medida}^2 = S_{DA36}^2 + S_{detector_fase}^2 \quad (2)$$

donde σ representa varianza de Allan.

De la Ecuación 2 se deduce que, para obtener la varianza de Allan del sistema transmisor DA 36, será necesario descontar de las medidas la varianza de Allan del detector de fase.

De forma intuitiva, la varianza de Allan se puede entender de la siguiente forma (tomando como ejemplo que las muestras de la medida del desfase se hayan capturado cada segundo):

- Para obtener la varianza de Allan 1 seg ($s^2_{1\text{seg}}$), se calculan las medias m_i entre dos muestras adyacentes. A continuación, se restan los valores obtenidos ($m_i - m_{i+1}$). La varianza de Allan se calcula como la varianza de todas las restas.

- Para obtener la varianza de Allan 10 seg ($s^2_{10\text{seg}}$), se calculan las medias m_i de los valores de desfase en intervalos de 10 segundos. A continuación, se obtienen las restas ($m_i - m_{i+1}$) entre medias adyacentes. La varianza de Allan se calcula como la varianza de todas las restas. De forma gráfica, el proceso se representa en la **Figura 3**.

- Para obtener la varianza de Allan 100 seg ($s^2_{100\text{seg}}$), se calculan las medias m_i de los valores de desfase en intervalos de 100 segundos. A continuación, se obtienen las restas ($m_i - m_{i+1}$) entre medias adyacentes. La varianza de Allan se calcula como la varianza de todas las restas.

-
-
-

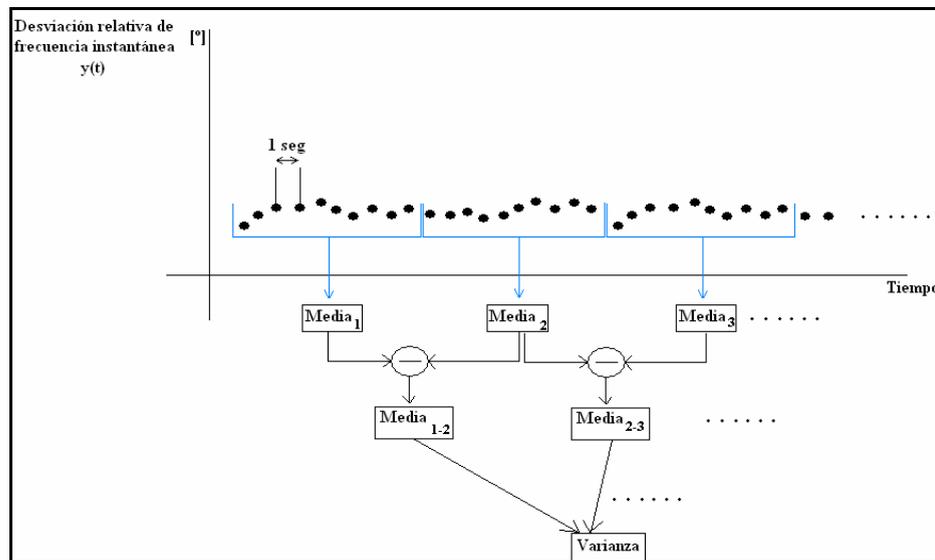


Figura 3. Cálculo de la varianza de Allan 10 seg

Antes de realizarse las medidas, se ha de verificar que la estabilidad en frecuencia (varianza de Allan) del detector de fase sea mejor que la estabilidad en frecuencia (varianza de Allan) del sistema transmisor DA 36. En este trabajo se analizan dos posibles detectores de fase:

- Contador HP 53131A
- Analizador FFT Agilent 35670A

III. Elección del detector de fase

Como se ha explicado en el Capítulo anterior, de acuerdo al procedimiento de medida que se ha elegido para medir la varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 (Fig. 2), se hace necesario el uso de un detector de fase.

El principal requisito que ha de cumplir el detector de fase es que sea más estable que el sistema a medir, lo cual significa que su varianza de Allan sea mejor (menor) que la varianza de Allan del sistema transmisor DA 36. Esta última es conocida ya que el fabricante nos la proporcionó y se muestra en la **Figura 4**. Desafortunadamente, se desconocen las condiciones en las que éste realizó la medida de la varianza de Allan.

En este trabajo se han estudiado dos posibles detectores de fase:

- Contador HP 53131A
- Analizador FFT Agilent 35670A

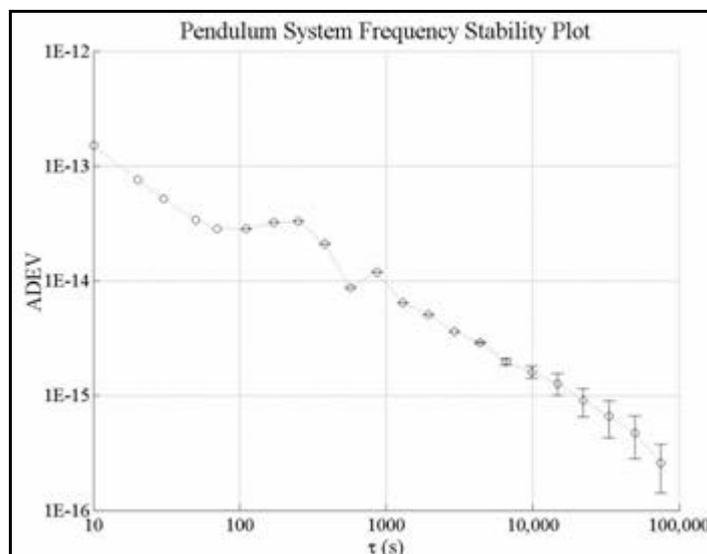


Figura 4. Varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 dada por el fabricante

(Nótese que la escala de tiempo empieza en 10 seg)

(Cortesía: Pendulum Instruments AB)

3.1 Contador HP 53131A

El montaje que se ha utilizado para medir la varianza de Allan del contador HP 53131A se muestra en la **Figura 5**. Las referencias de los componentes se pueden consultar en el Apéndice I.

En la **Figura 6** se presentan los valores de desfase medidos por el contador, cuyo espectro es de tipo blanco en frecuencia.

La varianza de Allan que se ha obtenido para el contador se muestra en la **Figura 7**.

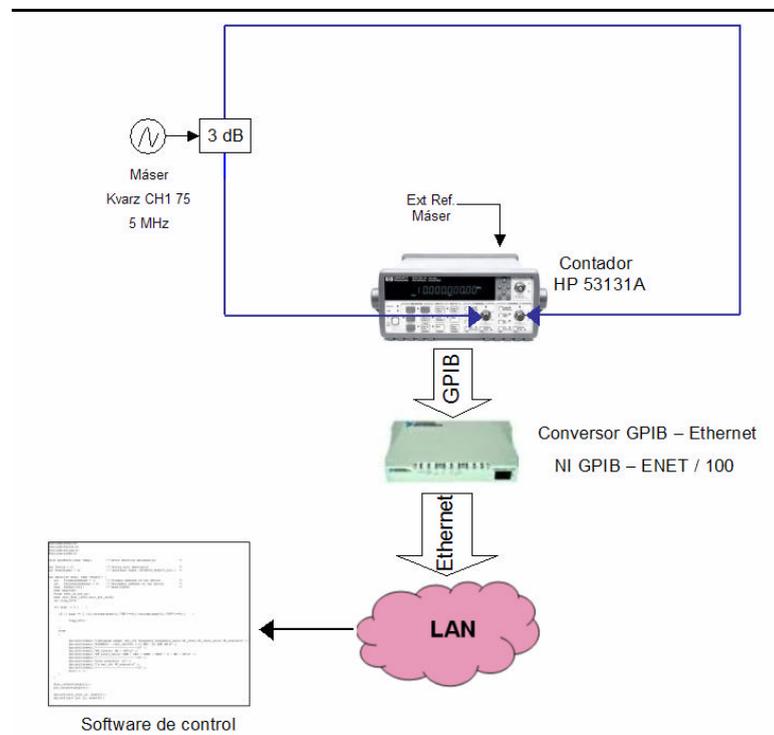


Figura 5. Esquema de medida de la varianza de Allan del contador HP 53131A

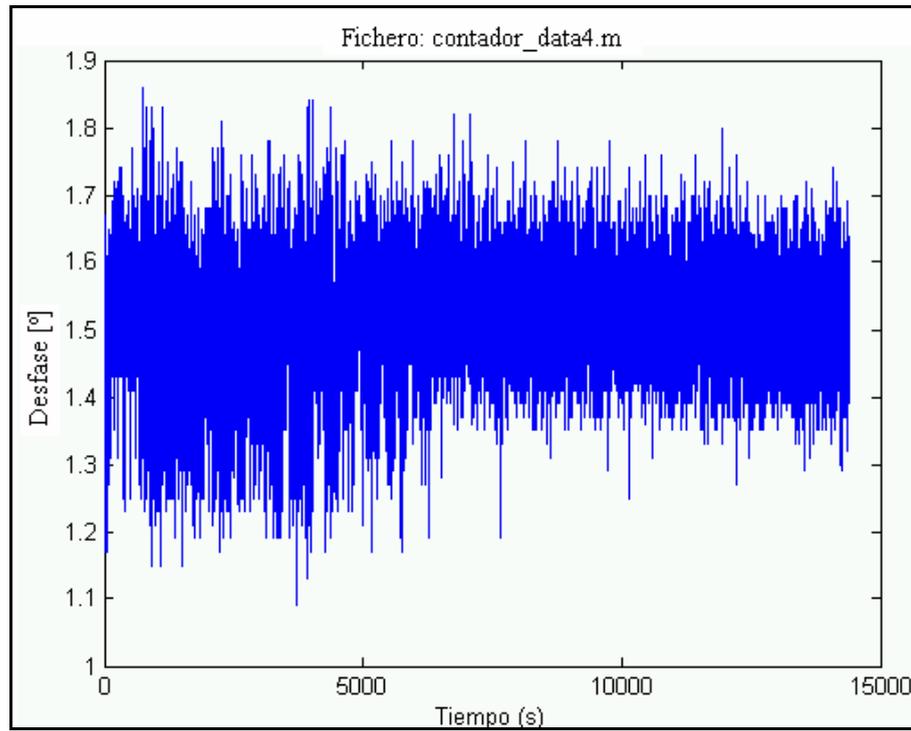


Figura 6. Valores de desfase medidos por el contador HP 53131A

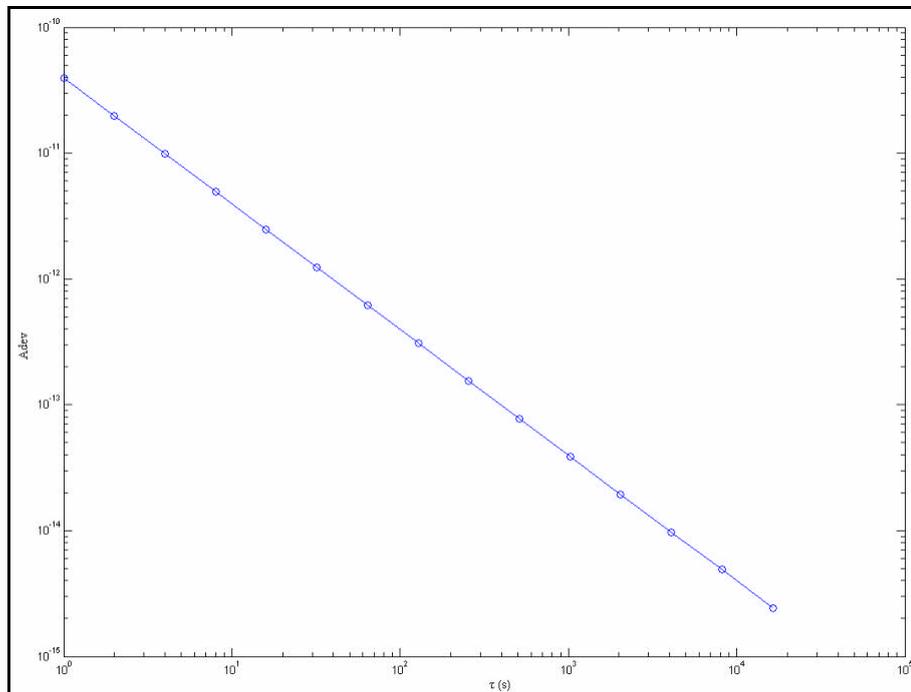


Figura 7. Varianza de Allan del contador HP 53131A

Del aspecto de la curva de la Figura 7, se deduce que la varianza de Allan del contador es peor (superior) a la del sistema transmisor DA 36 (Fig. 4), por lo que se concluye que el contador no sirve como detector de fase para medir la estabilidad en frecuencia del sistema transmisor DA 36.

3.2 Analizador FFT Agilent 35670A

Para realizar la medida de la varianza de Allan del analizador FFT Agilent 35670A se empleó el circuito que se muestra en la **Figura 8**. Se incluyen los mezcladores para bajar en frecuencia la señal de 5MHz del máser ya que el analizador FFT no admite señales de tan alta frecuencia. Las referencias de los componentes se pueden consultar en el Apéndice I.

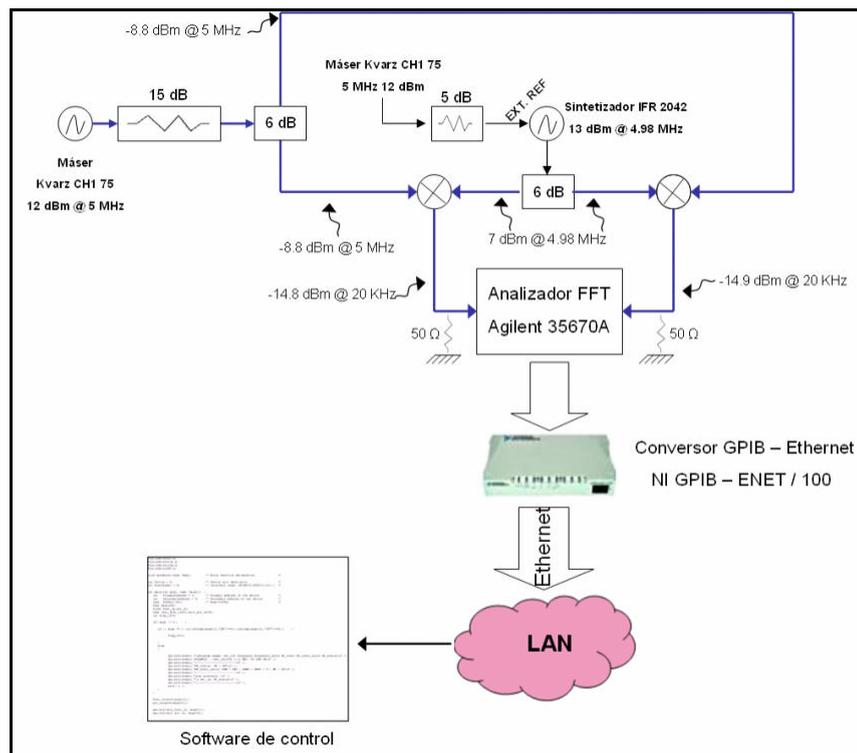


Figura 8. Circuito para medir la varianza de Allan del analizador FFT Agilent 35670A

En la **Figura 9** se presentan los valores de desfase medidos por el analizador FFT y el registro de temperatura [4]. El espectro de los valores de desfase es del tipo *flicker* en frecuencia.

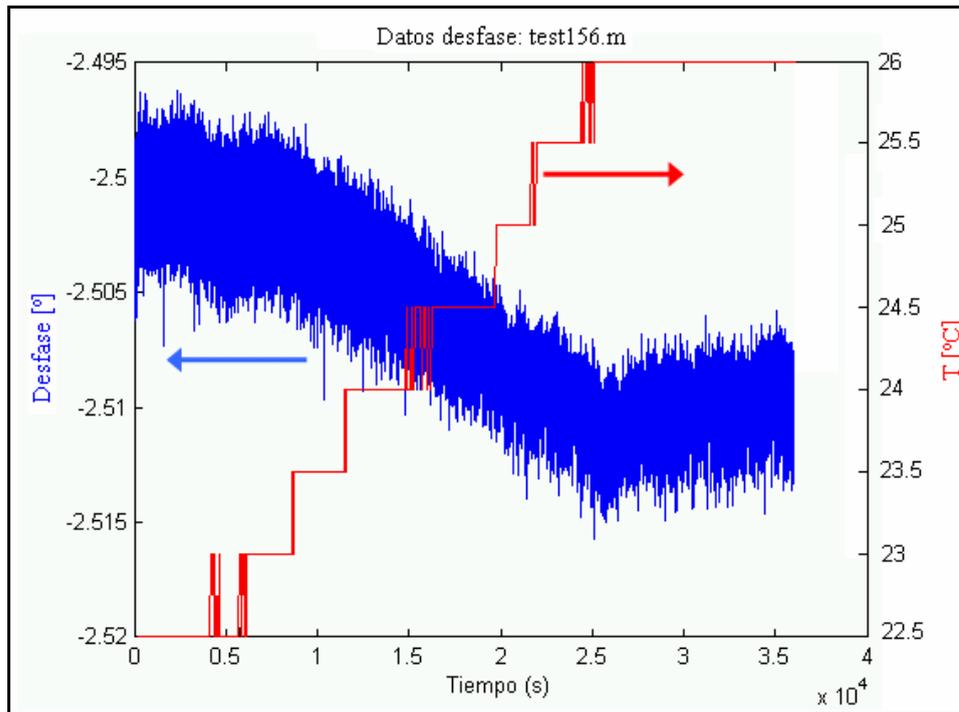


Figura 9. Valores de desfase medidos por el analizador FFT Agilent 35670A y registro de temperatura (resolución de 0.5°C)

La varianza de Allan que se ha obtenido para el analizador FFT se muestra en la **Figura 10**. A la vista de esta curva de varianza de Allan, y comparándola con la curva de varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 dada por el fabricante (Fig. 4), se concluye que el analizador FFT es más estable en frecuencia que el sistema transmisor DA 36 y es por tanto adecuado para realizar la medida de la varianza de Allan del sistema transmisor DA 36. La comparación entre el contador y el analizador FFT se representa en la **Figura 11**.

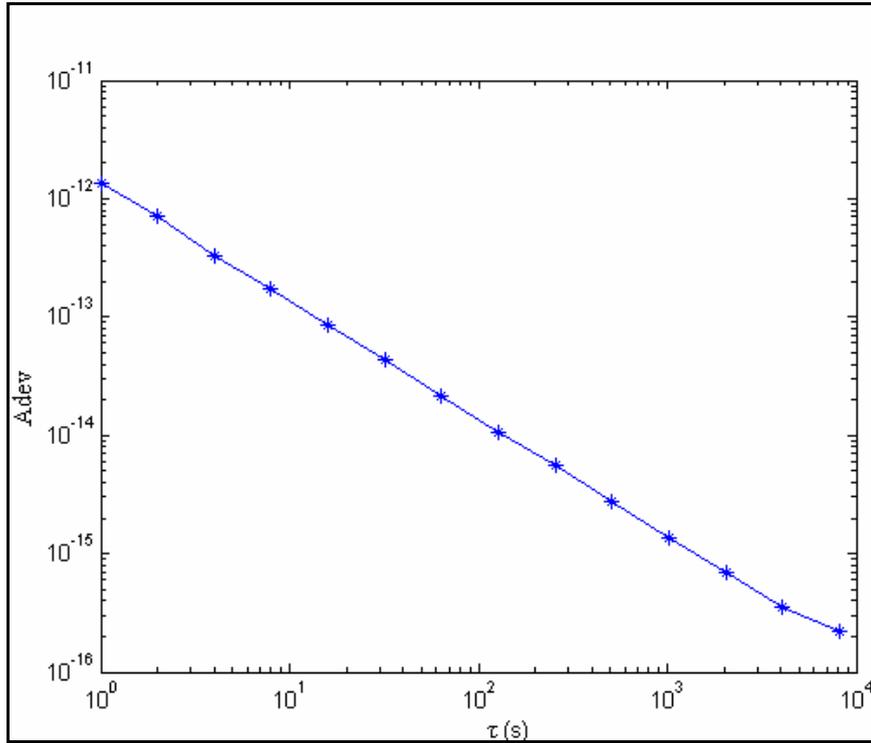


Figura 10. Varianza de Allan del analizador FFT Agilent 35670A

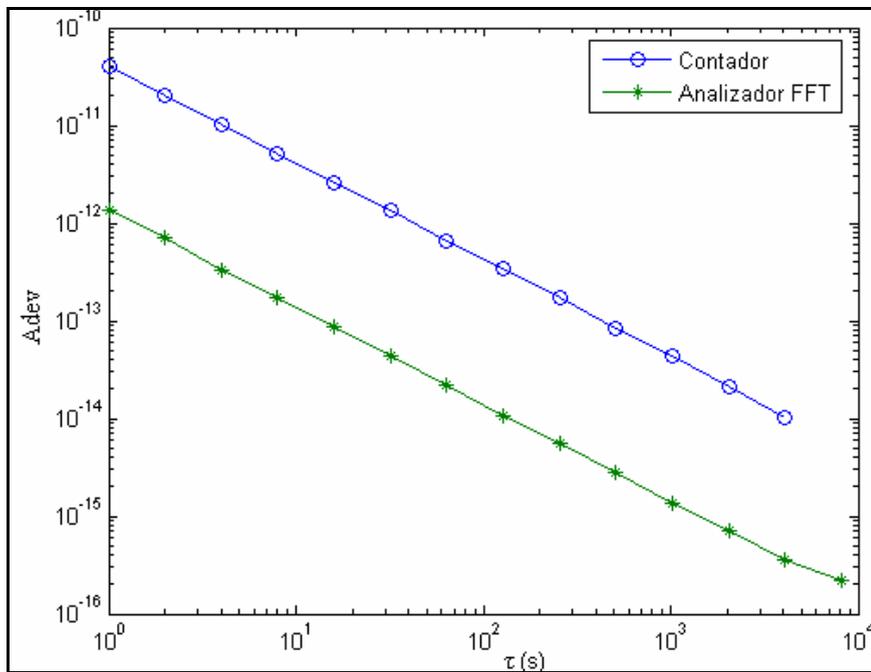


Figura 11. Comparación entre las varianzas de Allan del contador y la del analizador FFT (Figuras 7 y 10 superpuestas)

IV. Resultados

4.1 Varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 empleando un tramo de fibra óptica de 50 cm

En la **Figura 12** se puede ver el montaje empleado para realizar la medida. Se empleó el sistema transmisor NI GPIB-Enet / 100 [5] para controlar el sistema a través de Ethernet. Las referencias de los componentes se pueden consultar en el Apéndice II. El sistema transmisor DA 36 dispone de un control automático de ganancia que hace que su salida se fije a unos 13 dB, de ahí la necesidad de utilizar un atenuador en su salida para que la señal original del máser y la que pasa por el DA 36 tengan una potencia similar en las entradas de sus respectivos mezcladores. En la **Figura B** se muestra una foto del montaje final.

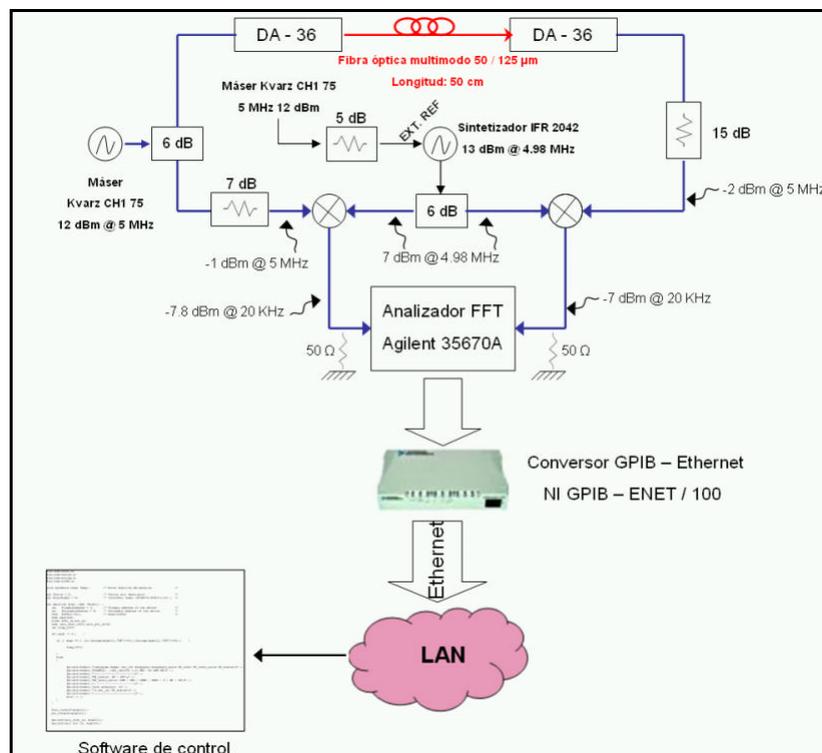


Figura 12. Circuito para la medida de la varianza de Allan del sistema transmisor DA 36

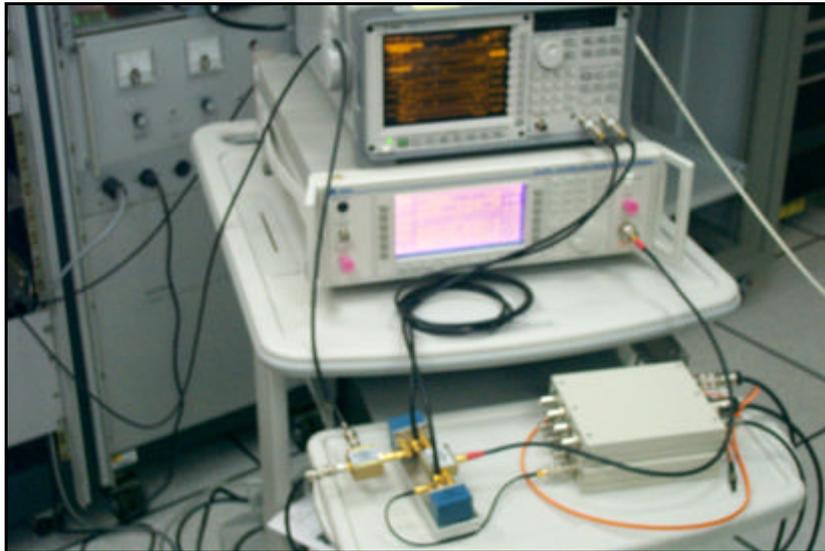


Figura 13. Aspecto del montaje de medida de la varianza de Allan del sistema transmisor DA 36

En la **Figura 14** se presentan los valores de desfase medidos por el analizador FFT y el registro de temperatura.

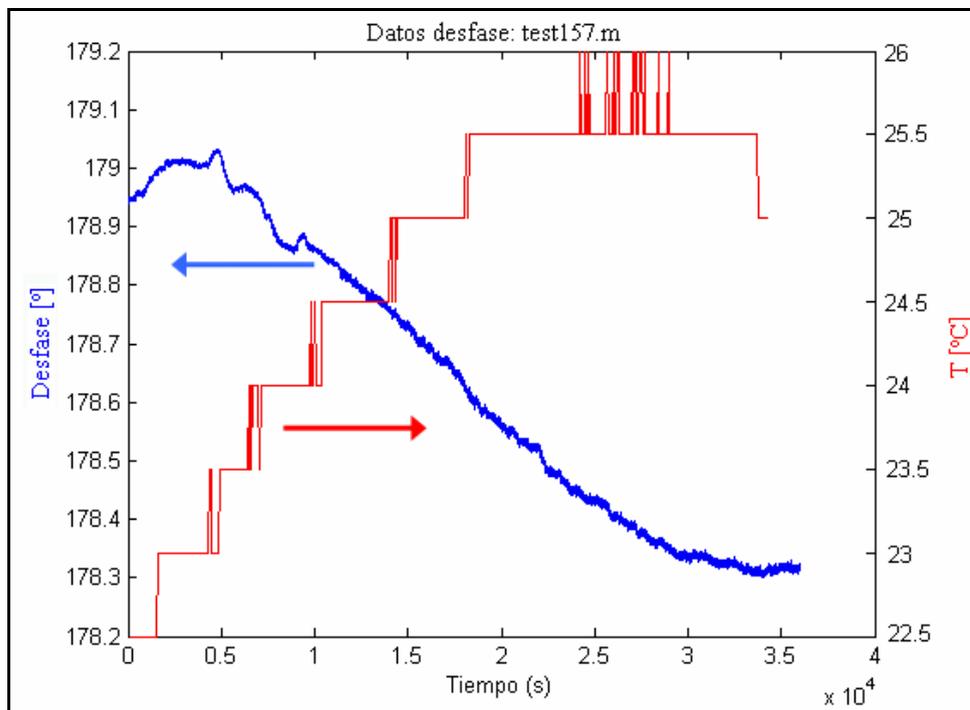


Figura 14. Valores de desfase medidos por el analizador FFT Agilent 35670A y registro de temperatura (resolución de 0.5°C)

En la **Figura 15** se presenta la varianza de Allan que se ha obtenido de los datos generados por el analizador FFT. Como se ya se ha visto en el Capítulo II de este informe, la varianza de Allan resultante reúne contribuciones del sistema transmisor DA36 a caracterizar y del propio analizador FFT. Esta última ha de ser descontada de la medida.

Es decir

$$s_{medida}^2 = s_{DA36}^2 + s_{analizador_FFT}^2 \quad (3)$$

donde σ representa varianza de Allan.

Despejando,

$$s_{DA36} = \sqrt{(s_{medida}^2 - s_{analizador_FFT}^2)} \quad (4)$$

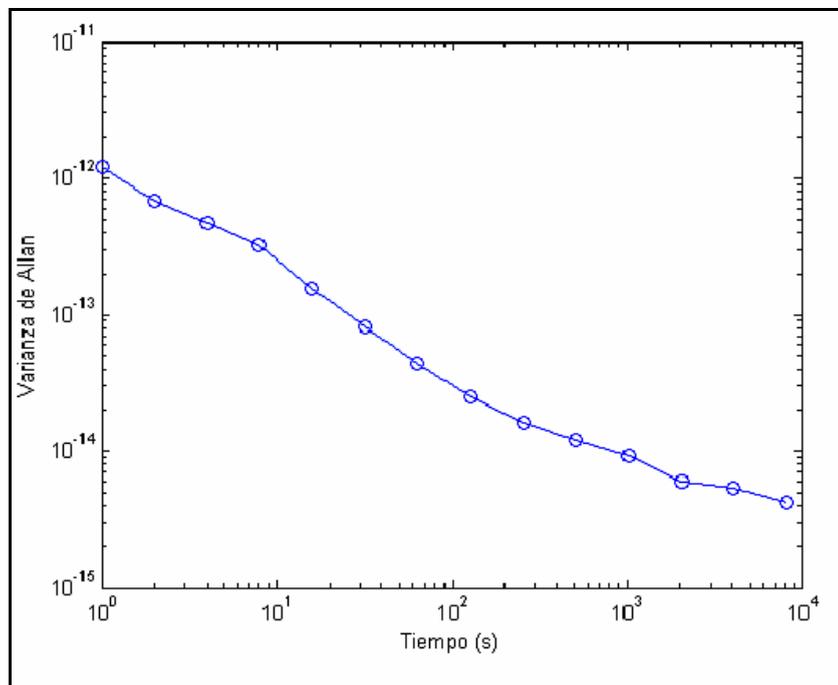


Figura 15. Varianza de Allan de los datos medidos por el analizador FFT Agilent 35670A empleando el montaje de la Figura 12.

Aplicando la Ec. (3) se obtiene la varianza de Allan del sistema transmisor DA 36, la cual se representa en la **Figura 16** (trazo verde). En la misma figura se muestra también la curva de varianza de Allan del analizador FFT (vista en la Fig. 10) y la curva de varianza de Allan obtenida de los datos medidos por el FFT (Fig. 15).

Comparando la varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 obtenida por nosotros (Fig. 16 trazo verde) con la que el fabricante nos proporcionó (Fig. 4), se puede comprobar que los valores de varianza son bastante similares. Las pequeñas diferencias se pueden achacar a nuestro desconocimiento de las condiciones en las que el fabricante realizó sus medidas.

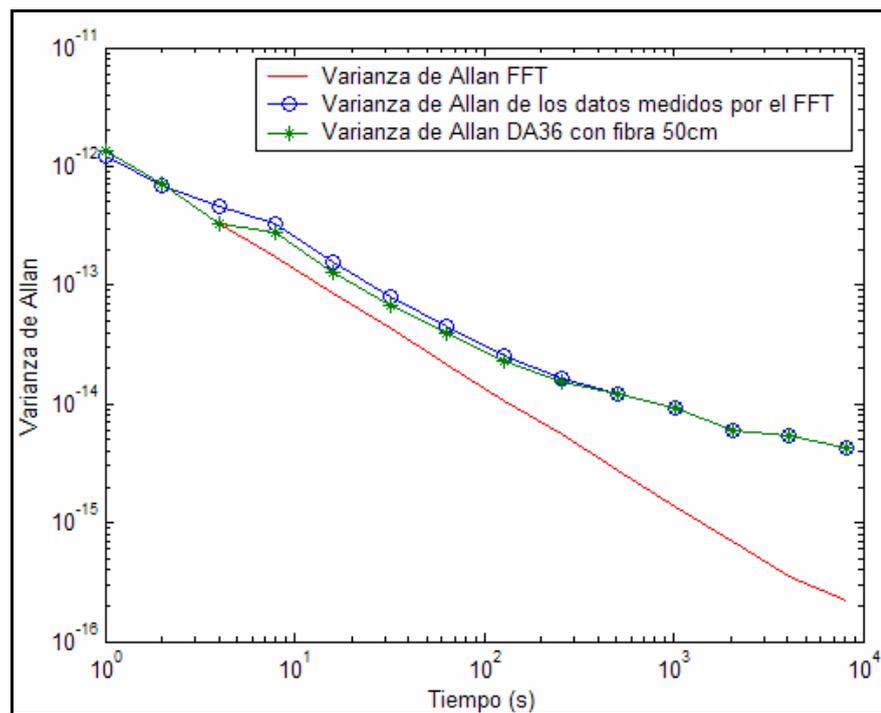


Figura 16. Varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 empleando un tramo de fibra de 50 cm.

4.2 Varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 empleando un tramo de fibra de 350m (enlace antena 14m - astrógrafo)

Para realizar esta medida se aprovechó el tramo de fibra (ida y vuelta) que conecta la antena de 14m con el astrógrafo. Fue necesaria una reubicación de los aparatos de medida por lo que se hizo una ligera modificación del montaje, la cual se muestra en la **Figura 17**.

En la **Figura 18** se presentan los valores de desfase medidos por el analizador FFT y el registro de temperatura.

En la **Figura 19** se presenta la varianza de Allan que se ha obtenido de los datos generados por el analizador FFT.

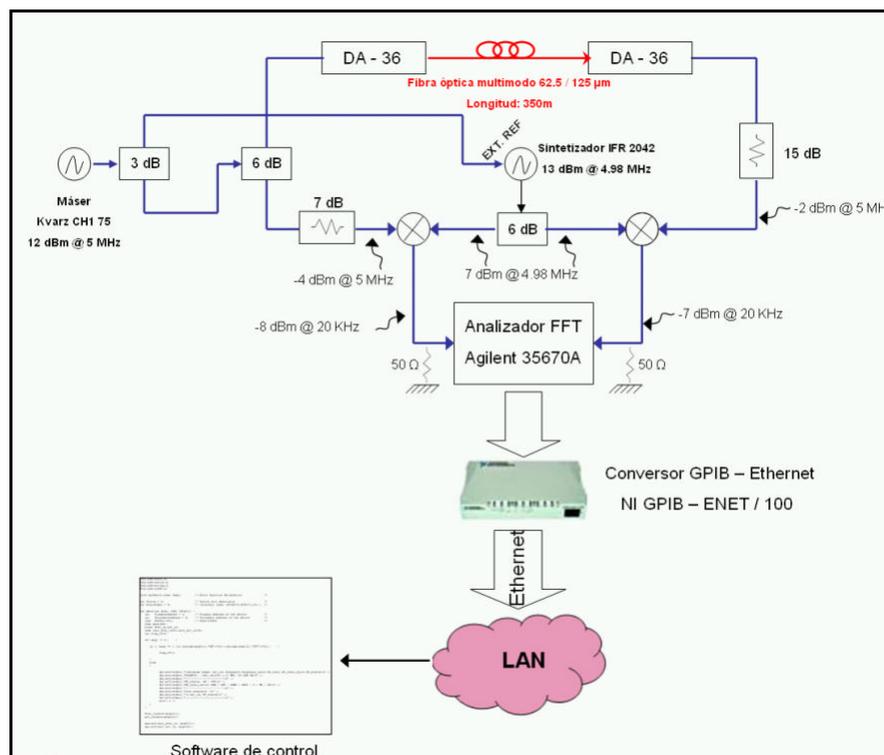


Figura 17. Circuito para la medida de la varianza del sistema transmisor DA 36 empleando una fibra de longitud 350m (enlace antena 14m – astrógrafo ida y vuelta)

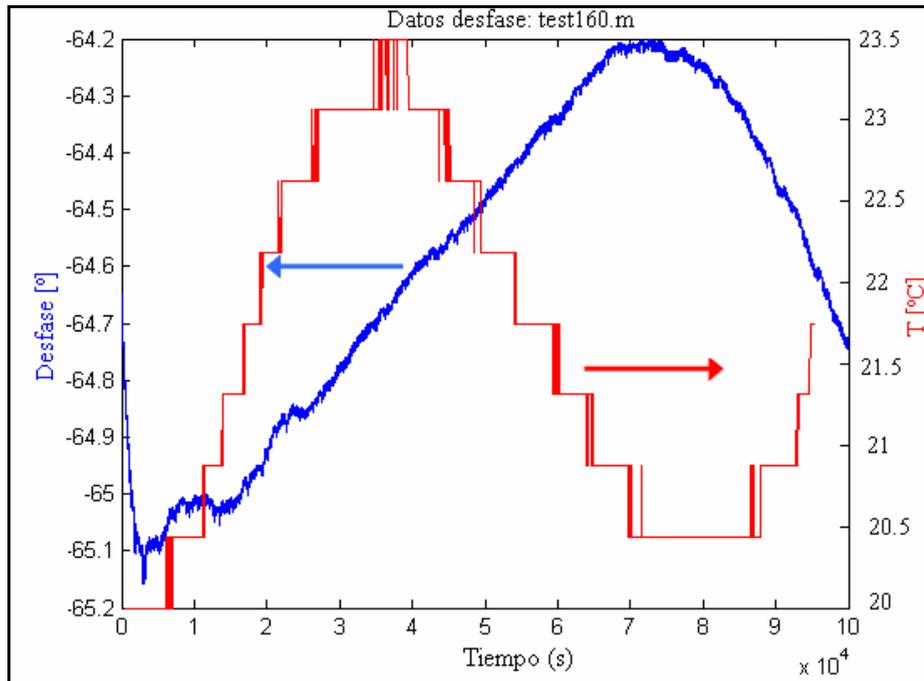


Figura 18. Valores de desfase medidos por el analizador FFT Agilent 35670A y registro de temperatura (resolución de 0.5°C)

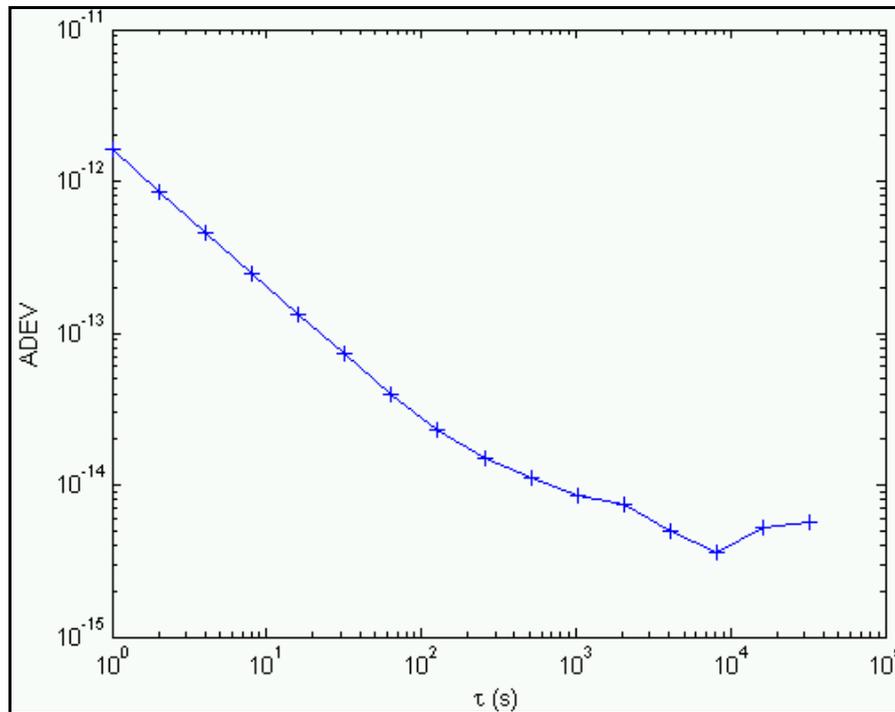


Figura 19. Varianza de Allan de los datos medidos por el analizador FFT Agilent 35670A empleando el montaje de la Figura 17

En la **Figura 20** se muestra la varianza del sistema transmisor DA36 (trazo verde) calculada de la Ec. 4.

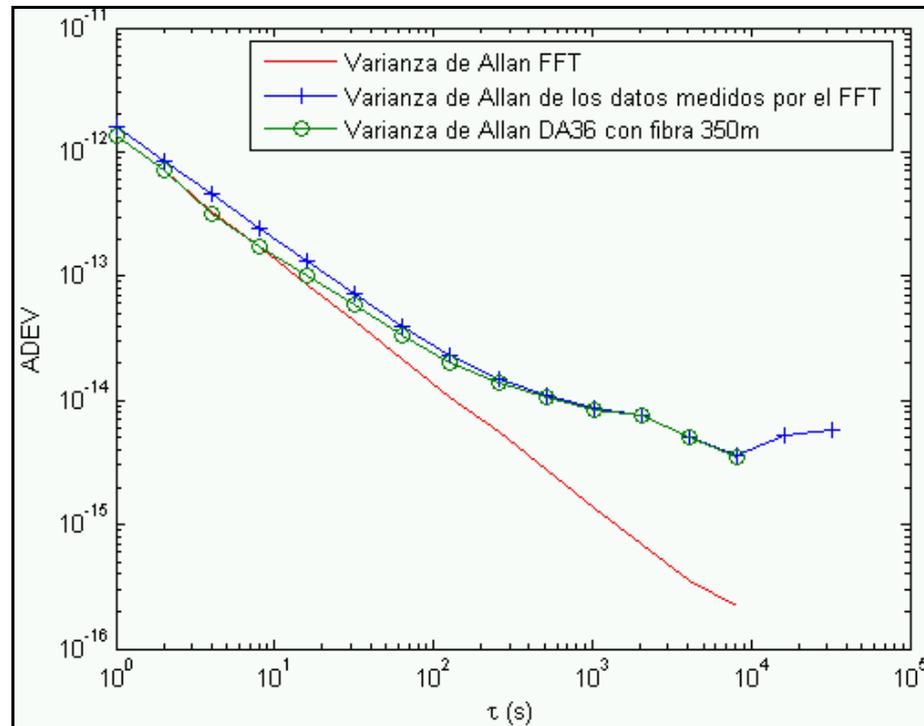


Figura 20. Varianza de Allan del sistema transmisor DA 36 empleando un tramo de fibra de 350 m

4.3 Varianza de Allan en un sistema típico de distribución de la señal del máser por fibra óptica

Una vez que la varianza de Allan del DA 36 es conocida, se puede estimar la varianza de Allan que se obtendría en un sistema típico de transmisión de la señal del máser de Hidrógeno por fibra óptica, con un diagrama de bloques como el que se muestra en la **Figura 21**.

La varianza de Allan que se va a tener a la salida del sistema transmisor DA 36 (s_{OUT} en la figura 21) va a tener influencias de la varianza de Allan del máser $s_{Máser}$ y de la varianza de Allan del sistema transmisor DA36 s_{DA36} . Matemáticamente,

$$s_{OUT} = \sqrt{(s_{DA36}^2 + s_{máser}^2)} \quad (5)$$

donde σ representa varianza de Allan.

$s_{Máser}$ es suministrada por el fabricante y ha sido medida en el CAY [6]. s_{DA36} ha sido medida por nosotros (Fig. 16), así que podemos estimar sin mayores problemas s_{OUT} , la cual se muestra en la **Figura 22** junto con $s_{Máser}$ y s_{DA36} .

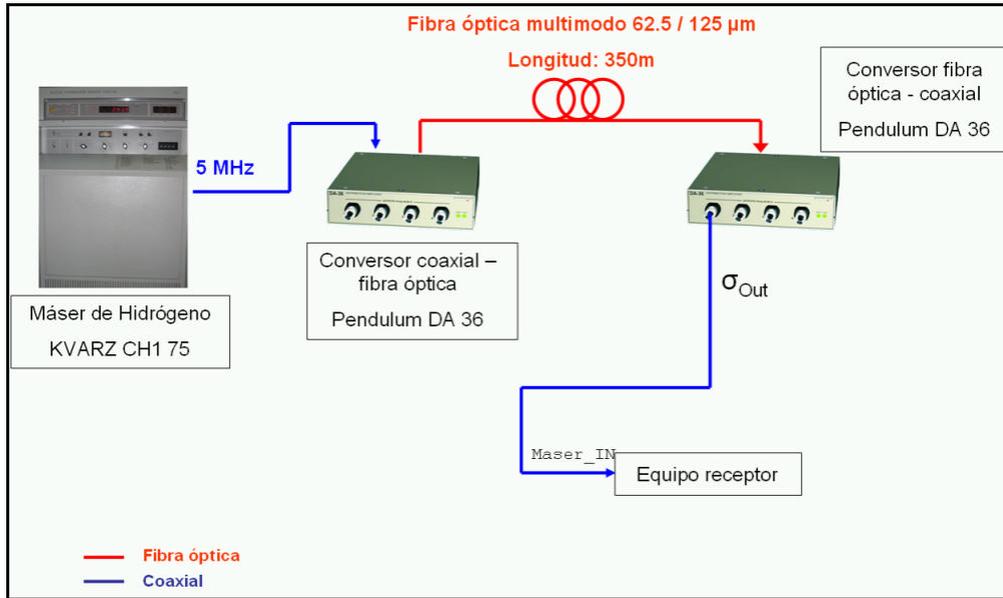


Figura 21. Sistema típico de distribución de la señal del máser por fibra óptica

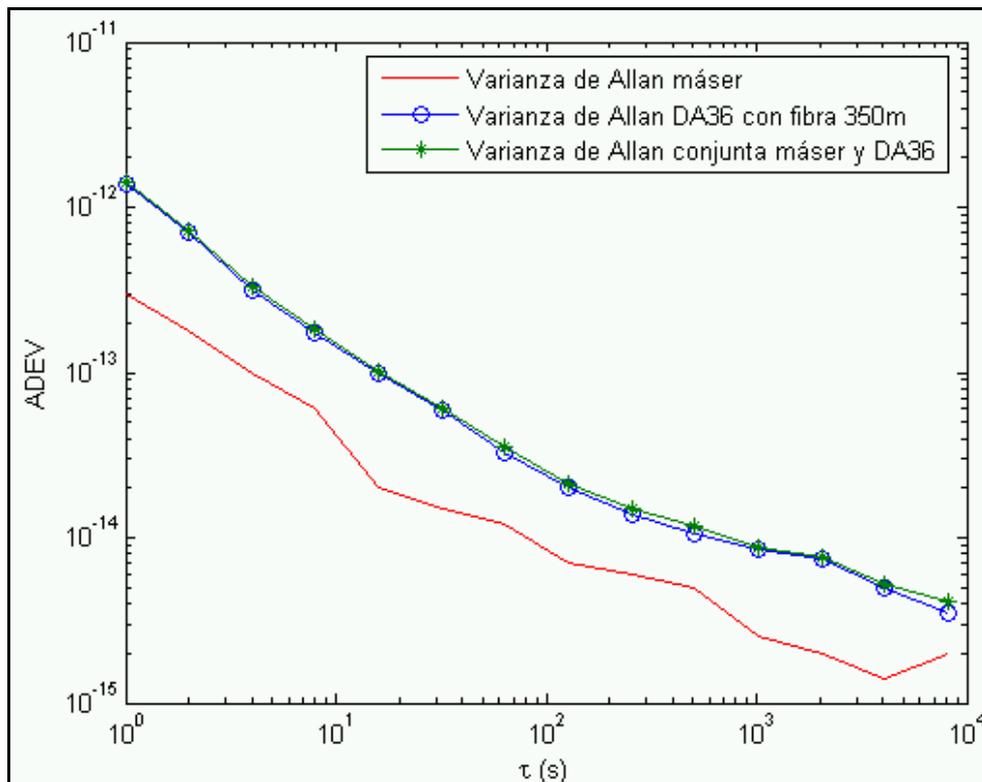


Figura 22. Varianza de Allan de un sistema típico de distribución de la señal del máser por fibra óptica

4.4 Varianza de Allan de un tramo de cable coaxial de 900m de longitud

En este apartado se analiza la estabilidad en fase y frecuencia de un sistema de distribución por cable coaxial (especificaciones en el Apéndice II), cuya longitud es de 900m, de la señal de 5MHz del máser. En la **Figura 23** se muestra el montaje empleado para realizar la medida de varianza de Allan.

En la **Figura 24** se presentan los valores de desfase medidos por el analizador FFT y el registro de temperatura.

En la **Figura 25** se presenta la varianza de Allan que se ha obtenido de los datos generados por el analizador FFT.

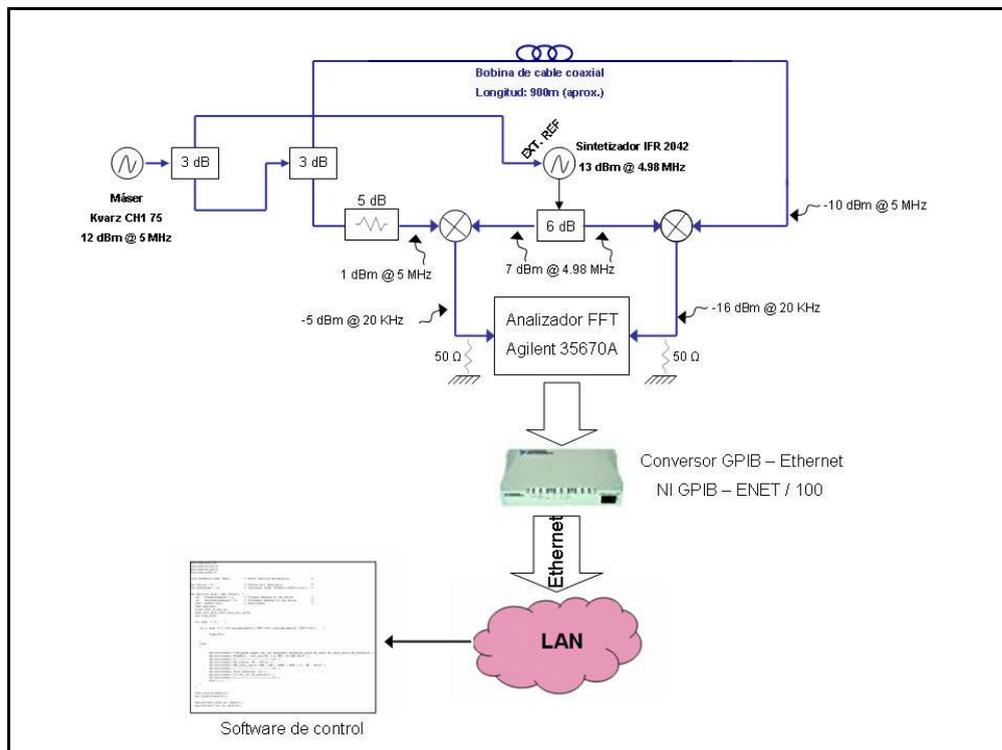


Figura 23. Circuito para la medida de la varianza de Allan de un sistema de distribución por cable coaxial de la señal del máser

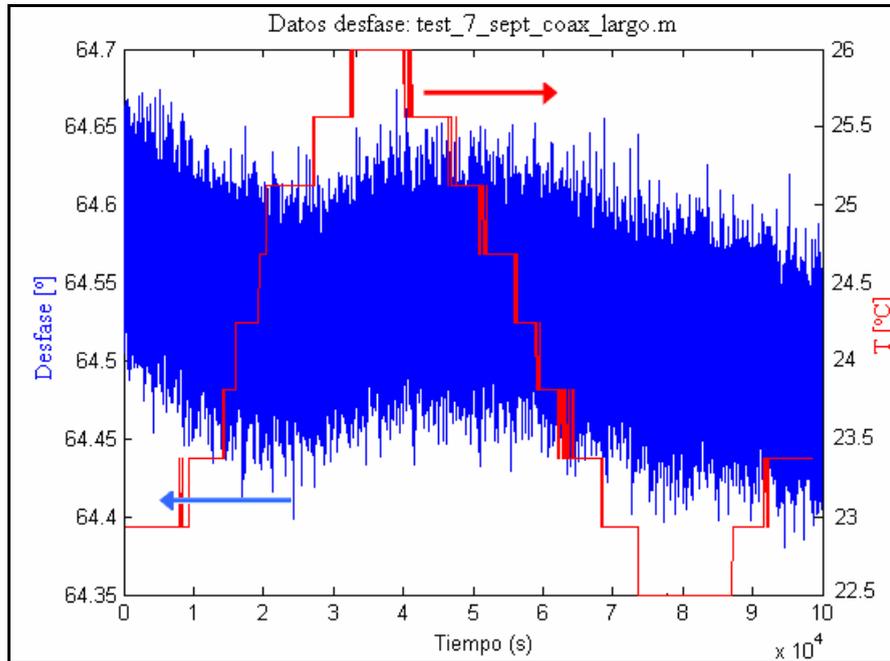


Figura 24. Valores de desfase medidos por el analizador FFT Agilent 35670A y registro de temperatura (resolución de 0.5°C)

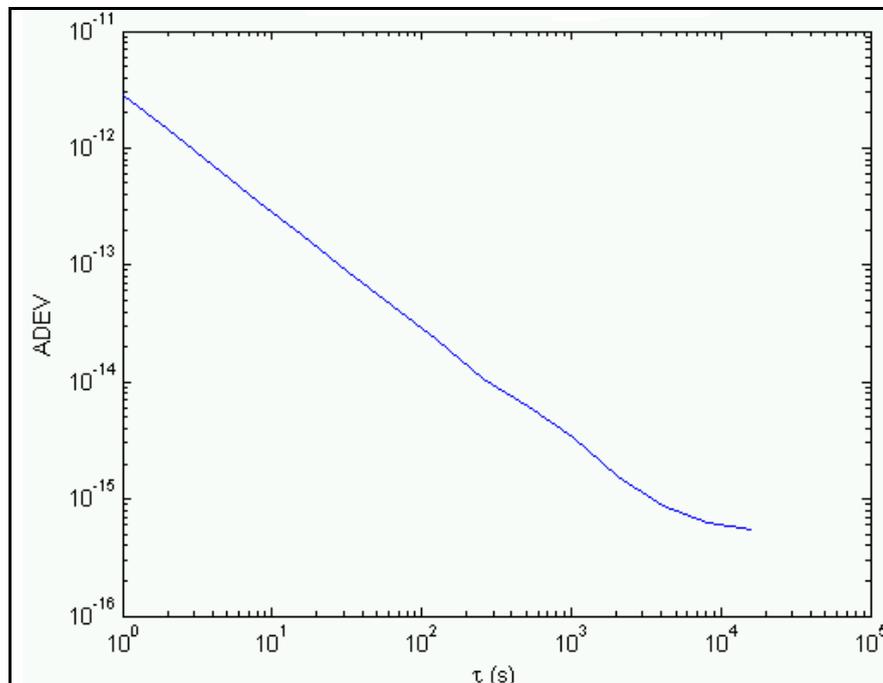


Figura 25. Varianza de Allan de los datos medidos por el analizador FFT Agilent 35670A empleando el montaje de la Figura 23

En la **Figura 26** se compara la varianza de allan del sistema con cable coaxial y el de fibra óptica (visto en la Fig. 20).

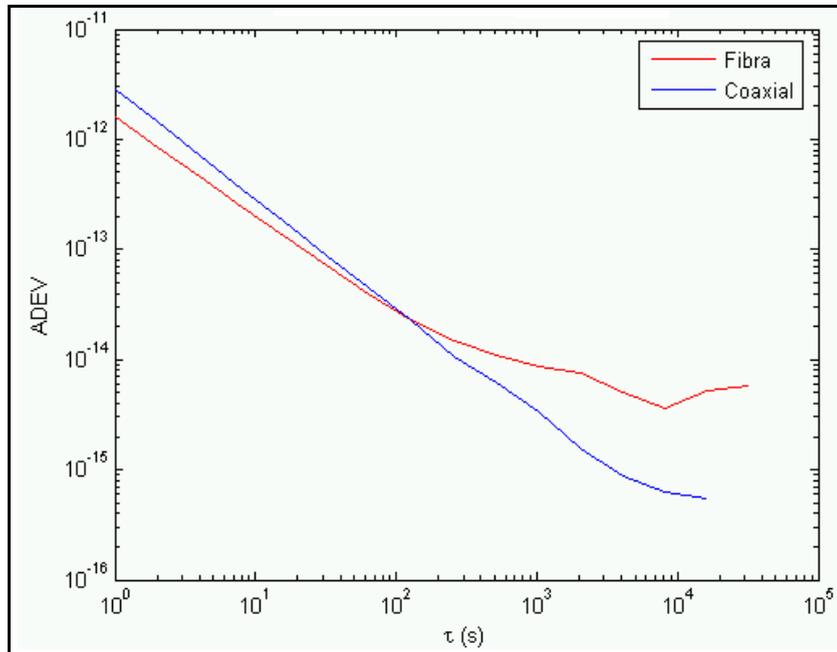


Figura 26. Varianza de Allan del sistema de distribución de la señal del máser por fibra óptica y por cable coaxial

En la **Figura 27** se muestra la varianza de Allan del cable coaxial (trazo verde) calculada de la Ec. 4.

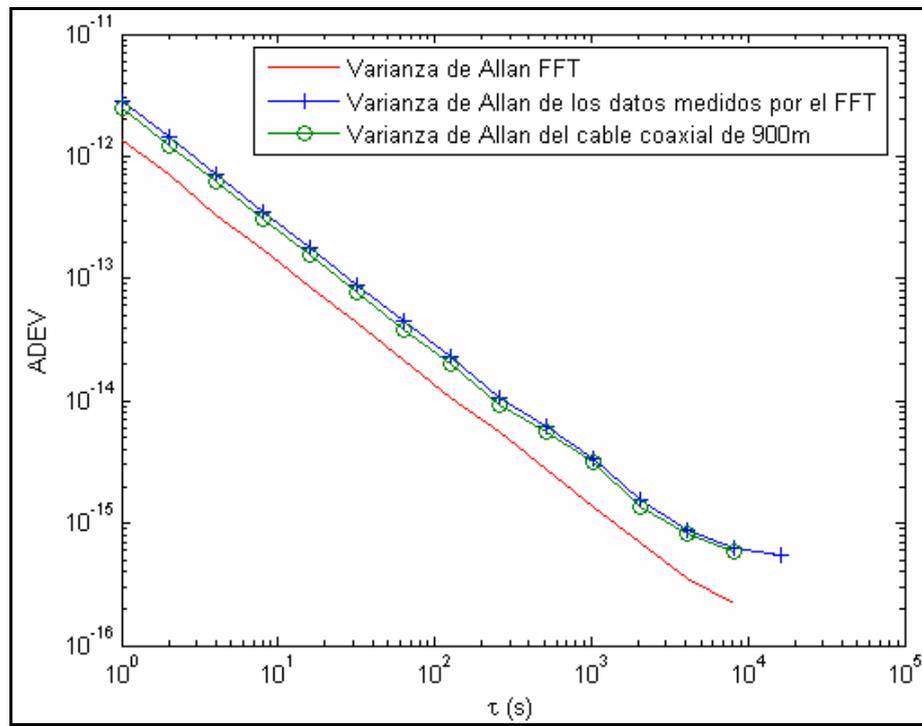


Figura 27. Varianza de Allan del tramo de cable coaxial de 900m.

4.5 Varianza de Allan en un sistema típico de distribución de la señal del máser por cable coaxial

De forma análoga al procedimiento visto en el apartado 4.3 para calcular la varianza de Allan en un sistema típico de transmisión de la señal del máser por fibra óptica, se puede obtener la varianza de Allan en un sistema de transmisión de la señal del máser por cable coaxial como el que se muestra en la **Figura 28**.

La varianza de Allan a la salida del cable coaxial (s_{OUT} en la figura 28) va a tener influencias de la varianza de Allan del máser $s_{Máser}$ y de la varianza del cable. Matemáticamente,

$$s_{OUT} = \sqrt{(s_{coaxial}^2 + s_{máser}^2)} \quad (6)$$

donde σ representa varianza de Allan.

$s_{Máser}$ es suministrada por el fabricante y ha sido medida en el CAY [6]. $s_{coaxial}$ ha sido medida por nosotros (Fig. 27), así que podemos estimar sin mayores problemas s_{OUT} , la cual se presenta en la **Figura 29** junto con $s_{Máser}$ y $s_{coaxial}$.

En la **Figura 30** se puede ver el montaje con el que se hicieron las medidas.

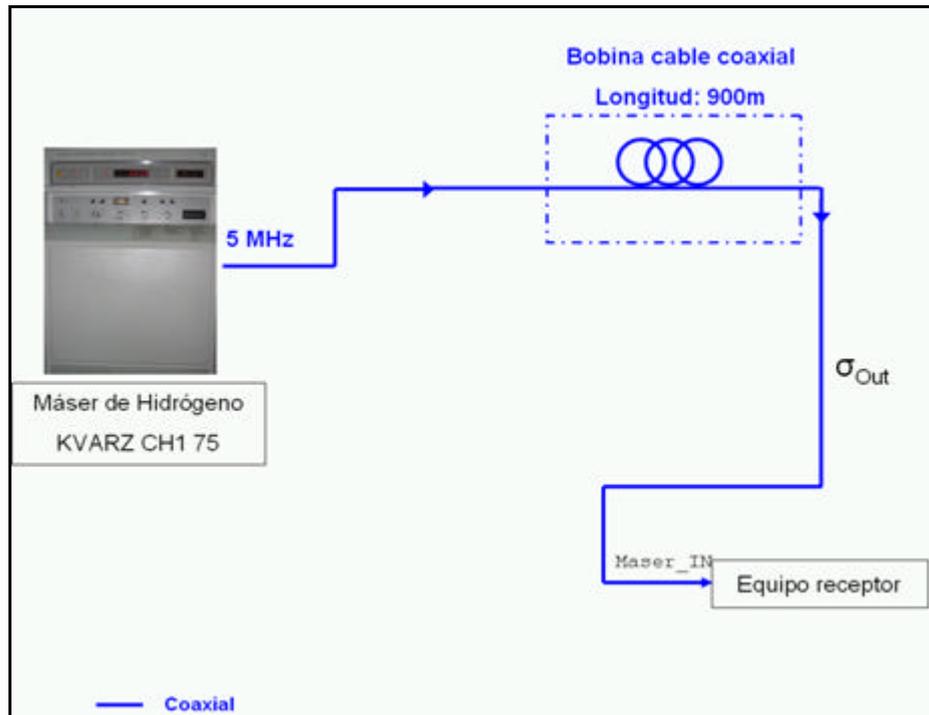


Figura 28. Sistema típico de distribución de la señal del máser por cable coaxial

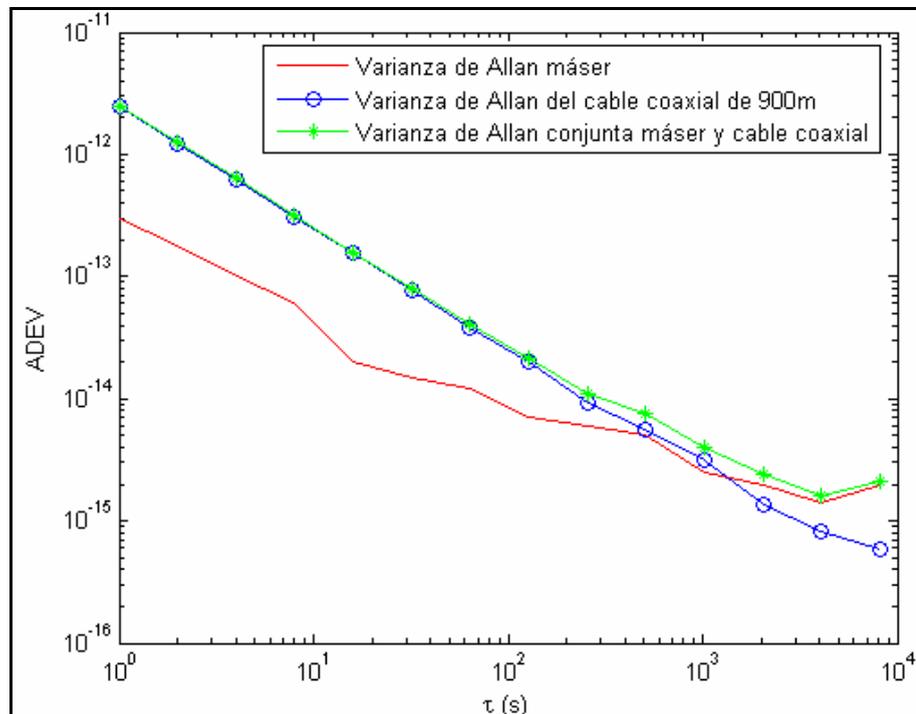


Figura 29. Varianza de Allan de un sistema típico de distribución de la señal del máser por cable coaxial



Figura 30. Aspecto del montaje de medida de la varianza de Allan del sistema transmisor de la señal del máser por cable coaxial

V. Conclusiones

En la **Figura 31** se representan conjuntamente las curvas de varianza de Allan del analizador FFT, máser, conversor DA36 + fibra de 350m y tramo coaxial de 900m, expuestas anteriormente en el informe.

A la vista de esta figura, se observa que la varianza de Allan del FFT es mejor que la del máser con altos tiempos de integración (lo cual puede parecer contradictorio). Esto es debido a que, en el método de medida que estamos empleando, comparamos la señal del máser consigo misma, con lo cual con altos tiempos de integración cancelamos el efecto de deriva del máser.

De la misma forma, en la **Figura 32** se pueden ver las curvas de varianza de Allan del máser, conversor DA36 + fibra de 350m + máser y tramo coaxial de 900m + máser, que también se han plasmado previamente en el informe.

De estas figuras se concluye que los sistemas de transmisión del máser por fibra óptica y por cable coaxial mostrados son bastante similares en cuanto a la estabilidad en frecuencia hasta tiempos de integración de 100 seg, por lo que en aplicaciones de VLBI en las que se integre durante menos de 100seg será preferible emplear fibra, mientras que para tiempos superiores, el uso de cable coaxial está más justificado. Adicionalmente, a la hora de la elección final, se tendrán que valorar los posibles pros y contras de trabajar con cable coaxial (mayor atenuación, vulnerabilidad frente a interferencias externas) en lugar de con fibra.

Existen fibras ópticas de mayor calidad (bajo coeficiente térmico de retardo (LTCD)), con las que se podrían superar las prestaciones del cable coaxial. El estudio de dichas fibras se recomienda en el apartado siguiente de *Trabajos futuros*.

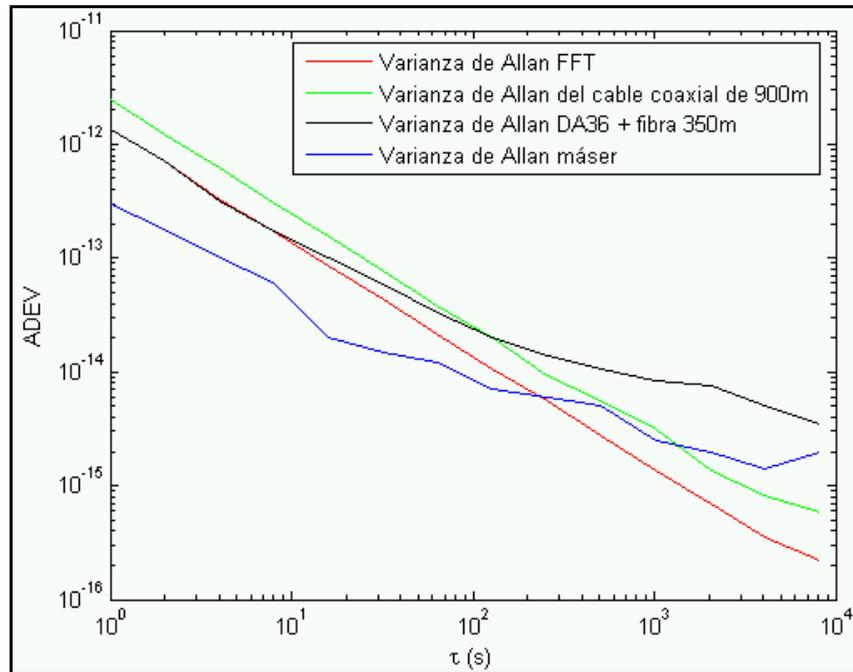


Figura 31. Representación conjunta de las curvas de varianza de Allan del FFT, conversor DA36 + fibra de 350m, tramo cable coaxial de 900m y máser

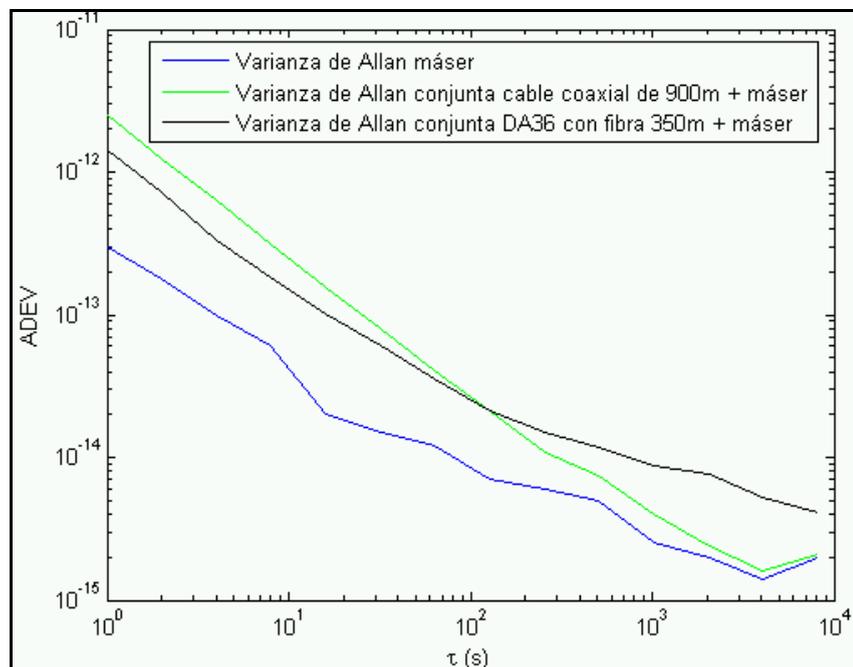


Figura 32. Representación conjunta de las curvas de varianza de Allan del máser, conversor DA36 + fibra de 350m + máser y tramo cable coaxial de 900m + máser

VI. Trabajos futuros

- Medida de la varianza de allan con tiempos menores de 1 seg para poder así evaluar la estabilidad del sistema de transmisión en alta frecuencia. Esto sería equivalente a un sistema capaz de medir el espectro [DC – 100KHz] del ruido de fase (**Fig. 33**)

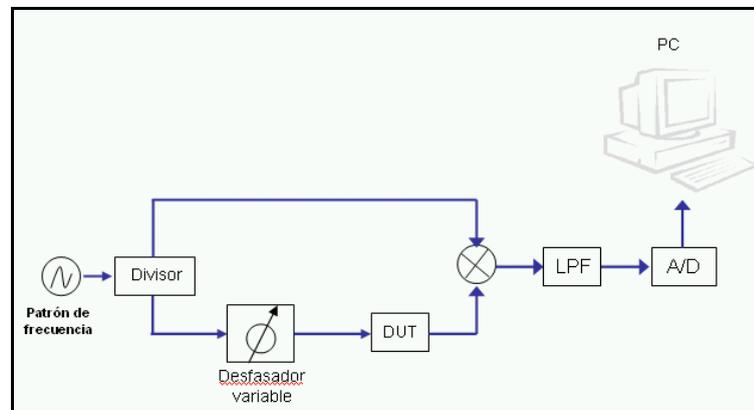


Figura 33. Medida del espectro del ruido de fase [7]

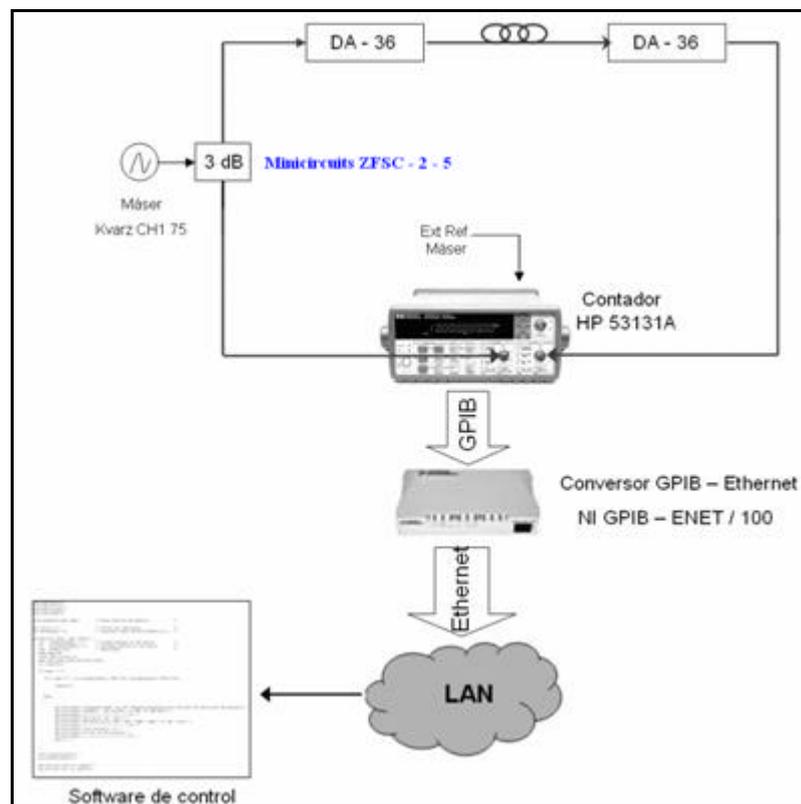
- Estudio de sistemas de transmisión con fibras ópticas monomodo de alta estabilidad, también conocidas en inglés por las siglas TCD (Termal Coefficient of Delay). Estas fibras añaden muy poco ruido de fase, por lo que están especialmente indicadas cuando se necesita una alta estabilidad en frecuencia [8].
- Diseño y construcción de un multiplicador de frecuencia basado en diodos de avalancha (SRD) para amplificar las fluctuaciones de fase que se pretende medir y hacerlo con mayor sensibilidad.

VII. Bibliografía

- [1] A.Thompson, J. Moran, G. Swenson, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, *Ed. Krieger*, 1994.
- [2] J. Rutman, Characterization of Phase and Frequency Instabilities in Precision Frequency Sources, *Proc. IEEE*, **66**, 1978.
- [3] Allan, D. W., Statistics of Atomic Frequency Standards, *Proc. IEEE*, **54**, 221-230, 1978.
- [4] D. Cordobés, José A. López Pérez, C. Almendros, Monitorización de la temperatura y humedad del receptor de holografía emp leando un microcontrolador PIC 16F84A, *Informe Técnico OAN 2005-13*.
- [5] José A. López Pérez, D. Cordobés, R. Bolaño, Comunicación con dispositivos GPIB a través de Ethernet, *Informe Técnico OAN 2006-1*.
- [6] P. de Vicente, A. Garrigues, Monitorización del máser de hidrógeno del CAY, *Informe Técnico OAN 2005-5*.
- [7] R. Ambrosini, Measurement of Allan Variance and short term phase noise of millimeter local oscillators, *Institute of Radio Astronomy (Bologna – Italy)*, May 2000.
- [8] G. Lutes, L. Primas, State-of-the-art fiber optics for short distance frequency reference distribution, *TDA Progress Report 42-97*, March 1989.

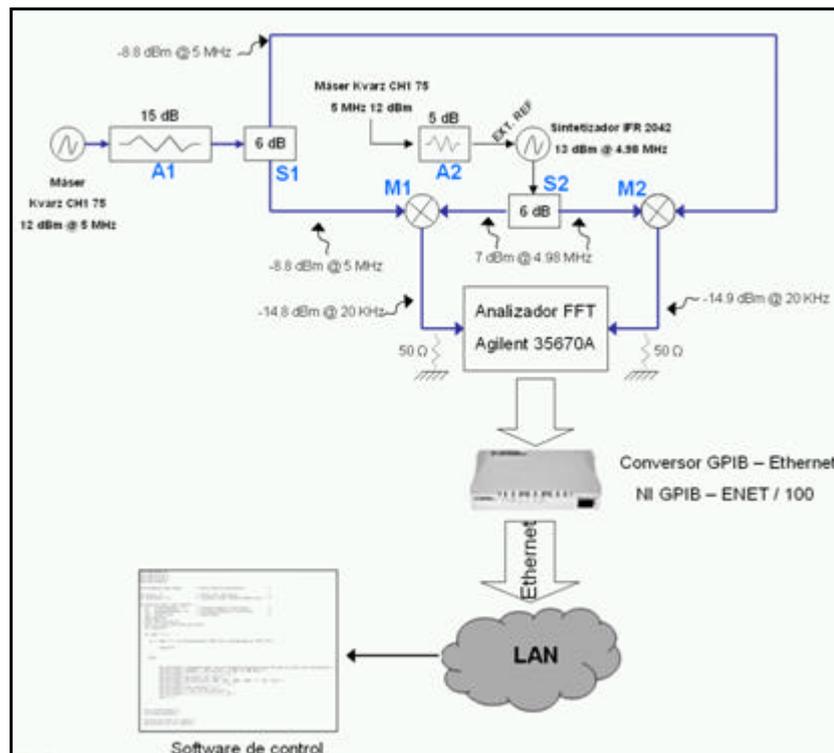
Apéndice I: Referencias de los componentes

1) Circuito del contador HP 53131A



2) Circuito del analizador FFT Agilent 35670A

2.1 Medida de la varianza de Allan del analizador FFT Agilent 35670A



A1: Minicircuits SAT-15

A2: Minicircuits SAT-5

M1: Minicircuits ZLW-1-1

M2: Minicircuits ZLW-1-1

S1: Minicircuits ZFRSC-42

S2: Minicircuits ZFRSC-42

Apéndice II: Hojas de características