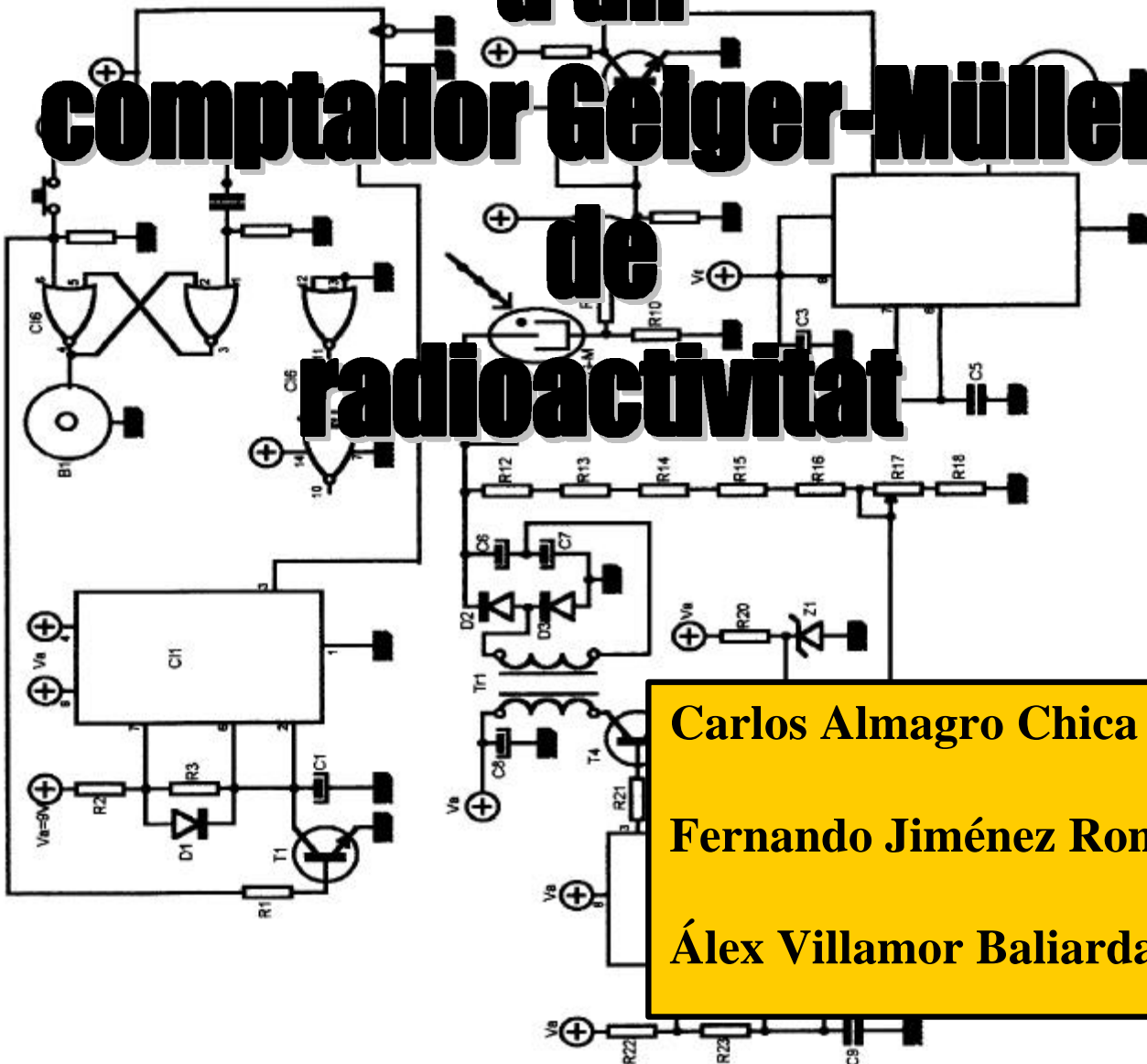


Disseny i construcció d'un

comptador Geiger-Müller de radioactivitat



Carlos Almagro Chica
Fernando Jiménez Romera
Álex Villamor Baliarda

Índex

	pàgina
1.- Objectius.	3
2.- Motivacions.	3
3.- Radioactivitat.	3
4.- El tub Geiger-Müller.	5
5.- Disseny d'el comptador emprant un tub comercial.	7
5.1- Descripció general del circuit.	7
5.2- Selecció del tub.	8
5.3- Disseny del convertidor d'alta tensió.	9
5.4- Amplificació dels impulsos.	13
5.5- Eixamplament dels impulsos i senyal acústic.	15
5.6- Comptador digital.	17
5.7- Alarma.	17
5.8- Esquema complet del circuit.	20
5.9- Llista de components.	21
6.- Muntatge del prototip.	22
7.- Conclusions.	23
8.- Bibliografia i programaris.	23
9.- Agraïments.	24
10.- Fotografies.	25

1.- Objectius.

L'objectiu del nostre treball era intentar dissenyar i construir un comptador Geiger-Müller de radioactivitat.

2.- Motivacions.

Havíem d'escollir algun tema pel "Treball de Recerca" de 2n. de Batxillerat i volíem que fos d'Electrònica.

Al laboratori de Física hi havia un comptador Geiger-Müller didàctic que no funcionava. Primer havíem pensat en arreglar-lo però el nostre tutor ens va dir que era millor dissenyar un circuit completament nou i que fos portàtil. En realitat el comptador espatllat era tant vell que portava una làmpada tríode.

3.- Radioactivitat.

La radioactivitat va ser descoberta per casualitat per Antoine Henri Becquerel al febrer del 1896, mentre estudiava la fluorescència dels minerals d'urani i gràcies a que aquests van velar una placa fotogràfica en absència de llum.



Antoine Henri Becquerel descobridor de la radioactivitat (1852-1908)

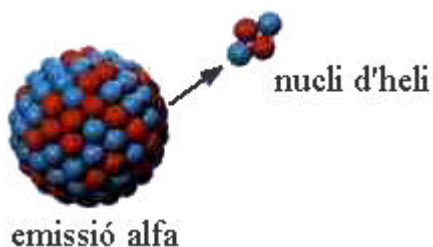
En general les radiacions poden ser ones o partícules i suposen un transport d'energia i de quantitat de moviment.

Les radiacions que constitueixen la radioactivitat s'anomenen radiacions ionitzants (juntament amb els raigs X i la llum ultraviolada) per que provoquen que els materials que travessen guanyin o perdin electrons formant ions.

Quant a la radioactivitat "natural" que és la que més incidència té sobre les persones i el medi ambient en general, pot ser de tres tipus:

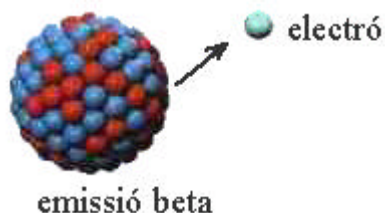
Radiació alfa (α).

Els raigs α són nuclis d'heli que es mouen a gran velocitat. Tenen massa i càrrega elèctrica positiva. Es poden desviar per camps elèctrics i magnètics. Tenen poca capacitat de penetració en els objectes: un paper de fumar ja els atura.



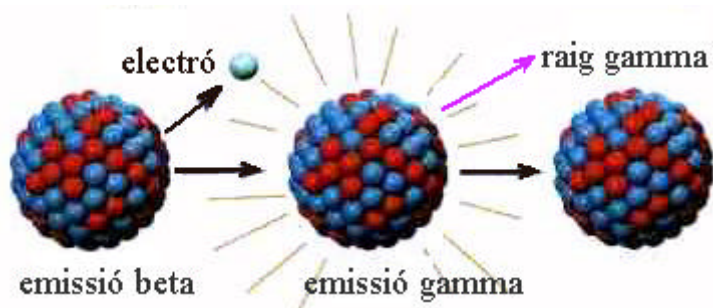
Radiació beta (β).

Els raigs β són electrons que es mouen a gran velocitat. Tenen una massa molt petita i càrrega elèctrica negativa. Es poden desviar fàcilment mitjançant camps elèctrics i magnètics. Tenen un poder de penetració molt superior al dels raigs α que depèn de la seva energia: poden penetrar alguns mil·límetres en els metalls i alguns metres a l'aire. S'originen quan un neutró es transforma en un protó més un electró en el nucli.



Radiació gamma (γ).

Els raigs gamma no són partícules si no ones electromagnètiques, per tant no tenen ni massa ni càrrega elèctrica i no es poden desviar per camps elèctrics ni magnètics.



El seu poder de penetració és molt superior al de les partícules β ja que s'absorbeixen gradualment: uns centímetres de formigó o uns mil·límetres de plom només els redueixen a la meitat. S'emeten quan un nucli "excitat" (després d'emetre una partícula beta) retorna a l'estat fonamental i radia l'excés d'energia en forma d'un fotó gamma.

Les reaccions nuclears, ciclotrons... produeixen altres radiacions a més de les ja descrites: neutrons, positrons, neutrins... i constitueixen la radioactivitat artificial.

4.- El tub Geiger-Müller.

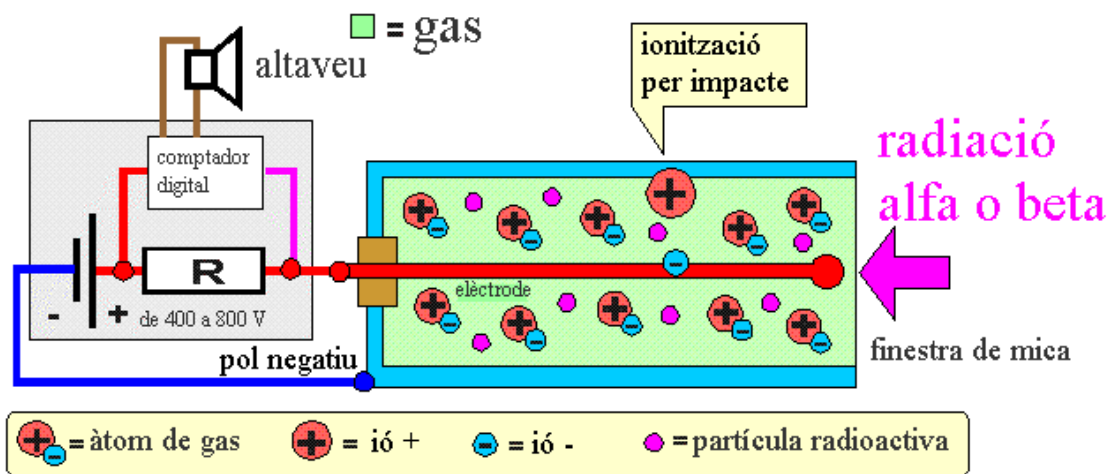
Va ser inventat per Hans Geiger (1882-1945) i W. Müller (1905).



Hans Geiger (1882-1945)

Consisteix en un cilindre metàl·lic ple d'un gas noble i un halògen i amb un elèctrode central aïllat del cilindre que generalment té la punta en forma d'una bola petita. S'aplica una diferència de potencial entre 400 i 800 V entre l'elèctrode central (connectat al pol positiu) i el cilindre (connectat al pol negatiu). En els models més sensibles el cilindre conté una "finestra" de mica en un extrem. Si aquesta finestra és molt prima el tub pot detectar partícules alfa i beta de baixa energia. Si és més gruixuda ja només pot detectar partícules beta d'energia mitjana i si no té finestra, només partícules beta d'alta energia. Tots els models poden detectar raigs gamma per que són detectats gràcies al mateix cilindre metàl·lic. Els raigs gamma no interaccionen amb el gas del cilindre però quan travessen el cilindre alliberen electrons al seu l'interior els quals sí que interaccionen amb el gas. Per a fer que el tub sigui més sensible a la radiació gamma generalment es recobreix de plom.

Normalment el tub no condueix però quan una partícula radioactiva xoca contra els àtoms del gas interior, es formen ions i electrons que fan que el tub es torni conductor produint un impuls de corrent. L'halògen s'encarrega d'absorbir els fotons ultraviolats que es produeixen en aquest procés i evita que el tub continuï conduint sense parar. Així doncs si la tensió aplicada al tub és la correcta, cada partícula incident origina un impuls de corrent molt breu que apareix en forma d'impuls de tensió en extrems de la resistència R. Aquest impuls, un cop amplificat, es pot comptar en un comptador digital o pot fer sonar un altaveu.



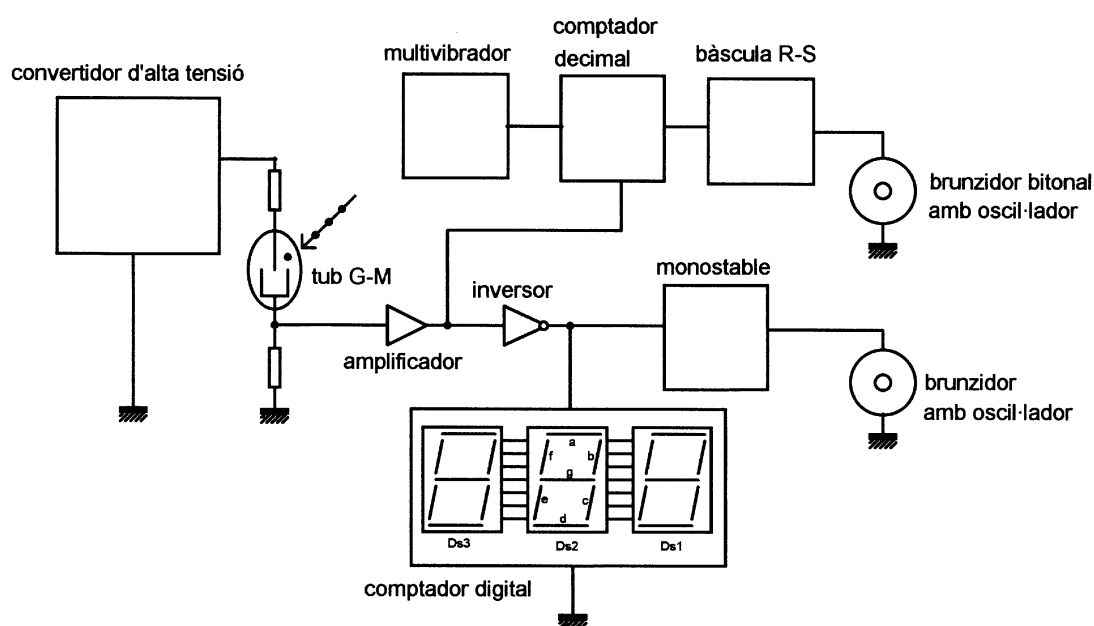
5.- Disseny del comptador emprant un tub comercial.

5.1.- Descripció general del circuit.

Més endavant es justificarà i calcularà els components utilitzats. A grans trets el circuit funciona de la manera següent:

- a) El convertidor d'alta tensió s'encarrega d'eleva la tensió de la pila de 9 V a 575 V necessaris per a que el tub utilitzat funcioni correctament.
- b) L'amplificador amplifica els impulsos baixant la impedància de manera que s'hi pugui connectar els comptadors, monostables... sense afectar el funcionament del tub.
- c) L'inversor dóna un impuls de "baixada" quan a la sortida de l'amplificador n'hi ha un de "pujada".
- d) El comptador digital compta els impulsos que li dóna l'inversor i és el que s'utilitza per a fer les mesures de radioactivitat.
- e) Els impulsos que dóna el tub G-M són massa "estrets" per a fer sonar el brunzidor, el monostable s'encarrega d'eixamplar-los.
- f) La alarma per a controlar el nivell de radioactivitat ambient consta d'un comptador decimal que compta els impulsos. El multivibrador s'encarrega de que el comptador compti durant un minut. Passat aquest temps posa el comptador a "zero" (reset). Si durant aquest minut el nivell de radioactivitat ha superat o igualat el nombre d'impulsos seleccionat al comptador decimal, s'activa la bàscula R-S i el brunzidor bitonal no para de sonar fins que es prem un polsador. En cas contrari el brunzidor no sona.

Cal aclarir que el comptador digital i el decimal funcionen independentment.



5.2- Selecció del tub.

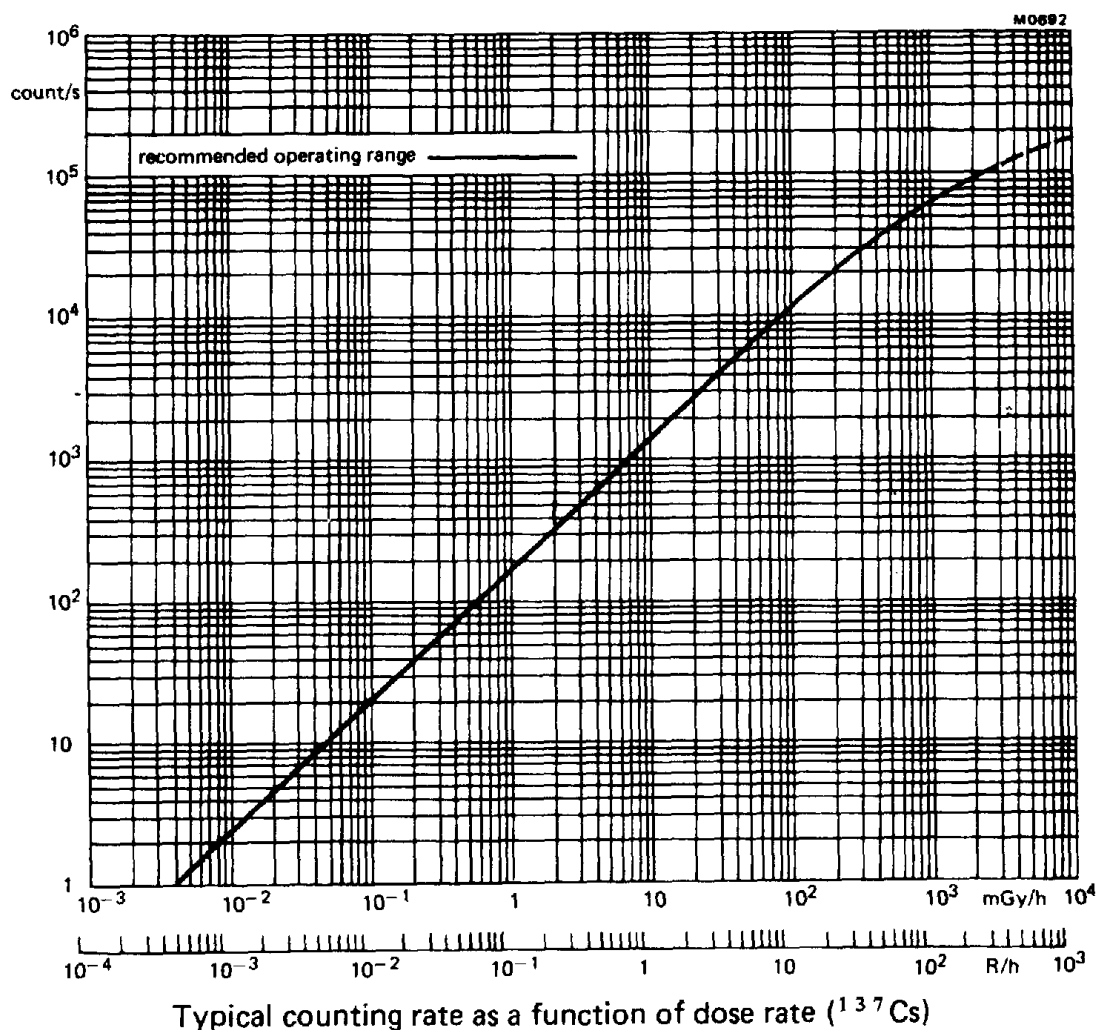
Els tub s'hauria d'escollir en funció de la sensibilitat que es necessités i de l'energia de les radiacions que es volgués detectar.

Els tubs amb finestra de mica eren massa cars així és que no vam tenir cap més remei que utilitzar el tub més econòmic: un ZP1310 de Philips (unes 7000 PTA). Per desgràcia aquest tub és poc sensible: uns 2 impulsos per minut amb la radioactivitat ambient. Un tub amb finestra de mica seria 20 vegades més sensible o més. De totes maneres donava 870 impulsos per minut amb un pot sense obrir de plàstic de 25g de nitrat d'uranil i 1720 impulsos per minut amb una font de radi de 3,3kBq.

Segons el fabricant, aquest tub es pot utilitzar per a dosis de radioactivitat entre $4 \cdot 10^{-3}$ i $3 \cdot 10^3$ mGy/h.

Detecta els raigs beta d'energia superior a 0,5 MeV i els gamma. Com que no té finestra no detecta els raigs alfa.

El fabricant dóna un gràfic de calibratge:

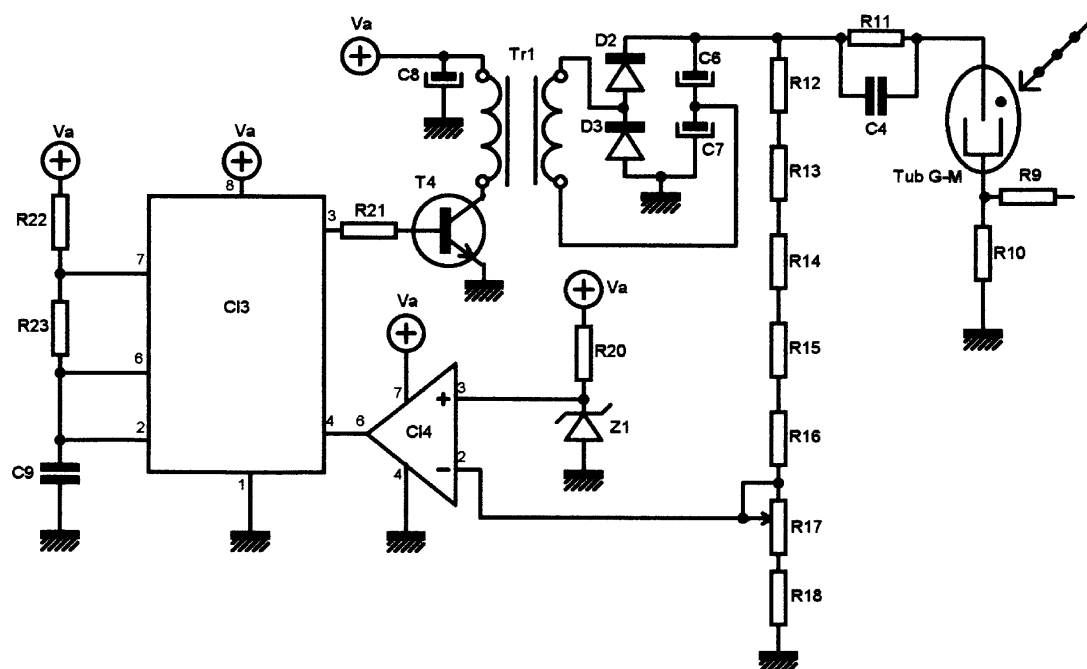


5.3- Disseny del convertidor d'alta tensió.

Volíem alimentar el comptador a 9 V per a que fos portàtil. El fabricant ens donava el valor de R11, C4, R10 i que la tensió òptima de funcionament del tub era 575 V.

Com podíem obtenir 575 V estabilitzats a partir d'una pila de 9 V?

Un transformador de 9V a 220V ens pot donar una tensió de pic de 311 V. Si la doblem amb un duplicador de tensió de dos díodes i dos condensadors (D2, D3, C6, C7) no solament la tindrem rectificada si no que a més arribarà a 622 V i si el primari del transformador és de 6 V en comptes de 9 V, encara disposarem de més tensió.

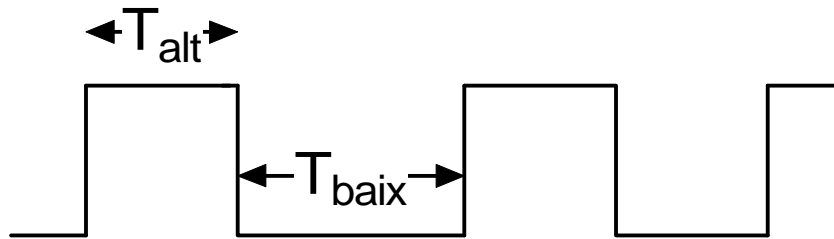


Com que un transformador només funciona amb corrent altern o amb impulsos calia alimentar el primari amb un transistor. Vam escollir un BD679 que té una "beta" elevada (>750), un tensió màxima col·lector-emissor de 80 V, una intensitat màxima de 4 A i una potència màxima de 40 W (no feia cap falta que suportés tanta potència).

Els impulsos es podien obtenir de diferents maneres però ens va semblar més fàcil utilitzar un temporitzador: el 555 o el 7555. Ens vam decidir pel 7555 que és més modern i ens estalviàvem un condensador en el circuit.

La freqüència dels impulsos no podia ser massa alta pel fet de que el transformador porta un nucli de ferro. Uns 300 Hz semblava una freqüència adequada. Ara calia calcular els valors de R22, R23 i C9.

El funcionament intern d'un 7555 és una mica complicat però es pot resumir dient que la càrrega del condensador (T_{alt}) es fa a través de R22 en sèrie amb R23 i la descàrrega (T_{baix}) té lloc només per R23. Tant la càrrega com la descàrrega es fan entre $1/3$ del voltatge d'alimentació i $2/3$ del voltatge d'alimentació, de manera que la freqüència és independent del voltatge. Els impulsos tenen la forma que es veu a continuació:



T_{baix} es calcula emprant la fórmula de la descàrrega d'un condensador, tenint en compte que el voltatge màxim correspon al d'alimentació V_a :

$$V = V_a e^{-T/RC}$$

$$\frac{1}{3}V_a = \frac{2}{3}V_a e^{-T_{baix}/RC}$$

$$1 = 2e^{-T_{baix}/RC}$$

$$\ln \frac{1}{2} = \frac{-T_{baix}}{RC}$$

$$T_{baix} = RC \ln 2$$

$$R = \frac{T_{baix}}{C \ln 2}$$

T_{alt} es calcula de manera semblant a partir de la fórmula de la descàrrega del condensador:

$$V = V_{m\grave{a}x} (1 - e^{-T/RC})$$

$$\frac{1}{3}V_a = \frac{2}{3}V_a (1 - e^{-T_{alt}/RC})$$

$$1 = 2(1 - e^{-T_{alt}/RC})$$

$$T_{alt} = RC \ln 2$$

$$R = \frac{T_{alt}}{C \ln 2}$$

Per a $F = 300Hz$ el període és $T = 3,33 \cdot 10^{-3} s$

$$\text{Agafant } T_{alt} \approx T_{baix} = \frac{3,33 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,67 \cdot 10^{-3} s$$

i $C = C9 = 100nF$, es pot calcular $R23$:

$$R23 = \frac{1,67 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-9} \ln 2} = 24000\Omega \approx 22k\Omega$$

No fa falta calcular $R22$, n'hi ha prou que sigui 10 vegades més petita que $R23$ (només farà variar el temps de càrrega en un 10% respecte

al valor previst i en aquest cas no té cap importància). Així doncs $R_{22}=2,2k\Omega$.

Ara cal regular i estabilitzar la tensió de sortida. Aquesta tensió és massa alta per a "control·lar-la" directament. Fem un divisor de tensió amb 5 resistències de $10M\Omega$ (R12, R13, R14, R15, R16), una resistència d'ajust de $250k\Omega$ (R17) i una resistència de $330k\Omega$ (R18). La tensió del divisor es compara, mitjançant un amplificador operacional Bi-MOS CA3130 (CI4), amb la tensió d'un zéner de $4,7V$ (Z1). Si la tensió del divisor és inferior a la del zéner, hi ha un "1" aplicat al terminal 4 del CI3 de manera que oscil·la i l'alta tensió va augmentant. En el moment que la tensió del divisor supera lleugerament la del zéner, hi ha un "0" aplicat al terminal 4 de CI3, aquest deixa d'oscil·lar i l'alta tensió ja no augmenta.

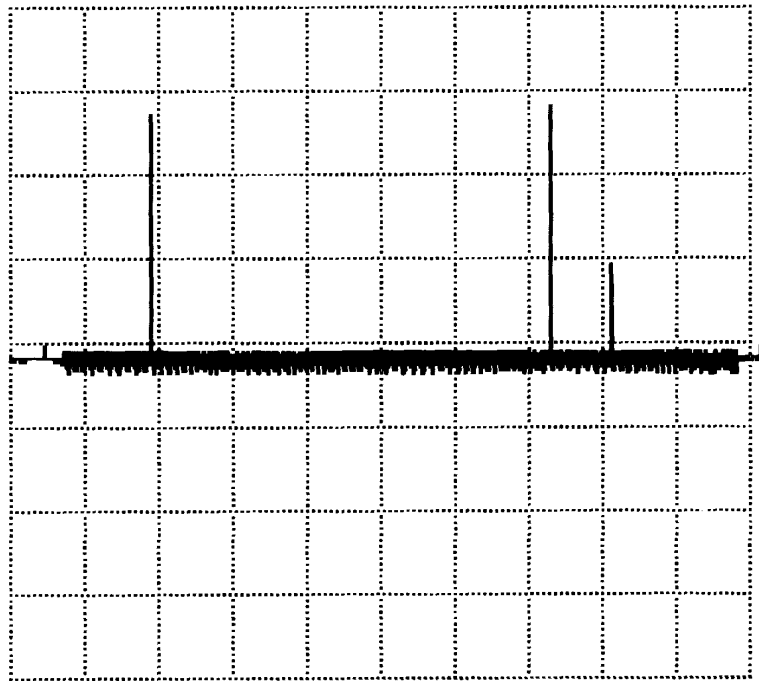
Com que R17 es pot ajustar entre 0 i $250k\Omega$, el voltatge de l'alta tensió es podrà regular entre:

$$V_{\text{mínim}} = \frac{4,7 \cdot (330 \cdot 10^3 + 250 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^7)}{330 \cdot 10^3 + 250 \cdot 10^3} = 410V$$

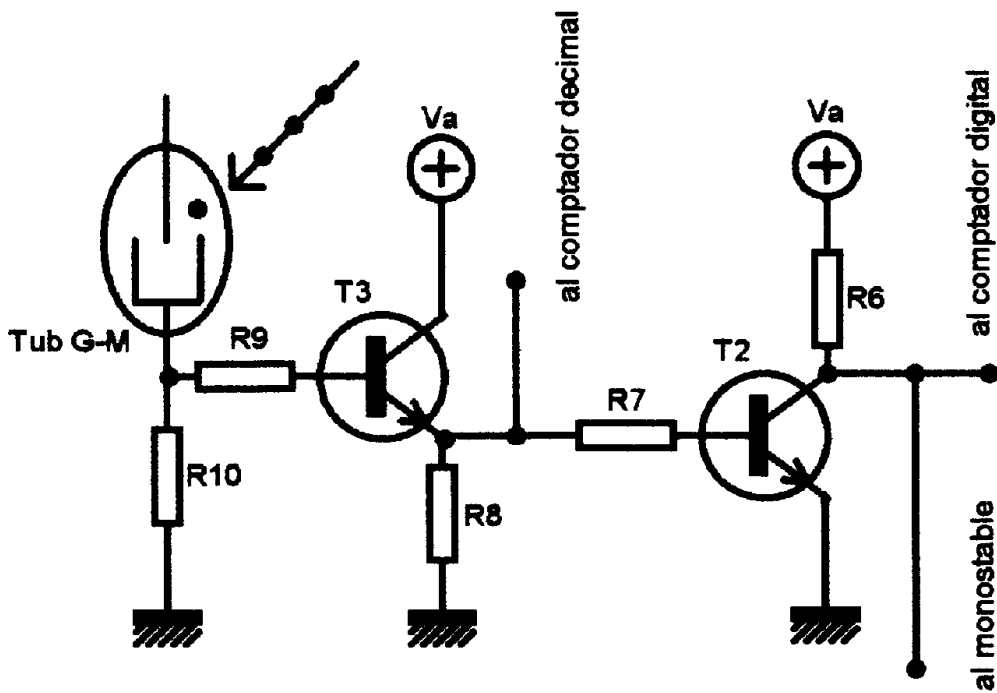
$$V_{\text{màxim}} = \frac{4,7(330 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^7)}{330 \cdot 10^3} = 717V$$

5.4- Amplificació dels impulsos.

Un cop muntat el convertidor d'alta tensió, vam comprovar amb l'oscil·loscopi si es detectava la radioactivitat per la qual cosa vam acostar un pot de plàstic de 25g de nitrat d'uranil al tub (sense obrir el pot) i sí que es detectava: uns 870 impulsos per minut. Amb una font de radi de $3,3kBq$ donava 1720 impulsos per minut i la radioactivitat ambient 2 impulsos per minut. Els impulsos eren tant breus que tenien la forma d'agulles i estaven entre 2 i 6V tal com es pot veure a continuació:



El voltatge dels impulsos ja era suficient però R10 era massa elevada. Per a no destorbar el funcionament del tub cal amplificar baixant la impedància, per la qual cosa era més indicat utilitzar la configuració de col·lector comú.

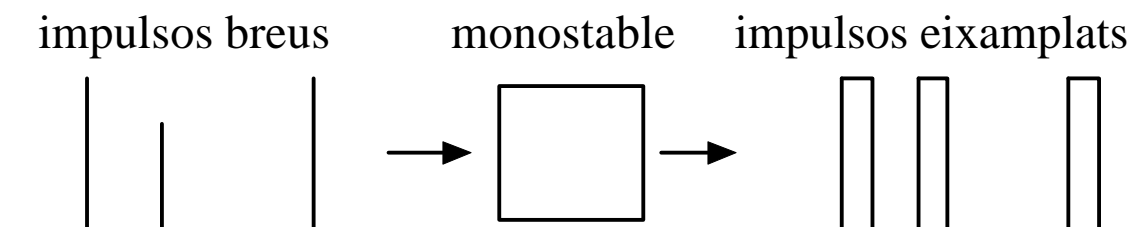


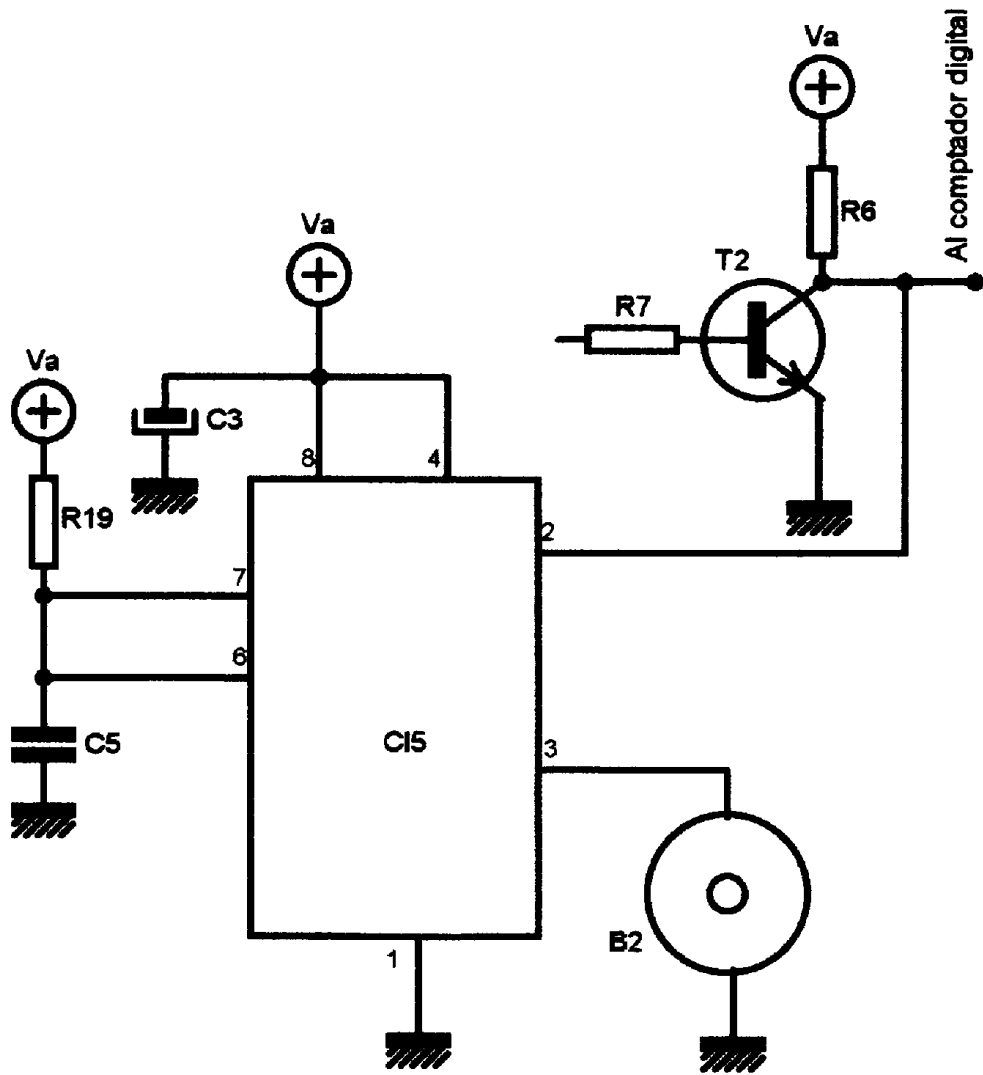
El valor de R9 es va escollir unes 20 vegades més gran que R10 o sigui $R9=1M\Omega$, per tal de no carregar R10. Ara bé per a poder-hi posar una R9 elevada, calia un transistor amb una beta molt gran, de manera que vam escollir un BC517 per a T3 que és un Darlington amb una $\beta=30000$.

Com que pel funcionament del comptador digital i del senyal acústic feia falta un impuls de baixada, vam afegir el transistor T2 (un BC547B) que actua com inversor. Els valors de R7 ($10k\Omega$) i R6 ($2,2k\Omega$) no són crítics i poden variar en un ample marge.

5.5- Eixamplament dels impulsos i senyal acústic.

Els impulsos que surten dels transistors T2 o T3 tenen la mateixa "durada" o "amplada" que a la resistència R10 i són massa breus per a fer sonar un brunzidor amb oscil·lador. Cal eixamplar-los fins a 0.01s o més i això s'aconsegueix amb un altre 7555 (CI5) muntat com a monostable:





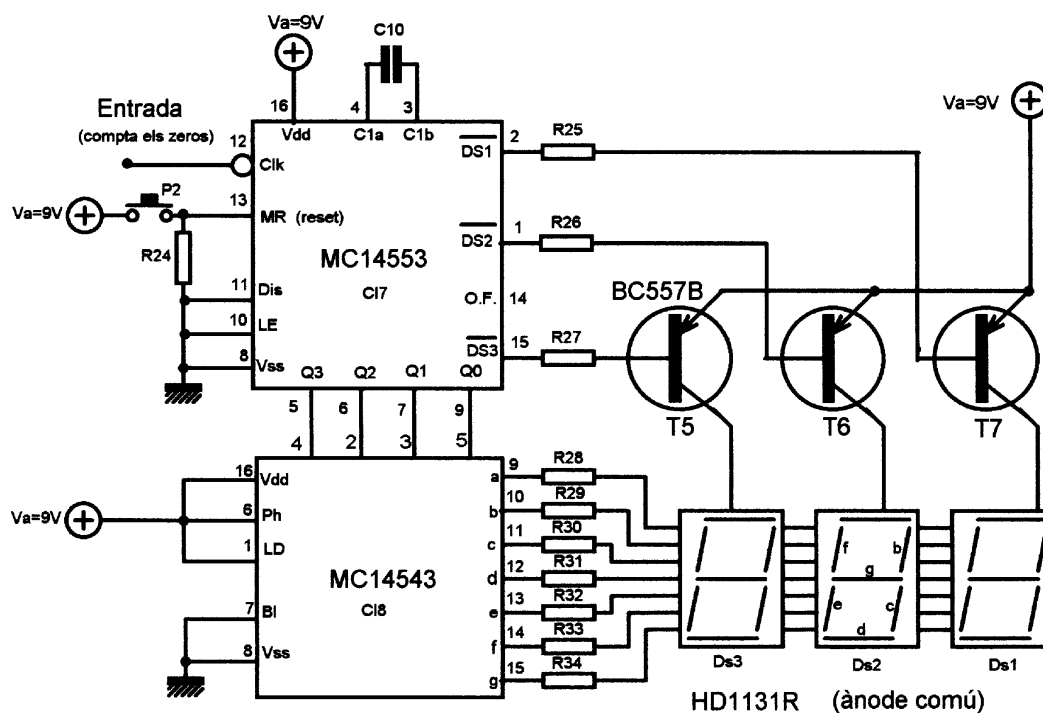
Agafant $C19=100\text{nF}$ i tenint en compte que $T_{alt}=0.01\text{s}$:

$$R19 = \frac{T_{alt}}{C \ln 2} = \frac{0.01}{100 \cdot 10^{-9} \ln 2} = 144269 \Omega \approx 150 \text{ k}\Omega$$

5.6- Comptador digital.

L'esquema del comptador digital ja el donava el fabricant dels circuits integrats: Motorola.

CI7 és un comptador en BCD i CI8 un descodificador de BCD a 7 segments. El polsador P2 serveix per a posar el comptador a "zero".

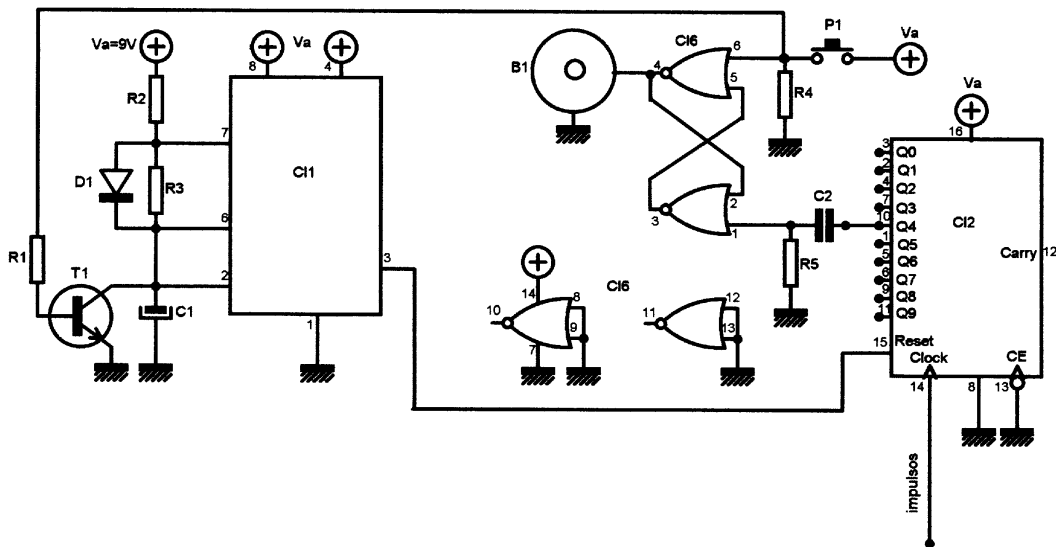


5.7- Alarma.

En aquests moments el comptador Geiger-Müller ja estava acabat però vam pensar que a més de mesurar la radioactivitat, podria tenir una altra aplicació: vigilar la radioactivitat ambiental i si aquesta superava un nivell pel damunt del normal que fes sonar una alarma.

Aquesta alarma ens va donar molta feina! Com que el tub era poc sensible, la radioactivitat ambiental només era de 2 impulsos per minut.

Al final la solució va ser la següent:



CI2 és un comptador decimal (4017). Al començament $Q_0=1$ i totes les altres sortides estan a zero. Quan rep el primer impuls $Q_1=1$ (totes les altres sortides a zero). Amb el segon impuls $Q_2=1$, amb tres impulsos $Q_3=1$... i així successivament fins a 9 impulsos. L'impuls número 10 torna a posar a "1" la sortida Q_0 . També prement el polsador P1 es torna a posar $Q_0=1$.

El multivibrador fet amb CI1 (un 7555) dóna un impuls breu durant cada minut i va ser calculat així:

$$T_{baix} = 60s, \quad \text{agafant} \quad C1 = 22mF$$

$$R3 = \frac{60}{22 \cdot 10^{-6} \ln 2} = 3934622\Omega \approx 3,9M\Omega$$

El díode D1 (1N4148) fa que la càrrega tingui lloc només per R2, però el seu valor no és crític així que vam agafar el valor de $R2=10k\Omega$ amb la qual cosa l'amplada de l'impuls és:

$$T_{alt} = 10 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-6} \ln 2 = 0,15s$$

Suposem que hem posat a zero el comptador decimal. El multivibrador deixa comptar al comptador durant un minut però després del

minut el posa a zero tornant a començar un nou minut... Ara entra en joc la bàscula R-S (CI6) feta amb portes lògiques "no o". Si la bàscula R-S la tenim connectada a la sortida Q4 significa que mentre en un minut es comptin 0, 1, 2 o 3 impulsos, l'alarma no es dispararà. Però si en aquest minut es compten 4 impulsos o més, l'alarma es dispara i continua sonant fins que es prem el polsador P1. Això també posa a zero el multivibrador (descarregant el condensador C1 mitjançant el transistor T1) i començant a comptar un nou minut.

Si el nivell de radiació ambient és de 2 impulsos per minut, no és prudent connectar l'alarma a Q3 doncs pot passar que en algun minut es comptin 3 impulsos i es dispari l'alarma sense que hi hagi hagut cap desastre o accident nuclear. Connectant-la a la sortida Q4 ja és poc probable que es dispari amb un nivell de radiació normal. És clar que si es viu en un lloc on la radiació ambient sigui de 3 impulsos per minut caldrà connectar l'alarma a Q5 o Q6.

Per a donar més la sensació d'alarma vam emprar un bronzidor bitonal.

5.9- Llista de components.

Resistències (és suficient que siguin d'1/4W de potència):

R1, R2, R7, R21: 10 k Ω

R3: 3,9 M Ω

R4, R5, R24: 100 k Ω

R6, R22: 2,2 k Ω

R8: 220 Ω

R9: 1 M Ω

R10: 47 k Ω

R11: 2,2 M Ω

R12, R13, R14, R15, R16: 10 M Ω

R17: 250 k Ω

R18: 330 k Ω

R19: 150 k Ω

R20: 1 k Ω

R23: 22 k Ω

R25, R26, R27: 4,7 k Ω

R28, R29, R30, R31, R32, R33, R34: 330 Ω

Condensadors (mentre no es digui el contrari és suficient que puguin treballar a 25V):

C1: 22 μ F

C2, C10: 10 nF

C3: 47 μ F

C4: 1pF-1000V = 2 X 2,2 pF-500V

C5, C9: 100 nF

C6, C7: 10 μ F-350 V

C8: 100 μ F

Zéners:

Z1: 4V7-400 mW

Díodes:

D1: 1N4148

D2, D3: 1N4007

Transistors:

T1, T2: BC547B

T3: BC517

T4: BD679

T5, T6, T7: BC557B

Circuits integrats:

CI1, CI3, CI5: 7555

CI2: 4017

CI4: CA3130

CI6: 4001

CI7: MC14553

CI8: MC14543

Altres:

Display: HD1131R (ànode comú)

B1: brunzidor amb oscil·lador incorporat CAF 25-11-16

B2: brunzidor bitonal amb oscil·lador incorporat CAF 27-17-06

P1, P2: polsadors normalment oberts

Tr1: transformador 6V-220V-2,8VA

Tub Geiger-Müller: ZP1310 (Philips)

6.- Muntatge del prototip.

Com és lògic i més en un circuit complex, cal anar provant el funcionament de cada etapa abans de dissenyar la següent.

Vam començar muntant el convertidor d'alta tensió en una placa de baquelita perforada, comprovant el funcionament del tub primer amb un

oscil·loscopi i després amb un amplificador i un altaveu. Després hi vam afegir els transistors T2 i T3.

El monostable encarregat d'eixamplar els impulsos per a fer sonar el brunzidor el vam muntar en un circuit imprès.

A continuació vam muntar el comptador digital també en circuit imprès doncs era massa complex per a improvisar-lo en una placa perforada o en una de prototips. Va funcionar a la primera!

Un cop comprovat el funcionament de tot plegat vam començar a muntar l'alarma en una placa de prototips de les que els components van "clavats" i es connecten amb fils.

El pas següents hauria estat dissenyar un circuit imprès pel circuit sensor i muntar-lo en una capsula, però ja no teníem més temps. Ens havia costat molt trobar un programari fàcil d'utilitzar i ara que ja el teníem havíem de presentar el treball.

7.- Conclusions.

Vam poder comprovar com seguint un procés lògic es pot arribar a dissenyar un circuit complex. L'ordre lògic era: 1) el convertidor d'alta tensió, 2) el senyal acústic, 3) el comptador digital i 4) l'alarma. De totes maneres si l'alarma no hagués funcionat ja havíem complert els objectius.

Els valors experimentals dels períodes van coincidir molt bé amb els valors calculats. Això no és mèrit nostre si no més aviat del bon disseny del 7555, la qual cosa fa que sigui molt fàcil d'utilitzar.

8.-Bibliografia i programaris.

8.1- Bibliografia.

PHILIPS. Geiger-Müller tubes. Part 6. July 1983.

PHILIPS. Linear products. IC 11. 1988.

MOTOROLA. CMOS logic data.

MOTOROLA. CMOS/NMOS special functions data.

AGUSTENCH, M., NADAL, LL. Ones i partícules. Les radiacions que ens envolten. Ed. Graó. 1997.

<http://www.treasure-troves.com/Bios/BecquerelHenri.html>

<http://www.umich.edu/~radinfo/sph/timeline.htm>

<http://www.middlebury.edu/~PHManual/geiger.html>

<http://www.ccr.jussieu.fr/radioactivite/english/accueil.htm>

http://www.aip.org/cgi-bin/esva_advanced2.pl

<http://www.zum.de/schule/dwu/>

8.2- Programaris.

Office 97 de MICROSOFT.

WinSchéma 98 d'ALAIN MICHEL. Programari "shareware" per a la realització d'esquemes electrònics. Es pot aconseguir a l'adreça següent:

<http://www.kagi.com/alain.michel/espagnol.htm>

WinCircuit 98 d'ALAIN MICHEL. Programari "shareware" per a la realització de circuits impresos. Es pot aconseguir a l'adreça:

<http://www.kagi.com/alain.michel/espagnol.htm>

SmartDraw 4. Programari de dibuix. Es pot aconseguir a l'adreça:

<http://www.smartdraw.com>

8.- Agraïments.

Donem les gràcies al Centre de Documentació i Experimentació de Ciències de la Subdirecció General d'Ordenació Educativa del Departament d'Ensenyament de la Generalitat de Catalunya per que ens va deixar un pot de 25g de nitrat d'uranil i una mostra encapsulada de radi de 3,3kBq per a provar el funcionament del tub.