

Sistema de radar para la detección y registro del perfil del lecho del glaciar Bahía del Diablo

Agustín De Carlo¹, Sebastián Marinsek², Néstor O. Rotstein¹

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ciencias Básicas, Medrano 951 (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

² Instituto Antártico Argentino, Balcarce 290 (CP 1064), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

nrotstein@cedi.frba.utn.edu.ar

Recibido el 07 de junio de 2016, aceptado el 19 de julio de 2016

Resumen

En este trabajo describimos el diseño, calibración, prueba y puesta a punto del radar que fuera utilizado para registrar el perfil del lecho del glaciar Bahía del Diablo durante la campaña antártica 2014-2015. El conocimiento del perfil del lecho es de vital importancia a la hora del análisis de la dinámica del glaciar. Este modelo de radar mejora en diversos aspectos a los utilizados en campañas anteriores, sobre todo en lo que tiene que ver con la relación señal-ruido. La confiabilidad del sistema se reflejó en la cantidad de kilómetros registrados, sustancialmente mayores que los de campañas anteriores.

PALABRAS CLAVE: RADAR - GLACIAR – LECHO - PERFIL

Abstract

In this article we describe the design, calibration, testing and tuning of the radar that was used to register the bed profile of the Bahía del Diablo glacier during the 2014-2015 antarctic campaign. Knowledge of the bed profile is of vital importance when analyzing the dynamics of the glacier. This model of radar improves in various aspects those used in previous campaigns, especially in what has to do with signal-to-noise ratio. The reliability of the system was reflected in the substantially greater amount of registered kilometers with respect to those of previous campaigns.

KEYWORDS: RADAR - GLACIER– BED - PROFILE

Introducción

En el marco del proyecto de investigación "Estudios medioambientales mediante sensado y detección remotos" se estudia la evolución del glaciar Bahía del Diablo (en adelante GBD, situado en la Isla Vega, Antártida Argentina, 63° 49' 12" S, 57° 25' 48" W). La importancia de este glaciar radica en el hecho de que se trata de uno de los glaciares monitoreados por el Servicio Mundial de Monitoreo de Glaciares (WMGS) dependiente de UNESCO, debido a que por su estructura y ubicación se halla fuertemente correlacionado con los cambios climáticos. Parte de estos estudios dependen de la información que se disponga del fondo del glaciar, razón por la cual su estudio detallado es de importancia central. Por ello, se ha decidido hacer un relevamiento amplio del mismo durante la campaña de verano 2014-2015 utilizando un radar de hielo, cuyo desarrollo y puesta en funcionamiento se implementó en el Instituto Antártico Argentino mediante una beca SECTIP-UTN.BA. Este artículo da cuenta de los logros alcanzados en el marco de esta beca, cuyo objetivo fue el diseño, adaptación, puesta en funcionamiento y prueba del sistema de radar que permitiera lograr los objetivos planteados.

Conocer la dinámica completa del glaciar es esencial para comprender su evolución. Sin embargo, las medidas de superficie realizadas *in situ* son insuficientes a la hora de evaluar la dinámica interna, y lo más que cabe es modelarla y correlacionarla numéricamente con las observaciones y mediciones en superficie. Modelos teóricos generales de evolución dinámica pueden hallarse por ejemplo en Hvidberg (1996),

Cuffey y Paterson (2010), o Lüthi *et al* (2011). Lüthi y Bauder (2010) estudiaron los cambios en glaciares alpinos mediante un modelo teórico, y Kingslake y colaboradores (2014) realizaron estudios de velocidades en profundidad mediante sensores tipo radar. Los modelos que utilizamos en este trabajo (Rotstein, N; Marinsek, S, 2013; Rotstein, N; Marinsek, S; Ríos, M, 2014) requieren del perfil del fondo del glaciar, que después de ser convertido a una curva "suave" se introduce en el modelo para cálculos ulteriores. De una forma u otra, parece evidente que la obtención del perfil del fondo es, por lo tanto, fundamental.

La Figura 1 muestra el contorno del glaciar Bahía del Diablo y el camino que se recorrió con un radar similar al de este artículo, durante la campaña 2013-2014, con el objeto de obtener información del fondo del glaciar. Uno de los mayores problemas de los registros obtenidos en esa campaña se trató de la relación señal-ruido del equipo, lo que tornaba poco confiables los datos obtenidos.

En base a esta experiencia, hemos implementado mejoras sustanciales en el sistema general. En términos generales, el radar que hemos desarrollado y empleado en la campaña 2014-2015 cuenta con un transmisor de onda arbitraria conectado a una antena de cuarto de onda (400 Ω), un receptor que capta la señal por rebote en el suelo y por el aire mediante otra antena de cuarto de onda y que su vez cuenta con un sistema de adaptación conformado por un balún, un amplificador de instrumentación y un osciloscopio.

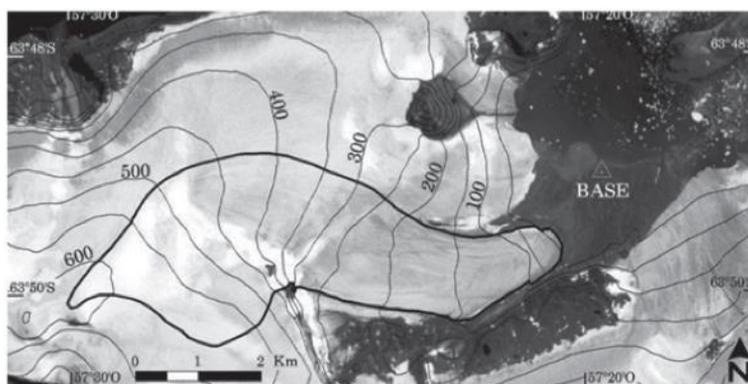


Fig. 1. Imagen satelital del glaciar Bahía del Diablo. La línea negra en forma de zapato marca los límites del GBD, y la línea gruesa en el extremo inferior derecho (en la "puntera de la bota") es el camino sobre el que se tomó el perfil del fondo en la campaña de verano 2013-2014.

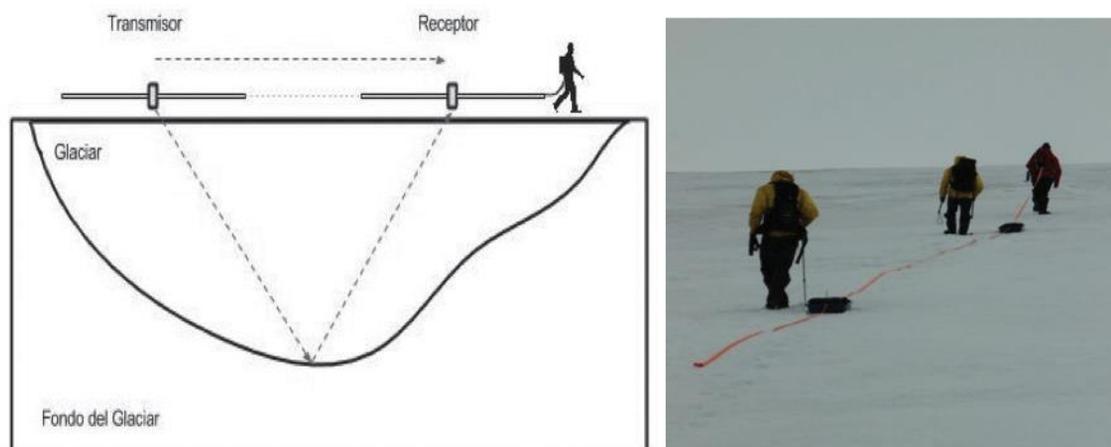


Fig. 2. A la izquierda, esquema del sistema de detección y registro. El radar es literalmente arrastrado sobre la superficie glaciar, como se muestra en la fotografía de la derecha, tomada durante el registro realizado en la campaña 2014-2015.

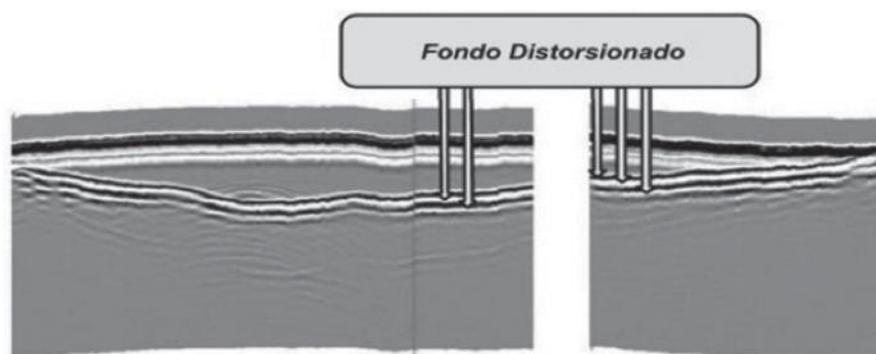


Fig. 3. Perfil del fondo del glaciar Bahía del Diablo registrado durante la campaña 2013-2014 con el antecedente del radar que se describe en este artículo. Puede observarse nítidamente la distorsión de la imagen.

El balún (del inglés *balanced-unbalanced lines transformer*) es básicamente un dispositivo que convierte líneas de transmisión no balanceadas en líneas balanceadas, o a la inversa. En nuestro caso la antena es un dipolo, es decir, recibe la misma información por dos cables y con polaridades opuestas (línea balanceada y sin referencia a tierra). Como las etapas posteriores a la antena son todas referenciadas a tierra (desbalanceadas), es necesaria la conversión previa de la señal que recibe la antena para poder tratarla, considerando a la par la adaptación de impedancias (esto es, utilizamos además el balún como adaptador de impedancias) y la relación de voltajes. De estas transformaciones se encarga precisamente el balún. (Véase, por ejemplo Jones, Narod y Clarke, G.K.C., (1989), Narod y Clarke (1994) y ARRL Handbook(2014)).

El panel izquierdo de la Figura 2 muestra esque-

máticamente la disposición del sistema, en tanto que el panel derecho es una imagen tomada en la campaña de verano 2014-2015, en la que se deja en evidencia el método de toma de muestras empleado.

Antecedentes

El sistema original había sido probado anteriormente durante la campaña de verano del Instituto Antártico Argentino en Febrero - Marzo 2013. La imagen de la Figura 3 muestra el perfil del glaciar obtenido durante esa campaña. Puede observarse que el fondo se encuentra distorsionado, produciendo una indeterminación indeseada en la forma del lecho glaciar, que se traduce en incertezas a la hora de la transformación del perfil en una forma matemática (que luego debe ser aproximada mediante polinomios) que podría llevar a errores en la velocidad de desplazamien-

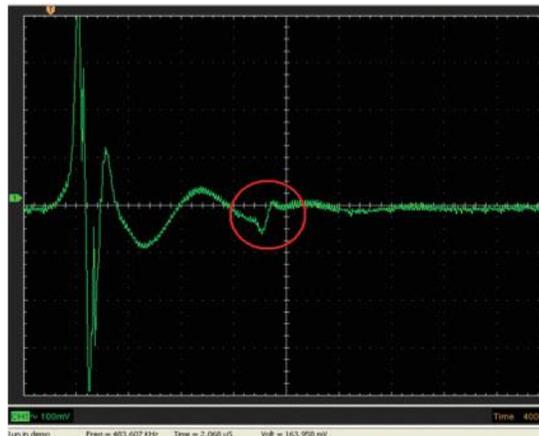


Fig. 4. El círculo delimita el ruido de 500 Hz que se introducía en el equipo original y que debió ser corregido.

to de la superficie (calculada mediante el modelo matemático) que podrían llegar a ser del orden de la velocidad misma.

El primer paso que debía darse, en consecuencia, era determinar la fuente de ruido que provoca esta distorsión en las mediciones, por lo que el enfoque del trabajo recayó en la caracterización de los componentes que conforman el sistema de radar ya que de este modo podíamos determinar los diversos parámetros que influyen en su funcionamiento, tales como interferencias en la frecuencia de trabajo, ruido externo y de interconexiones, etcétera. Con el fin de simular este ambiente se utilizó un sistema de prueba que recrea la señal recibida por el radar de modo óptimo. Este sistema está conformado por un oscilador y un amplificador que además adapta la señal de salida del oscilador con el balún. Las ventajas de recurrir a este sistema de pruebas se basan en una cuestión de practicidad, debido a que resulta engorroso probar todo el sistema, sea transmisor o receptor, de manera conjunta.

Cabe destacar que el sistema funciona a una frecuencia fija que queda impuesta por el largo de las antenas. Sabiendo que la longitud de onda λ se relaciona con la frecuencia f de emisor a través de la ecuación:

$$\lambda = v/f \quad (1)$$

Donde v es la velocidad de la luz en el medio y como las antenas son de cuarto de onda ($\lambda/4$), la frecuencia estará impuesta por la relación

$$f = v/((\lambda/4)) = 4c/n\lambda \quad (2)$$

de manera tal que la longitud de la antena determina la frecuencia de trabajo. Obsérvese que la velocidad en el medio es $v = c/n$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío y $n=1,31$ es el índice de refracción del hielo, que a los efectos prácticos habremos de considerar constante.

Teniendo en cuenta que las antenas con las que hemos trabajado establecen una frecuencia de transmisión en el orden de las decenas de MHz, cabe destacar la presencia de frecuencias espurias, con un valor de alrededor de 500 Hz, superpuesta a la frecuencia de trabajo (véase la Figura 4).

Mediciones y calibración

A primer orden, la señal espuria de la Figura 4 podría obedecer a alguna de las siguientes causas:

- ruido en el balún a causa de una posible resonancia entre el mismo y la antena;
- ruido proveniente del circuito de amplificación, por mal diseño del circuito impreso o del circuito en sí;
- ruido por la interconexión de todos los elementos que conforman el receptor;

El balún

Se efectuaron distintas pruebas con el objeto de determinar la causa y el origen del ruido.

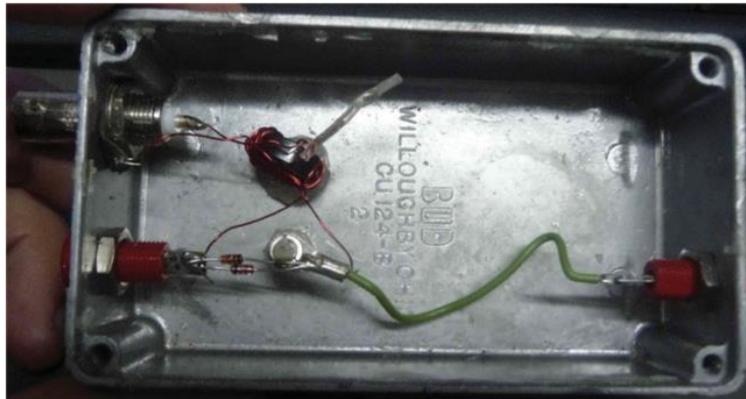


Fig. 5. Balún de tipo 1

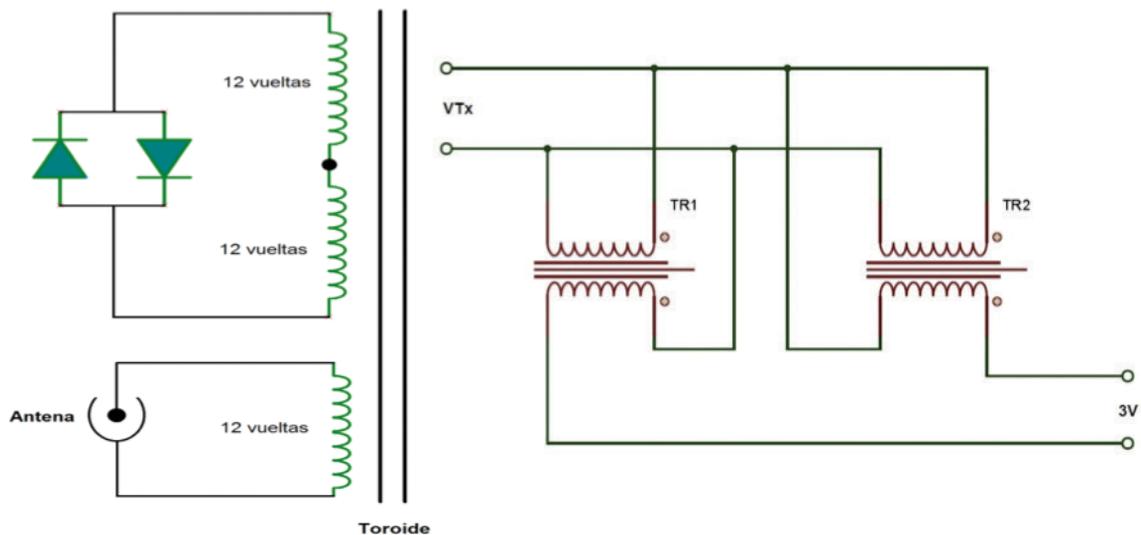


Fig. 6. Circuitos de los balunes tipo 1 (a la izquierda) y de tipo 2 (a la derecha). Características salientes: Relación Voltaje 3:1; Relación impedancia 9:1; Impedancia Antena: 400 Ω .

para cada uno de los módulos internos del radar, a partir de los cuales fue posible la caracterización de cada una de las causas probables. Hubo que prestar especial cuidado en cuanto al diseño y elaboración de estos módulos de prueba, pues en todo momento se procuró reducir las distancias mínimas entre componentes circuitales, ampliar los planos de masa, reducir el número de conexiones para obtener el mínimo ruido posible y utilizar

componentes específicos para la aplicación.

Tipos de balunes

En lo que respecta al balún en sí mismo contamos con dos tipos: el de la Figura 5 (tipo 1), en el puede verse el balún implementado en un inicio, realizado en base a la disposición circuital de la Figura 6.

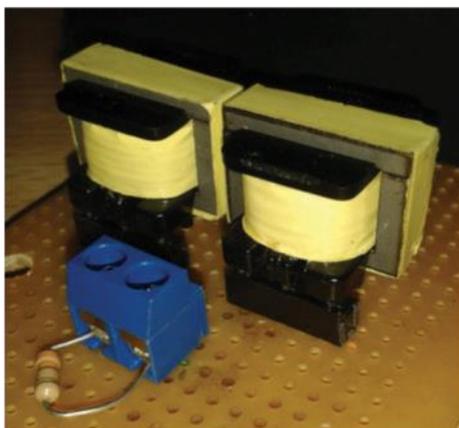


Fig.7. Vista real del balún de tipo 2

En la Figura 7 pueden observarse los transformadores de pulsos que conforman el balún tipo 2.

Realizando una evaluación de comportamiento en condiciones, se efectuó un barrido en frecuencia secuencial pasando por frecuencias de 100 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz y 3 MHz, con amplitudes variables de 200 mV y 800 mV.

Se determinó que el comportamiento del balún tipo 1 (Figura 8) en función de la frecuencia cumple con las especificaciones en cuanto a la transformación de tensión y conversión sin ruido. En la misma figura, en el panel derecho, se muestra una captura de osciloscopio en la cual se puede ver el comportamiento del balún ante una frecuencia de 3,17 MHz. Esta es considerada la situación más crítica con respecto al ruido y la frecuencia es la máxima que pudimos lograr en los ensayos. La señal de entrada tiene una amplitud de 200 mV, simulando el pico de recepción que se transmite por el hielo, y la señal de salida del balún cuenta con una amplitud de 800 mV.

Elección del Amplificador Operacional (OA)

Luego se instaló una etapa amplificadora y de adaptación de señal a la salida del balún para poder controlar la ganancia de salida. La elección de la etapa amplificadora en conjunto

con su armado y posterior ensayo fue un tema clave a solucionar en el desarrollo del trabajo ya que de esto dependía la pureza de la señal obtenida.

Se evaluaron las características de varios amplificadores operacionales con el propósito de elegir el más conveniente en función de los requerimientos del proyecto. La Tabla 1 compara el funcionamiento de una serie de amplificadores operacionales en función de la frecuencia de operación, donde se han tomado valores de tensión en la entrada¹ para mostrar el funcionamiento en alta frecuencia.

La configuración utilizada para realizar las pruebas se muestran en la Figura 9.

$$R1 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 470 \text{ k}\Omega$$

Comparando el comportamiento de los distintos AO (*amplificadores operacionales*) detallados anteriormente, parece evidente que el rendimiento del amplificador decrece cuanto más aumenta la frecuencia de operación, sin importar cual sea el AO en cuestión; esta es una característica innata de todo amplificador, y su comportamiento es juzgable en función del *BW* (ancho de banda) que el mismo posea. En función del requerimiento de frecuencia del proyecto se destacan dos AO, el AD797 y el OPA 1611. Sin embargo, la relación señal-ruido del AD797 es mejor frente a la del OPA1611.

¹ Las mediciones que se realizaron con menor amplitud en la entrada son consecuencia del umbral de tensión necesarias en la entrada del OPA1611 y el AD797 por estar alimentados con +/-5 V.

Este es un factor fundamental a tener en cuenta en un proyecto de las características del nuestro, en el cual el objetivo principal es determinar la causa de ruido. De modo tal que operar con componentes que sean bajos en ruido es un requisito indispensable a la hora de la elección de un AO. Dado que el AD797, en contraste con el OPA1611, tiene más bajo ruido a una frecuencia determinada hemos optado por emplear este último.

Problemas en el circuito de prueba

Para ensayar los equipos se utilizó una fuente de alimentación simple que entregaba una tensión partida de +/- 12 V compuesta por un transformador, su etapa rectificadora y etapa reguladora (Figura 10).

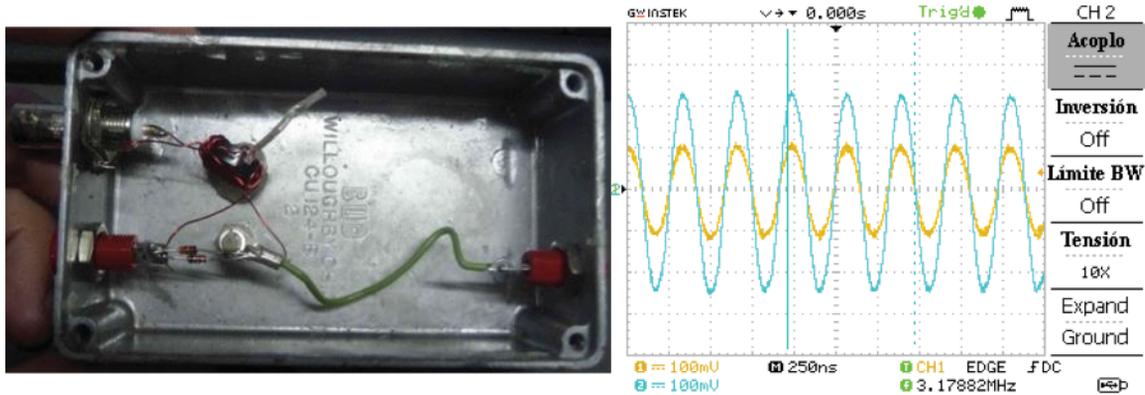


Fig. 8. A la izquierda, vista interna del balún empleado. A la derecha se muestra la respuesta de este balún a una frecuencia de 3,17 MHz.

Tabla 1. Comparación de diferentes parámetros operacionales de los amplificadores estudiados.

	TI081		OPA227p		AD797		OPA1611	
	Mediciones de ganancia		Mediciones de ganancia		Mediciones de ganancia		Mediciones de ganancia	
F(Hz)	Vpp in	Vpp out						
100KHz	5V	23V	5V	25.1V	1.4V	7.8V	1.4V	7.6V
500KHz	5V	6,9V	5V	20.6V	1.4V	7.81V	1.4V	7.6V
1 MHz	5V	5,4V	5V	3.19V	1.4V	7.7V	1.4V	7.6V
2 MHz	5V	2,5V	5V	400mV	1.4V	7V	1.4V	6.28V
3 MHz	5V	300mV	5V	260mV	1.4V	5V	1.4V	4.2V

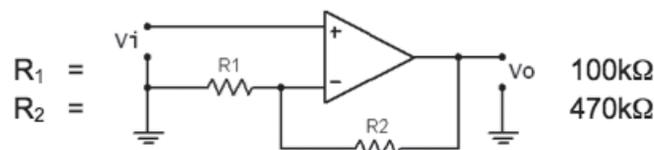


Fig. 9. Circuito No inversor de ganancia $G = 5,7$

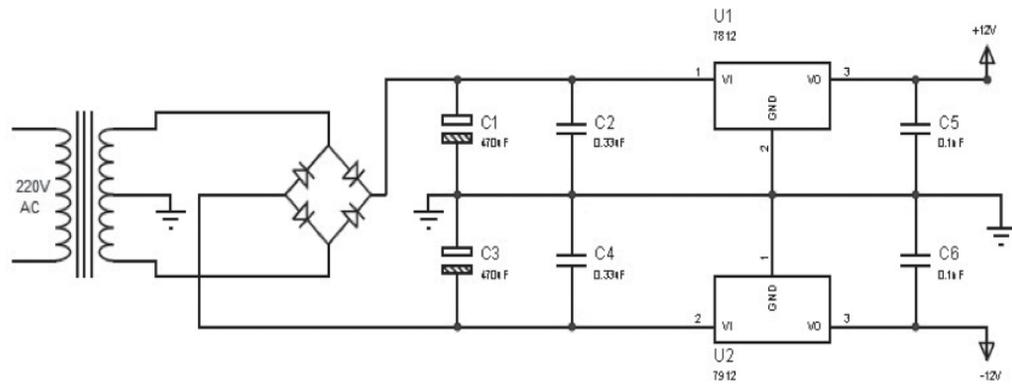


Fig. 10. Circuito de la fuente y filtrado.

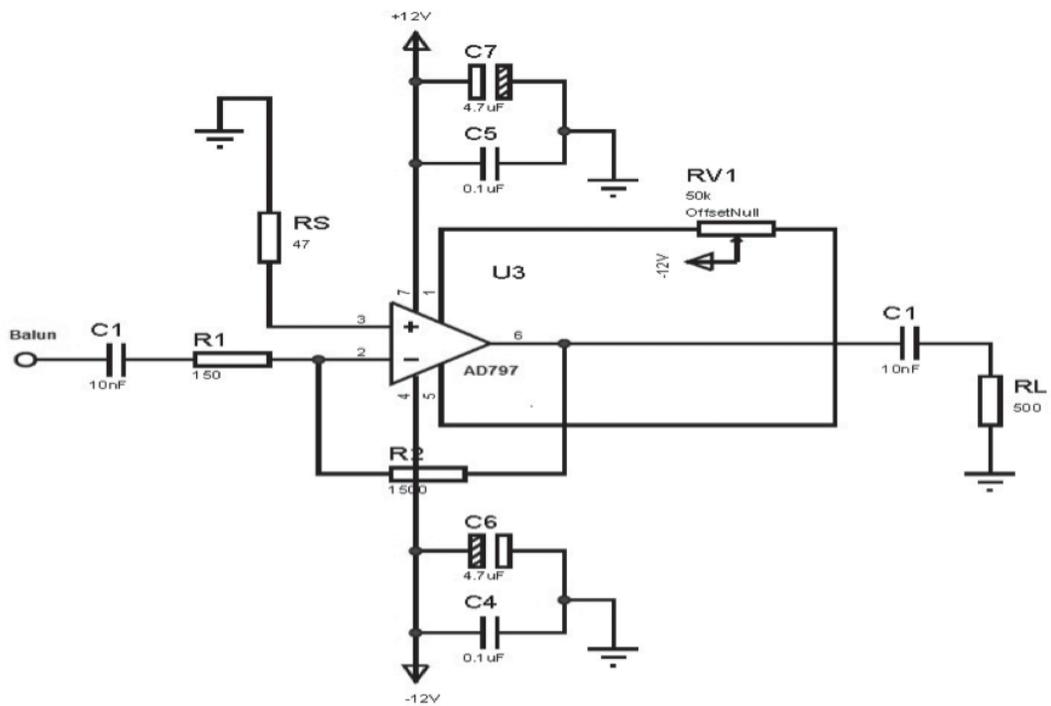


Fig. 11. Circuito empleado para la calibración de la tensión offset-null

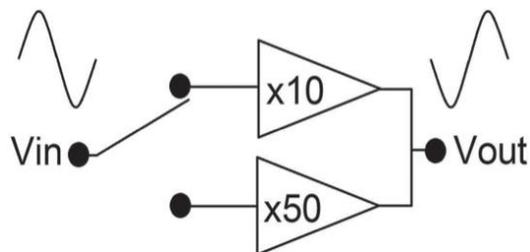


Fig. 12. Esquema. Amplificador de ganancia variable

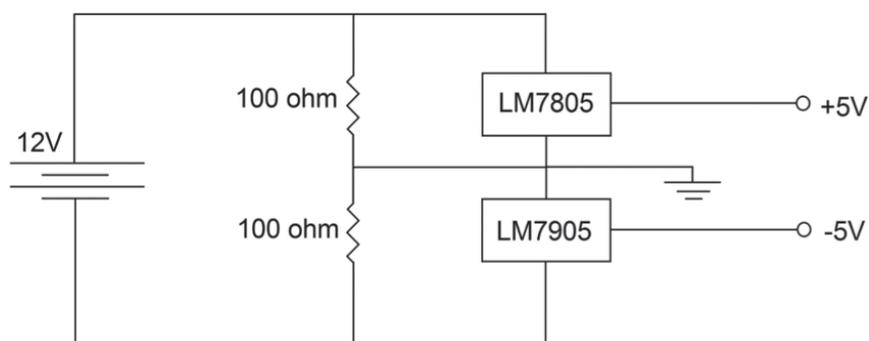


Fig. 13. Configuración circuital de la etapa de fuente

Al ensayar el amplificador operacional con la configuración previamente descrita y alimentado con la fuente de la Figura 10 se observó *ripple* a la salida del mismo alimentándolo con una tensión de $V_{ppin} = 1,4 \text{ V}$ y una frecuencia $= 3 \text{ MHz}$, como muestra la Figura 6. Este *ripple* fue solucionado eventualmente agregando los capacitores de filtrado lo más cerca posible de los pines de alimentación del AO.

Con esta disposición circuital eliminamos el *ripple*, pero la señal de salida resultó demasiado pequeña y montada en una continua, por lo que optamos por calibrar la tensión de *offset-null* con el circuito de la Figura 11 y cambiar la configuración circuital por una configuración inversora.

El sistema de amplificación fue modificado para que tenga posibilidad de cambiar la ganancia para las pruebas para ello se realizaron redes circuitales en el lazo de realimentación que permitieron tener dos posibilidades de ganancia $\times 10$ y $\times 50$ (Figura 12).

Circuito de alimentación

Los resultados anteriores fueron positivos, aunque el amplificador operacional elevaba muy rápidamente su temperatura y la llevaba fuera de los rangos normales.

Teniendo en cuenta la situación y para evitar un embalamiento térmico se optó por disminuir la fuente de alimentación del mismo de $\pm 12 \text{ V}$ a $\pm 5 \text{ V}$. Si bien la hoja de datos del AD797 indica que la máxima tensión de alimentación es 18 V , hemos comprobado experimentalmente que no es recomendable trabajar cerca de estas condiciones ya que se

puede llevar a un embalamiento térmico y posterior destrucción del mismo.

El sistema de radar cuenta ahora para su alimentación con una batería de gel de 12 V . Con el fin de adaptar las tensiones a este circuito se ha optado por la configuración de la Figura 13, que transforma los 12 V de la batería en una tensión de $\pm 5 \text{ V}$ necesaria para alimentar el circuito amplificador.

Pruebas

La primera de las pruebas se realizó en el subsuelo de la sede Campus de UTN BA. Conectamos el balún 1 al osciloscopio directamente sin el amplificador. El transmisor se hallaba ubicado a una distancia de aproximadamente 4 m , y se observó una única señal sin ruido, la proveniente del emisor.

Se probó el balún 2, en el cual también se observó una señal recibida similar a la obtenida con el balún 1, aunque esta vez con un mínimo ruido.

Al ver que el sistema funcionaba dentro de lo previsto se pasó a probar el amplificador de ganancia 10 el cual se conectó entre el balún y el osciloscopio. La señal fue amplificada diez veces sin la presencia de ruido, con lo que quedó descartado el ruido proveniente de los empalmes y del balún.

Al conectar el balún 2 se observó que el mínimo ruido que aparecía sin el amplificador ahora se encontraba amplificado diez veces. Si bien

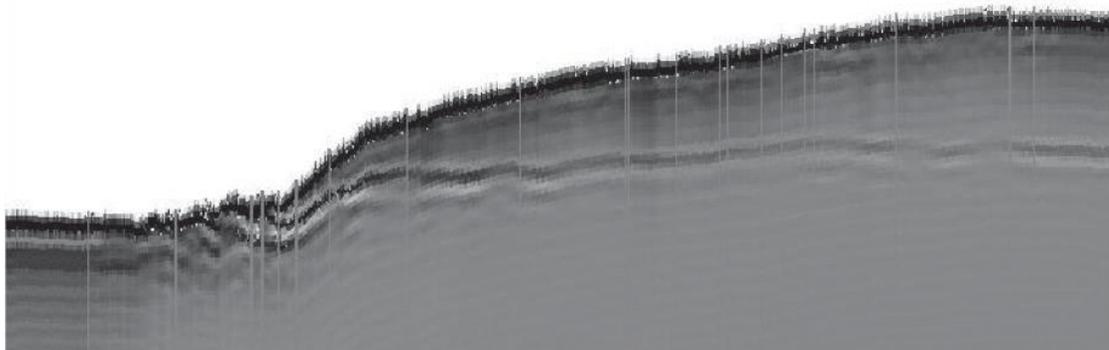


Fig. 14. Perfil del lecho del GBD, en el cual se muestra una elevación de 130 m en el terreno

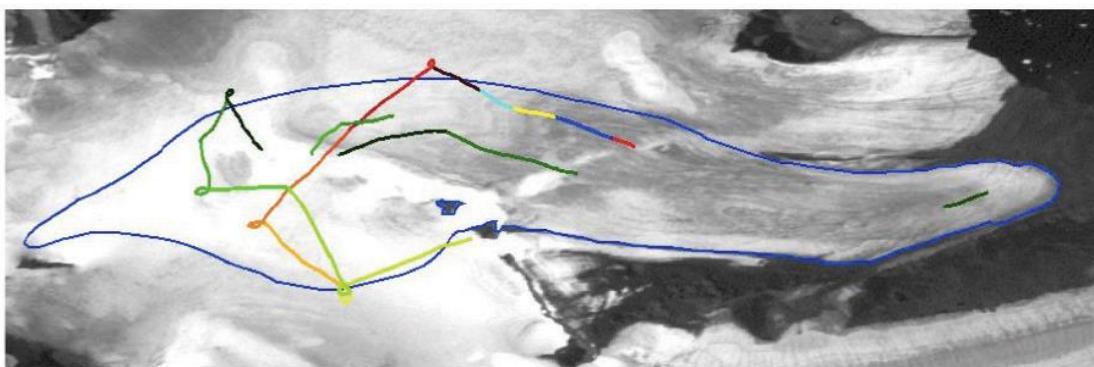


Fig. 15. Recorridos efectuados sobre el glaciar Bahía del Diablo con el radar diseñado y construido *ad hoc*

seguía siendo despreciable con respecto a la señal que se recibía, optamos por descartar este balún y trabajar de ahí en más con el balún de tipo 1.

La segunda prueba se realizó al aire libre, con resultados por completo inútiles debido a que la zona de Campus es de alta contaminación de ondas de radio, de modo tal que las mediciones se vieron completamente afectadas y, en consecuencia, las pruebas en ese lugar se dieron por finalizadas.

En la tercera prueba, realizada en el campus del Instituto Antártico Argentino en San Martín (Pcia. de Buenos Aires) se rearmó el circuito amplificador en un circuito impreso especialmente diseñado que poseía distintas ganancias configurables manualmente. Este se hallaba montado en el mismo gabinete jun-

to con el balún. Interconectamos las antenas mediante una manguera flexible de tela que nos permitió efectuar las mediciones con las antenas orientadas de forma longitudinal.

Luego de problemas que surgieron sobre la marcha, tales como falsos contactos, calibración de instrumentos y problemas con el programa del osciloscopio, se obtuvo una señal limpia y sin ruido en el receptor para todas las frecuencias utilizadas.

El equipo fue probado finalmente en el lugar para el que fue desarrollado. Su funcionamiento estuvo dentro de los parámetros previstos, y se tomaron datos del lecho del glaciar a lo largo de cerca de 10 000 m.

Han podido detectarse en algunas zonas más de 200 m de espesor. La imagen de la Figura

14 muestra un ejemplo de perfil, en el cual una loma del glaciar sube desde un punto donde el espesor es cero hasta el domo donde hay 130 m de espesor de hielo.

La Figura 15 muestra los recorridos que se realizaron en el glaciar Bahía del Diablo. En todo momento el radar se comportó de manera estable y segura, y los resultados de estas mediciones, una vez procesados, fueron utilizados para evaluar la velocidad basal del glaciar.

Agradecimientos

Queremos agradecer especialmente a las autoridades y al personal de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la FRBA, por el aliento y los permanentes esfuerzos que han realizado para apoyar este trabajo.

Referencias

- ARRL (2014) Handbook 91 Ed. [18-07-14]
- CUFFEY, K. y ATERSON, W. (2010): "The Physics of Glaciers" (Elsevier: Oxford) ISBN 978-0-12-369461-4.
- HVIDBERG, C. S. (1996): "Steady-state thermomechanical modelling of ice flow near the centre of large ice sheets with the finite-element technique", *Ann. Glaciol.*, 23, 116–123.
- JONES, F.; NAROD, B. y CLARKE, G. (1989): "Design and operation of a portable, digital impulse radar" *igs journal*, 35, 19.
- KINGSLAKE, J.; HINDMARSH, R.; AÐALGEIRSDÓTTIR, G.; CONWAY, H.; CORR, H.; GILLET-CHAULET, F.; MARTÍN, C.; KING, E.; MULVANEY, R. y PRITCHARD, H. (2014): "Full-depth englacial vertical ice sheet velocities measured using phase-sensitive radar", *J. Geophys. Res. Earth Surf*, 119, doi: 10.1002/2014JF003275.
- LÜTHI, M. y BAUDER, A. (2010): "Analysis of Alpine glacier length change records with a macroscopic glacier model" *Geographica Helvetica*, 65(2), 92–102.
- LÜTHI, M.; WALTER, F.; JOUVET, G. y WERDER, M. (2011): en "Physics of glaciers, cap 5" ETH Zürich: *Physics of Glaciers I (HS 2011)*.
- NAROD, B. y CLARKE, G. (1994): "Miniature high-power impulse transmitter for radio-echo sounding" *igs journal*, 40, 190-194.
- ROTSTEIN, N. y MARINSEK, S. (2013) "Modelo elemental de flujo de un fluido viscoso elástico. El glaciar Bahía del Diablo. Parte I" *Proyecciones*, 11, 67-81.
- ROTSTEIN, N.; MARINSEK, S. y RÍOS, M. (2014) "Modelo elemental de flujo de un fluido viscoso elástico. El glaciar Bahía del Diablo. Parte II" *Proyecciones*, 12, 43-81.