

# Simulation de modulations de fréquence avec le logiciel SPICE

par Bruno VELAY  
Département Mesures Physiques  
IUT - 44600 Saint-Nazaire

---

## RÉSUMÉ

Fonctionnement d'un VCO didactique «tout Ampli-Op», produisant un signal Triangle modulable FM [1].

Méthodes comparées d'obtention de signaux modulés FM par calcul direct, et leurs spectres [4].

Relire [2] et [3] pour les détails techniques concernant le logiciel et son emploi.

## 1. MODULATION DE FRÉQUENCE AVEC VCO DIDACTIQUE

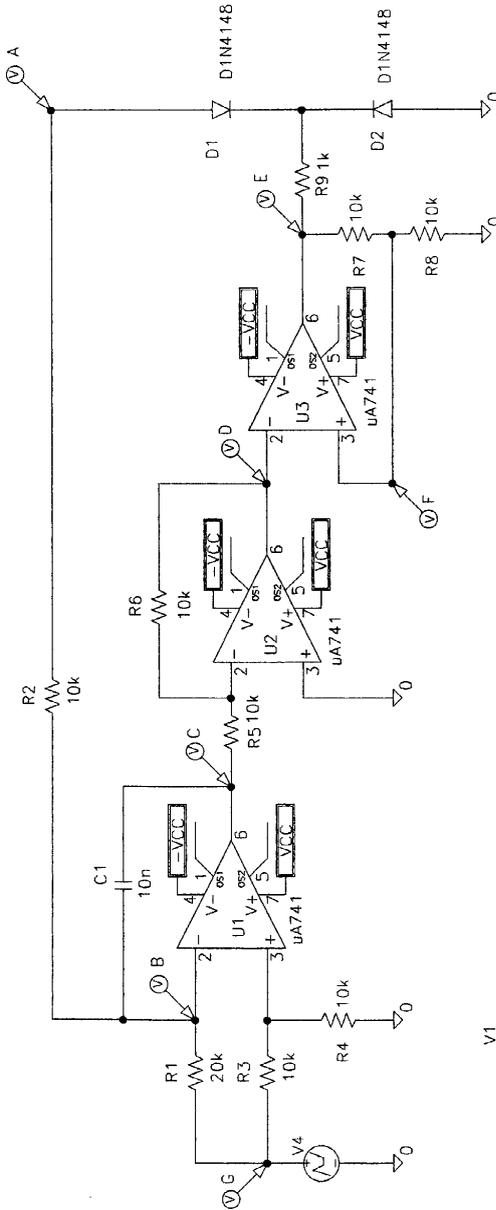
Comme expliqué en [1], un oscillateur commandé en tension (VCO : Voltage Controlled Oscillator) délivre un signal donc la fréquence varie selon la tension de commande.

Le schéma proposé figure 1 est du à Jacques TABUTEAU, Lycée Janson de Sailly à Paris. C'est une habile variante du célèbre oscillateur de relaxation (Intégrateur, Comparateur à Seuil) capable de générer des signaux triangulaires très propres.

La réalisation pratique ne pose aucune difficulté, on emploiera de préférence un quadruple ampli-op type TL 084. Bien entendu, ce montage est purement didactique et n'a aucune vocation industrielle.

### 1.1. Principe du fonctionnement

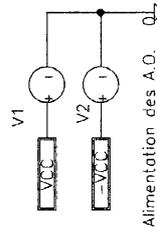
Les graphes présentés figure 2, débutent par le transitoire. Il est possible de l'éluder en ne représentant les fonctions qu'à partir de 2 ms, par exemple.



### OSCILLATEUR COMMANDE EN TENSION

Vc : signal triangulaire, Ve : signal carré

La fréquence de Vc dépend de la tension Vg



Alimentation des A.O.

Figure 1

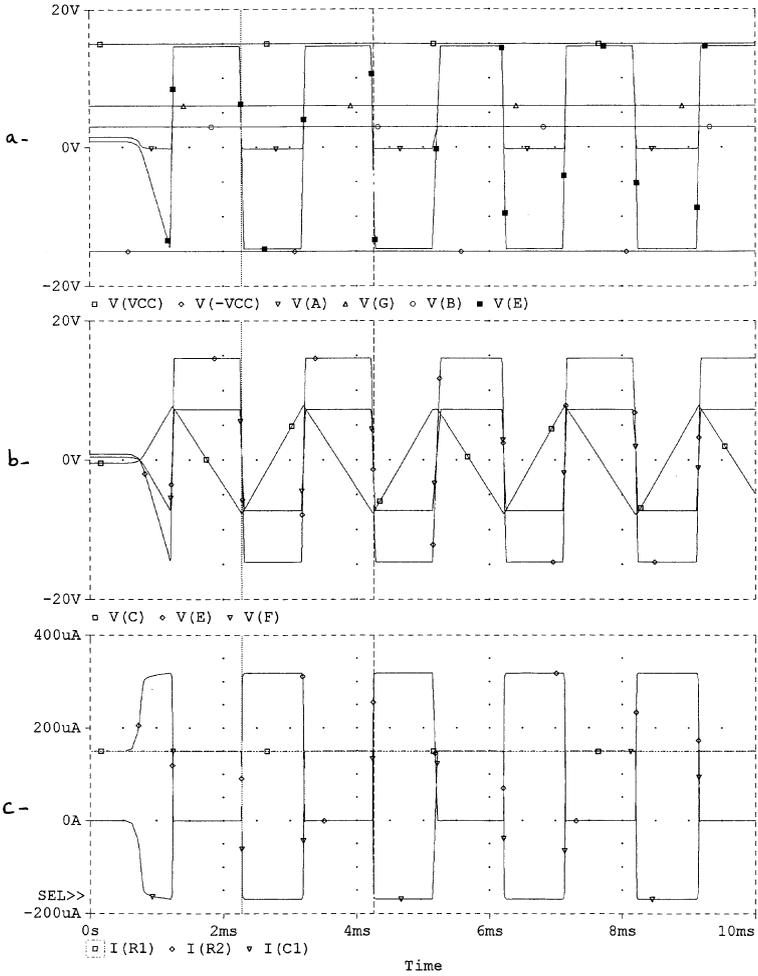


Figure 2

On constate figure 2b que le montage oscille bien, à partir de sources de tensions continues  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$ .  $V_E$  est un signal carré, en sortie de  $U_3$  qui est un comparateur à seuil. Le seuil est réglé à  $V_F$  par un diviseur de tension  $R_7/R_8$ .

$V_C$  est un signal triangulaire (figure 2b). Le courant  $I(C_1)$  dans le condensateur est lui-même carré (figure 2c) :  $U_1$  est un intégrateur particulier puisque le condensateur se charge et se décharge à courant constant, d'où  $V_C$  triangulaire.

Le critère de fin de charge (on décharge) est explicité figure 2b puisque le basculement de  $U_3$  a lieu lorsque  $V_C = V_F$  ; l'inverseur  $U_2$  ( $R_5 = R_6$ ) rétablit le changement de signe créé par l'intégrateur.

Pour l'instant le signal modulant est constant ( $V_G = 6 \text{ V}$ ) (figure 2a).  $V_B$  est aussi constant. En effet :

$$- V_{1+} = V_G \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{V_G}{2},$$

-  $V_{1+} = V_B$  car  $U_1$  est en fonctionnement linéaire.

On note figure 2c que le courant  $I_1$  dans  $R_1$  est constant. Il vaut en effet :

$$V_G - V_B = R_1 I_1 = V_G - \frac{V_G}{2} = \frac{V_G}{2} \quad \text{d'où} \quad I_1 = \frac{V_G}{2R_1}$$

Examinons maintenant le cas de  $R_2$ , si  $V_E = -V_{CC}$  : figure 2a, on note que lorsque  $V_E = -V_{CC}$ , alors  $V_A = 0$ . En effet la diode  $D_2$  est bloquée et la diode 1 compense la chute de tension liée aux seuils des diodes :  $+0,6 - 0,6 = 0 \text{ V}$  !  $R_2$  est alors parcouru par le courant  $I_{2-}$  avec :

$$- R_2 I_{2-} = V_B - V_A = \frac{V_G}{2} - 0,$$

$$- R_2 = \frac{R_1}{2} \quad (\text{c'est fait exprès !}),$$

$$- I_{2-} = \frac{V_G}{2} \times \frac{2}{R_2} = \frac{V_G}{R_1} = 2 I_1.$$

On constate bien figure 2c, que le condensateur est parcouru par  $I_{C-} = I_1 - I_{2-} = I_1 - 2 I_1 = -I_1$  c'est la phase de décharge du condensateur (le choix de l'indicateur  $V_C$  n'est pas très heureux car il correspond à l'opposé de la tension aux bornes du condensateur pris comme un récepteur, cf. rôle de l'inverseur  $U_2$  : on peut tracer  $-V_C$ ).

Examinons le cas de  $R_2$ , si  $V_E = +V_{CC}$  : figure 2a, on note que  $V_A \approx V_E \approx +V_{CC}$  dans ce cas, mais la diode  $D_1$  bloque le courant car  $V_A > V_B$ . Donc  $I_{1+} \approx 0$  (figure 2c) le condensateur se charge alors avec  $I_{C+} = I_1 - I_{2+} = I_1 - 0 = I_1$ .

### Calcul de la période :

– pendant une demi période, le condensateur voit sa tension varier de :

$$\Delta V_C = \frac{V_{CC}}{2} - \left( -\frac{V_{CC}}{2} \right) = V_{CC}$$

– pendant ce temps, il emmagasine la charge :

$$Q = I_C \frac{T}{2} = \frac{V_G}{2 R_1} \times \frac{T}{2}$$

– or  $\Delta V_C \times C = Q$  pour un condensateur,

– donc :

$$T = \frac{4 R_1}{V_G} \times V_{CC} \times C = 4 R_1 C \frac{V_{CC}}{V_G}$$

*Application numérique* :  $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 10 \text{ nF}$ ,  $V_{CC} = +15 \text{ V}$ ,  $V_G = +6 \text{ V}$   
d'où  $T = 2 \text{ ms}$ . A l'aide des curseurs figure 2c, on mesure  $T = 1,98 \text{ ms}$ .

### 1.2. Modulation par une rampe de tension

En faisant varier la tension de commande  $V_G$ , on constate figure 3 que le fréquence des signaux  $V_E$  et  $V_C$  augmente avec  $V_G$  conformément au calcul précédent. Des simulations détaillées pour différentes valeurs de  $V_G$  fixées permettraient de déterminer la relation Tension / Fréquence du VCO, en volt par décade.

On constatera d'ailleurs que la variation de fréquence est limitée. Pratiquement on constatera aussi une légère dépendance de l'amplitude. Les circuits intégrés spécialisés sont plus performants [1].

### 1.3. Choix des paramètres [2]

Analysis \ Setup \ Transient :

- Print Step : 500 us,
- Final Time : 60 ms (ou 10 ms selon),
- Step Ceiling : 500 us.

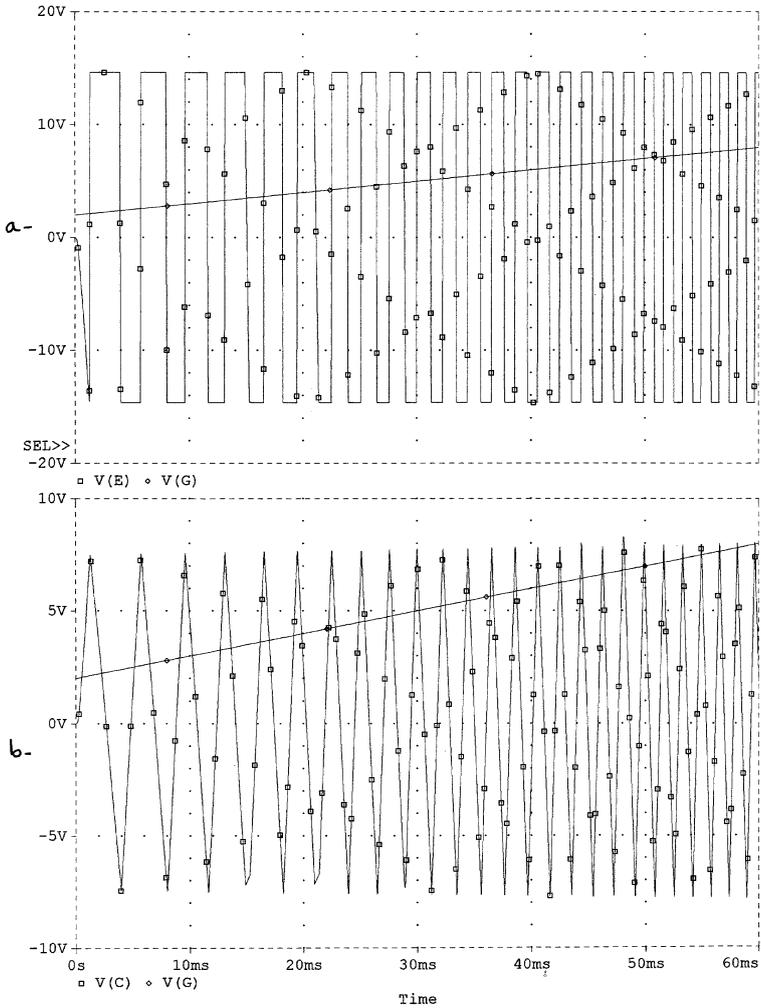


Figure 3

La source modulante  $V_4$  est de type VPWL (pour Piecewise linear) : en bref, le signal de votre choix est défini par morceau.

Pour la figure 2 :

AC :      DC :  
 $T_1 = 0$      $V_1 = 6$     signal continu  
 $T_2 = 0,1$     $V_2 = 6$

Pour la figure 3 :

AC :      DC :  
 $T_1 = 0$      $V_1 = 2$     signal de rampe  
 $T_2 = 0,1$     $V_2 = 12$

## 2. MÉTHODES COMPARÉES DE CALCULS

Le principe consiste à utiliser soit une source spécifique de tension SFFM, soit les possibilités de calcul et de graphisme du module PROBE [2].

### 2.1. La source VSFFM est disponible dans SOURCE.SLB (pour «Single Frequency, Frequency Modulation»)

Exemple de paramétrage :

- VO (offset) : **0**,
- VA (amplitude de la porteuse) : **5 (V)**,
- FC (fréquence de la porteuse sinusoïdale) : **20 k (Hz)**,
- MOD (indice de modulation  $\beta$ ) : **5**,
- FM (fréquence du signal modulant sinusoïdal) : **1 k (Hz)**.

En prenant exemple sur [2], il suffit de relier la source à la masse analogique et à une résistance de 100 k $\Omega$ .

### 2.2. La simulation d'une source modulante VSIN [2]

Réglée à AC : **1 (V)** et F : **1 k (Hz)** permet de plus de disposer de la variable **Time**. Pour les tracés correspondants, il suffit de demander : TRACE \ ADD puis de taper une des commandes :

$$S * \cos(2 * 3.14 * 20 K * TIME + 5 * V \text{ source})$$

$$S * \cos\left(2 * 3.14 * 20 K * TIME + 5 * \sin(2 * 3.14 * 1 k * TIME)\right)$$

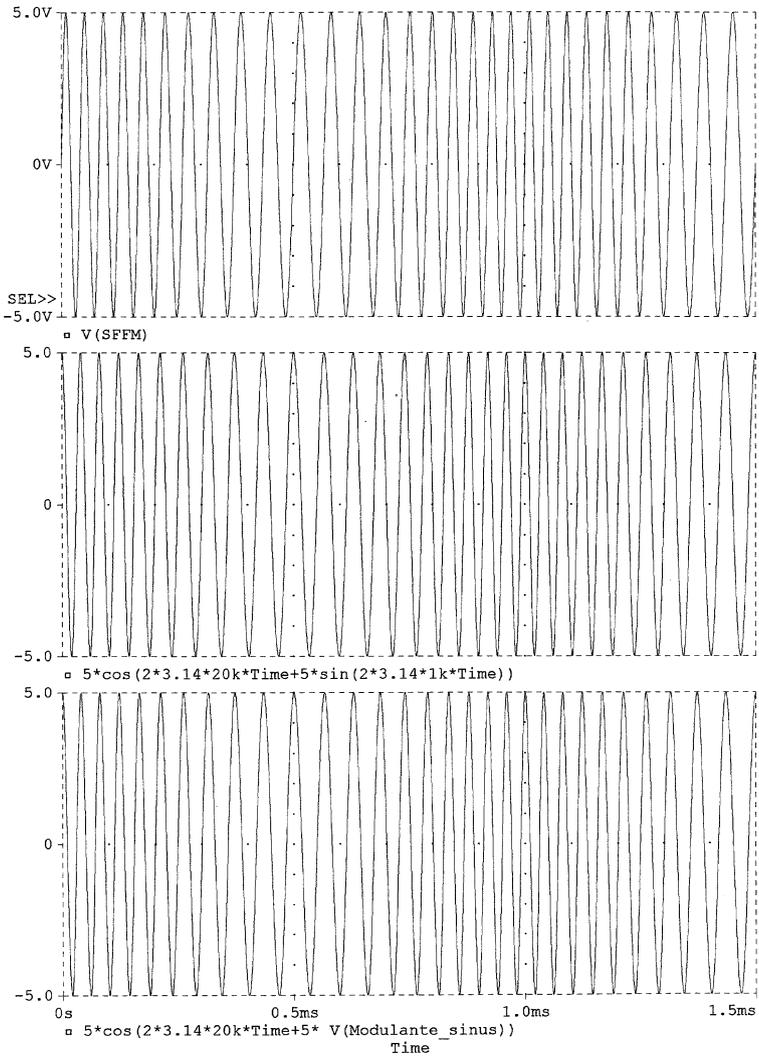


Figure 4

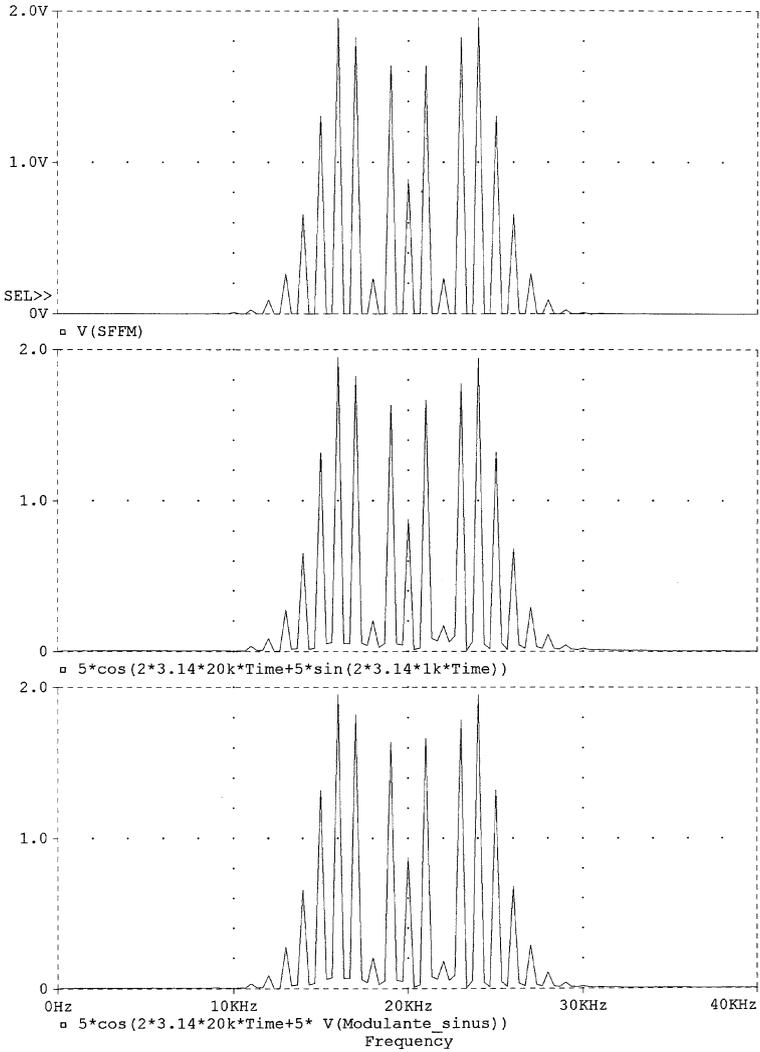


Figure 5

On obtient ainsi les graphes similaires figure 4 et leurs spectres figure 5. L'interprétation s'en fera à l'aide des articles concernés [1] et [4]. Les méthodes sont cohérentes.

On peut aussi souhaiter faire varier l'indice de modulation (figures 6 et 7) :

- $\beta = 0,24$  donne un signal peu lisible mais un spectre proche de la modulation d'amplitude,
- $\beta = 0,24$  donne un signal plus convaincant. Le spectre montre bien la disparition de la porteuse dans ce cas particulier :  $|J_0(2,4)| = 0$  [1],
- $\beta = 24$  donne un signal surmodulé. Ça ne va plus ! Le spectre n'est d'ailleurs plus symétrique par rapport à  $f_p$ .

### 2.3. Paramétrages

Analysis \ Setup \ Transient :

- Print Step : 500 ns,
- Final Time : 3 ms,
- Step Ceiling : 500 ns.

**Remarque :** Il faut de nombreux points pour des spectres de qualité. Le calcul est donc plus long.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. VELAY, «*Introduction à la modulation*», chapitre 4., dans le B.U.P. n° 771, février 1995, p. 229.
- [2] Détails techniques en annexe de «*Simulation d'une modulation d'amplitude avec le logiciel PSPICE*», par B. VELAY, dans le B.U.P. n° 771, février 1995, p. 297.
- [3] S. GAZAIX, «*La simulation électronique avec SPICE*», dans le B.U.P. n° 771, février 1995, p. 373.
- [4] R. MOREAU, «*Moduler en fréquence...*», dans ce numéro p. 441.

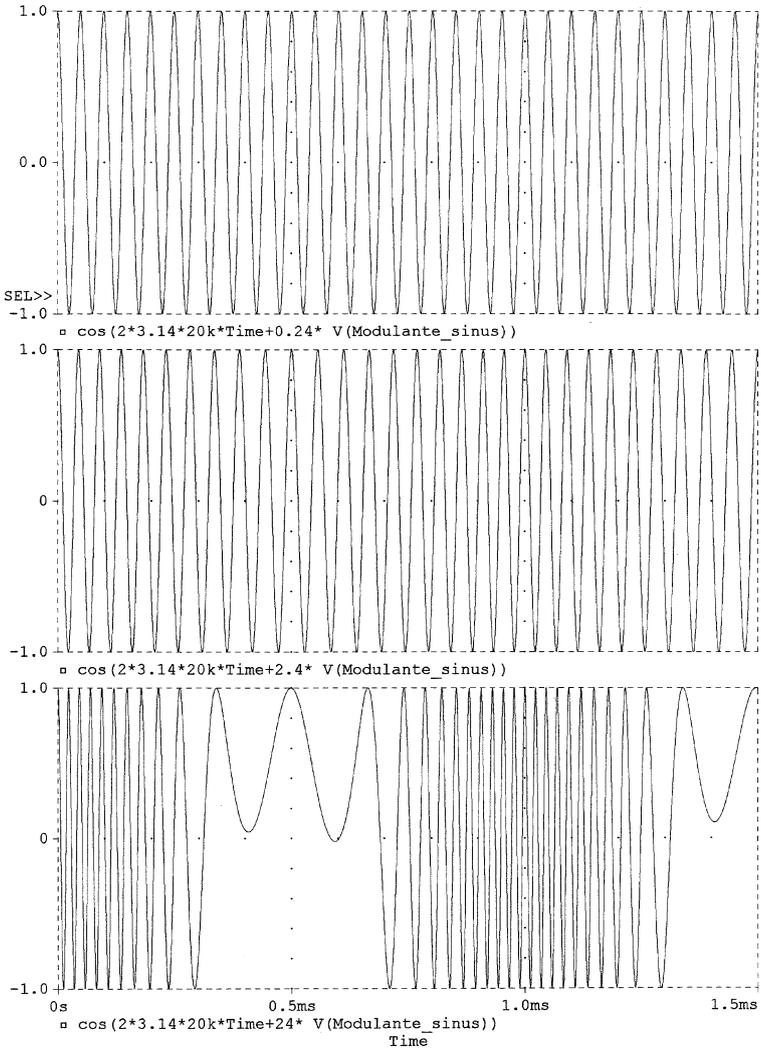


Figure 6

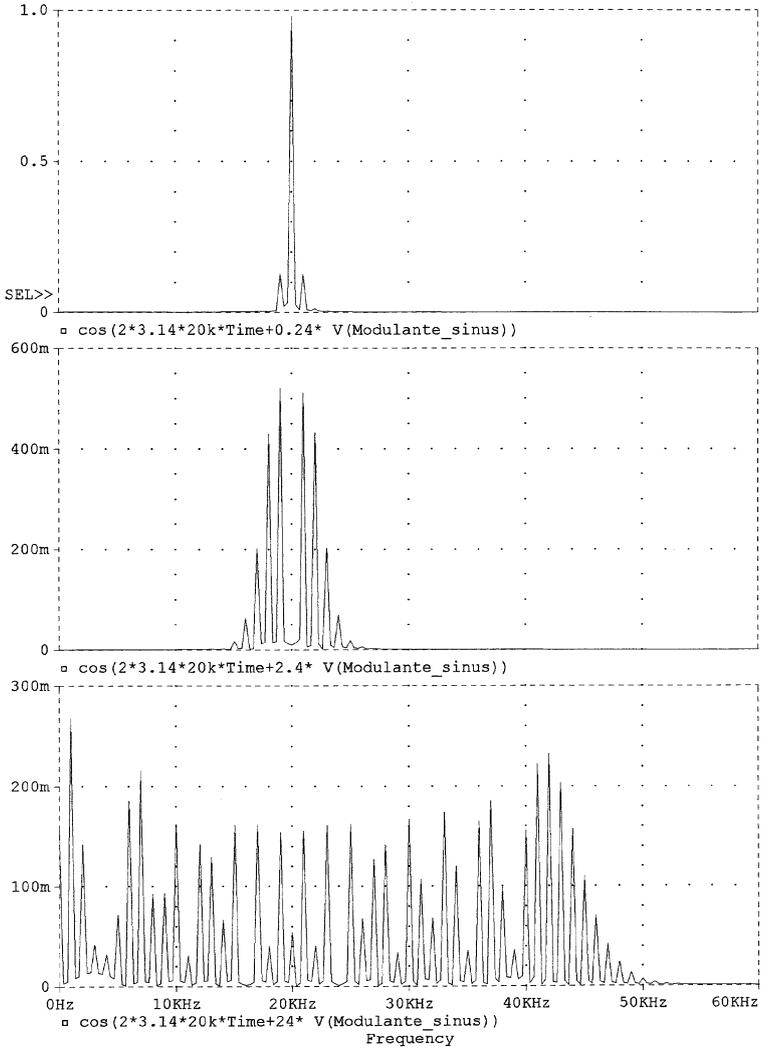


Figure 7