

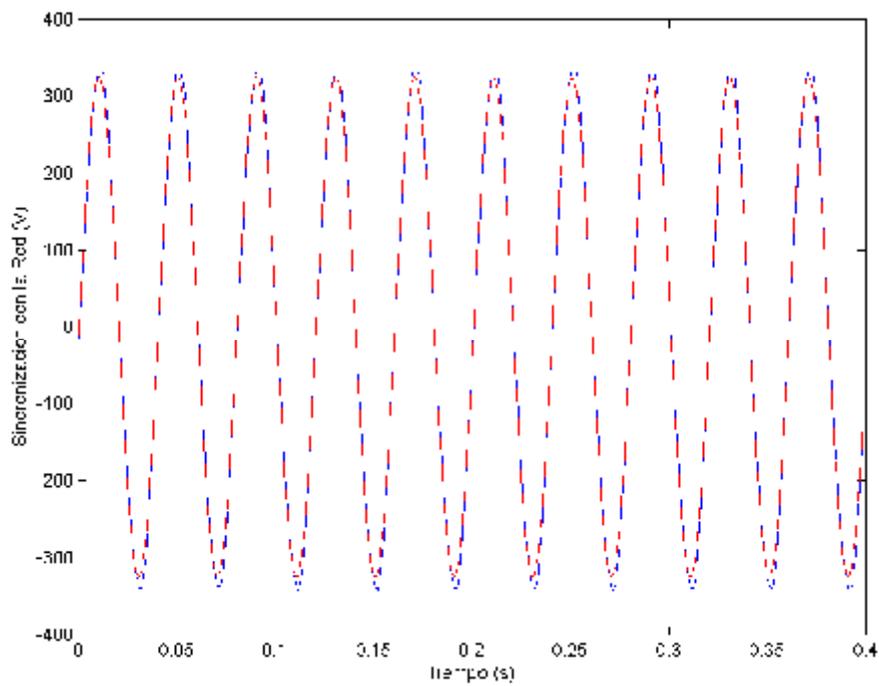
## 9. Resultados Experimentales

Para la toma de resultados experimentales se tuvieron que realizar dos tipos de pruebas diferentes. En primer lugar, se comprobó la capacidad de sincronismo del SPLL con la señal medida en la Red Eléctrica, para ello se llevó a cabo la lectura de la Fase A de la misma y se observó si la onda generada por el PLL estaba en sincronía con ésta. Debido al buen funcionamiento de la Red, con esta prueba solamente se puede verificar el denominado modo normal del SPLL, puesto que la variación de frecuencia de la misma es del orden de las centésimas de Hz y siempre en torno a la frecuencia nominal de 50Hz.

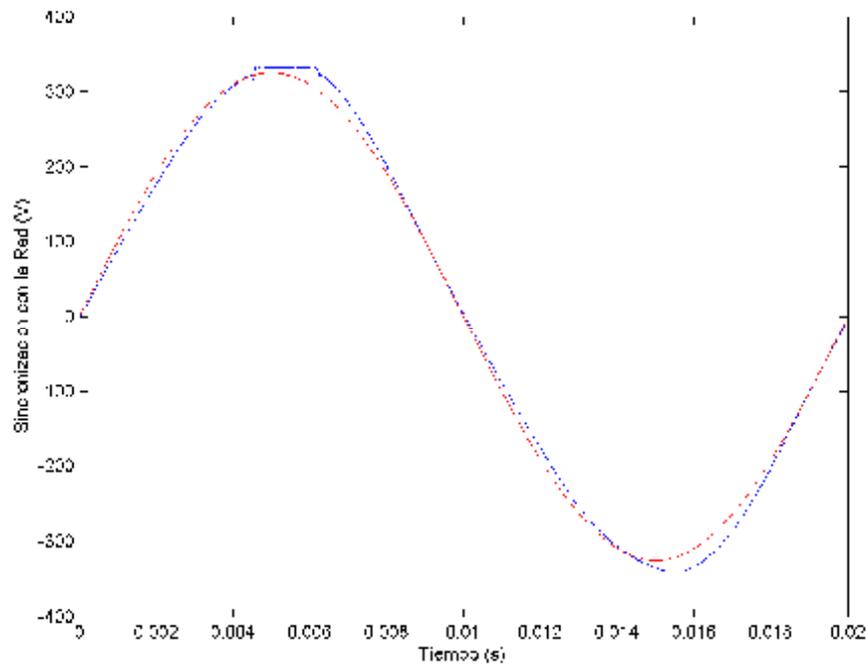
Para poder estudiar el comportamiento del PLL durante un “fallo” en la red y la posterior “re-sincronización” con la misma se procedió de la siguiente manera. En primer lugar se generó una señal de similares características a la percibida por el sensor de tensión cuando éste se conecta a la Red a través del transformador de medida. En este caso el interruptor de habilitación de la Red se encuentra abierto y lo que se hace con la señal generada es emular el comportamiento de la misma. Para llevar a cabo esta prueba se emuló tan sólo la Fase A, de tal forma que la lectura de las otras dos fases provocaría error pues al no ser generadas su frecuencia sería cero. Para evitar el continuo estado de error, se modificó el Software deshabilitando las señales de error de las dos fases anteriores. Para generar la señal se empleó el generador de ondas GF-230 de PROMAX, mediante el cual y para no sobrecargar al sensor de tensión, se generó una onda sinusoidal de  $10V_{pp}$  y cuya frecuencia se iría variando con el fin de comprobar el comportamiento del PLL antes variaciones algo más severas en la frecuencia de la señal con la que se sincroniza. Para la monitorización de esta onda se ha empleado el osciloscopio TDS 2012 de TEKTRONIK. Finalmente comentar que la implementación real del SPLL se ha llevado a cabo sobre el DSP TMS320VC33 de Texas Instruments, el software empleado para la monitorización de los resultados y la toma de medidas ha sido desarrollado por el Grupo de Tecnología Electrónica.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el caso en el que la señal medida es la correspondiente a la Fase A de la Red Eléctrica. Veamos como se alcanza la sincronización con la misma y por tanto la verificación del correcto funcionamiento del modo normal del SPLL.

En la Figura 85 se representan 10 ciclos de red en los que se puede apreciar la sincronización con la ésta, para ver dicho sincronismo con mayor claridad se representa un solo ciclo en la Figura 86.



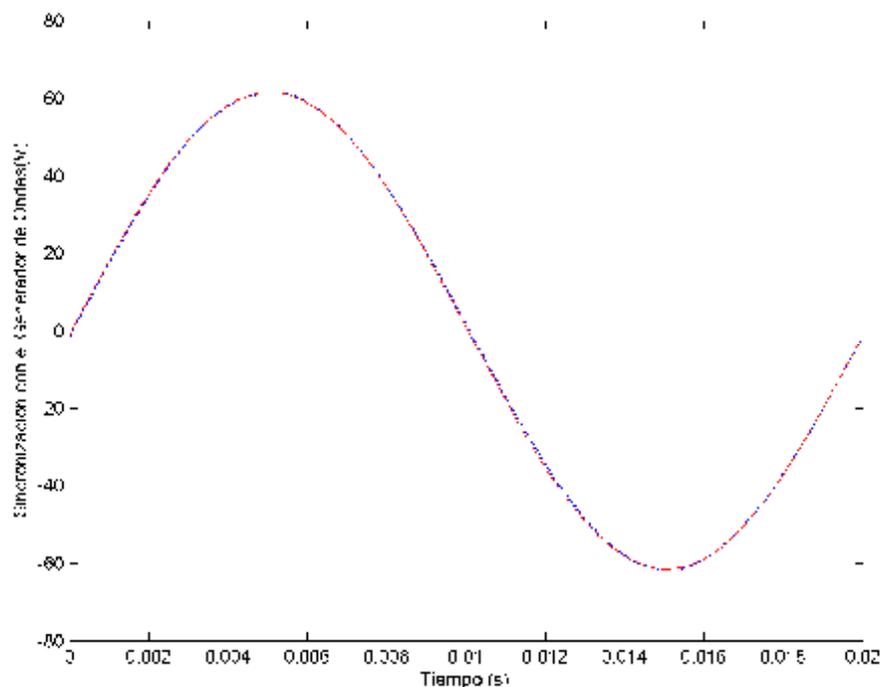
**Figura 1. Sincronización del PLL con la Red**



**Figura 2. Detalle de la sincronización con la Red**

A la vista de la Figura 86, cabe destacar dos cosas, la primera de ellas es la saturación existente en la medida de la red en su semiciclo positivo. En segundo lugar se debe comentar que para adaptar la señal de salida del PLL con la medida por el sensor se tuvo que bajar el valor rms de la primera, de los  $230V_{rms}$  iniciales a  $50V_{rms}$  aproximadamente, por este motivo hubiese sido más adecuado variar también la banda de sincronismo y bajar su valor, de esta forma la sincronización se hará de forma más precisa. En este caso, dicho cambio no se llevo a cabo apareciendo, como se puede ver en la Figura 86, una pequeña diferencia entre las dos ondas. Como se verá en los resultados presentados a continuación, para el generador de ondas, la sincronización se hará de manera más precisa con tan sólo bajar el valor de la banda de sincronización de 5V a 1V.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el caso en el que emulamos la Red con ayuda del generador de ondas. El proceso llevado a cabo es el siguiente, inicialmente se sincroniza el PLL con la señal de referencia para una frecuencia aproximada a la nominal de la red, esto es 50.10Hz, Figura 87, 88 y 89. Tras esto se variará levemente la misma para observar el comportamiento del PLL en modo normal y ver como se lleva a cabo el seguimiento de la frecuencia de la señal de referencia, de esta manera posicionamos la consigna de la frecuencia en 49.70Hz, Figuras 90, 91, y 92. Una vez alcanzado dicho valor se variará la frecuencia hasta un valor fuera del rango de fluctuaciones permitidas por la normativa provocando el “fallo en la Red”, para ello la frecuencia adquiere un valor de 48.7Hz, Figuras 93, 94 y 95. Se recuerda que en este caso, el Software marcará la existencia de fallo obviando el valor de la frecuencia medida e imponiendo un valor de 50Hz para la frecuencia de la onda de salida del PLL. Finalmente se llevará a cabo una recuperación de la frecuencia llevando a ésta a un valor cercano al nominal, en este caso 50.18Hz, con esta última prueba se estudia el comportamiento en modo recuperación, Figuras 96, 97 y 98.



**Figura 3. Sincronización con la señal generada por el generador de ondas para 50.10Hz**

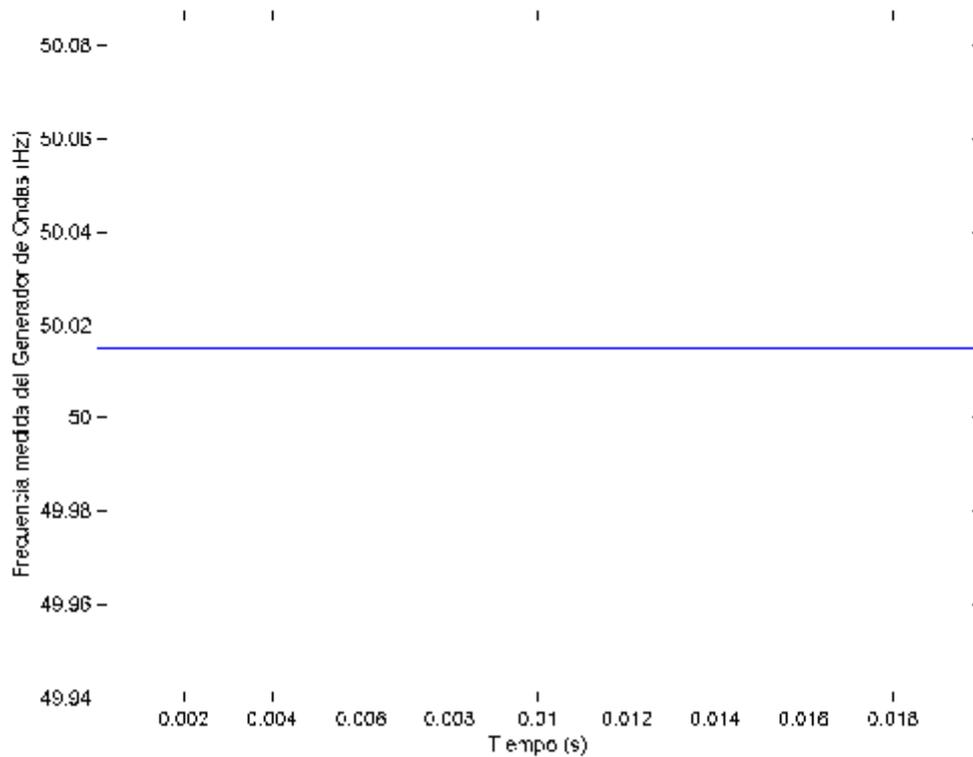


Figura 4. Frecuencia medida por el algoritmo del PLL sobre la onda de 50.10 Hz generada

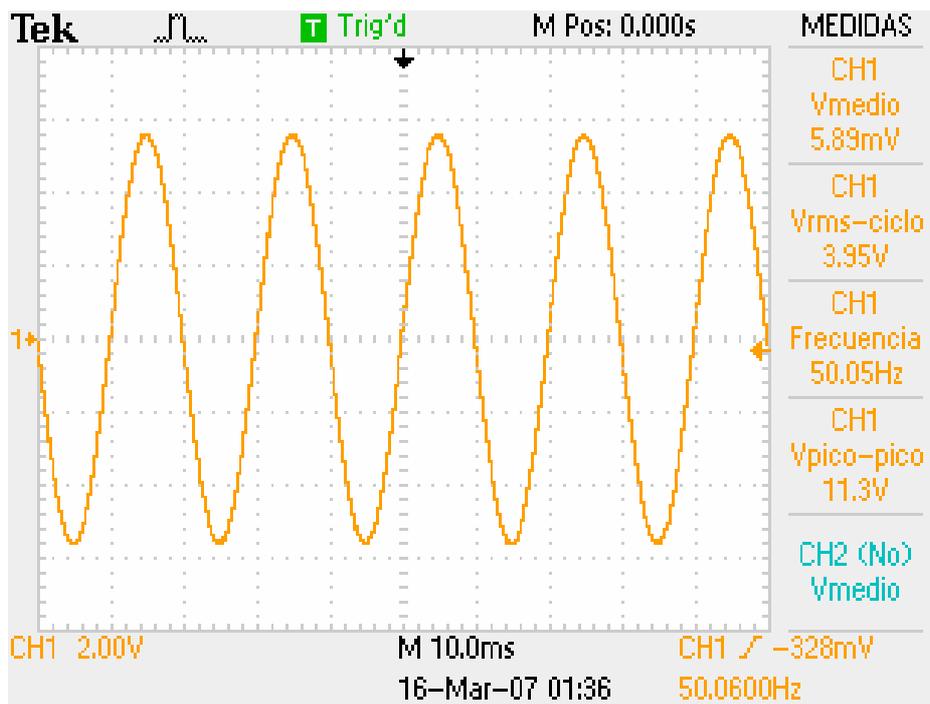


Figura 5. Medida de la señal generada. Capturada por el Osciloscopio para el caso de 50.1Hz

Si la frecuencia de referencia sufre una fluctuación dentro del rango de funcionamiento normal de la red, el PLL debe generar una nueva señal de salida de acuerdo con esta nueva frecuencia, de tal manera que se mantenga el sincronismo con la señal de referencia, cuya frecuencia en este caso se ha posicionado en 49.70Hz.

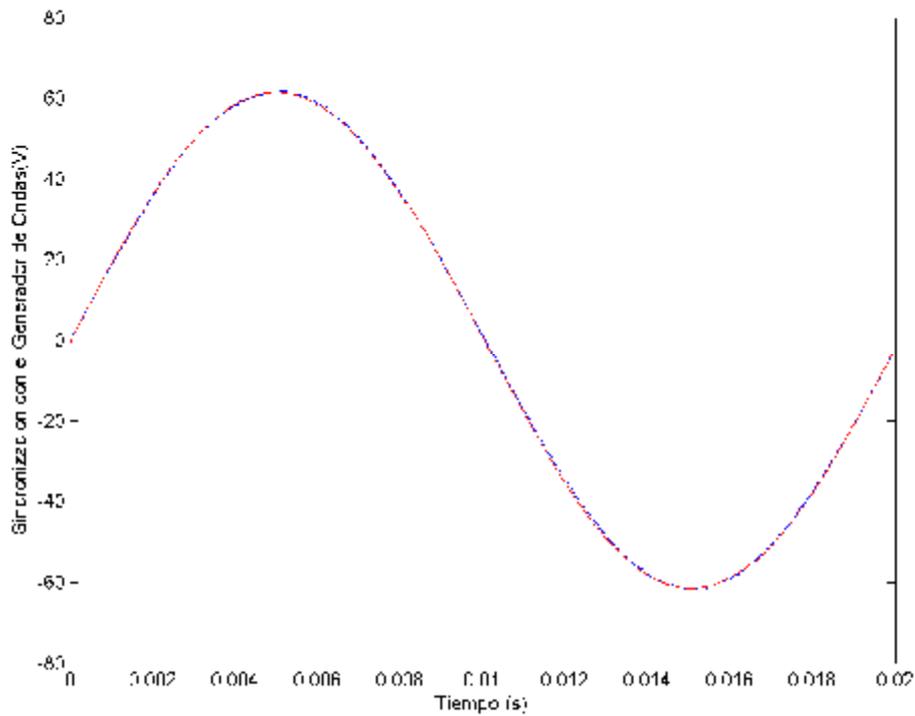


Figura 6. Sincronización con la señal generada por el generador de ondas para 49.70Hz

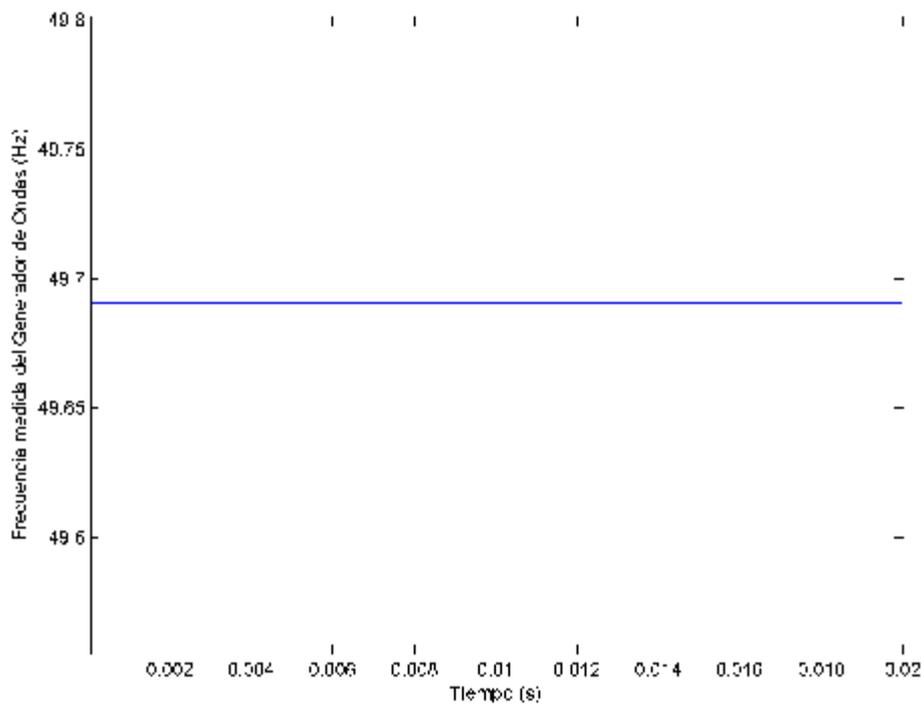
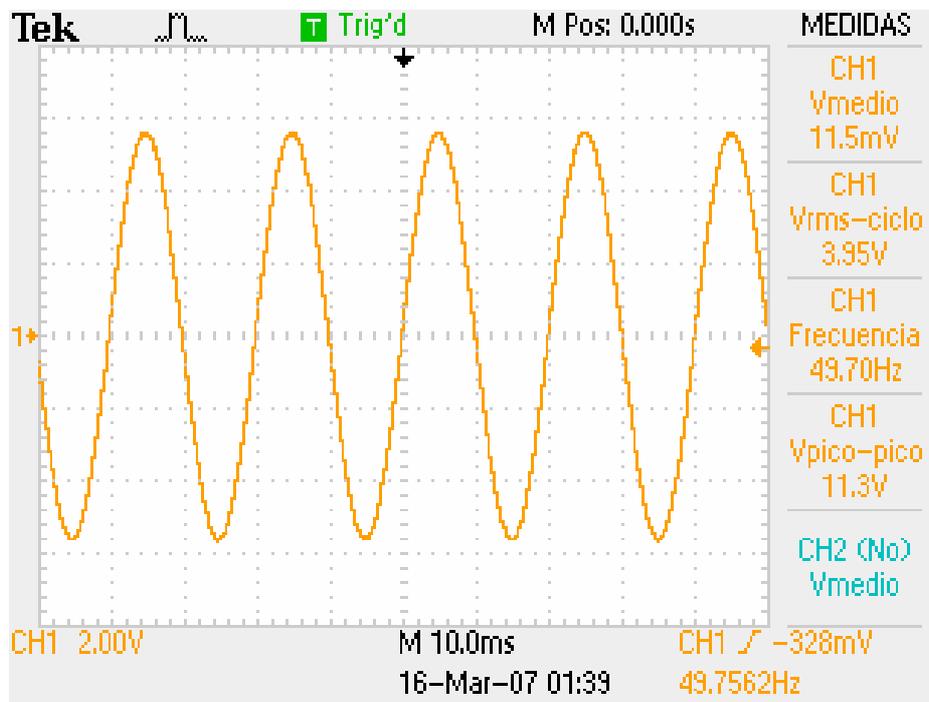
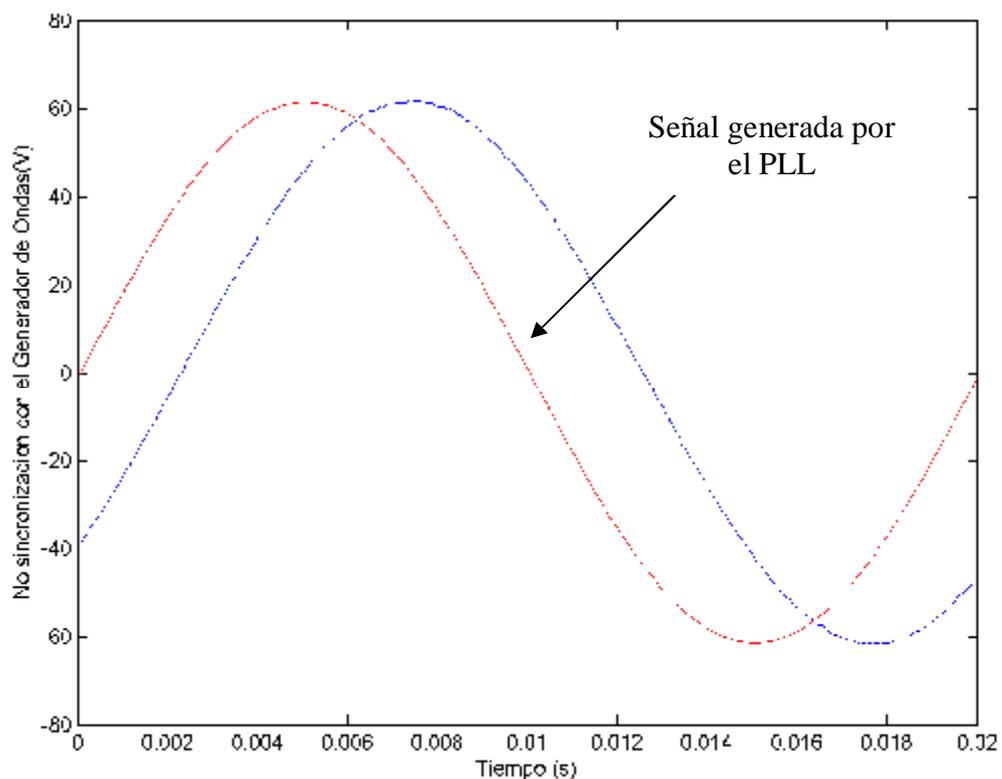


Figura 7. Frecuencia medida por el algoritmo del PLL sobre la onda de 49.70 Hz generada



**Figura 8. Medida de la señal generada. Capturada por el Osciloscopio para el caso de 49.7Hz**

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el caso de existencia de error, en este caso la frecuencia de referencia cae hasta los 48.7Hz.



**Figura 9. Desacoplo entre la señal generada por el PLL y la generada por el generador de ondas**

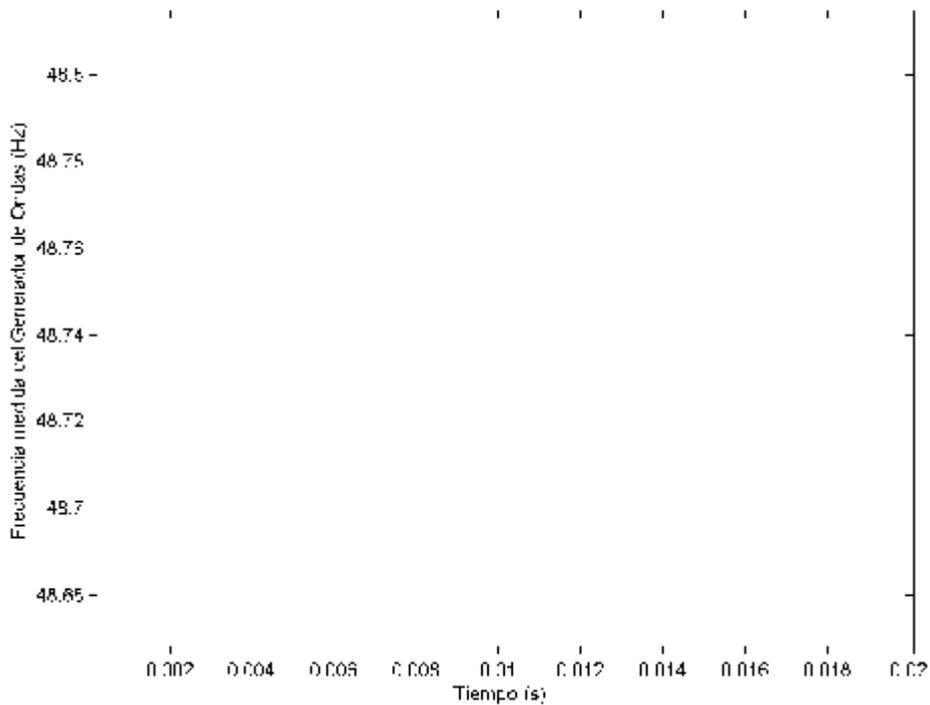


Figura 10. Frecuencia medida por el algoritmo del PLL sobre la onda de 48.70 Hz generada

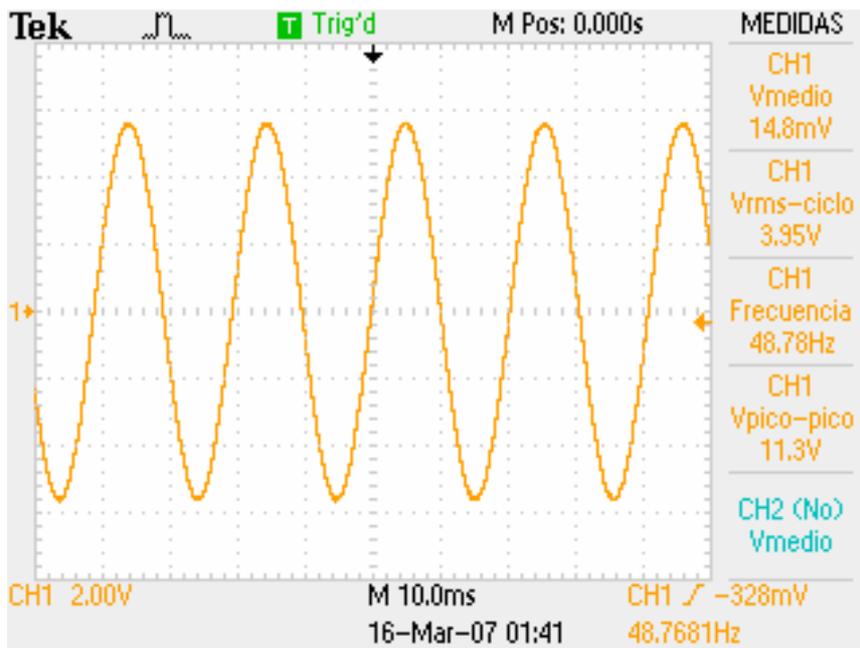


Figura 11. Medida de la señal generada. Capturada por el Osciloscopio para el caso de 48.7Hz

A la vista de las Figuras 93, 94 y 95, vemos como en la primera de ellas la frecuencia de la señal de salida del PLL tiene una frecuencia de 50Hz, mientras que la frecuencia real medida tanto por el osciloscopio como por el algoritmo del PLL está en torno a los 48.7Hz.

Finalmente se representan los resultados obtenidos para el caso en el que se la frecuencia de la red vuelve a estar dentro del  $\pm 1\%$  de la frecuencia nominal, 50Hz. Para este caso el valor fijado en la frecuencia ha sido de 50.18Hz.

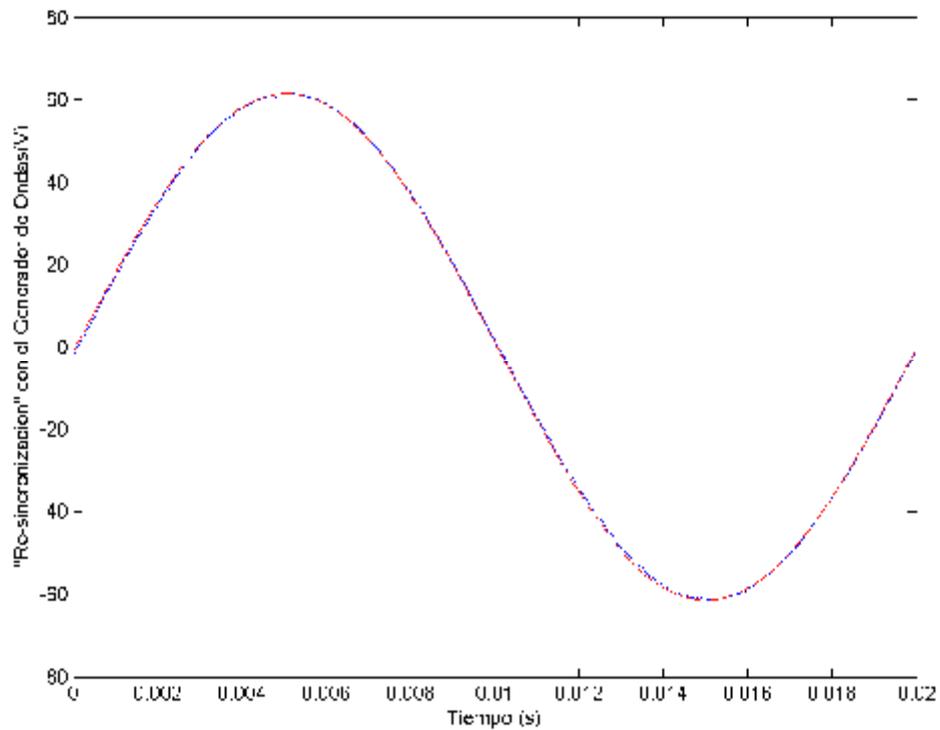


Figura 12. Sincronización con la señal generada por el generador de ondas para 50.18Hz

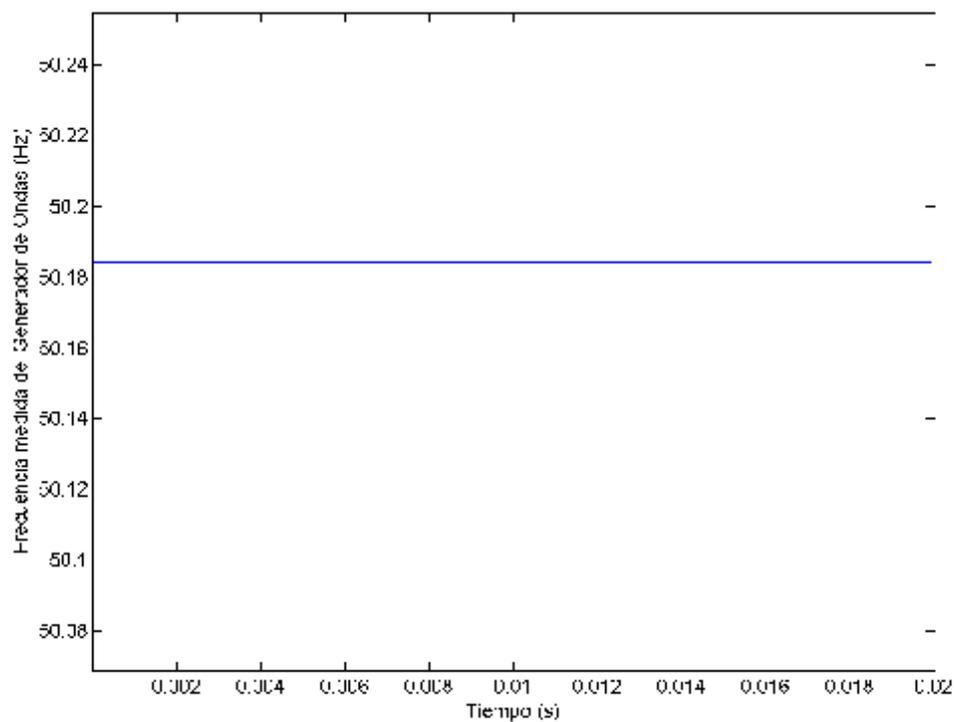


Figura 13. Frecuencia medida por el algoritmo del PLL sobre la onda de 50.18 Hz generada

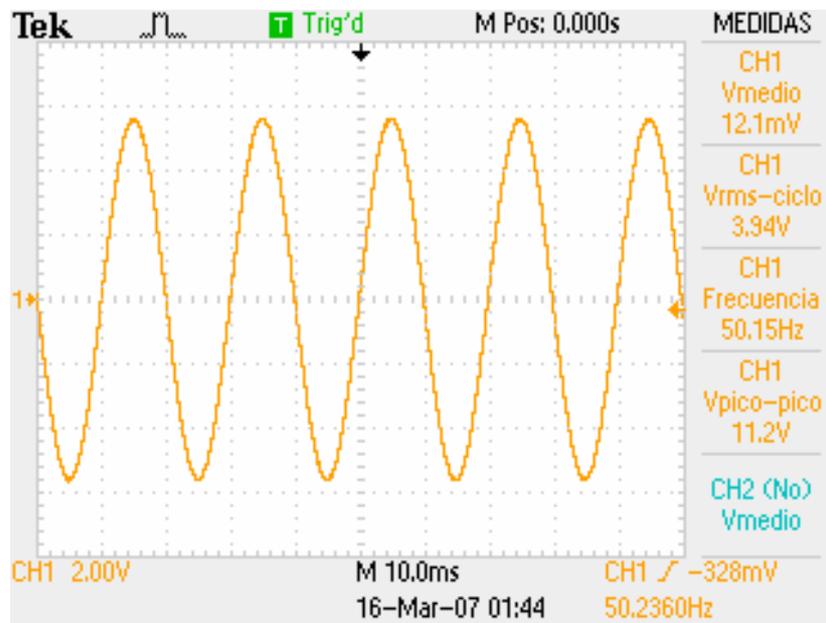


Figura 14. Medida de la señal generada. Capturada por el Osciloscopio para el caso de 50.18Hz

