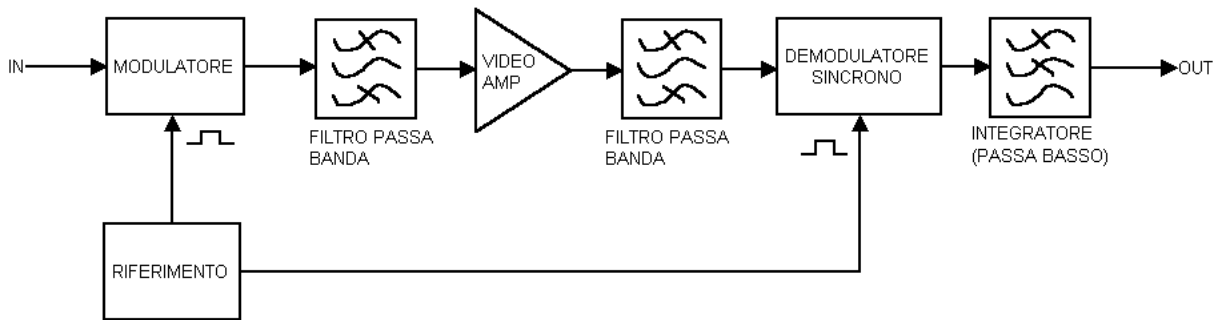


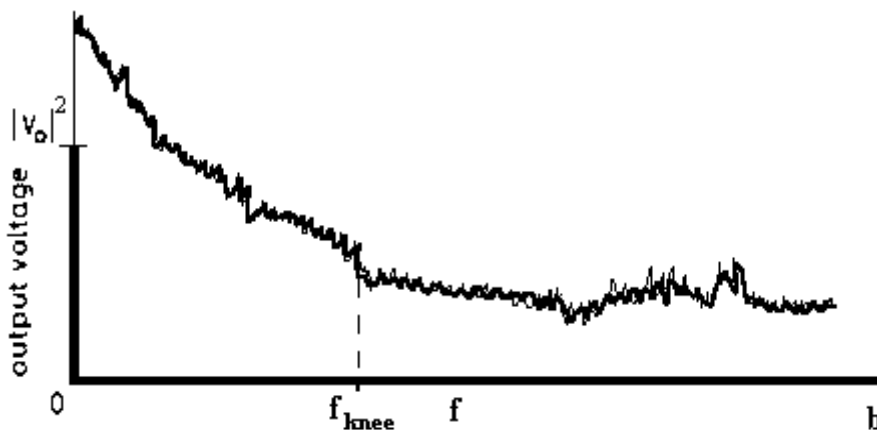
## Teoria della Modulazione Demodulazione sincrona



1 Schema generale dell' Anello Lock-In

La mod/demod sincrona prende anche il nome di architettura di tipo Lock In (Fig.1). Essa consiste nel realizzare una modulazione ad una frequenza diversa da quella del segnale sorgente, al fine di traslarlo al di fuori della banda in cui è dominante il rumore  $\frac{1}{f}$  (fig.2), meglio noto come rumore

strumentale o rosa. Tale frequenza, nota come  $f_{chop}$ , dovrà essere superiore alla frequenza di ginocchio  $f_{knee}$  (Fig. 2), punto in cui si ha la transizione tra la regione in cui il rumore ha andamento  $\frac{1}{f}$  e quella in cui il rumore è Bianco Gaussiano, il discorso vale per qualsiasi rumorosità, che come ben sappiamo aumenta in modo inversamente proporzionale alla frequenza.



2 Frequenza di ginocchio

La tecnica di modulazione sincrona Lock-In prende anche il nome di modulazione Chopping, tecnica che viene usata per realizzare appunto amplificatori Chopper.

Ricordando che traslare in frequenza un segnale equivale a campionarlo, si può considerare la tecnica chopper come una tecnica di campionamento con frequenza  $F_c$  che, per il teorema di Nyquist, deve essere maggiore o uguale al doppio della frequenza massima del segnale.

Il procedimento consiste quindi nel selezionare in frequenza la parte di segnale che interessa, modularla, amplificarla, rifelezionare la parte di segnale che interessa tramite un filtro passa-banda e quindi demodularla in modo sincrono.

Demodulando in modo sincrono il segnale di uscita verrà restituito amplificato di un certo valore per ottenere un rapporto  $\frac{S}{N} > 1$ , senza le componenti spettrali indesiderate e con il vantaggio di reiettare tutti gli offset e i drift alle basse frequenze, generati all'interno dell'anello.

Vediamo ora, in modo semplificato, come è la risposta in frequenza di un sistema Lock In mediante un esempio:

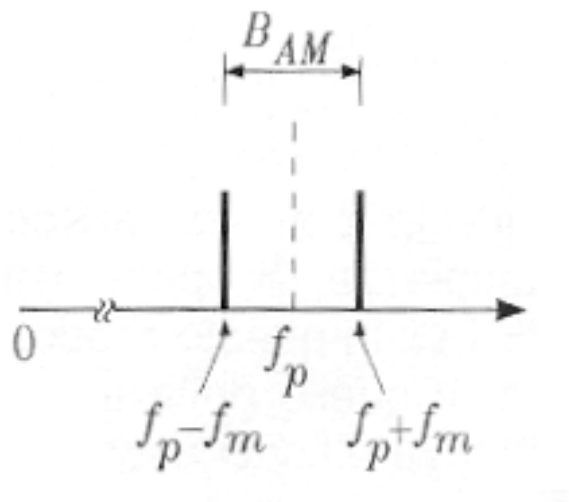
Nel caso di segnali tempo varianti:

$$\begin{cases} V_0 \cos \omega_1 t & \text{Segnale In} \\ A \cos \omega_0 t & \text{Segnale Modulante} \end{cases}$$

In cui  $\omega_0$  è la pulsazione di chopping e  $\omega_1$  quella della fondamentale, in questo caso andando a demodulare il segnale otteniamo il seguente risultato:

$$V_0 A \cos \omega_0 t \cos \omega_1 t = \frac{V_0 A}{2} \cos(\omega_0 - \omega_1) t + \frac{V_0 A}{2} \cos(\omega_0 + \omega_1) t$$

ed è evidente che trattasi di uno spettro di una modulazione Dsb-Sc (Double Side Band Suppressed Carrier), in cui l'informazione è contenuta nelle bande laterali (Fig 3).



3 Spettro di modulazione DSB-SC

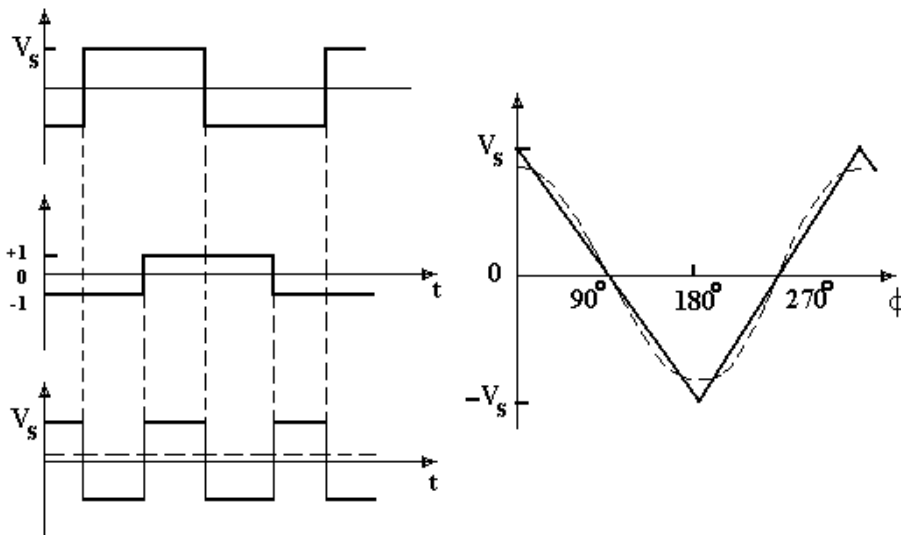
## 2.2 Problemi di asincronismo.

Una degli scogli tecnici nella realizzazione di ricevitori impieganti Lock In è dato dalla necessità di fornire un segnale di riferimento sincrono alla parte Mod e Demod. A causa del ritardo di propagazione del segnale lungo la catena di amplificazione, in generale diverso da quello del segnale di demodulazione, si può riscontrare la possibilità di un non perfetto sincronismo tra la parte modulante e quella demodulante.

L'importanza del sincronismo è data dal fatto che in presenza di uno sfasamento  $\phi$  fra il segnale da demodulare e il riferimento si verificherebbe un errore sulla componente continua quantificabile mediante la relazione:

$$V_{out} = V_s \cdot \left[ 1 - \frac{\Phi}{90} \right] \quad \text{con: } 0 < \Phi < 90$$

e graficabile mediante la figura 4

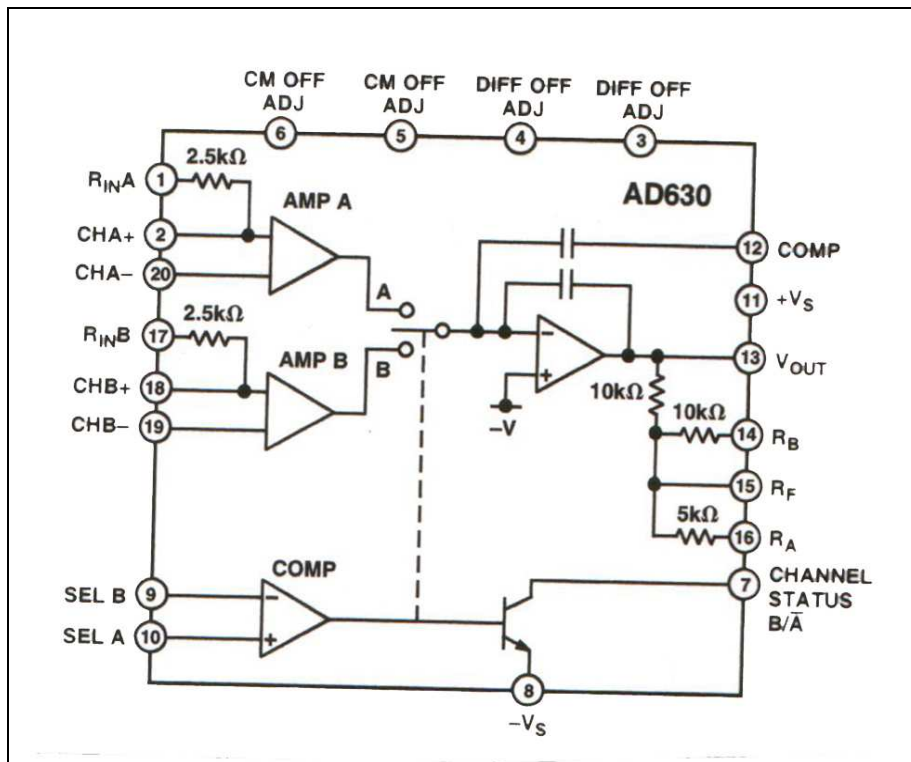


4 Ampiezza e fase nel caso di asincronismo

Come si nota dai grafici il segnale demodulato, a causa dello sfasamento, in uscita si ha un' ampiezza minore. In particolare si evidenzia come l' ampiezza sia inversamente proporzionale al crescere della differenza di fase fino ad annullarsi in coincidenza di  $90^\circ$  e dei suoi multipli, dove il segnale demodulato è nullo. Per i multipli dispari di  $180^\circ$  si avrà invece inversione del segno.

## ANALOG DEVICE AD630 Balanced Modulator-Demodulator

Per le mie prove ho scelto AD630 dell' Analog Device. Esso è un modulatore bilanciato di precisione che combina una architettura di commutazione flessibile con un'accurata stabilità in temperatura. Tra le sue varie applicazioni include la Modulazione Demodulazione bilanciata, la rilevazione sincrona, la rilevazione di fase, di quadratura, l'amplificazione di tipo Lock In. Esso funziona come un amplificatore operazionale di precisione con due ingressi differenziali indipendenti e un comparatore di precisione che è usato per selezionare l'ingresso attivo (Fig 5)

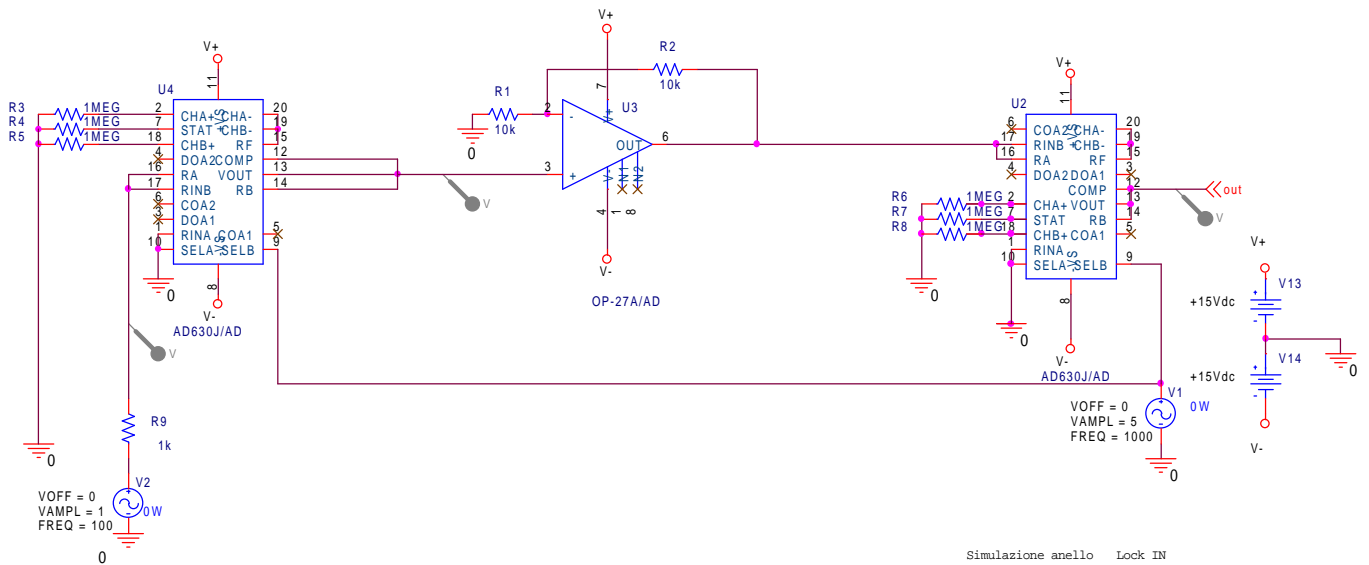


5 Schema elettrico del circuito integrato.

In pratica, sul Pin 9, viene portato l'ingresso di Clock sincrono che comanda il comparatore di precisione selezionando alternativamente l'ingresso attivo degli amplificatori A o B. Il segnale in ingresso viene portato sui Pini 16 e 17, modulato a prodotto con il contributo del Pin 9, il segnale così ottenuto viene prelevato dai pini 12-13-14. La potenza e la versatilità di questo circuito integrato fanno in modo che con lo stesso dispositivo e nella stessa configurazione sia possibile realizzare sia il modulatore che il demodulatore.

Nel nostro studio abbiamo utilizzato il dispositivo nella sua configurazione di Modulatore sincrono e Demodulatore sincrono e cioè, come visto nella teoria, abbiamo formato un anello Lock-In. Secondo le specifiche del Data Sheet, questa configurazione, è in grado di effettuare il signal-recovery di piccoli segnali immersi fino a 100 dB sotto il livello di rumore interferente.

## Il circuito elettrico



## 6 Schema elettrico della catena Lock-In

Nel nostro studio si è focalizzato l'attenzione su segnali a bassissima frequenza scegliendo un valore di 100 Hz e ritenendolo significativo per le simulazioni da effettuare in questo caso.

Segnale in ingresso	Offset	Freq.	V.ampl.
Sinusoidale	0V	100 Hz	0.1-5V

Segnale modulante	Offset	Freq.	V.ampl.
Sinusoidale	0V	1 KHz	5V

Tra il modulatore e il demodulatore viene interposto, per l'amplificazione del segnale, l'Amplificatore Operazionale Op 27 dell' Analog Device. La larghezza di banda dell'amplificatore deve essere tale da verificare, una volta scelto il guadagno:

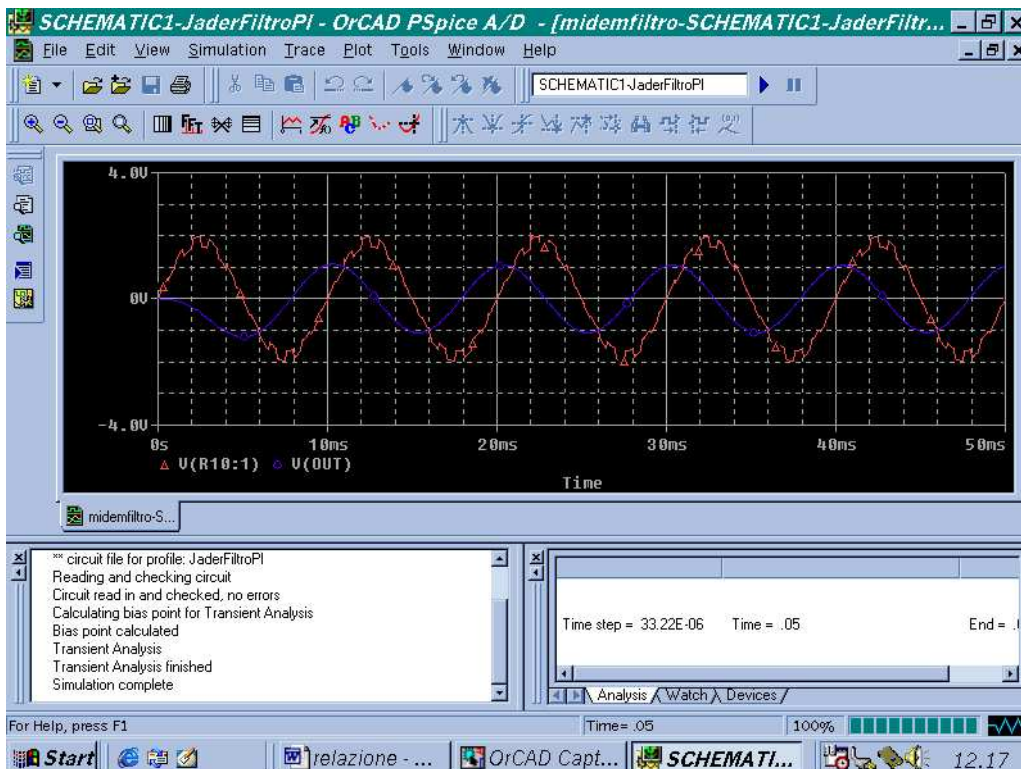
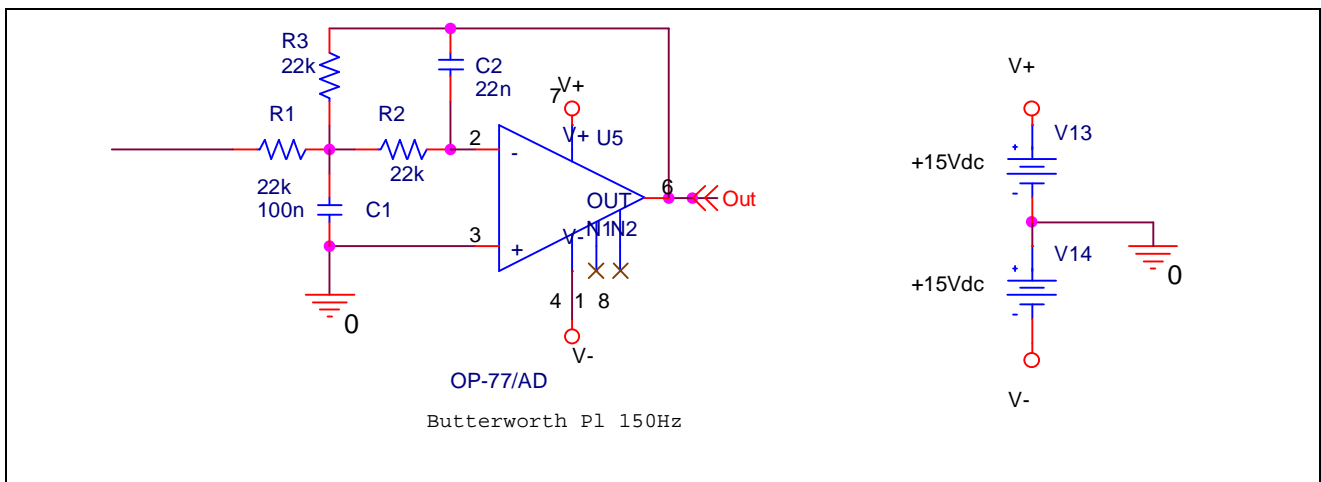
$$G_{OL} = G \times B = K \omega t$$

dove G è il guadagno e B la banda del segnale da applicare. Nel caso dell' OP27 tale valore è circa 8 Mhz , permettendoci quindi dei buoni guadagni (nell'ordine di 100 in lineare) per segnali di banda fino a 100 KHz. Inoltre l'amplificatore operazionale in questione presenta un ottima figura di rumore.

### Filtraggio del segnale in uscita

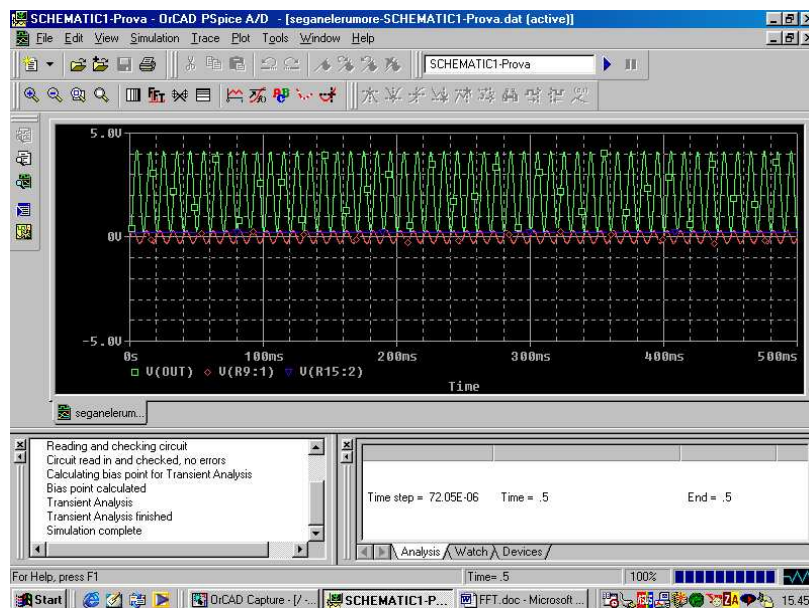
Come detto in precedenza è necessario realizzare un sistema di filtraggio a valle del demodulatore per andare ad eliminare quelle componenti armoniche multiple di 1 KHz, per far ciò si è realizza un filtro passa basso Butterworth, con le seguenti specifiche:

OPamp.	Tipo	Ordine	Ft	Gain	Config.
OP77	Butterworth	2°	150Hz	1	Invertente

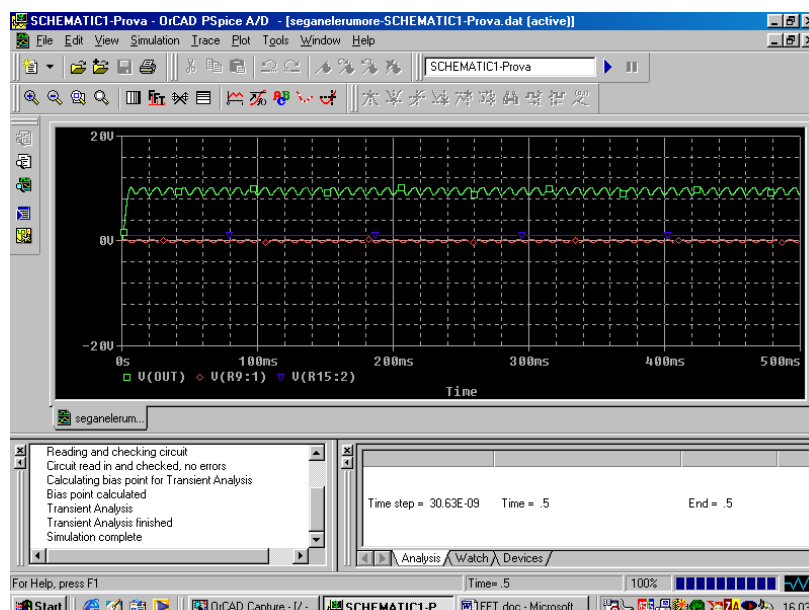


Sono quindi passato a simulare, tramite Pspice®, l'intera catena lock In. Al segnale d'ingresso (Segnale di test) viene sommato rumore bianco gaussiano di intensità crescente e facendo variare l'intensità del segnale test, si verifica, a demodulazione avvenuta, l'effettiva rilevazione del segnale.

<b>Vin</b>	<b>Vnoise</b>	<b>Sign/Noise</b>	<b>GAmp</b>	<b>Demod.</b>	<b>Simulazione:</b>
$V_{pp}$	$\frac{V_{eff}^2}{Hz} (1Khz)$	$\frac{S}{N} (dB)$	$20Log\left(1 + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)\right)$		Rosso=Input 100 Hz Verde=Out Demodulatore
1V	$1.26 \frac{V_{eff}^2}{Hz} (1Khz)$	-2 dB	6 dB	SI	



0.3V	$1.90 \frac{V_{eff}^2}{Hz} (1Khz)$	-16 dB	20 dB	SI	
------	------------------------------------	--------	-------	----	--



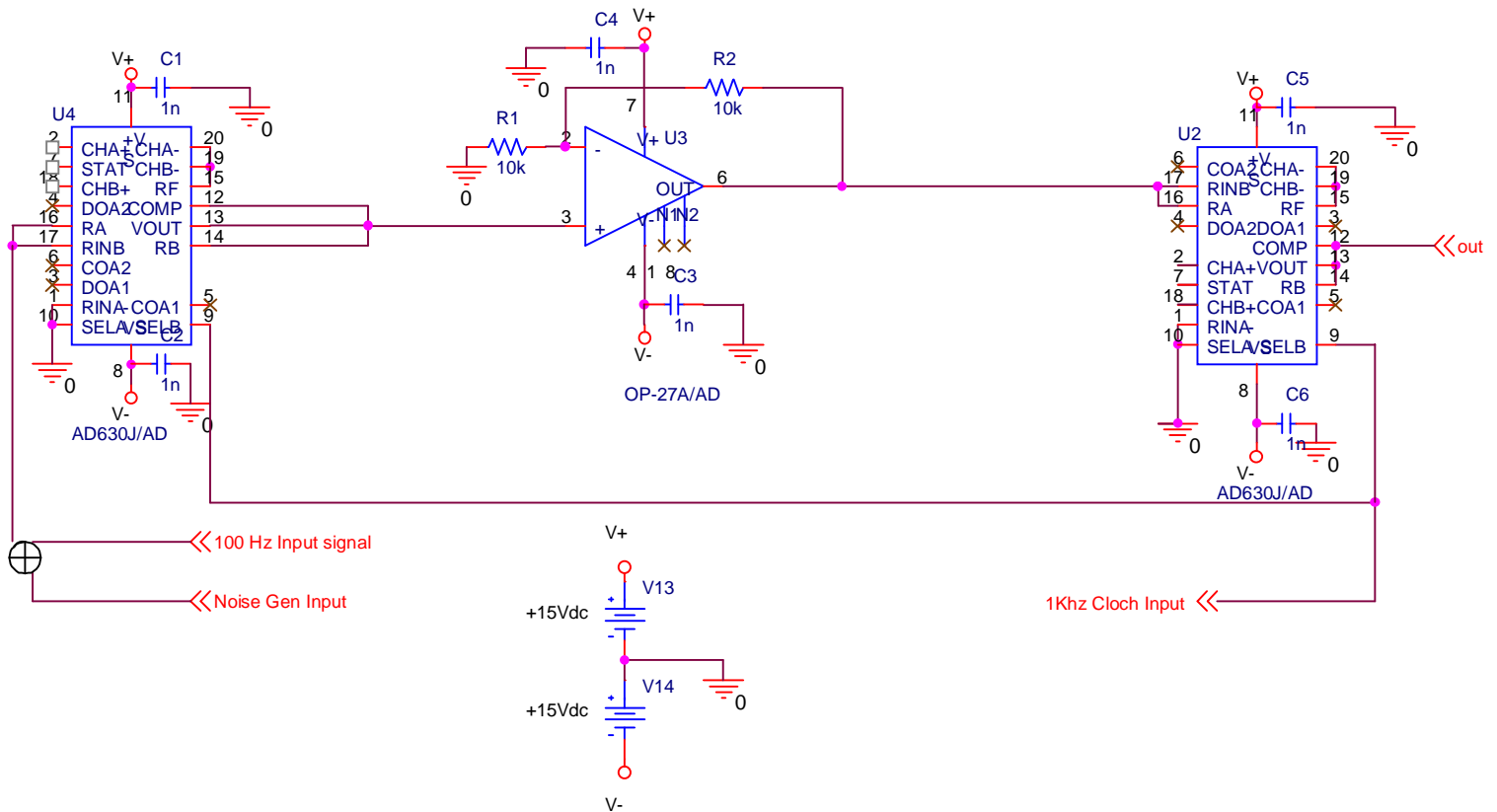
Dalla simulazione realizzata emergono molti dati interessanti.

In primo luogo il simulatore Pspice© si è rivelato abbastanza limitato, per quel che riguarda le analisi di rumore. Mediante lo studio di un'opportuna elettronica, che realizzava un generatore di rumore, i dati ricavati, non confermano ciò che in linea teorica era affermato nel Data Sheet della casa produttrice.

Il limite dei  $-100 \text{ dB} \left( \frac{S}{N} \right)$  a  $1 \text{ KHz}$  si è rivelato essere di  $-45 \text{ dB} \left( \frac{S}{N} \right)$  a  $100 \text{ Hz}$ .

In linea teorica il risultato è comunque sufficiente per l'applicazione finale desiderata

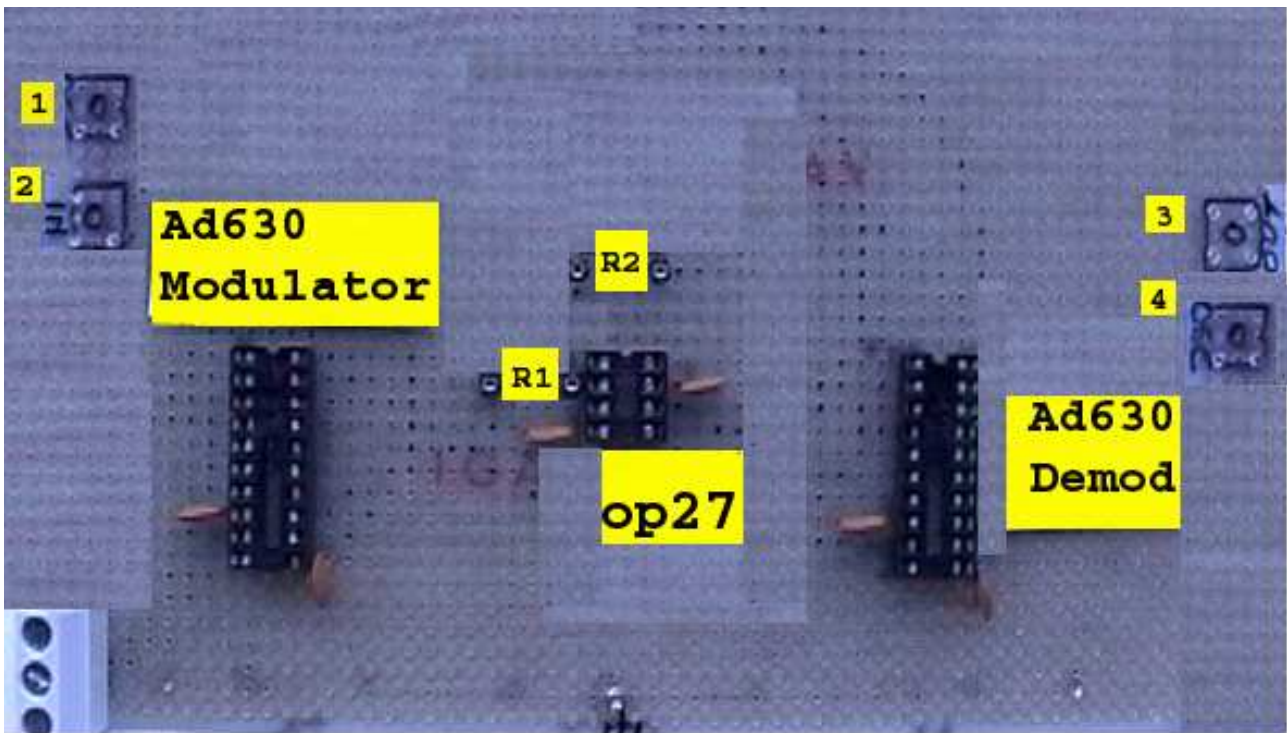
Si è quindi passati alla realizzazione pratica del sistema Lock in schema elettrico è visibile in figura 7, al fine di poter avere una controverifica dei risultati ottenuti con Pspice.



7 Schema elettrico del circuito da realizzare



Il circuito è stato realizzato montato su Bread Board millefori, (Figura 8).



#### 8 Disposizione dei componenti

Sulla scheda sono state previste quattro porte di In/Out su connettori coassiali a 50 Ohm tipo SMB.

1: NOISE: Ingresso da dove viene immesso il Rumore

2:INPUT: Ingresso del segnale a 100 Hz, denominato Test.

3:OSCILLATORE: Ingresso del segnale di riferimento del Modulatore-Demodulatore a 1 KHz

4:OUTPUT:Uscita del Demodulatore.

E' inoltre presente una torretta per l'alimentazione duale +15V -15V .Il circuito e stato montato e verificato singolarmente in ogni suo componenti, iniziando con il modulatore poi il demodulatore ed infine l'intera catena Lock in .

Si è aggiunto tra Modulatore e Demodulatore un Amplificatore Operazionale OP27, in configurazione non-invertente con guadagno pari a :

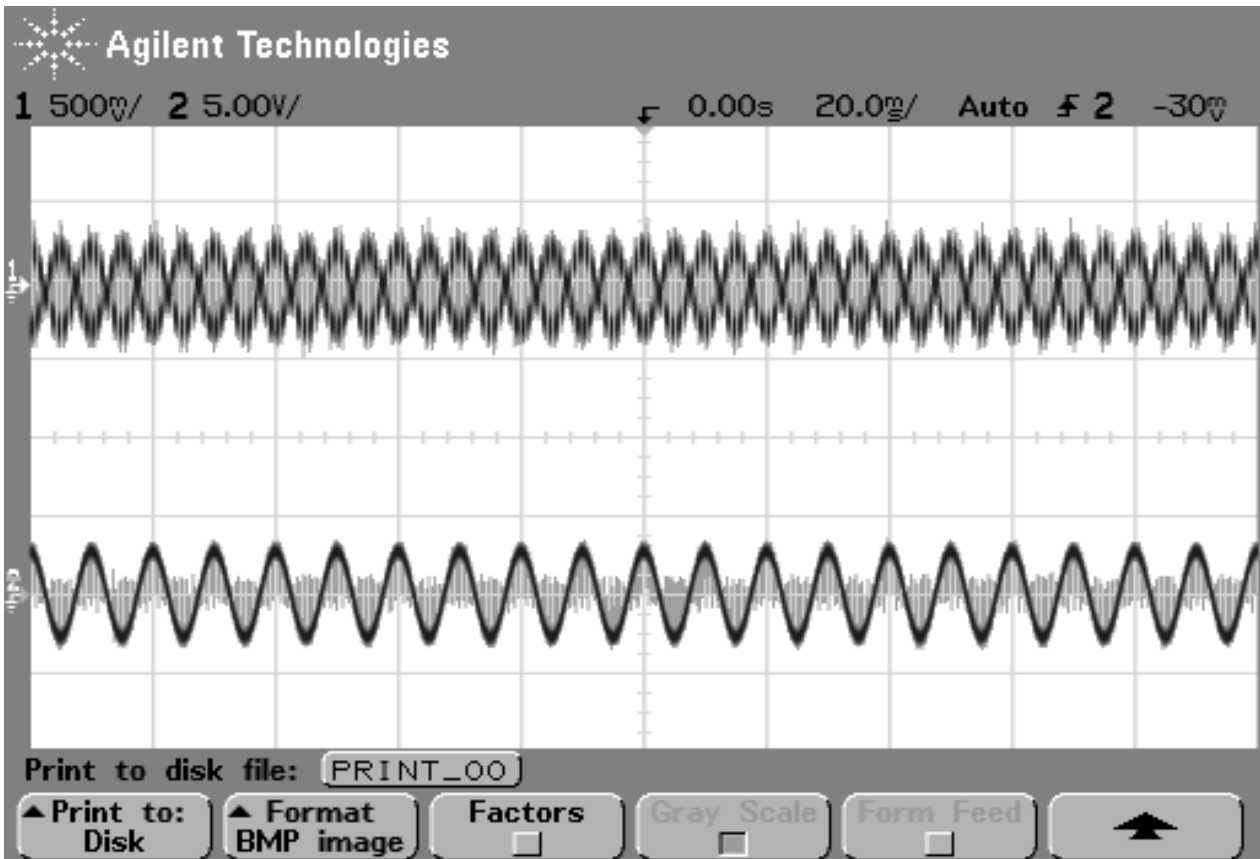
$$G = 20\text{Log}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 20\text{Log}\left(1 + \frac{1\text{k}\Omega}{100\Omega}\right) = 21\text{dB}$$

Ad entrambi gli AD630 è stato collegato un segnale di riferimento di tipo Sinusoidale a Frequenza pari a 1KHz e ampiezza 1Vpp. In ingresso è stato collegato un segnale di test, sempre sinusoidale, a frequenza 100Hz di cui è stata variata l'ampiezza da 500mV a scendere che costituirà il segnale da rivelare all'uscita del demodulatore sincrono. Verificato il corretto funzionamento in condizioni ideali, si è quindi passati ad aggiungere all'ingresso, un segnale di Noise di ampiezza variabile .

Andando a variare l'ampiezza del segnale in ingresso a scalare da 500mV e aumentando il rumore, si è verificato sperimentalmente che tale circuito permetteva di recuperare i segnali di test fino a :

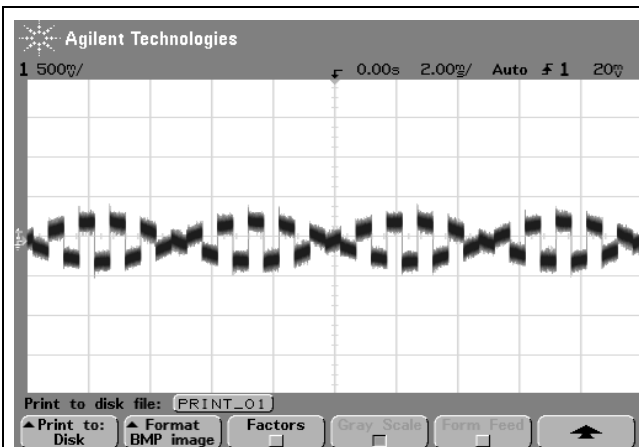
$$\left(\frac{S}{N}\right) = -20dB .$$

Come riportato dall'acquisizione all'oscilloscopio 9, sul canale 1 viene visualizzato il segnale modulato a 1 KHz e sul canale 2 il segnale di test correttamente Demodulato e amplificato.

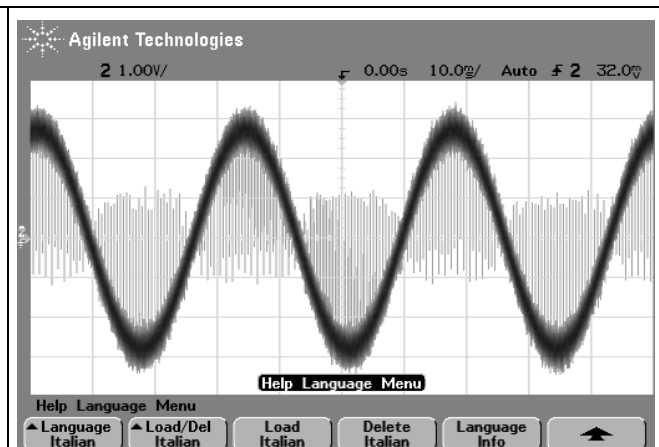


9 Modulato Vs Demodulato

I risultati sono visibili zoomati a: Figura 10, canale 1 e Figura 11, canale 2.



10 Zoom del canale 1



11 Zoom del canale 2.

L'analisi al calcolatore e poi la verifica sperimentale, hanno dimostrato l'efficacia della Modulazione Demodulazione sincrona in presenza di segnali con basso rapporto segnale rumore.

Lo scopo di questo lavoro era quello di verificare il limite massimo di rapporto  $\left(\frac{S}{N}\right)$  a cui era

possibile spingersi con un'architettura di tipo Lock In.

Il data Sheet dell' Analog Device sosteneva il limite teorico di  $-100\text{dB}$  a  $10\text{ KHz}$ .

La simulazione al calcolatore ha verificato la possibilità di spingersi fino oltre i  $50\text{ dB}$  di rapporto Segnale/Rumore con una corretta demodulazione del segnale d'interesse.

La principale difficoltà incontrata nella simulazione al calcolatore è stata quella di trovare un adeguata fonte di rumore gaussiano bianco. Infatti il software non prevede nelle sue librerie questo tipo di generatore, per far ciò è stato realizzato un componente ad hoc che genera rumore bianco nella banda ed è stato inserito all'ingresso della catena Lock In.

Dai risultati emerge il fatto che, considerando un guadagno di catena di  $20\text{ dB}$  come da simulazione, non è possibile estrarre segnali monocromatici con rapporto  $\left(\frac{S}{N}\right) < -20\text{ dB}$ .

Anche se il risultato sperimentale è il peggiore tra quello teorico e quello simulato, si può comunque concludere che l'architettura Lock In, per segnali a bassa frequenza, è comunque vantaggiosa rispetto a una rilevazione diretta e utilizzabile quindi per ricevitori per Vlf-Elf-Ulf.

L'intero lavoro è disponibile sul mio sito internet [www.qsl.net/iw2lla](http://www.qsl.net/iw2lla), ringrazio l' Ing. Jader Monari e l'Ing Marco Poloni dell' Istituto di radioastronomia dwel CNR di Medicina (Bo) per la collaborazione e il prezioso aiuto e il direttore Ing. Stelio Montebugnoli per l'ospitalità

## **Bibliografia:**

C. Vignali (I4VIL):Radio Rivista 10/2002-Ricevitori a rivelazione Sincrona

F.P.Panter:Modulation-Noise and Spectral analysis – Mc Graw Hill 1985

Monari-Guidi-Poloni : Circuito di riferimento per Mod/Dem Lock In

Marco Poloni: Tesi di Laurea

### **Autore:**

IW2LLA Dott. Ing. Andrea Ghedi

Andrea Ghedi® 2003 Pubblicazione autorizzata per Radio Rivista e diffusione per solo uso Radio Amatoriale