

## LABORATORIO DIDATTICO 2

### Generazione di un segnale modulato a più stati tramite l'uso di due portanti in quadratura.

#### 1 Premessa

Un segnale modulato avente una certa ampiezza e una fase, che può assumere M valori diversi può essere ottenuto come somma vettoriale di due sinusoidi, una di tipo *coseno* e una di tipo *seno*, aventi ampiezze opportune.

Infatti se si considera un segnale modulato, per esempio un 4-PSK (QPSK), avente ampiezza ( $A_p$ ) ed una certa fase ( $\phi_i$ ) esso può venire così scomposto:

$$A_p \cos(\omega_p t + \phi_i) = A_p \cos(\phi_i) \cdot \cos(\omega_p t) - A_p \sin(\phi_i) \cdot \sin(\omega_p t) \quad (1)$$

Poiché per uno stato di modulazione il valore di  $\phi_i$  è costante, tale espressione può essere riscritta nel seguente modo:

$$A_p \cos(\omega_p t + \phi_i) = I \cdot \cos(\omega_p t) - Q \cdot \sin(\omega_p t) \quad (2)$$

$I = A_p \cos(\phi_i)$ : ampiezza del termine coseno, in fase rispetto alla portante generata dall'oscillatore.

$Q = A_p \sin(\phi_i)$ : ampiezza del termine seno, posto in quadratura rispetto al segnale generato dall'oscillatore e cioè sfasato di  $90^\circ$  rispetto ad esso.

La (2) dimostra che esiste la possibilità di ottenere un segnale modulato avente una certa fase ed una certa ampiezza, cioè posto in un determinato stato di modulazione, sommando un termine coseno ed un termine seno aventi ampiezza opportuna. In altri termini, variando le ampiezze (I e Q) di due portanti *poste in quadratura* ed effettuandone la somma è possibile ottenere uno qualsiasi degli M stati di modulazione che si intendono definire.

La modulazione *QAM* (*Quadrature Amplitude Modulation*, modulazione di ampiezza in quadratura) è l'estensione del concetto di modulazione PSK multifase. In pratica poiché adottando più di 8 fasi e mantenendo costante l'involuppo si va incontro ad una probabilità di errore elevata, per via degli effetti del rumore e delle distorsioni, si è pensato di posizionare i punti di modulazione (stati) in modo tale che anche con numero di punti di modulazione elevato (tipicamente  $M \geq 16$ ) essi risultino sufficientemente separati. Per ottenere questo risultato occorre generare un segnale modulato in cui, a seconda dello stato di modulazione che si determina, varia sia l'ampiezza sia la fase. Uno stato (o punto) di modulazione corrisponde a una sinusoide avente dei ben precisi valori di ampiezza e di fase che non variano per tutto il tempo di simbolo e a cui viene associata una certa configurazione di bit ( $\log_2 M$  bit).

La modulazione QAM è perciò una *modulazione mista ampiezza/fase*. L'insieme dei punti di modulazione viene anche denominato *costellazione* della modulazione.

Con la modulazione QAM il segnale modulato può assumere un numero di stati,  $M$ , molto elevato. Per evidenziare il numero di stati ammessi ( $M$ ), essa viene usualmente indicata come *M-QAM*.

Vi sono così le modulazione 16-QAM, 64-QAM, ecc., caratterizzate rispettivamente da un numero di stati,  $M$ , pari a 16, 64, ecc.

La relazione tra velocità del flusso di bit in ingresso, bit rate  $R_s$  [bit/s], e velocità di modulazione ( $V_m$ ) o symbol rate  $S_R$  [baud], è la seguente:  $R_s = S_R \cdot \log_2 M$  [bit/s].

In prima approssimazione l'occupazione di banda di un segnale modulato QAM risulta pari al valore del symbol rate:  $B_{QAM} \approx S_R$  [Hz].

## 2 Generazione della modulazione QAM

Come indica il nome stesso, un modulatore QAM è basato sul metodo delle portanti in quadratura. In linea di principio esso opera nel seguente modo: il flusso di bit in ingresso viene suddiviso in gruppi di  $N$  bit e, tramite una codifica multilivello, si pilotano le due portanti in quadratura con due livelli di ampiezza (I e Q) tali da produrre in uscita un segnale somma che risulta modulato sia in ampiezza sia in fase e che è posizionato nel punto di modulazione associato alla configurazione corrente degli  $N$  bit di ingresso; il numero di punti di modulazione, cioè il numero di stati che può assumere il modulato, risulta pari a  $M = 2^N$ .

Va sottolineato che la modulazione M-QAM è una modulazione *ad alta efficienza spettrale* (sfrutta al meglio la banda di canale disponibile) che però richiede un  $E_b/N_0$  (e quindi un  $S/N$ ) sempre più alto all'aumentare del numero di stati ( $M$ ), se si desidera che la probabilità di errore non aumenti.

## 3 Simulazione del principio di funzionamento di un modulatore in quadratura (I-Q)

Tramite il programma di simulazione MicroCap della Spectrum Software (la versione demo è scaricabile gratuitamente dal sito [www.spectrum-soft.com](http://www.spectrum-soft.com)) è possibile simulare il comportamento di un modulatore in quadratura (I-Q) per verificare che:

- a) sommando due sinusoidi aventi la stessa frequenza, ma con fasi in quadratura (cioè una di tipo coseno e una di tipo seno) e aventi ampiezze opportune, è possibile ottenere una sinusoide avente un'ampiezza e una fase qualsiasi;
- b) variando l'ampiezza dei termini coseno (I) e seno (Q) si varia l'ampiezza e la fase della sinusoide generata, che possono così assumere dei valori desiderati.

Come noto, una sinusoide avente una data ampiezza e una data fase può essere generata sommando due sinusoidi aventi fase in quadratura, cioè una di tipo coseno, il cui vettore giace sull'asse I, e una di tipo seno, il cui vettore giace sull'asse Q. Variando le componenti coseno e seno (cioè i vettori I e Q) si determina la variazione dell'ampiezza e/o della fase della sinusoide generata, figura 1.

E' così possibile creare una tabella che riporta i valori da assegnare a I e Q per ottenere le ampiezze e le fasi desiderate del segnale risultante, TABELLA 1

TABELLA 1 Esempi di determinazione delle ampiezze I e Q che forniscono valori desiderati di ampiezza e fase della sinusoide generata.

I (vettore coseno)	Q (vettore seno)	R  (ampiezza risultante)	$\theta$ (fase risultante, rispetto al coseno)
Primo quadrante			
3	3	4,24	-45°
3	1	3,16	-18,43°
1	1	1,41	-45°
1	3	3,16	-71,57°
Terzo quadrante			
-3	-3	4,24	135°
-3	-1	3,16	161,57°
-1	-1	1,41	135°
-1	-3	3,16	108,43°

Per generare una sinusoide che assuma i valori di ampiezza e fase riportati nella tabella 1 è possibile utilizzare un modulatore I-Q.

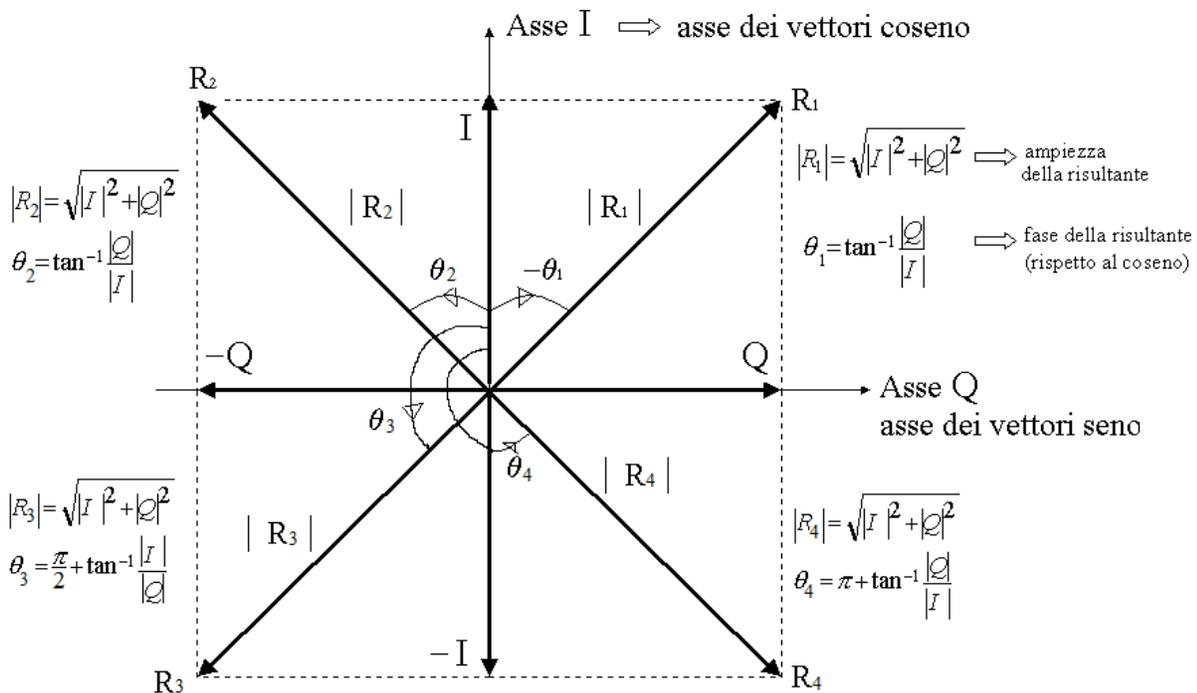


FIGURA 1 Rappresentazione vettoriale di una sinusoide.

Come qui di seguito indicato, tramite il programma Microcap si può effettuare la simulazione di un modulatore I-Q che fornisce in uscita delle sinusoidi con le caratteristiche indicate nella TABELLA 1.

### 3.1 Simulazione con Microcap di un modulatore I-Q

Il principio di funzionamento del modulatore I-Q può essere analizzato attraverso una simulazione con MicroCap, agendo nel seguente modo.

Disegniamo il circuito inserendo i seguenti componenti:

- BATTERY (PART=Amp\_I; Value=Io);
- BATTERY (PART=Amp\_Q; Value=Qo);
- MUL (moltiplicatore, preso dal menu Component⇒Analog primitives⇒Macros);
- SINE SOURCE, generatore coseno; preso da *Analog Primitives* → *Waveform Sources* → *Sine source* e configurato con PART=cos, MODEL=coseno, A=1, F=fp, , PH=pi/2 (fase =  $\pi/2$ );
- SINE SOURCE, generatore seno; preso da *Analog Primitives* → *Waveform Sources* → *Sine source* e configurato con PART=sen, MODEL=seno, A=1, F=fp, , PH=0;
- SUM (sommatore, preso da *Analog Primitives* → *Macros* → *Sum*).

Se si possiede la versione Professional è possibile inserire anche una figura nel disegno, come quella della costellazione della modulazione.

Inseriamo poi le seguenti dichiarazioni per le due variabili simboliche **Io** e **Qo**, che definiscono i valori che volta per volta assumono I e Q (per esempio inizialmente 3 e 3) e per la frequenza dei generatori (per esempio fp= 1 MHz):

```
.define Io 3  
.define Qo 3  
.define fp 1E6
```

Posizioniamo i testi I, Q, OUT come indicato nel disegno (curando che siano ancorati alle linee di interconnessione degli elementi) per evidenziare i punti in cui si analizzano le forme d'onda.

Si ottiene così lo schema del modulatore I-Q riportato in FIGURA 2, in cui le batterie simulano il mappatore e consentono di variare i valori di I e di Q affinché sia generata una sinusoide corrispondente a un determinato punto di una costellazione 16-QAM.

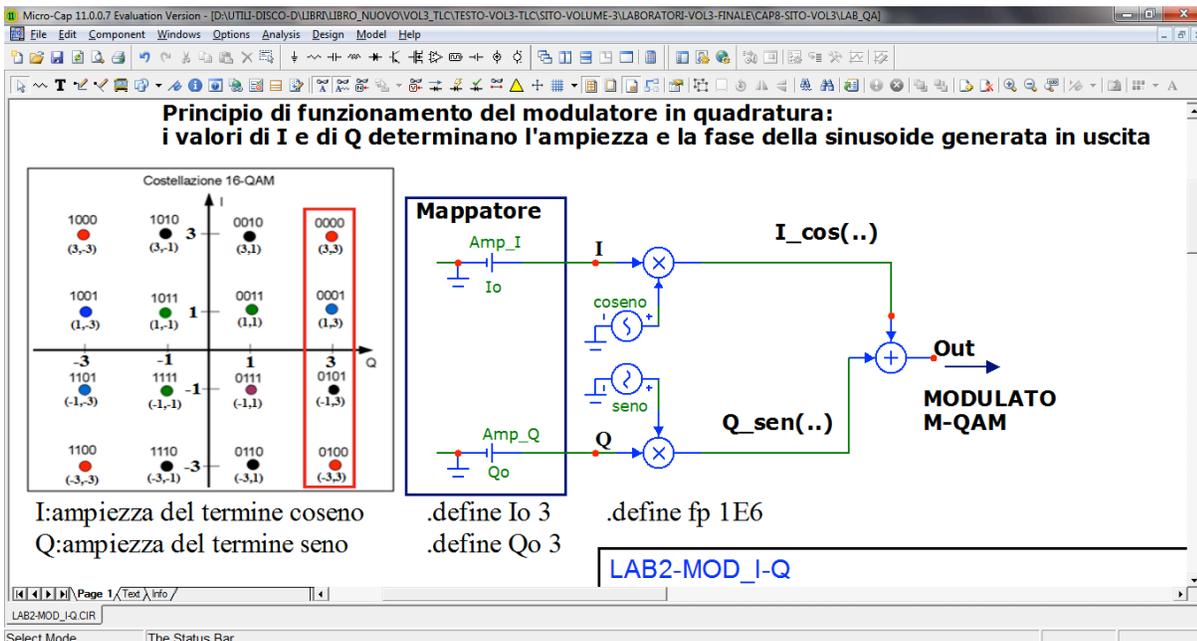


FIGURA 2 Circuito che simula il principio di funzionamento di un modulatore IQ

### 3.2 Analisi del funzionamento del modulatore IQ

Dopo aver aperto l'analisi *Transient*, impostiamo i parametri in modo da analizzare e visualizzare 5 periodi delle forme d'onda (TIME RANGE  $5/f_p$ ) con buona accuratezza (Maximum Time Step  $1e-9$ ), FIGURA 3, la avviamo e selezioniamo *Transient* → *Slider* → *Add Slider*

per aggiungere due *Slider* (cursori) che ci consentano di variare i valori di  $I_0$  e di  $Q_0$  (*Symbolic*) tra un minimo e un massimo (-3, 3 a passi di 2) oppure tra quelli indicati in un elenco (*List*: -3, -1, 1, 3), FIGURA 4.

Agendo sui cursori possiamo quindi impostare i valori di  $I_0$  e di  $Q_0$  che generano, uno alla volta, tutti i punti della costellazione.

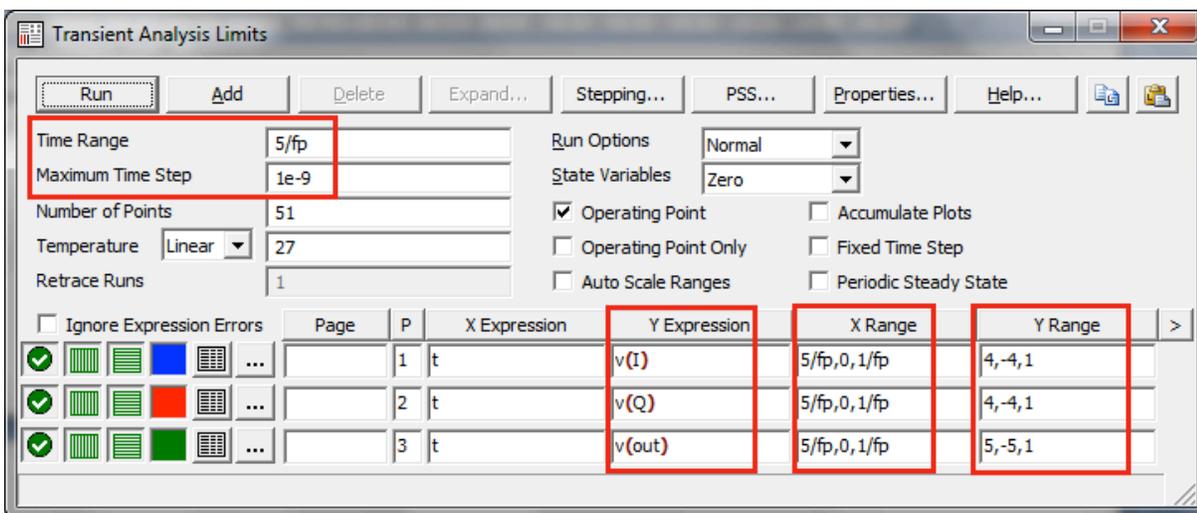


FIGURA 3 Limiti per l'analisi Transient

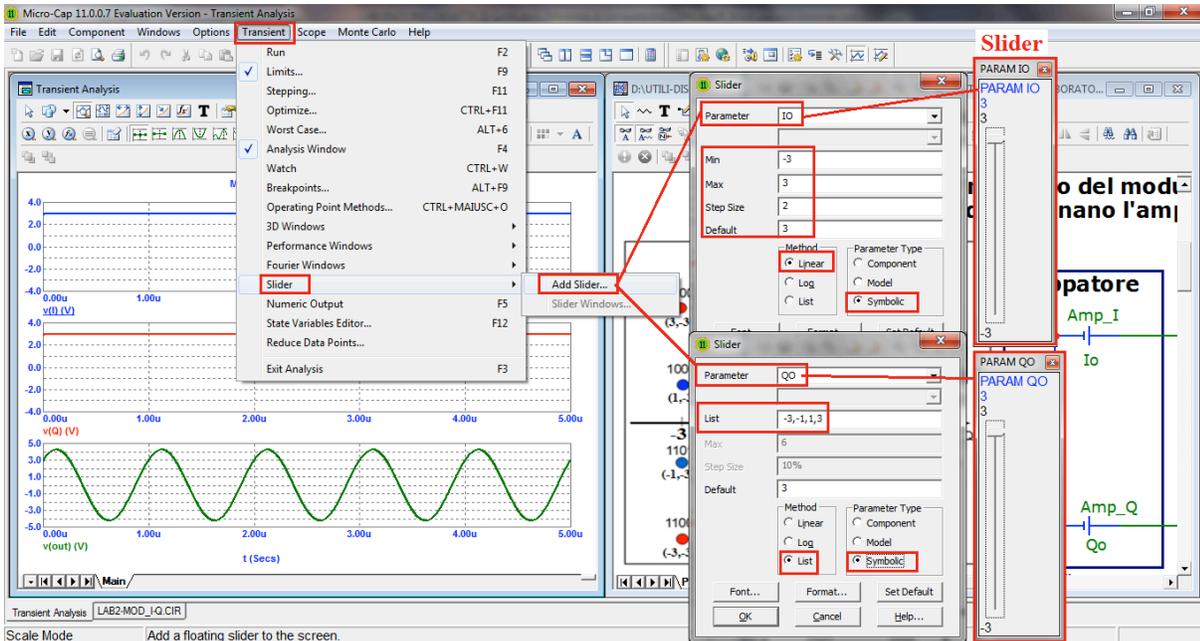


FIGURA 4 Inserimento degli Slider

È anche possibile mantenere sulla finestra di analisi le forme d'onda, in modo da poter comparare i segnali prodotti in relazione ai diversi punti della costellazione, cliccando sull'icona *Save or recall waveform* (FIGURA 5).

Si può così verificare come un segnale modulato 16-QAM vari sia in ampiezza sia in fase a seconda del simbolo che si trasmette e quindi del punto della costellazione che lo identifica.

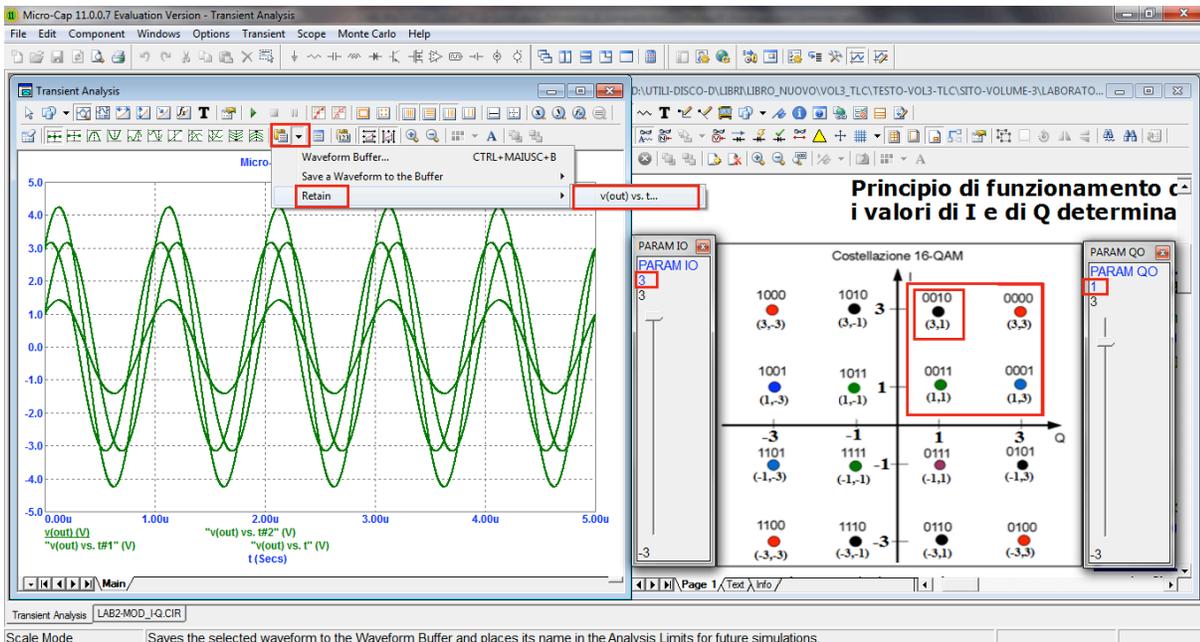


FIGURA 5 Forme d'onda corrispondenti ai punti del primo quadrante della costellazione

È anche possibile impiegare l'opzione *Stepping* della finestra *Transient Analysis Limits* (FIGURA 6) per far variare automaticamente il valore di  $Amp_I$  tra quelli ammessi (ricordarsi di selezionare *Step It: Yes*). In questo modo, fissato il valore di  $Amp_Q$  (per esempio = 3), è possibile far generare le quattro sinusoidi corrispondenti ai 4 punti di una colonna della costellazione, FIGURA 7.

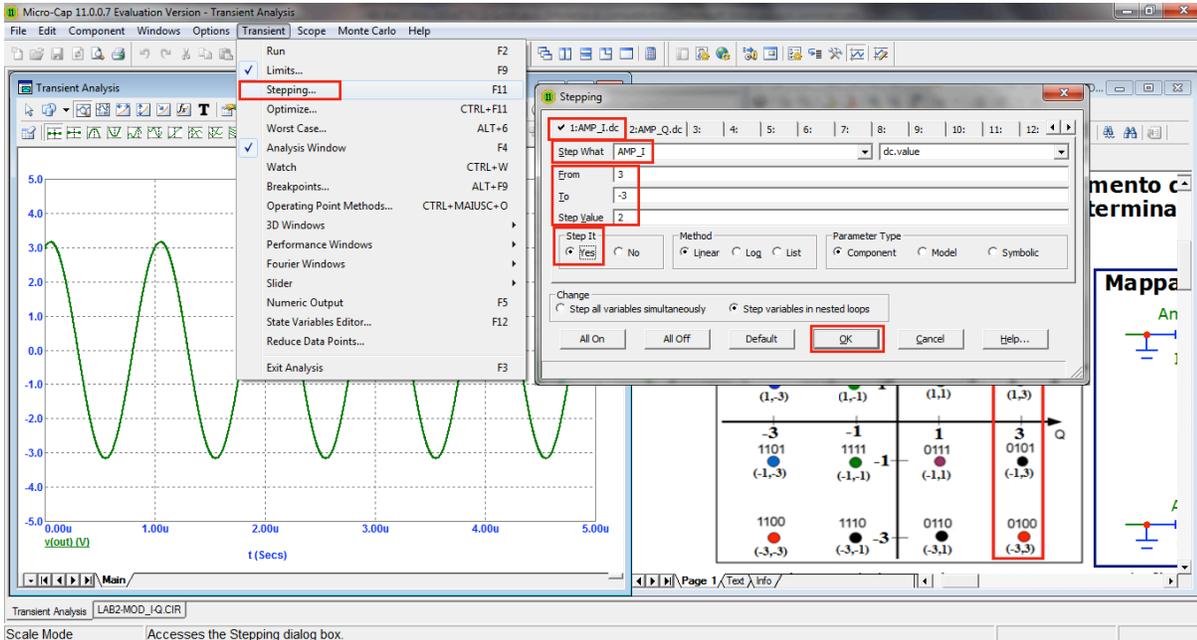


FIGURA 6 Impostazione dello stepping

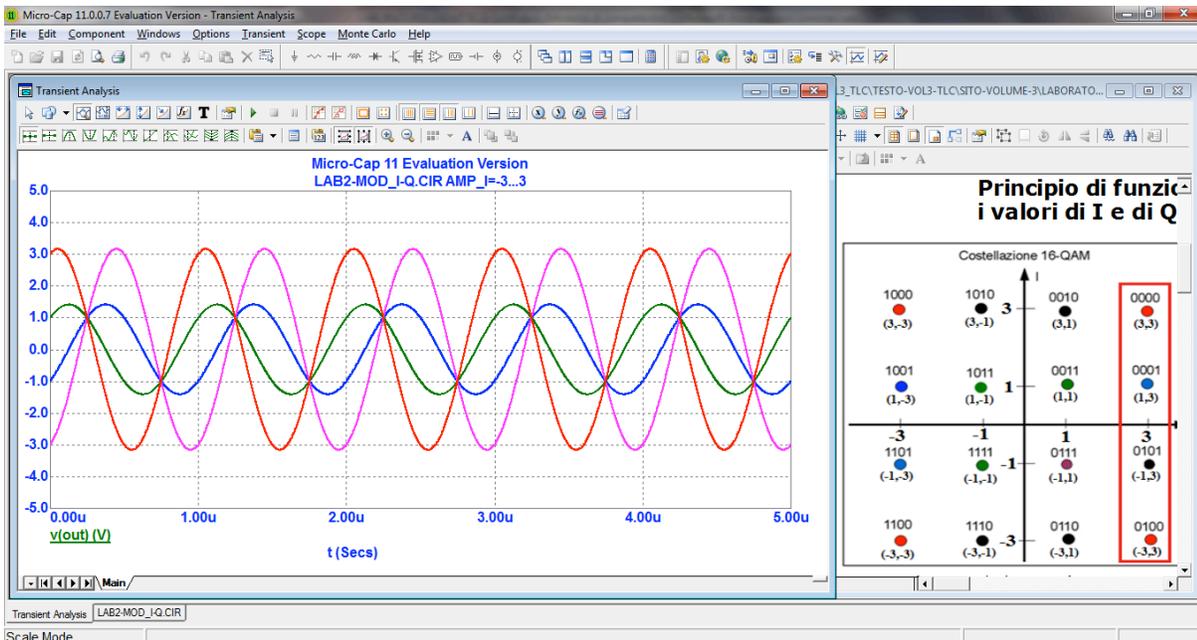


FIGURA 7 Analisi con stepping: forme d'onda corrispondenti ai punti di una colonna della costellazione.

### 3.3 Simulazione di un modulatore-demodulatore (modem) QPSK.

È possibile simulare il mappatore con due generatori impulsivi (*pulse source*) che generano, per esempio, due segnali a onda quadra configurati per fornire i valori di I e Q corrispondenti ai punti di una costellazione QPSK e far tracciare anche le traiettorie che portano da un punto della costellazione a un altro nel piano I-Q (FIGURE 8, 9, 10, 11), nonché simulare un demodulatore I-Q (FIGURE 12, 13, 14, 15).

I filtri passa basso da inserire nel demodulatore possono essere creati con il menu Design di Microcap. Il file del circuito che costituisce la macro del filtro va salvato (o copiato) nella directory Library di Microcap.

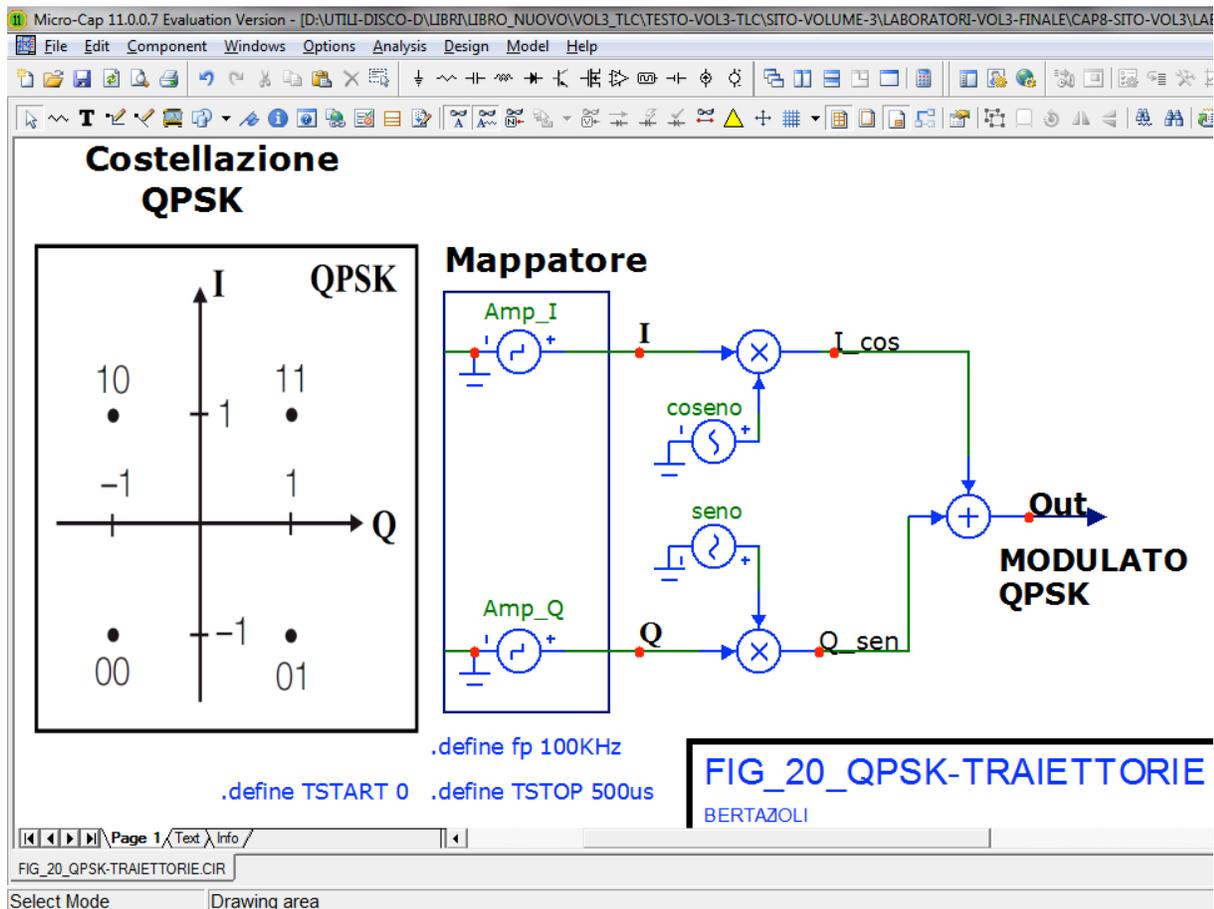


FIGURA 8 Modulatore QPSK.

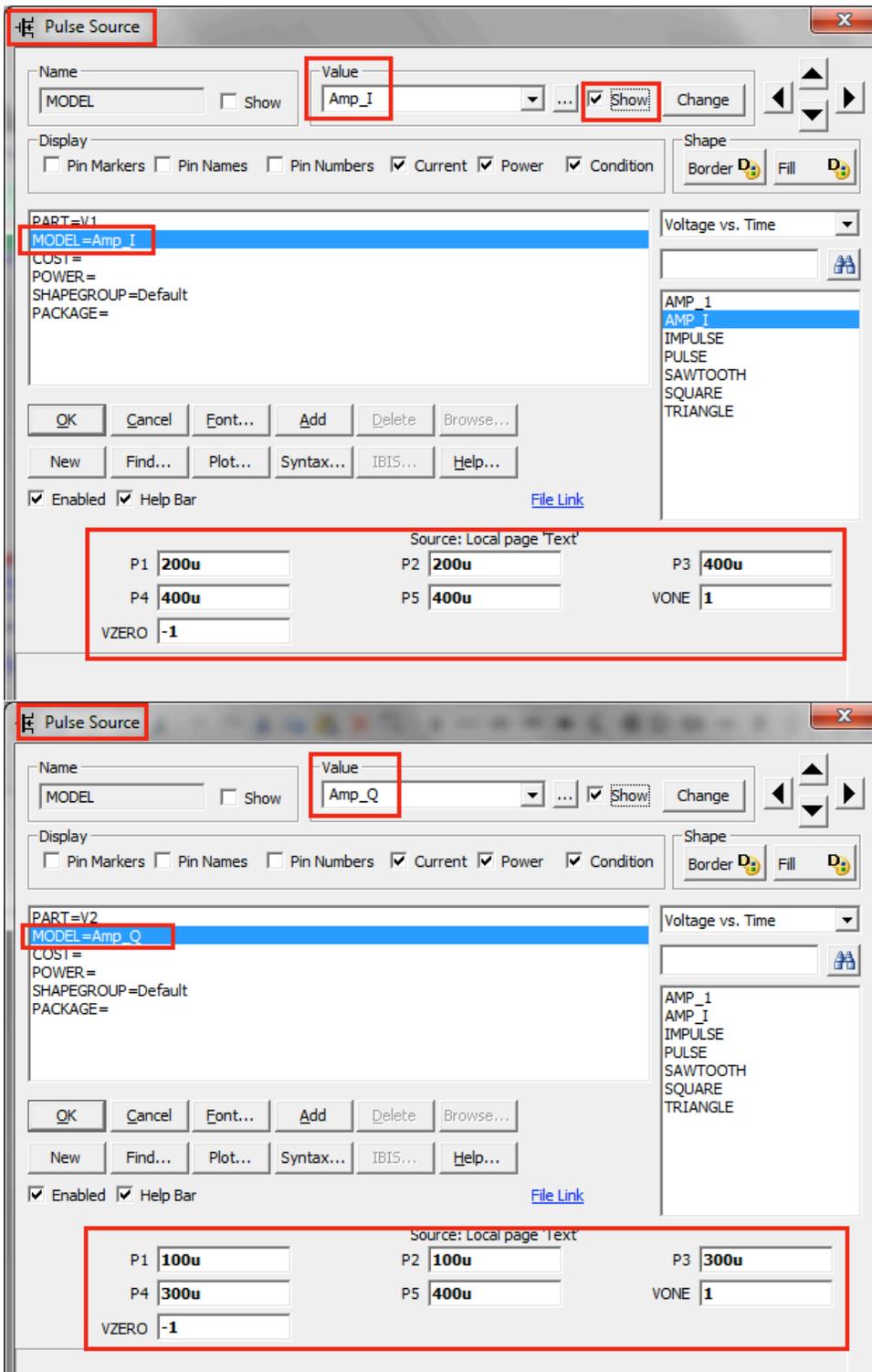


FIGURA 9 Configurazione delle pulse source che simulano il mappatore

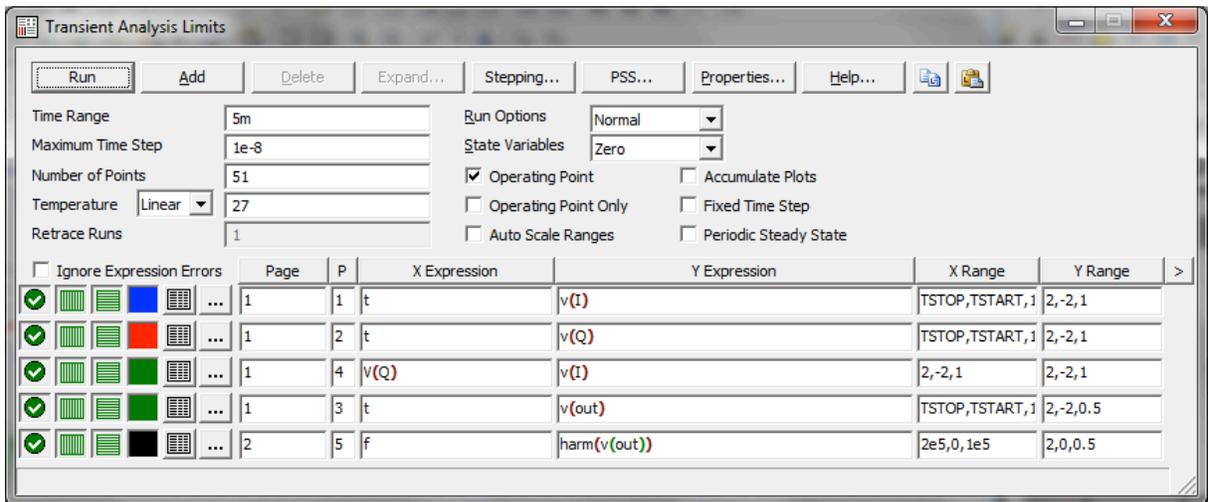


FIGURA 10 Impostazione dei Limits per l'analisi Transient

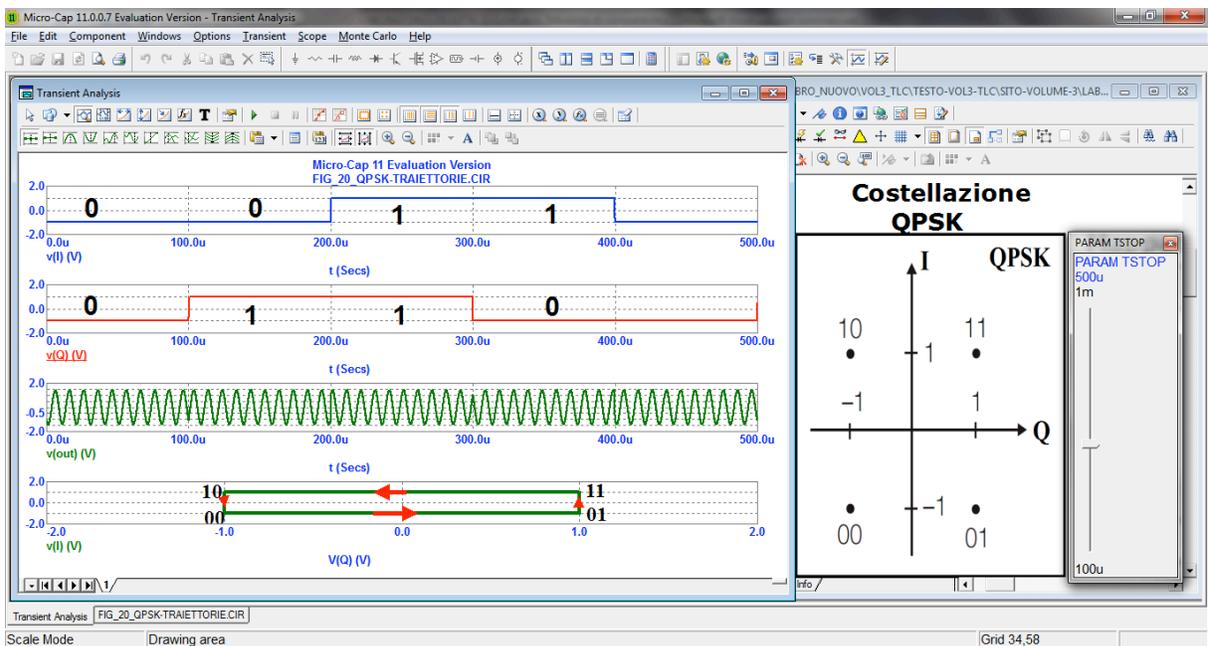


FIGURA 11 Analisi Transient con i valori di I e Q, le forme d'onda generate, le traiettorie sulla costellazione

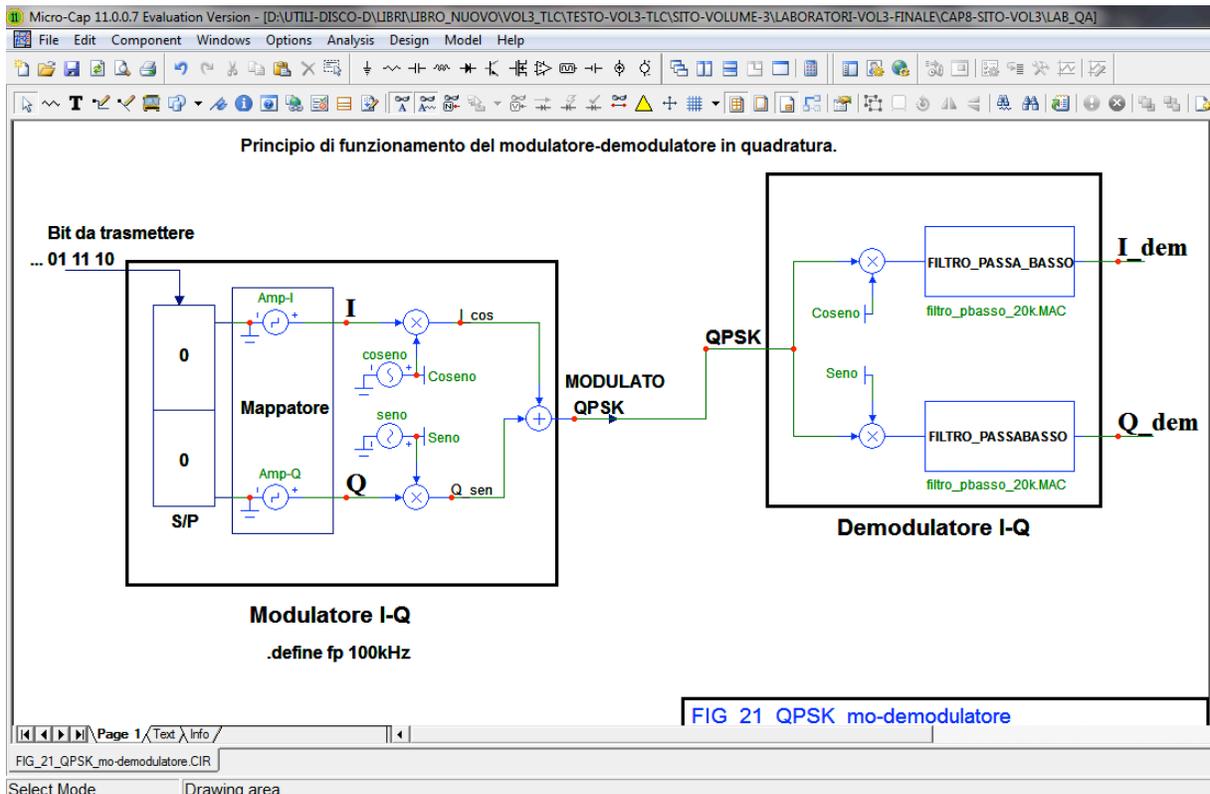


FIGURA 12 Simulazione di un modem QPSK.

Transient Analysis Limits

Run Add Delete Expand... Stepping... PSS... Properties... Help...

Time Range: 10m  
Maximum Time Step: 1e-8  
Number of Points: 51  
Temperature: Linear 27  
Retrace Runs: 1

Run Options: Normal  
State Variables: Zero

Operating Point  
 Accumulate Plots  
 Operating Point Only  
 Fixed Time Step  
 Auto Scale Ranges  
 Periodic Steady State

<input type="checkbox"/> Ignore Expression Errors	Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4	t	v(I)	0.5m,0,0.1m	2,-2,1
<input checked="" type="checkbox"/>	1	5	t	v(Q)	0.5m,0,0.1m	2,-2,1
<input checked="" type="checkbox"/>	2	6	v(Q)	v(I)	2,-2,1	2,-2,1
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	t	v(QPSK)	0.5m,0,0.1m	1.5,-1.5,0.5
<input checked="" type="checkbox"/>	2	2	f	HARM(v(QPSK))	200k,0,50k	1.5,0,.5
<input checked="" type="checkbox"/>	1	4	t	v(I_dem)	0.5m,0,0.1m	1.5,-1.5,0.5
<input checked="" type="checkbox"/>	1	5	t	v(Q_dem)	0.5m,0,0.1m	1.5,-1.5,0.5

FIGURA 13 Limits per l'analisi Transient

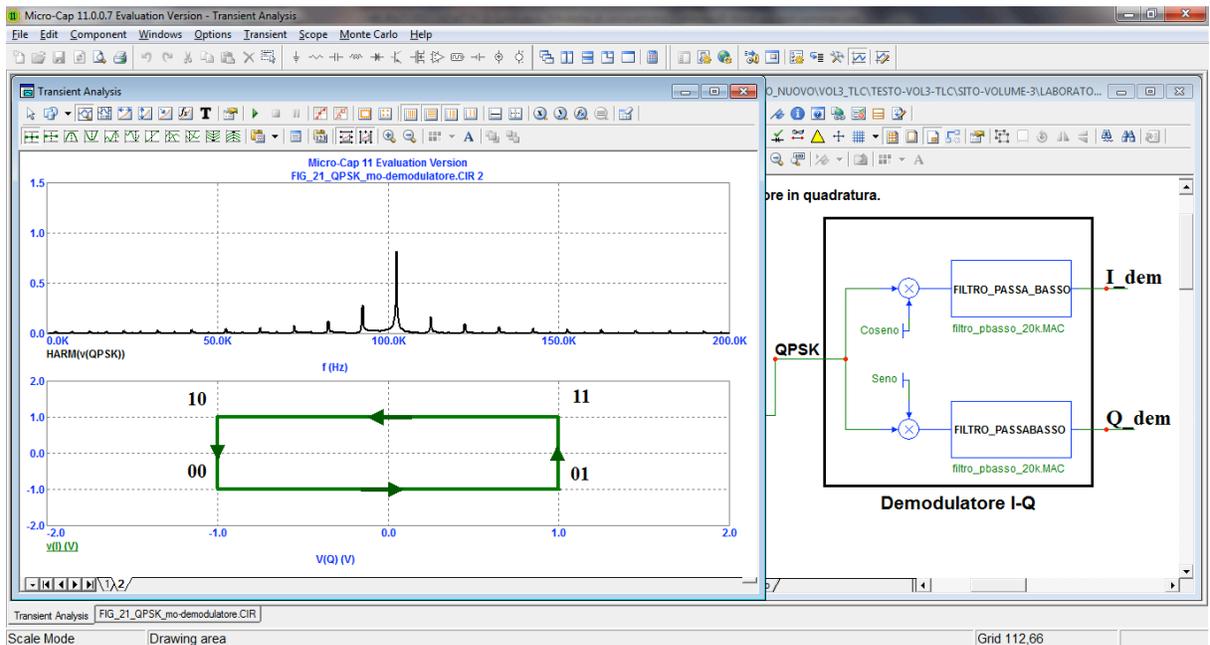


FIGURA 14 Spettro del segnale modulato, traiettorie sulla costellazione

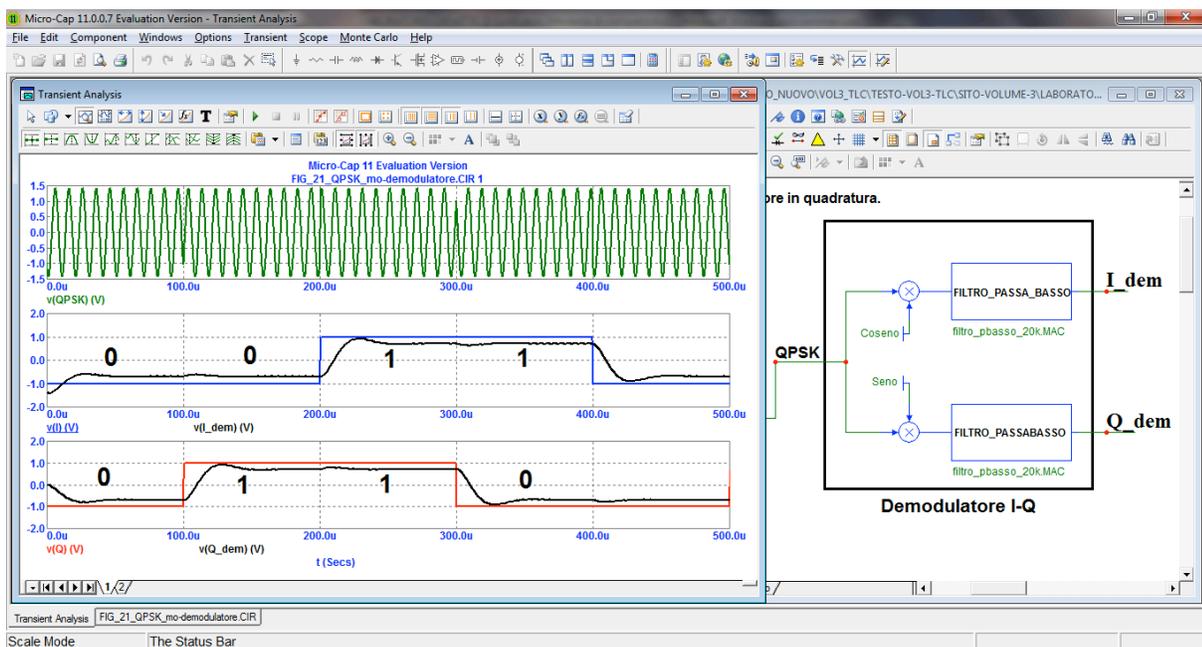


FIGURA 15 Segnale modulato QPSK, segnali I e Q demodulati e confronto con quelli forniti dal mappatore

#### **4 Esempio di utilizzo di Microcap per produrre un segnale memorizzato in un file utilizzabile dal generatore di forme d'onda arbitrarie (AWG, Arbitrary Waveform Generator) TIEPIE HS5.**

Utilizziamo Microcap per produrre un segnale modulato ottenuto con un modulatore IQ. Per esempio è possibile simulare il mappatore di FIGURA 15 con due generatori a scalinata (*Waveform Sources, Staircase*) per produrre un segnale che presenti molte variazioni di ampiezza e fase, come indicato in FIGURA 16, ottenendo così il circuito di FIGURA 17.

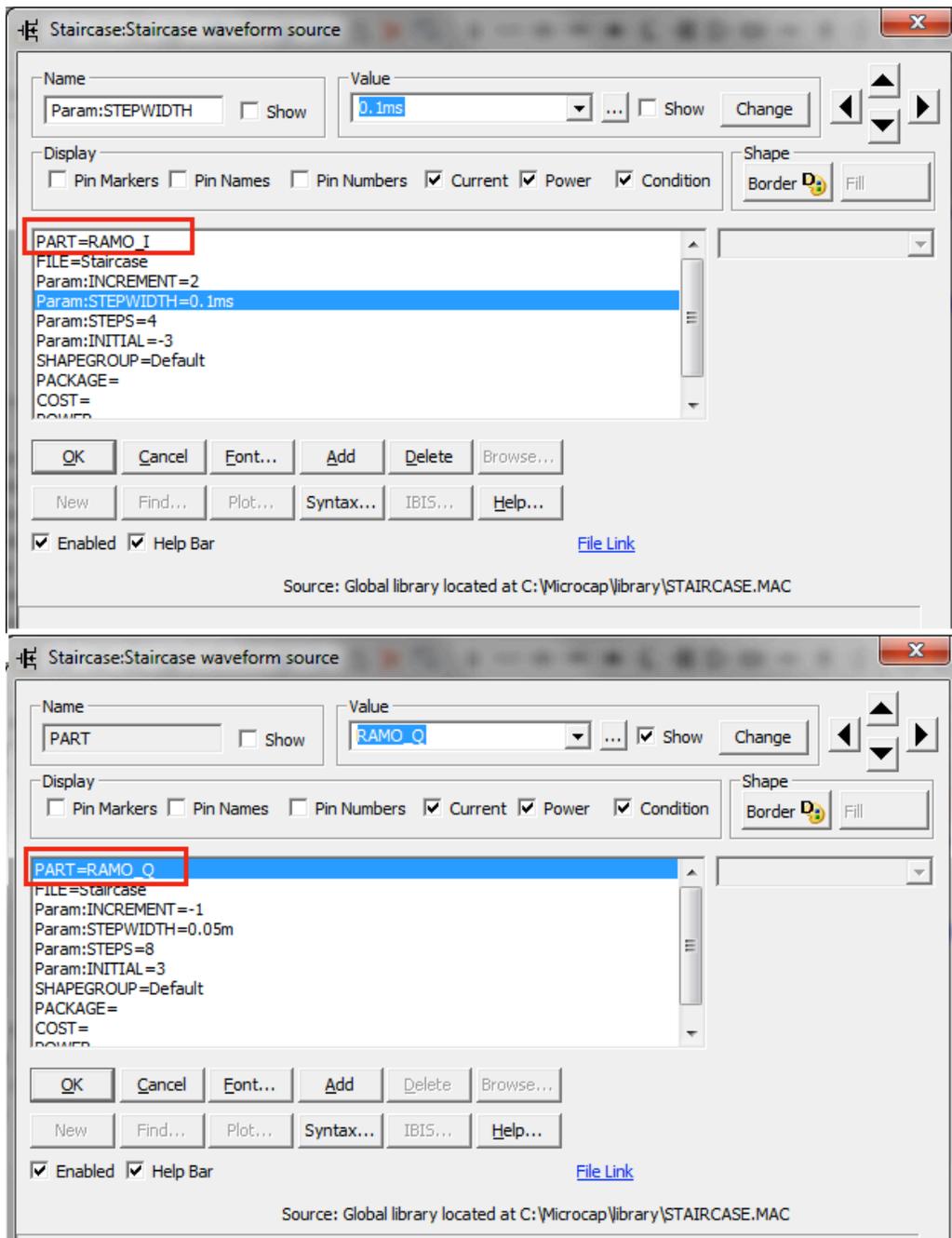


FIGURA 16 Mappatore simulato con sorgenti Staircase.

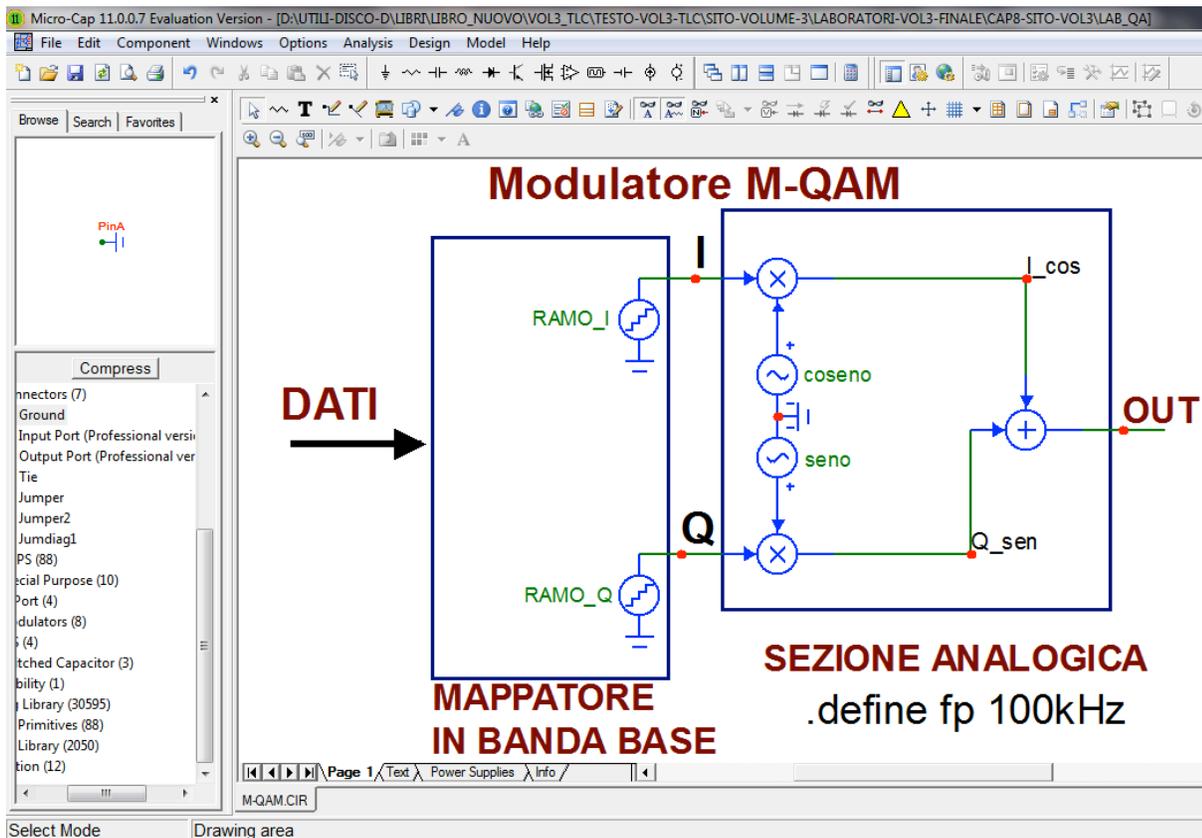


FIGURA 17 Modulatore IQ

Si esegue l'analisi *Transient* facendo tracciare il segnale di uscita e il suo spettro, come indicato in FIGURA 18.

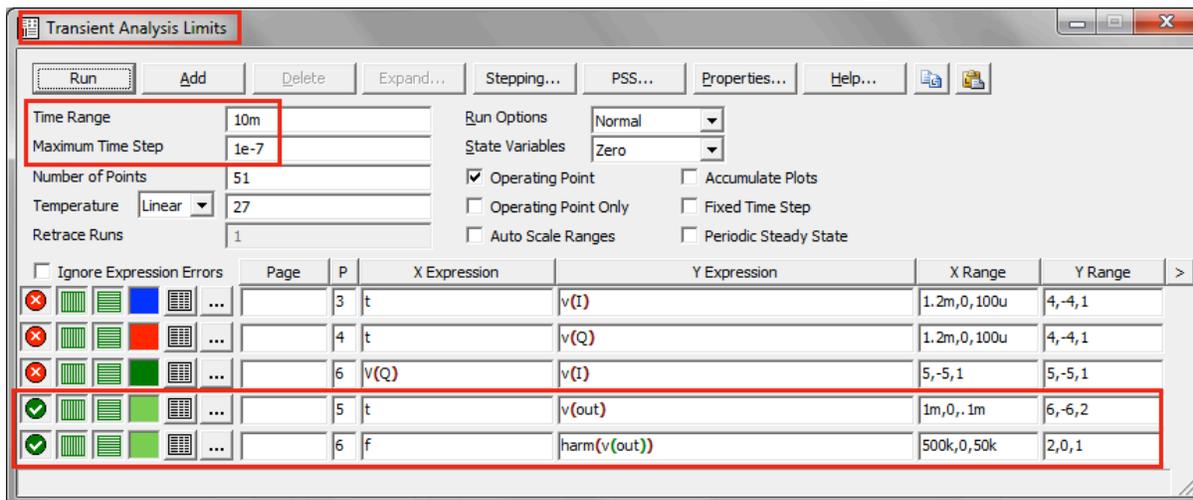


FIGURA 18 Limits dell'analisi Transient

Fatta partire l'analisi si ottengono i grafici di forma d'onda e spettro riportati in FIGURA 19.

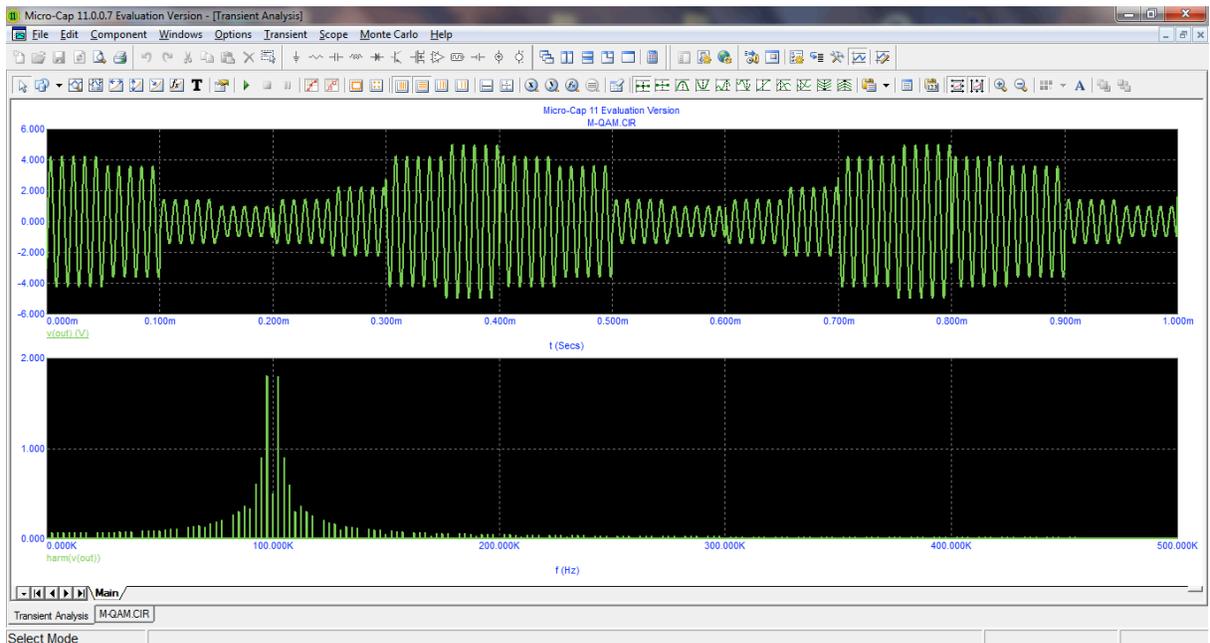


FIGURA 19 Forma d'onda e spettro del segnale di uscita.

Clicchiamo ora su un grafico per verificare le impostazioni dell'analisi di Fourier, selezionando se necessario il numero di punti desiderato, e salviamo la forma d'onda in un file avente estensione .CSV, FIGURA 20.

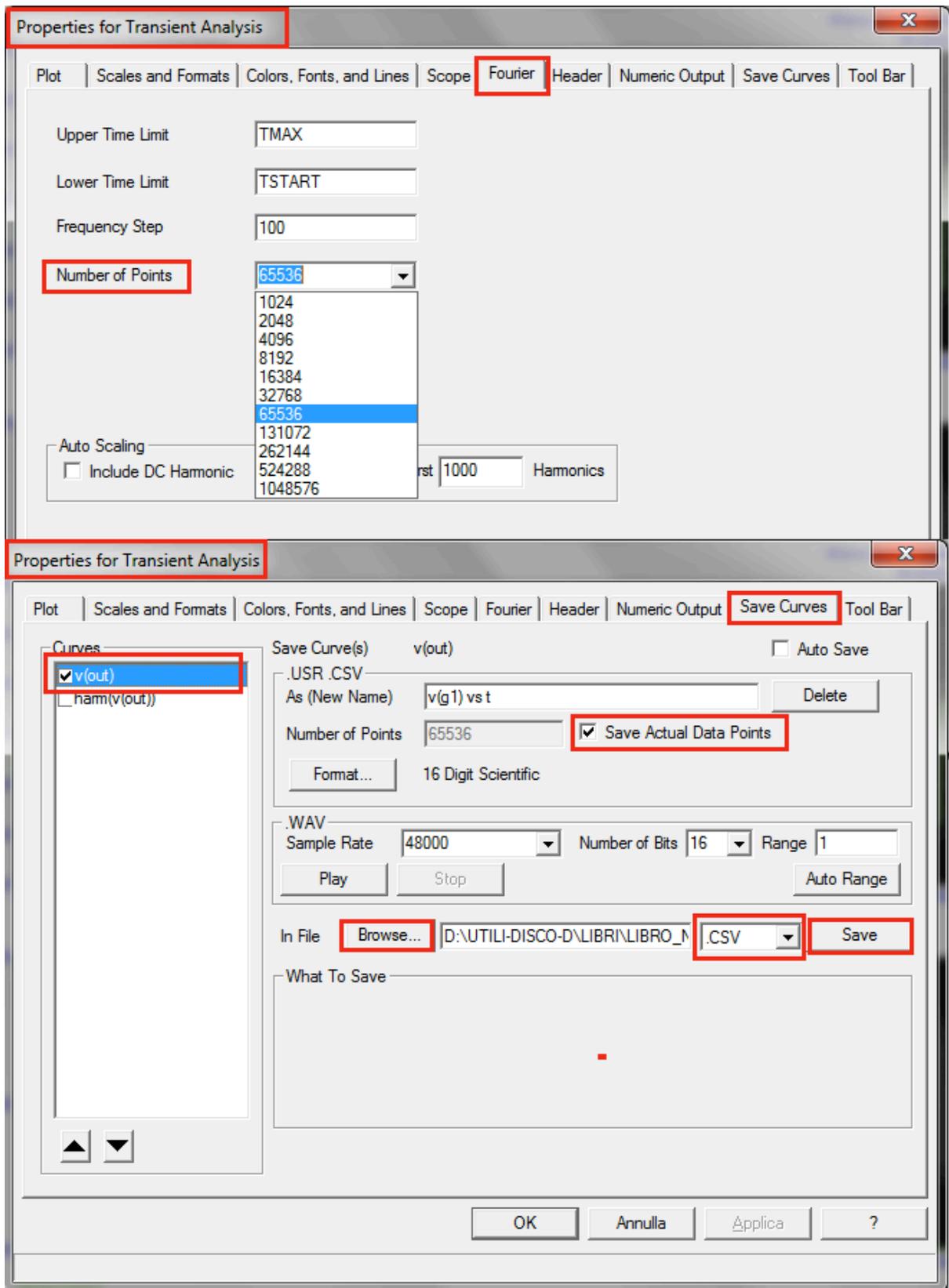


FIGURA 20 Forma d'onda salvata in un file con estensione .CSV

Convertiamo il formato del file in modo che sia leggibile dall'AWG TIEPIE operando nel seguente modo:

- apriamo il file .CSV con LibreOffice (o un altro programma), configurato per utilizzare la virgola come separatore di campo;
- eliminiamo il contenuto della prima colonna;
- inseriamo a sinistra una nuova colonna;
- aggiungiamo il testo **[SCOPE]**, in maiuscolo;
- salviamo mantenendo il formato .CSV;
- apriamo il file con un editor di testo puro (blocco note, wordpad, ecc.)
- eliminiamo le virgole dopo [SCOPE] e le eventuali prime righe che lo precedono (se presenti);
- salviamo con nome imponendo l'estensione .DAT,
- si ottiene così un file leggibile dall'AWG, che è in grado di produrre il segnale fisico corrispondente al segnale simulato, la cui forma d'onda e spettro sono riportati in FIGURA 26.

In questo modo si evidenzia come un segnale possa essere generato digitalmente, in modo software, e attraverso una conversione Digitale/Analogica si possa ottenere da esso un segnale fisico utilizzabile nella pratica.

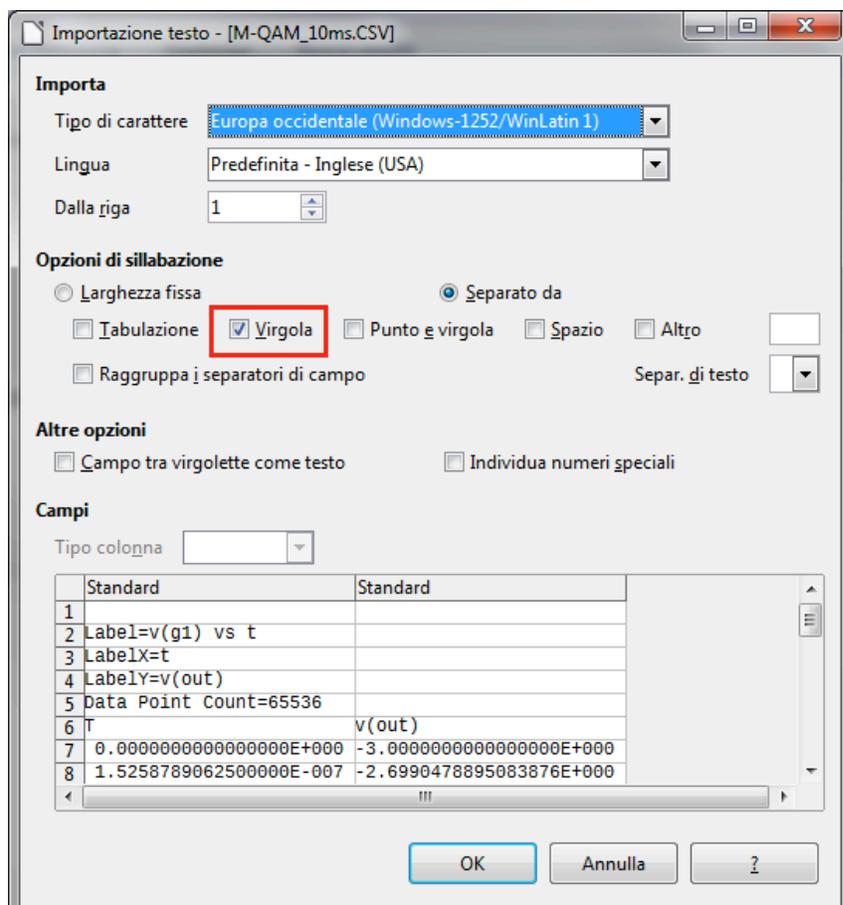


FIGURA 21 Importazione del file .CSV in LibreOffice

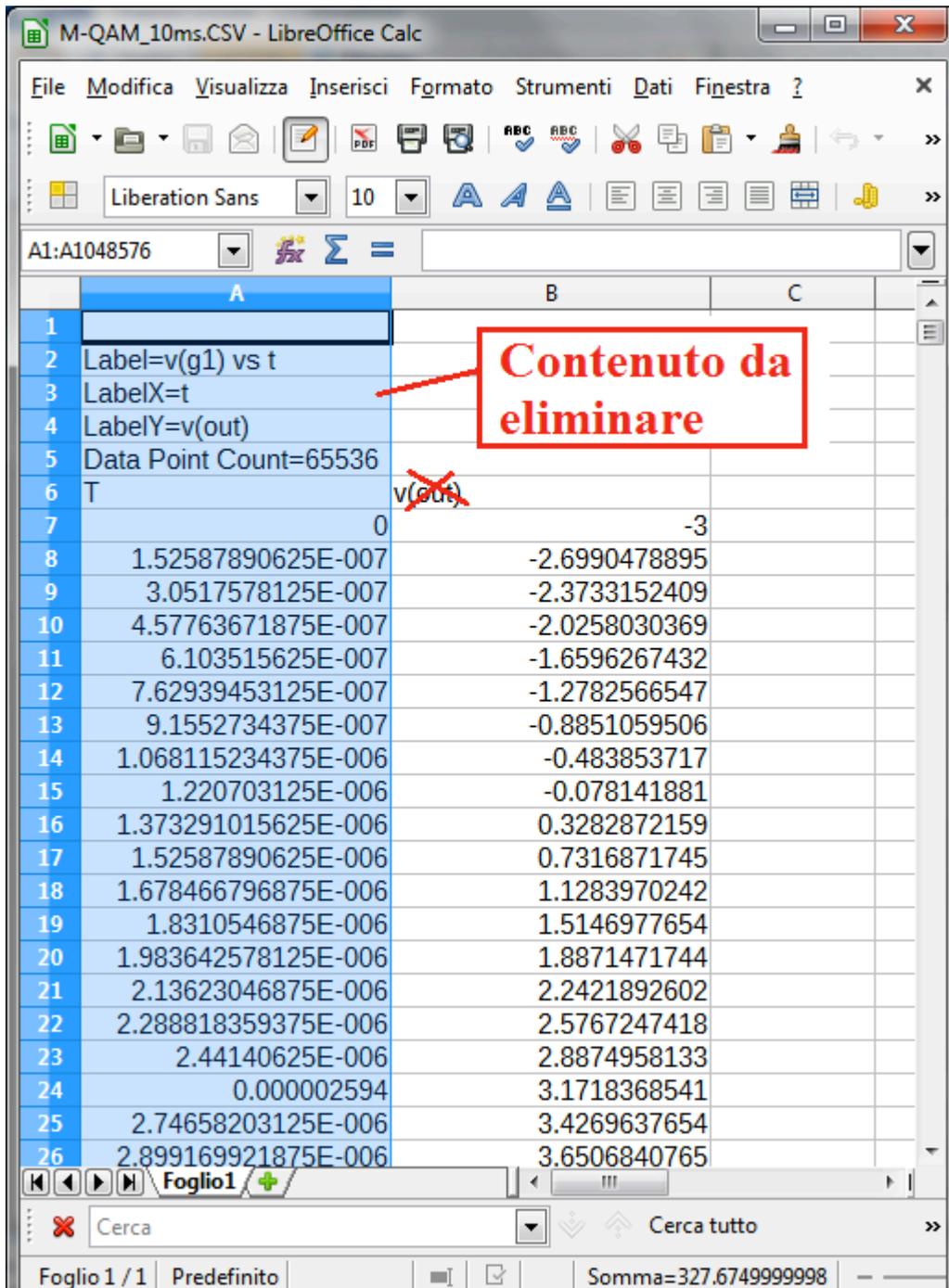


FIGURA 22 File .CSV aperto in LibreOffice e modificato.

M-QAM\_10ms.CSV - LibreOffice Calc

File Modifica Visualizza Inserisci Formato Strumenti Dati Finestra ?

Liberation Sans 20

A1 [SCOPE]

	A	B	C
1	[SCOPE]		
2			-3
3			-2.6990478895
4			-2.3733152409
5			-2.0258030369
6			-1.6596267432
7			-1.2782566547
8			-0.8851059506
9			-0.483853717
10			-0.078141881
11			0.3282872159
12			0.7316871745
13			1.1283970242
14			1.5146977654
15			1.8871471744
16			2.2421892602
17			2.5767247418
18			2.8874958133
19			3.1718368541
20			3.4269637654
21			3.6506840765
22			3.8408186552
23			3.9957198063
24			4.1138900626
25			4.1942970455

Foglio1 / 1 Predefinito Somma=0 110%

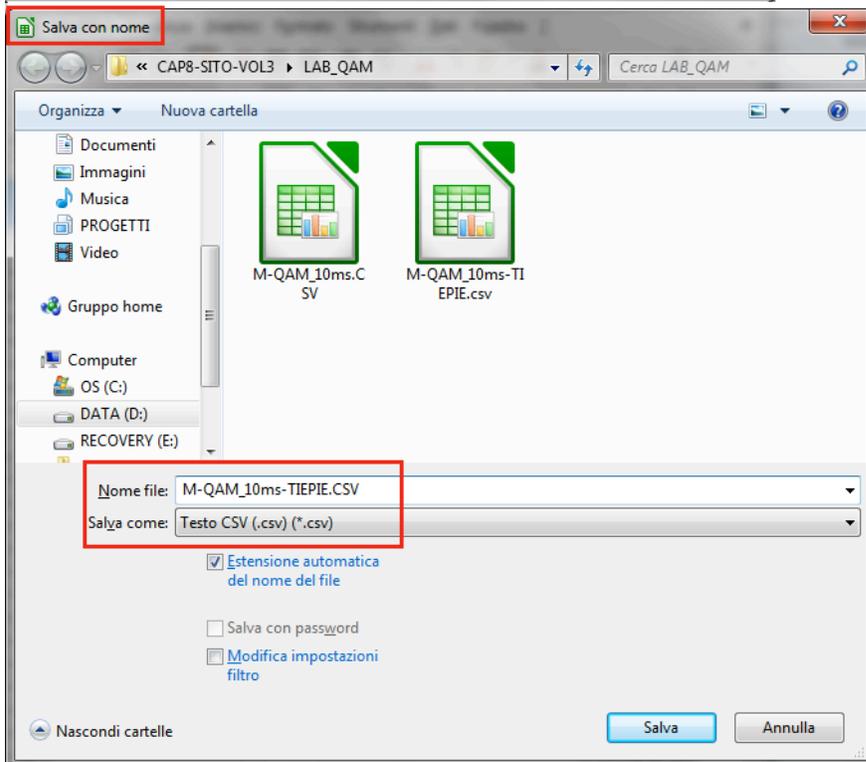


FIGURA 23 Eliminazione dei valori non richiesti dall'AWG Tiepie e aggiunta del testo [SCOPE].

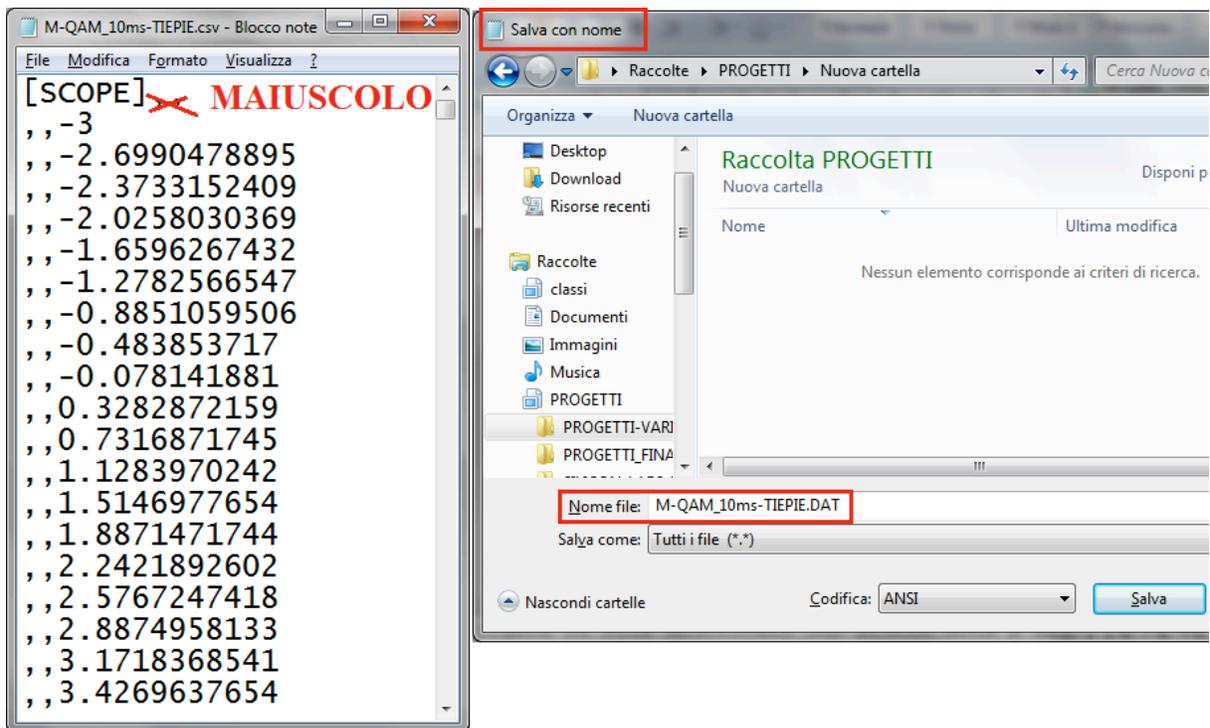


FIGURA 24 File modificato con Blocco Note e salvato in formato .DAT

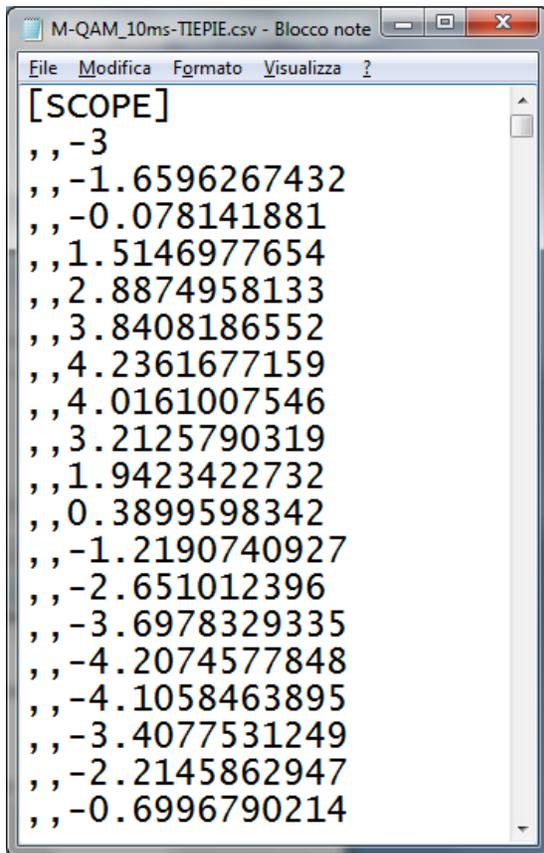


FIGURA 25 File convertito in un formato leggibile dall'AWG Tiepie.

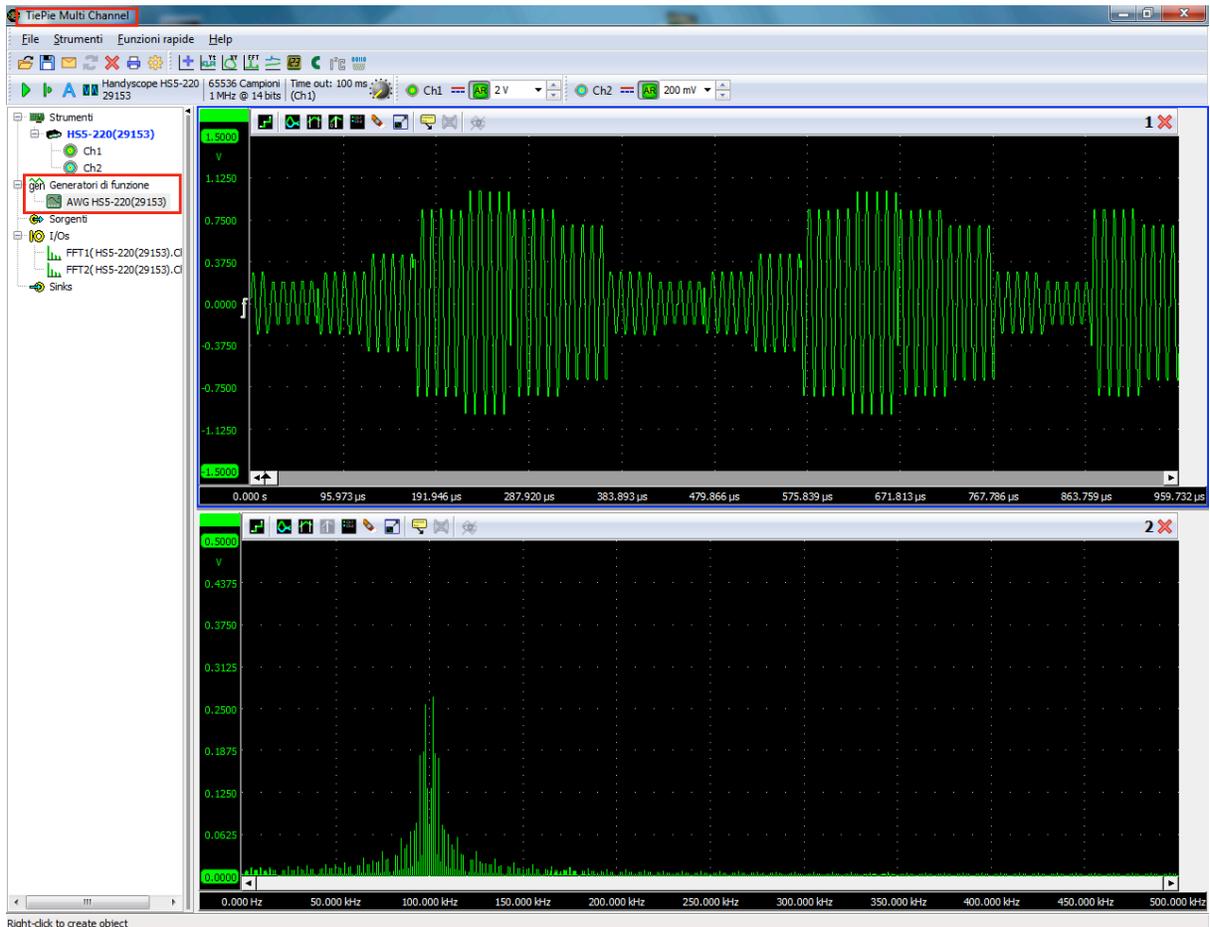


FIGURA 26 Forma d'onda e spettro del segnale fisico prodotto dall'AWG Tiepie HS5