

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
CARRERA DE FÍSICO



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
CONTADOR-CRONÓMETRO DIGITAL
Y UN GENERADOR DE CHISPAS

TESIS PROFESIONAL
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE

F Í S I C O

PRESENTA

JOSE VALENZUELA BENAVIDES

BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

ENSENADA, B.C.

JUNIO 1986

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

ESCUELA DE CIENCIAS BIOLOGICAS

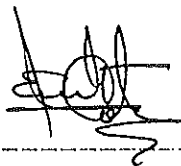
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
CONTADOR-CRONOMETRO DIGITAL
Y UN GENERADOR DE CHISPAS

T E S I S P R O F E S I O N A L

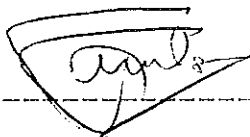
QUE PRESENTA:

JOSE VALENZUELA BENAVIDES

Aprobado por:



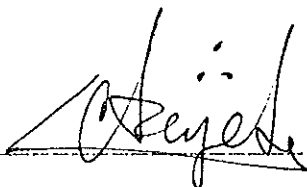
DR. LEONEL S. COTA ARAIZA
Presidente del jurado



M.C. FERNANDO FAVELA VARA
S i n o d a l



M.C. JAIME SANCHEZ GARCIA
S i n o d a l



FIS. ARMANDO REYES SERRATO
S i n o d a l

DR. ARTURO SERRANO SANTOYO
S e c r e t a r i o

I

BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

A mis padres:

Rosa María y José.

A mis hermanos:

Rosa María, Carlos y Mónica

A mis amigos.

Para Alex

AGRADECIMIENTOS:

A la Universidad Autónoma de Baja California por proporcionarme los elementos de trabajo para este proyecto de Tesis.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (C.I.C.E.S.E.) por facilitarme el uso de sus talleres y laboratorios.

Al M. en C. Jaime Sánchez García por el tiempo dedicado.

A Josefina Rodríguez Jacobo por su insistencia y mecanografiado de este trabajo.

A mis sinodales: Dr. Leonel Cota A., Fís. Armando Reyes S., M. en C. Fernando Favela V., Dr. Arturo Serrano S.

RESUMEN

El presente trabajo de Tesis tiene como objetivo reportar todo lo relacionado con dos aparatos que se diseñaron y construyeron para usarse en el laboratorio de Física de la Escuela de Ciencias Biológicas, Carrera de Físico (U.A.B.C.).

Los dispositivos construídos son: un "Contador-Cronometro Digital" con resolución variable, y un "Generador de Chispas" con selector de frecuencia.

El primero de ellos es un dispositivo capaz de medir un número de eventos y el tiempo que transcurrió en llevarse cabo tales eventos. Estos eventos pueden ser oscilaciones, revoluciones, destellos luminosos, etc.

El segundo aparato genera chispas de alto voltaje a cualquiera de las cinco frecuencias seleccionadas. El generador es esencialmente práctico para experimentos que requieren grabar papel sensible la trayectoria de un cuerpo conductor.

Se detalla la construcción, los usos en un laboratorio de Física y su manejo, incluyéndose prácticas modelo que podrían implementarse dentro de un curso de mecánica. Al final se incluyen los resultados obtenidos en varios experimentos llevados a cabo utilizando los dispositivos.

ABSTRACT

The objective of the present Thesis is to report everything that has to do with two apparatuses that were designed and built to be used in the Physics Laboratory of the Escuela de Ciencias Biológicas, carrera de Física (U.A.B.C.).

The apparatuses are: "Digital Counter-Chronometer" with variable resolution, and a "Spark Generator" with frequency selector.

The first is an instrument capable of counting number of events and the time between events. These events may be oscillations, revolutions, flashes of light, etc.

The Spark Generator produce high voltage sparks at any of the five available frequencies. The sparks source is particularly useful for experiments that require a permanent record of spark traces on coated paper or metallic objects trajectories.

The design and construction of the apparatuses are detailed. Their uses in a physics lab as well as their operation are presented.

Finally, experiments feasible in a basic mechanics course are suggested.

INDICE

	Pag.
INTRODUCCION	1
CAPITULO I. CONTADOR-CRONOMETRO	4
I.1 Descripción General	7
I.1.1 Alimentación	7
I.1.2 Encendido	7
I.1.3 Entradas	7
I.1.4 Seleccionador de Transductor	7
I.1.5 Límite de Cuenta	8
I.1.6 Resolución	8
I.2 Descripción Técnica del Diseño	9
I.2.1 Sección del Contador	11
I.2.2 Sección del Reloj	16
I.2.2.1 Circuito Oscilador	16
I.2.2.2 Circuito Divisor de Frecuencia	19
I.2.2.3 Circuito contador de década de siete dígitos	21
I.2.3 Fuente de Alimentación	21
I.3 Operación	22
I.3.1 El Péndulo	24
I.3.2 Riel de Aire	25
I.3.3 Plato giratorio	26
I.3.4 Balín rodante	27
I.3.5 Estroboscopio	28
I.3.6 Caída Libre	29
I.4 Mantenimiento y Calibración	31
I.4.1 Terminales de prueba (TPX)	31
I.4.2 Calibración	34
 CAPITULO II GENERADOR DE CHISPAS	 37
II.1 Descripción General	37
II.1.1 Alimentación	39
II.1.2 Encendido	39
II.1.3 Alto Voltaje	39
II.1.4 Chispa eléctrica	39
II.1.5 Aterrizamiento	40
II.1.6 Seleccionador de frecuencias	40
II.1.7 Precisión	40
II.2 Descripción Técnica del Diseño	41
II.2.1 Sección de Alto Voltaje	41
II.2.2 Circuitería Lógica	44
II.3 Operación	46
II.3.1 Riel de Aire	46
II.3.2 Caída Libre	46
II.4 Mantenimiento	49

	Pag.
CAPITULO III. EXPERIMENTOS EFECTUADOS	56
III.1 Caída libre con el Contador-Cronómetro . . .	56
III.2 Caída libre con el Generador de Chispas . .	60
III.3 Prácticas de Laboratorio (sugerencias) . . .	65
CAPITULO IV CONCLUSIONES	79
APENDICE	86
BIBLIOGRAFIA	93

INTRODUCCION

La Física es una ciencia tanto teórica como experimental. De aquí la importancia de contar con instrumentos de medición adecuados para propósitos de experimentación.

Uno de los factores que han contribuido al avance de la Física, es el poder efectuar mediciones cada vez más precisas de los fenómenos físicos.

Es muy ventajoso que una carrera como la de físico cuente con la capacidad de diseñar y construir equipo para sus laboratorios según sus necesidades. Enseña al alumno como atacar el problema básico de medir o cuantificar los fenómenos, y evita en cierta manera que simplemente se utilice un aparato comercial sin tener la menor idea de como funciona internamente ese dispositivo.

Ante la necesidad de contar con aparatos de medición en el laboratorio de nuestra escuela, se propone el diseño y construcción de dos instrumentos indispensables para las prácticas de mecánica que se llevan en los primeros semestres de la carrera de físico: un "Contador-Cronómetro Digital" con resolución variable, y un "Generador de Chispas" con selector de frecuencia.

El diseño de los instrumentos se llevó a cabo durante el período de servicio social realizado en el Laboratorio de Física de la Escuela de Ciencias Biológicas (Carrera de Físico, UABC), de Septiembre de 1983 a Julio de 1984.

Los circuitos impresos y la construcción final, así como las pruebas necesarias se realizaron en el Taller de Electrónica del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) de Septiembre de 1984 a Mayo de 1985.

En el presente trabajo se describe la construcción, manejo y los usos en laboratorio, incluyéndose prácticas modelo que podrían realizarse dentro de un curso de Mecánica Clásica.

En el capítulo I se da una descripción del Contador-Cronómetro: sus características, modo de operación, funcionamiento electrónico, mantenimiento y calibración.

El Generador de Chispas se detalla en el capítulo II con los mismos puntos tratados en el capítulo I.

En el capítulo III se reportan varios experimentos realizados con estos instrumentos, así como algunas sugerencias para nuevos experimentos.

Los resultados y conclusiones se tratan en el capítulo IV.

Se anexa finalmente un apéndice donde se desarrolla el método de mínimos cuadrados utilizado en el capítulo III.

CAPITULO I. CONTADOR-CRONOMETRO DIGITAL

I.1.- DESCRIPCION GENERAL

El Contador-Cronómetro Digital es un dispositivo totalmente electrónico con la capacidad de contar por medio de transductores, eventos físicos e intervalos de tiempo simultáneamente.

El circuito electrónico puede dividirse en dos secciones: la sección del contador de eventos y la del reloj.

La sección del contador tiene la función de detectar los pulsos que provienen de los transductores y visualizar el número de ellos digitalmente. La cantidad máxima de eventos (pulsos) se puede seleccionar de 8 valores establecidos.

La sección del reloj consta de un cronómetro de resolución variable. La frecuencia para la base de tiempo se genera con un oscilador utilizando un cristal piezoeléctrico de frecuencia cercana a 1 MHz, pudiéndose ajustar con un capacitor variable. En la sección I.2.2 se explica en más detalle el oscilador.

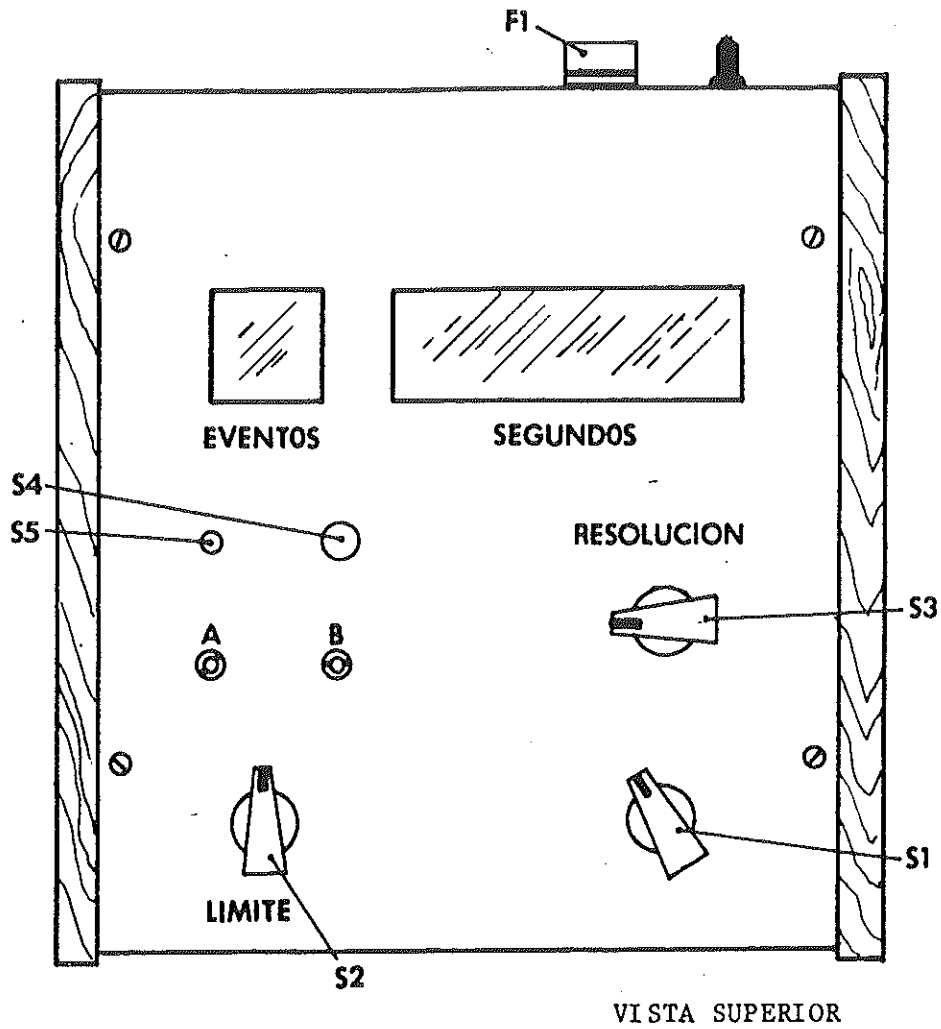
Para visualizar las lecturas, la sección del cronómetro consta de siete dígitos del tipo diodo emisor de luz (LED), y

la sección del contador de eventos con dos dígitos del mismo tipo.

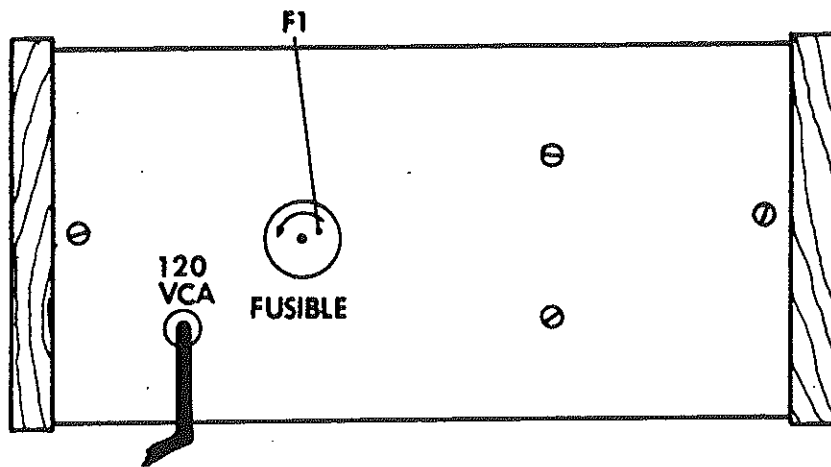
El aparato cuenta con su propia fuente de alimentación, que proporciona un voltaje regulado de +5 volts a los circuitos TTL¹³ (Transistor-Transistor Logic). Se usaron TTL por su bajo costo y disponibilidad en el mercado, sin importar su consumo de energía relativamente alto, comparado con otras familias de circuitos lógicos.

Para su presentación, la circuitería está contenida dentro de una caja de aluminio y madera, con todos los selectores y botones en la parte superior. La Fig. 1 muestra las caras superior y posterior del aparato.

A continuación se describe más ampliamente las características de funcionamiento, construcción y operación del Contador-Cronómetro.



VISTA SUPERIOR



VISTA DE ATRAS

FIG. 1. CONTADOR-CRONOMETRO DIGITAL.

I.1.1 ALIMENTACION

El aparato se alimenta con 120 volts (\pm 20 volts) corriente alterna (vca) de línea sin necesidad de aterrizar físicamente, y está protegido por un fusible de 0.5 amperes localizado en la parte posterior.

I.1.2 ENCENDIDO

Tiene un interruptor general de encendido. Cuando se enciende aparecen "ceros" en los visualizadores una vez que se haya oprimido el botón de borrar.

I.1.3 ENTRADAS

Existen solamente dos, que son para los transductores que vayan a utilizarse. La entrada hembra acepta conectores macho comunmente usados para audiofrecuencia.

I.1.4 SELECCIONADOR DE TRANSDUCTOR

Con este seleccionador se escoge el tipo de transductor utilizado en el experimento. Tiene dos posiciones: "fotodetectores" e "interruptores".

I.1.5 LIMITE DE CUENTA

Con esta perilla se selecciona la cuenta máxima que se quiere. Cuando el contador registra el número máximo de eventos escogidos, detiene automáticamente el cronómetro (reloj) y se queda en un estado latente hasta que no se borre la cuenta del visualizador y se empiece otra vez el experimento.

El aparato puede contar y pararse automáticamente con 1, 2, 4, 8, 10, 20, 40 y 80 eventos. En la posición marcada "X" impide que el cronómetro pare, sin importar el número de eventos. Oprimiendo el botón de borrar se reestablece la cuenta del reloj y de eventos.

I.1.6 RESOLUCION

El dispositivo tiene una resolución variable en la sección del cronómetro: 1.0 milisegundos (mseg), 0.1 mseg., 10.0 microsegundos (useg) y 1.0 useg

La resolución a seleccionar depende de la naturaleza del experimento, e.g., en la sección III.1 se reporta un experimento donde se mide el tiempo de caída de un cuerpo en una distancia de 13 cm aproximadamente. La resolución seleccionada fué de 1 useg, pero los errores aleatorios fueron tan grandes que se cambió a 10 useg.

I.2 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL DISEÑO

En esta sección se describe el diseño electrónico del aparato Contador-Cronómetro.

La Fig. 2 muestra un diagrama a bloques del circuito electrónico.

Tiene dos secciones fácilmente distinguibles: la sección del contador y la sección del reloj, unidos por los bloques de la fuente de alimentación y del selector de cuenta. Este último se encarga de detener las dos secciones cuando la cuenta del contador coincida con la seleccionada. Las dos secciones aunque realizan funciones independientes, están sincronizadas. Esto es necesario para que empiecen y terminen de funcionar simultáneamente.

La sección del reloj tiene el oscilador, le sigue un divisor de frecuencia, el selector de resolución y finalmente los visualizadores de siete dígitos. Cada visualizador es de siete segmentos del tipo cátodo común.

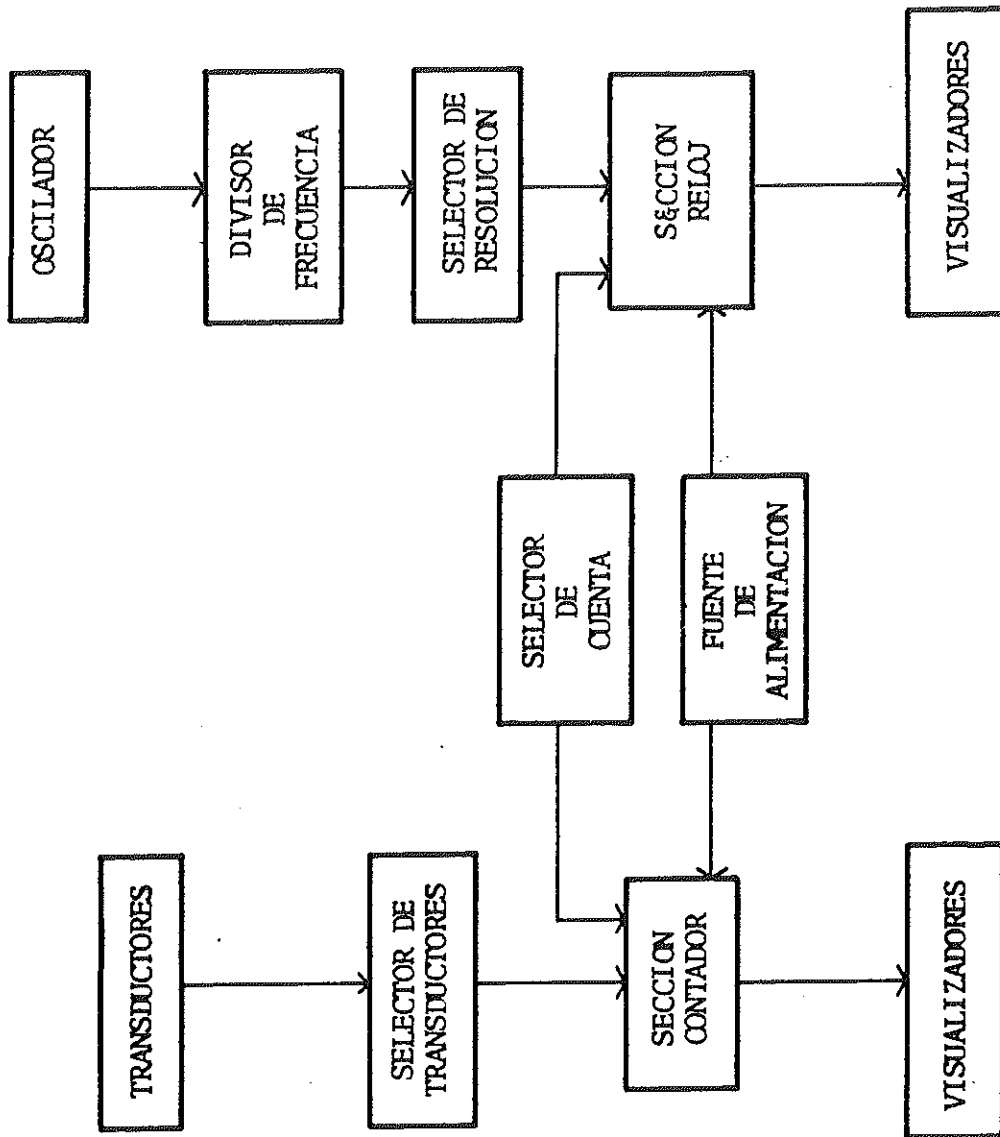


FIG. 2. -diagrama a bloques del contador-cronómetro.

I.2.1 SECCION DEL CONTADOR

Esta sección tiene como tarea contar los pulsos que provienen de los transductores y visualizar la cuenta en un indicador numérico de dos dígitos.

Un contador digital se puede construir con circuitos integrados del tipo 7490, 7492, 74161, 74163, 74190, y otros de la familia TTL¹³. En este diseño se optó por el contador 74190 que cuenta de 0 a 10 en lenguaje decimal cifrado binario (BCD), y con la propiedad de que se puede conectar en cascada.

El contador 74190 es el más apropiado para nuestro propósito. A la salida de los contadores tenemos los decodificadores, que encienden y apagan los 7 segmentos de los visualizadores para formar el dígito codificado en lenguaje binario.

Se utilizó el circuito integrado 7447, que es un decodificador de BCD a siete segmentos, compatible con el contador 74190 y con los visualizadores¹¹ MAN 74A de siete segmentos.

La Fig. 3 ilustra lo anterior en forma de bloques. La sección del contador lo forman dos contadores U3, U4, dos decodificadores U5, U6, y dos visualizadores.

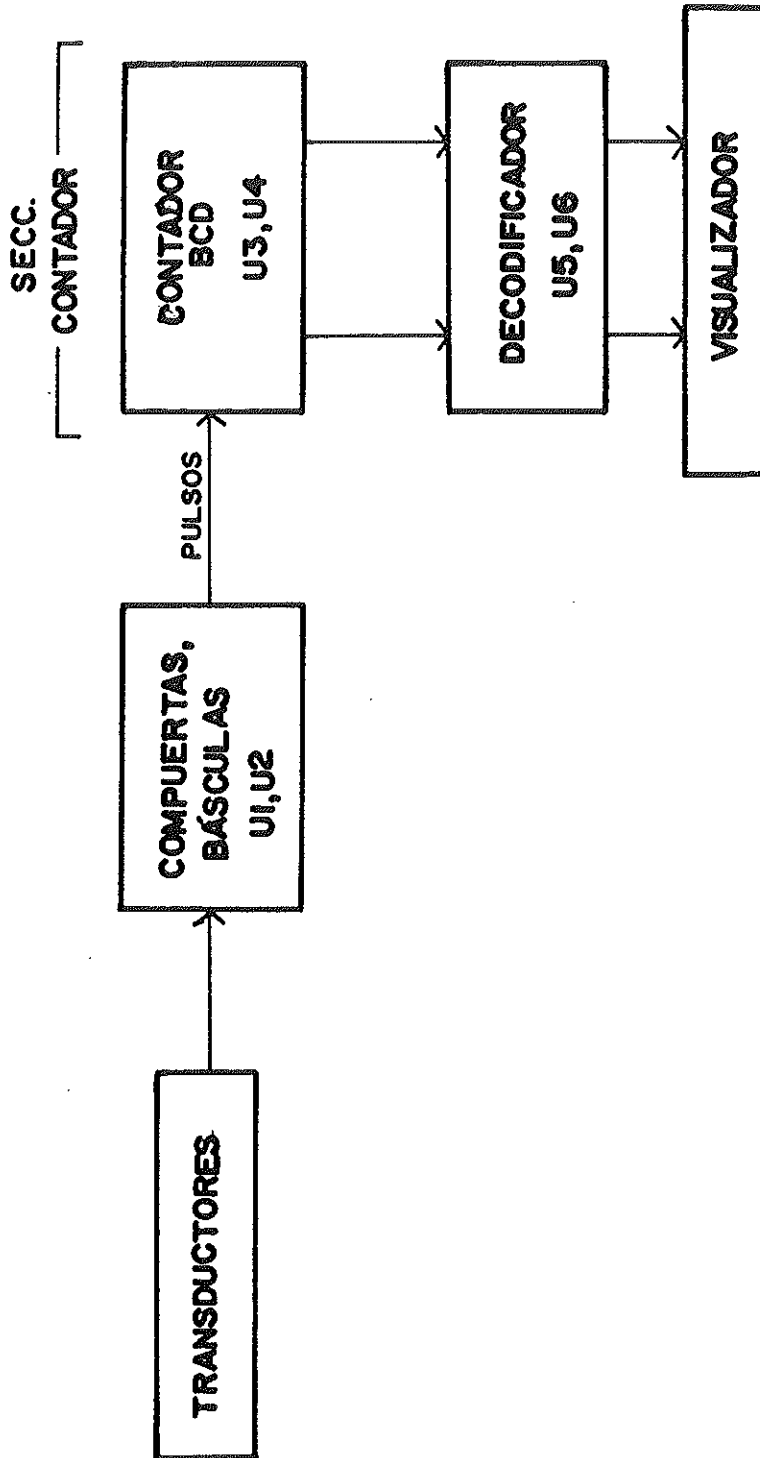


FIG. 3. DIAGRAMA A BLOQUES DE LA SECCION DEL CONTADOR DE E VENTOS.

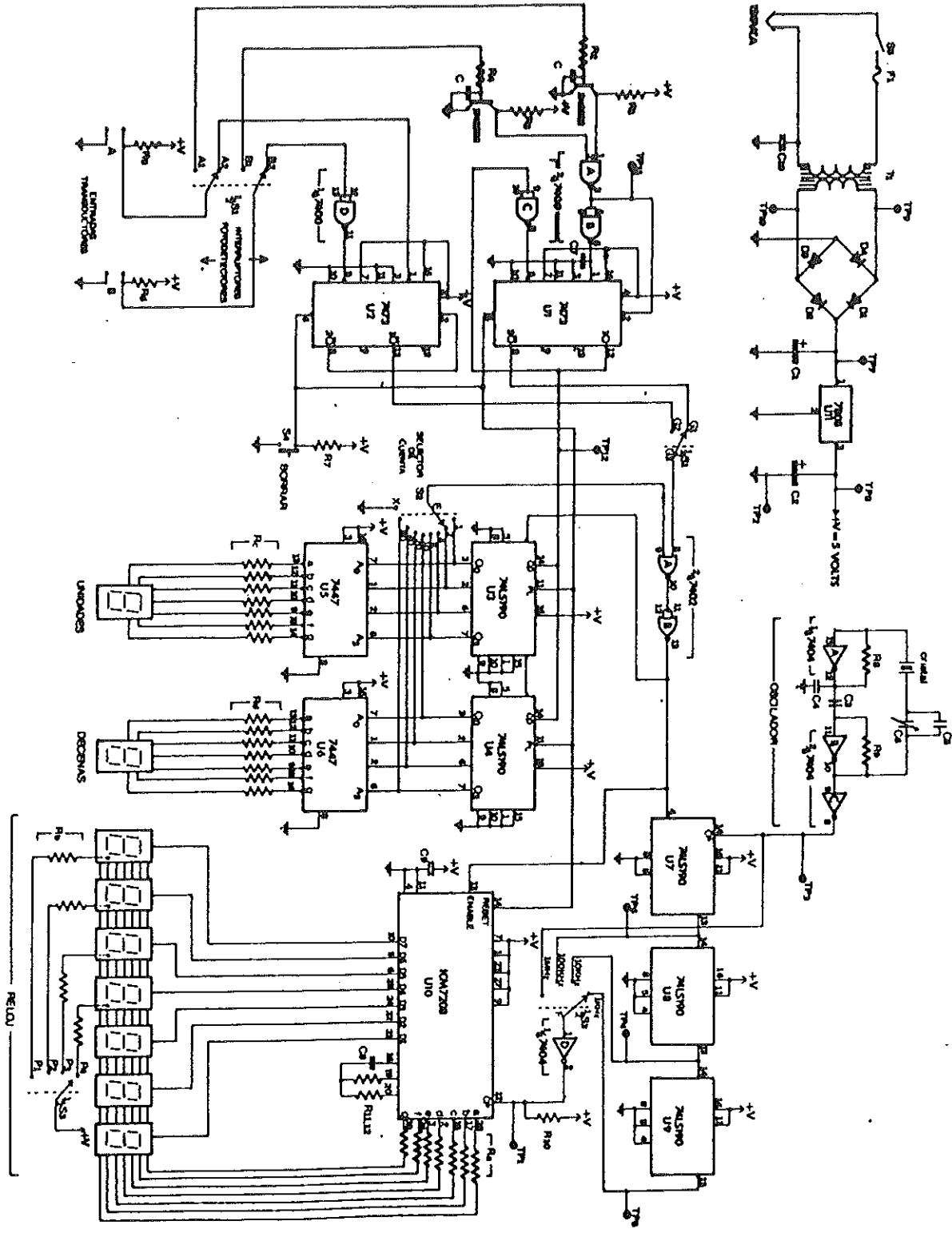
Los pulsos que se cuentan provienen de los transductores.

La Fig. 4 representa el diagrama electrónico del Contador-Cronómetro que se utilizará como referencia para las siguientes descripciones.

Al incidir luz intermitente sobre el fototransistor se producen pulsos de voltaje que son amplificados por los transistores 2N2222. Después de los transistores los pulsos entran a las compuertas "Y" negado (NAND) 7400A y 7400B, y finalmente a la báscula U1 tipo JK.

Las compuertas NAND (A, B, y C) reestablecen la báscula U1 inmediatamente después de que se produjo el pulso de salida por IQ (pata 12 de U1). Cada pulso aumenta la cuenta de eventos en una unidad.

En la sección I.1.5 se mencionó que se puede seleccionar el límite de cuenta de eventos a 1, 2, 4, 8, 10, 20, 40 ó 80. Esto es cierto únicamente cuando se utilizan fotodetectores, en el caso de interruptores se puede contar un solo evento. Se debe a que se le da un tratamiento diferente a la señal que proviene de un interruptor. El diagrama a bloques de la Fig. 3 sigue siendo válido para este tipo de transductores, aunque sólo se utiliza la báscula U2 y la compuerta 7400D (ver Fig. 4).



El selector S1 realiza las conexiones necesarias al escoger el transductor a usar. El selector múltiple S2 escoge la cuenta máxima que se quiere. Cuando el número de pulsos contados coincide con el máximo seleccionado aparece un "1" lógico en la compuerta A "0" negada (7402 NOR), y automáticamente se detiene el cronómetro y el contador.

Esto se hizo con la idea de poder determinar así la frecuencia (ó el período de los eventos) dividiendo el número de eventos - contados entre el tiempo ue transcurrió para esos eventos.

Esta modalidad del dispositivo cumple con el objetivo de diseño que se mencionó en la introducción de este trabajo.

El interruptor S4 nos permite borrar la cuenta de los visualizadores para repetir el experimento.

I.2.2 SECCION DEL RELOJ

Esta sección constituye el cronómetro del dispositivo, y esta dividida en:

- El circuito oscilador
- El circuito divisor de frecuencia.
- El circuito contador de década de siete dígitos.

La Fig. 5 muestra con un diagrama a bloques como se genera la frecuencia para la base de tiempo. Primero tenemos el oscilador de 1 MHz, le siguen 3 contadores de década 74190 conectados en cascada, que operan como divisores de frecuencia. Cada uno de ellos divide la frecuencia que recibe entre 10. La frecuencia seleccionada (1 MHz, 100 KHz, 10 KHz ó 1 KHz) entra a la sección del contador U10.

I.2.2.1 CIRCUITO OSCILADOR

Está formado por un cristal de cuarzo que oscila a una frecuencia cercana a 1 MHz, los inversores 7404A, B y C, un capacitor variable (C6), y las componentes C3, C4, C5, R8 y R9. El capacitor C6 permite calibrar el oscilador a la frecuencia de 1MHz. Para el valor de estas componentes, véase la lista de partes del Contador-Cronómetro, tabla III.

Es la parte más importante de esta sección, porque de él

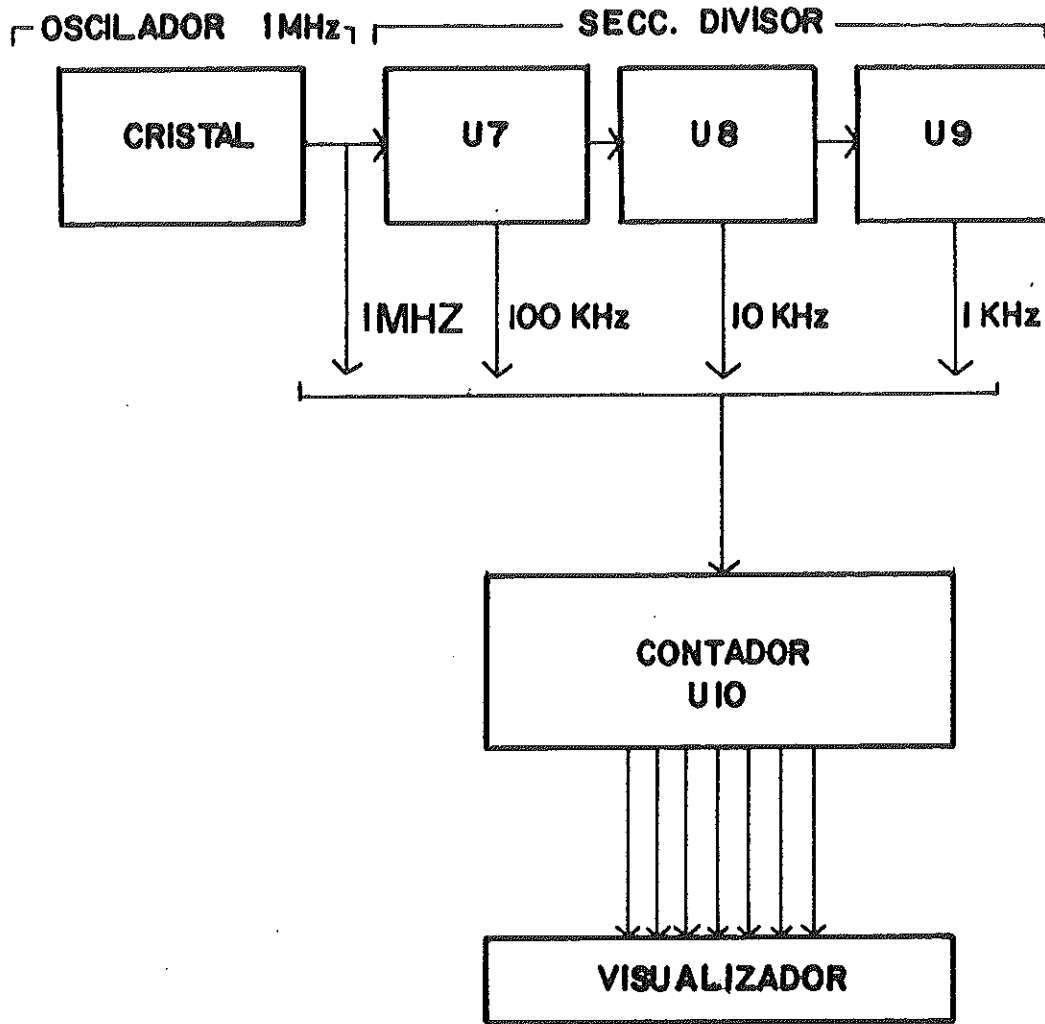


FIG. 5. DIAGRAMA A BLOQUES DE LA SECCION DEL CRONOMETRO DIGITAL.

depende la confiabilidad que se le pueda dar a las lecturas de tiempo. Por eso se tomó cuidado en su diseño.

Hay varios circuitos electrónicos generadores de onda cuadrada. El oscilador integrado 555¹² es un ejemplo. Con un par de capacitores y resistencias se escoge la frecuencia de oscilación. Pero tienen la desventaja que es muy inestable para nuestro propósito, y generalmente oscila a frecuencias relativamente bajas.

Con cristales piezoeléctricos también se puede construir un oscilador estable. La configuración se muestra en la parte superior central del diagrama de la Fig. 4. Está compuesto por tres inversores TTL, un par de resistencias y varios capacitores.

Estos cristales no oscilan a la frecuencia que especifica el fabricante, pero sí a una muy cercana. Para ajustar la frecuencia deseada se conectó en serie al cristal un capacitor variable. Este diseño es muy usado por su simplicidad y estabilidad.

Para los valores de las resistencias y capacitores véase la Tabla III.

I.2.2.2 CIRCUITO DIVISOR DE FRECUENCIA

Los eventos físicos que se miden en un experimento pueden ser rápidos, como la caída libre de un balón en una distancia pequeña, ó lentos como las oscilaciones de un péndulo de longitud grande. Para estos experimentos necesitamos un reloj con diferente resolución en cada caso. No tiene sentido determinar un intervalo de tiempo hasta la cuarta o quinta cifra decimal si los demás parámetros a medir no se pueden determinar con la misma precisión.

La idea al construir el Contador-Cronómetro Digital fué que tuviese resolución variable para hacerlo lo más versátil posible, y que pudiera adaptarse a toda una gama de experimentos.

Si utilizamos otra frecuencia como base de tiempo, e.g. 100 KHz en lugar de 1 MHz, reducimos la resolución del cronómetro en un décimo.

Esta es la idea al dividir la frecuencia de 1 MHz, en 100 KHz, 10 KHz y 1 KHz, usando los contadores U7, U8 y U9 (ver Figs. 4 y 5).

Según la frecuencia del divisor que se utilice será la resolución del cronómetro, de acuerdo con la Tabla I.

FRECUENCIA SELECCIONADA CON S3	RESOLUCION DEL CRONOMETRO
1 MHz	1 microsegundo
100 KHz	10 microsegundos
10 KHz	0.1 milisegundos
1 KHz	1 milisegundo

TABLA I. Relación entre frecuencia seleccionada y resolución del cronómetro.

La razón por la cual se diseñó el cronómetro con la mínima resolución de ± 1 useg fué la siguiente: en 1976 Blackburn y Koenig⁴ realizaron el experimento de caída libre de un balón utilizando un reloj electrónico con una resolución de ± 10 useg, obteniendo el valor de la constante de gravedad con un error relativo del orden de .1%.

La intención de repetir el experimento en el laboratorio de la Escuela con un reloj de mayor resolución no proporcionó mejores resultados, puesto que los errores aleatorios eran mucho mayores que 1 useg. En la sección III.1 se reporta este experimento.

I.2.2.3 CIRCUITO CONTADOR DE DECADA DE SIETE DIGITOS

El circuito integrado U10 es un dispositivo contador de pulsos fabricado por la compañía INTERSIL⁹. Realiza las funciones de contador de 7 décadas, decodificador de 7 segmentos y reforzador con salidas multicanalizadas.

Como componentes adicionales se requieren 7 dígitos de 7 segmentos del tipo cátodo común, 9 resistencias y un capacitor.

El uso de este dispositivo es una solución adecuada cuando se trata de manejar siete dígitos. Otra forma de hacerlo, pero no muy recomendable por cuestión de espacio y economía, es utilizar un contador del tipo U3 y U4, con su respectivo decodificador y juego de 7 resistencias por cada dígito que se quiera. Es decir, un total de 14 circuitos integrados y 49 resistencias en lugar de U10.

I.2.3 FUENTE DE ALIMENTACION

La fuente de alimentación está formada por el transformador T1, el puente de diodos D1, D2, D3 y D4, los capacitores C1, C2 y el regulador de voltaje U1 (ver Fig. 4), que proporciona un voltaje estable de +5 volts.

El sistema se protege con el fusible F1 de medio ampere

y se enciende con el interruptor general S5, representados en la Fig. 4 del circuito.

1.3. OPERACION

El manejo del aparato es sencillo y puede ordenarse en los siguientes pasos:

- a) Seleccionar los transductores adecuados, según la naturaleza del experimento. Conectarlos en las entradas A y B, y colocar el selector de transductor en la posición correspondiente.
- b) Seleccionar la resolución del cronómetro de acuerdo a la precisión requerida en el experimento.
- c) Seleccionar la cuenta máxima que se quiera en los eventos a medir.

NOTA:- La posición marcada "X" es para una cuenta indefinida y no habrá manera de detener el reloj en ningún momento durante el experimento.

- d) Colocar los transductores en la posición correcta según las sugerencias de este trabajo.
- e) Encender el aparato. Verificar que los transductores estén funcionando correctamente haciendo pruebas.

El aspecto más importante de una medición utilizando el Contador-Cronómetro, es saber que tipo de transductor usar para un experimento en particular, y sobre todo, donde colocarlos. El éxito de un experimento depende mucho de esto.

I.3.1 EL PENDULO

Para este experimento se utiliza un fotodetector como transductor. Se coloca el detector enfrente de una lámpara de luz, de tal forma que la masa del péndulo interrumpa la luz que incide en el fotodetector (Fig. 6).

Podría ser objetivo de una práctica de laboratorio estimar la constante de gravedad o verificar la relación que existe entre la longitud del péndulo y la frecuencia del mismo.

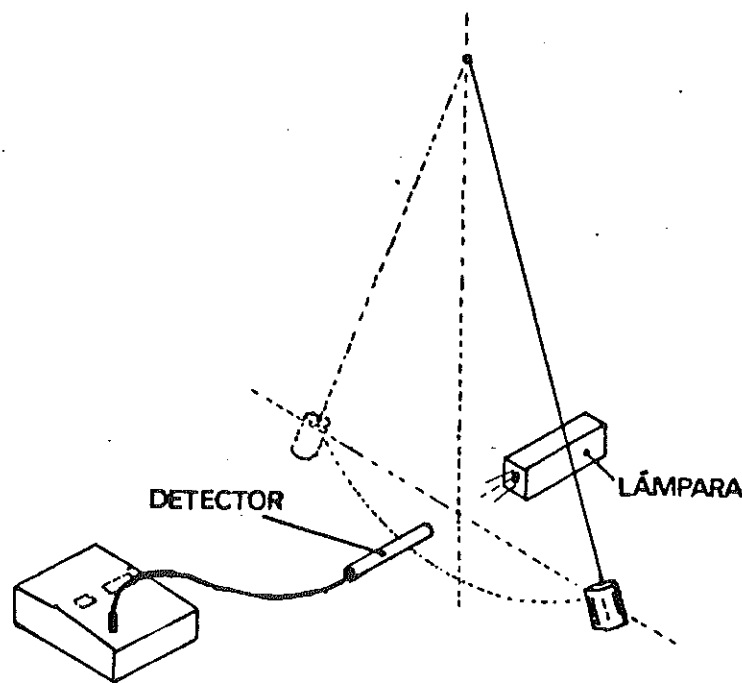


Fig. 6. DETERMINACION DEL PERIODO DE OSCILACION DE UN PENDULO SIMPLE.

I.3.2 RIEL DE AIRE

Como se ilustra en la Fig. 7 los fotodetectores se colocan a lo largo de la trayectoria del móvil. Aquí se utilizan dos lámparas, una enfrente de cada detector. El primer detector autoriza a que empiece a funcionar el cronómetro y el segundo lo detiene. Es necesario que el selector de límite de cuenta esté en la posición de "uno". Con este experimento se pueden calcular aceleraciones y velocidades.

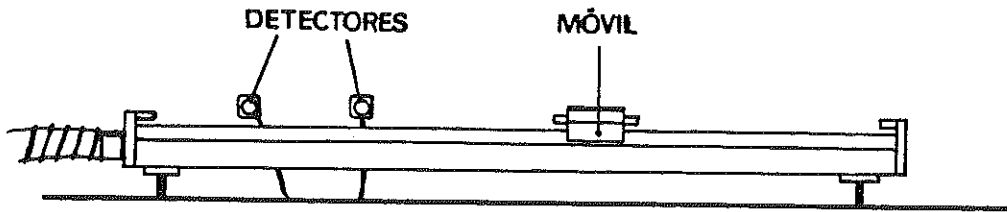


FIG. 7. EXPERIMENTO CON EL RIEL DE AIRE.

I.3.3 PLATO GIRATORIO

La Fig. 8 muestra un montaje sencillo. Se coloca una cartulina opaca en la periferia del plato, de tal manera que interrumpa la luz que incide en el detector.

De las lecturas obtenidas se puede calcular la velocidad angular o las revoluciones por minuto.

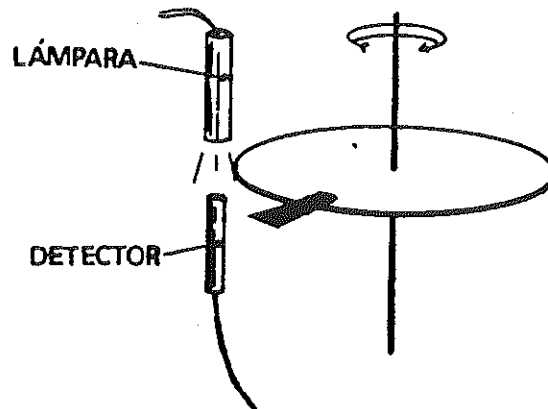


FIG. 8 MEDICION DEL NUMERO DE REVOLUCIONES.

I.3.4 BALIN RODANTE

Un objetivo de este experimento podría ser medir la velocidad final de un balón. Colocando dos fotodetectores al final del riel a una distancia pequeña entre ellos y repitiendo la medición varias veces se obtiene un buen valor para la velocidad para calcular otros parámetros como la energía cinética o de rotación (ver Fig. 9).



.FIG. 9. EXPERIMENTO CON UN RIEL

I.3.5 ESTROBOSCOPIO

Utilizando un solo fotodetector directamente enfrente de un estroboscopio se puede calcular la frecuencia de éste, (ver Figs. 10 y 11).

Es conveniente medir el tiempo para unos 40 ó 80 destellos cuando se trata de frecuencias relativamente altas. Para frecuencias bajas, el selector de cuenta podría colocarse para 10 ó 20 destellos.

El estroboscopio se utiliza comunmente en la medición de la frecuencia de vibración del agua en una cuba de ondas, el Contador-Cronómetro sería útil en este experimento.

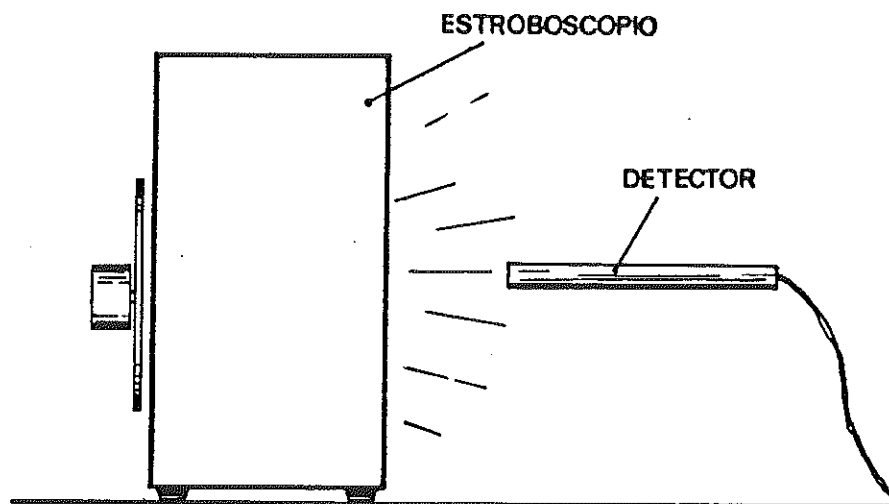


FIG. 10. MEDICION DE LA FRECUENCIA DE DESTELLOS DE UN ESTROBOSCOPIO.

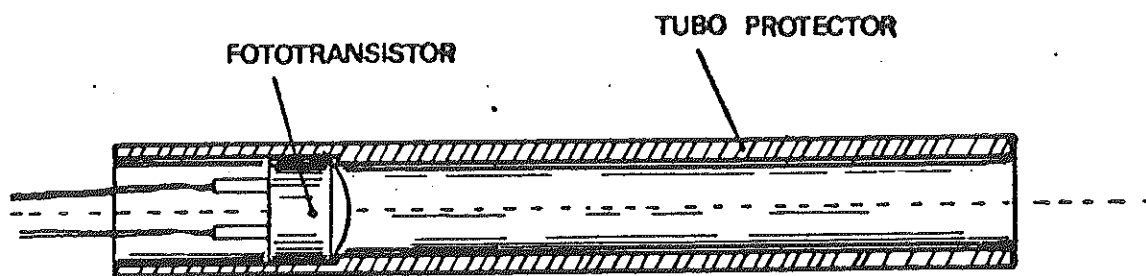


FIG. 11. DETALLE DE LA CONSTRUCCION DEL FOTODETECTOR.

I.3.6 CAIDA LIBRE

Para efectuar el experimento de medición del tiempo de caída libre de un cuerpo se construyó el aparato mostrado en la Fig. 12⁴.

El dispositivo es simplemente un soporte rígido de base circular, con interruptores de contacto en la parte superior e inferior (A y B) respectivamente. El balón se coloca en el interruptor A cerrando el circuito. Cuando empieza a caer abre el interruptor y activa el crónometro. Al final de su caída cierra el interruptor B, desactivando el crónometro.

La estructura es de aluminio con dos pares de cables y conectores A y B (ver Fig. 12), que se conectan en las

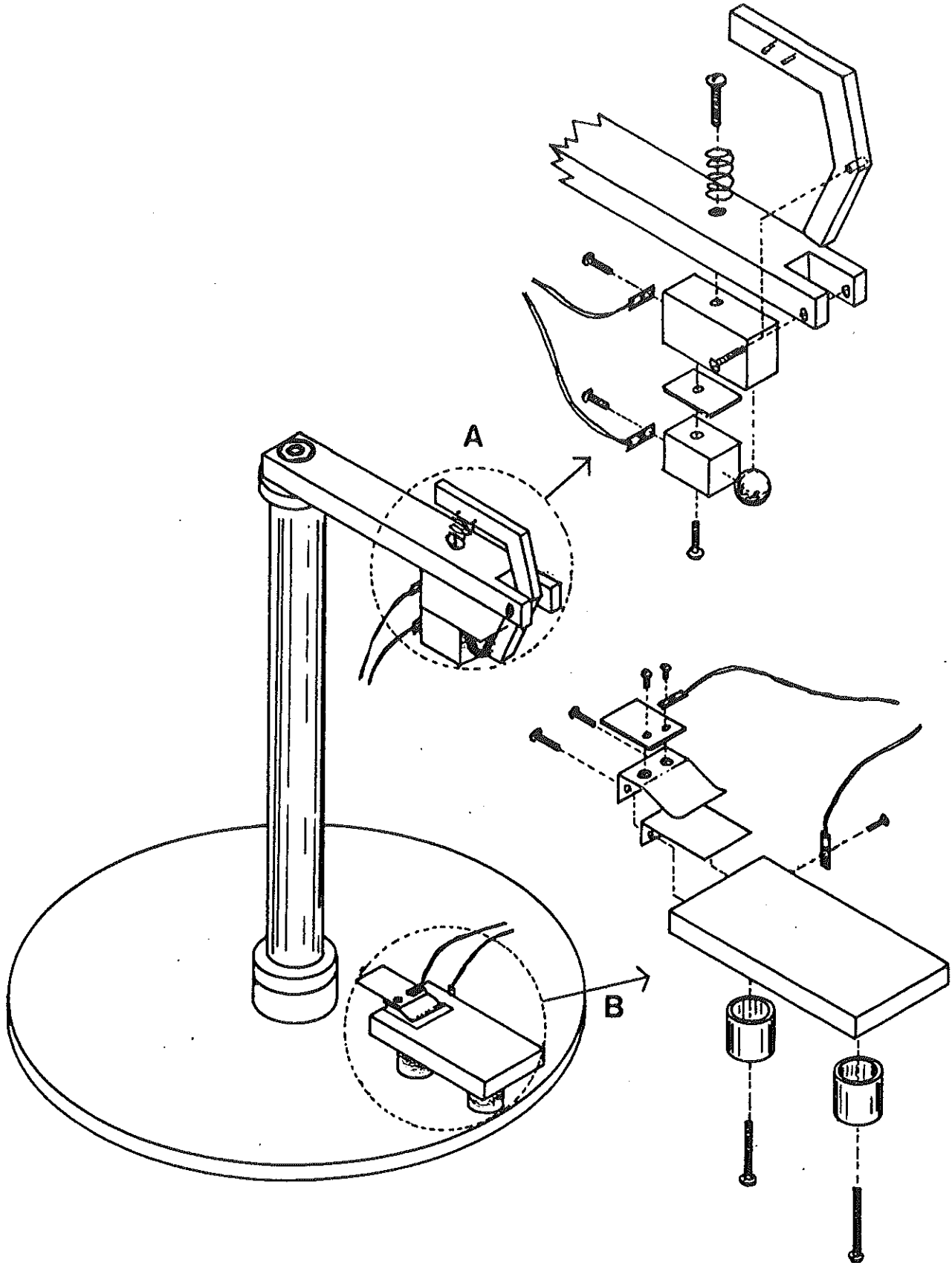


FIG. 12. SOPORTE PARA MEDICION DEL TIEMPO DE CAIDA LIBRE.

respectivas entradas del aparato de medición.

En el capítulo tres se reporta un experimento efectuado con este dispositivo para estimar el valor de la aceleración debido a la gravedad.

Es labor del estudiante que lleva a cabo el experimento, encontrar las posibles causas de error inherente al uso del aparato y tomarlas en cuenta en su reporte de laboratorio.

I.4 MANTENIMIENTO Y CALIBRACION.

El propósito de esta sección es dar una guía para que, en caso de un desperfecto del aparato, cualquier persona con los conocimientos básicos de electrónica pueda repararlo y calibrarlo.

I.4.1 TERMINALES DE PRUEBA (TPX)

Existen doce terminales de prueba en el circuito, cada una de ellas con una señal diferente, ya sea en frecuencia, en voltaje, o en ambas. En la tabla II se enumeran las doce terminales con sus respectivas señales.

Ayudándose de las Figs. 4, 13 y la tabla II, fácilmente puede encontrarse la falla y corregirla en caso de existir.

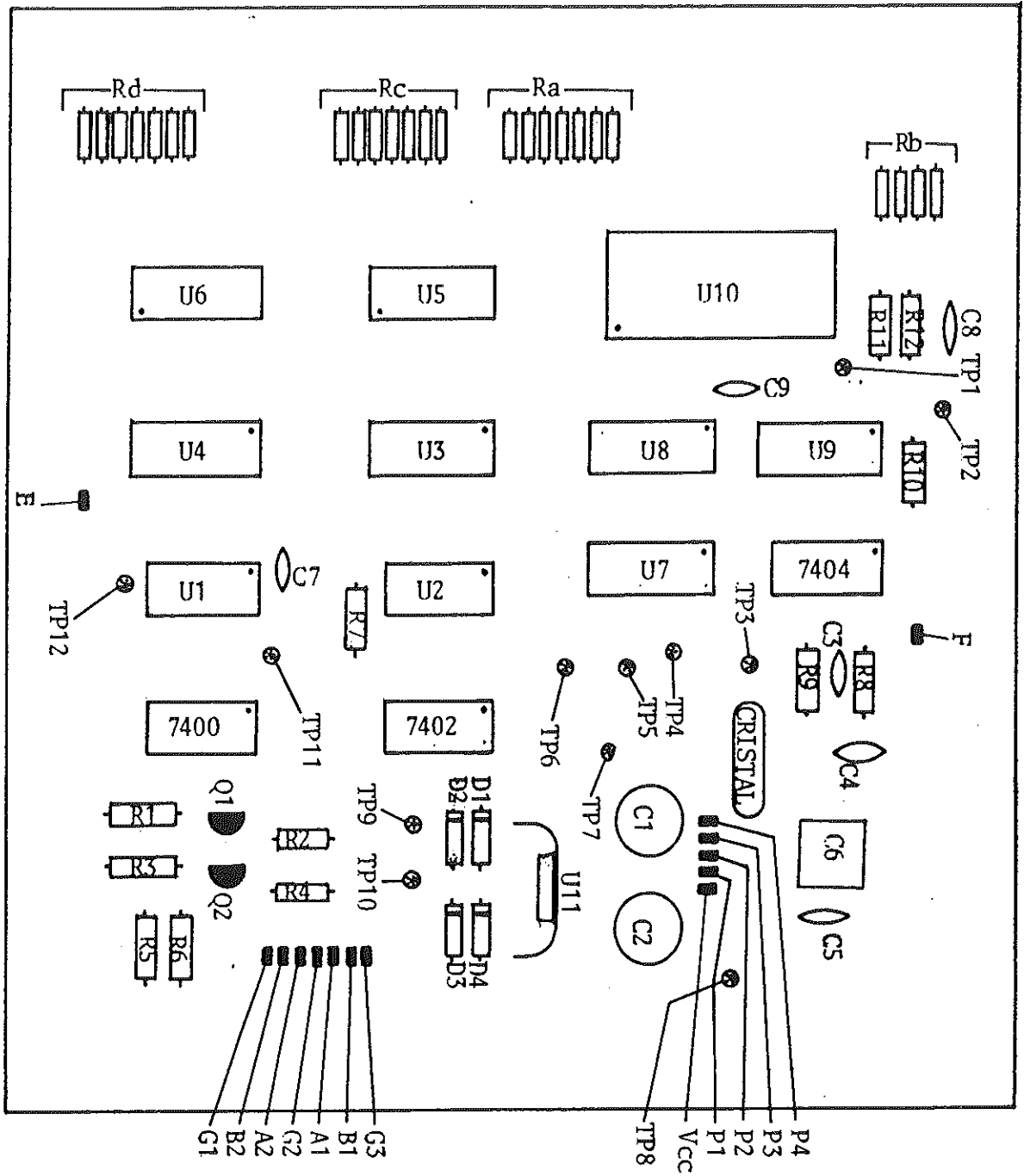


FIG.13. LOCALIZACION DE COMPONENTES.

TP	TIPO DE ONDA	FRECUENCIA	VOLTAJE (volts)
1	cuadrada	ver tabla I	0 a 4.5
2	punta de referencia		0
3	cuadrada	1 MHz	0 a 4.5
4	cuadrada	10 KHz	0 a 4.5
5	cuadrada	1 KHz	0 a 4.5
6	cuadrada	100 KHz	0 a 4.5
7	c. directa	-----	9.5
8	c. directa	-----	5
9 10	senoidal	60 Hz	15 V p-p
11,12	pulso positivo (cuando se acciona transductor)		0 a 4.5

NOTA: Todos los voltajes medidos con respecto a TP2, excepto TP9 y TP10.

TABLA II: Terminales de prueba del Contador-Cronómetro Digital.

NOTA:- Los niveles de voltaje pueden estar en el intervalo de 4.5 a 5.0 volts, i.e., en los circuitos integrados TTL su voltaje de alimentación es de 5 volts, pero los niveles de salida son menores.

En la tabla III se enumeran los componentes electrónicos y su valor.

I.4.2 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION

Para garantizar la precisión del cronómetro, el oscilador debe calibrarse periódicamente. Esto se debe a que el uso y el envejecimiento de los componentes, sobre todo del circuito oscilador de cuarzo, causa que la frecuencia de oscilación cambie.

Para efectuar la calibración se necesita de un contador de frecuencia calibrado con una precisión de ± 1 Hz o mejor, cuando se mide una frecuencia de 1 MHz o mayor. De la tableta del circuito electrónico se mide por TP3 la frecuencia a que está oscilando el cristal, variando el condensador C6 se obtendrá la frecuencia correcta de 1 MHz ± 1 Hz, que es la resolución mínima de un contador de frecuencia típico.

La Fig. 14 nos muestra cómo están ensambladas dentro de la caja de madera las diferentes partes del dispositivo.

Ra: resistencias	82 ohms, 1/4 W
Rb,Rc,Rd,R8,R9: resistencias	330 " "
R1,R3,R5,R6,R7,R10: "	4.7K " "
R2,R4: "	1K " "
R11,R12: "	51K " "
C1,C2: capacitores electrolíticos	1000 uF, 35V
C3,C7,C9: capacitores cerámica	0.1 uF, 50V
C4,C8: "	.01 uF, 50V
C5: "	5 pF, 50V
C6: capacitor variable	2-10pF
D1,D2,D3,D4: diodos rectificadores Si,	1N4001
Q1,Q2: transistores Si, NPN,	2N2222
U1,U2: básculas tipo "JK" TTL,	7473
U3,U4,U7,U8,U9: contadores BCD síncronos TTL,	74190
U5,U6: decodificadores de siete segmentos TTL,	7447
U10: contador década 7 dígitos CMOS,	ICM7208
U11: regulador de voltaje,	7805 (LM340T-5)
U12: compuertas NAND TTL,	7400
U13: compuertas NOR TTL,	7402
U14: inversores TTL,	7404
T1: transformador 120-10VCA, 1A	
visualizadores reloj: MAN74A (7) cátodo común	
visualizadores contador: M3610 (2) ánodo común	
crystal piezoeléctrico: 1 MHz	
S1: selector tres polos, dos tiros	
S2: selector un polo, ocho tiros	
S3: selector dos polos, cuatro tiros	
S4,S5: interruptores un polo, un tiro	
F1: fusible 0.5A	
fotodetectores: fototransistor FPT-100	

TABLA III: Lista de partes del Contador-Cronómetro.

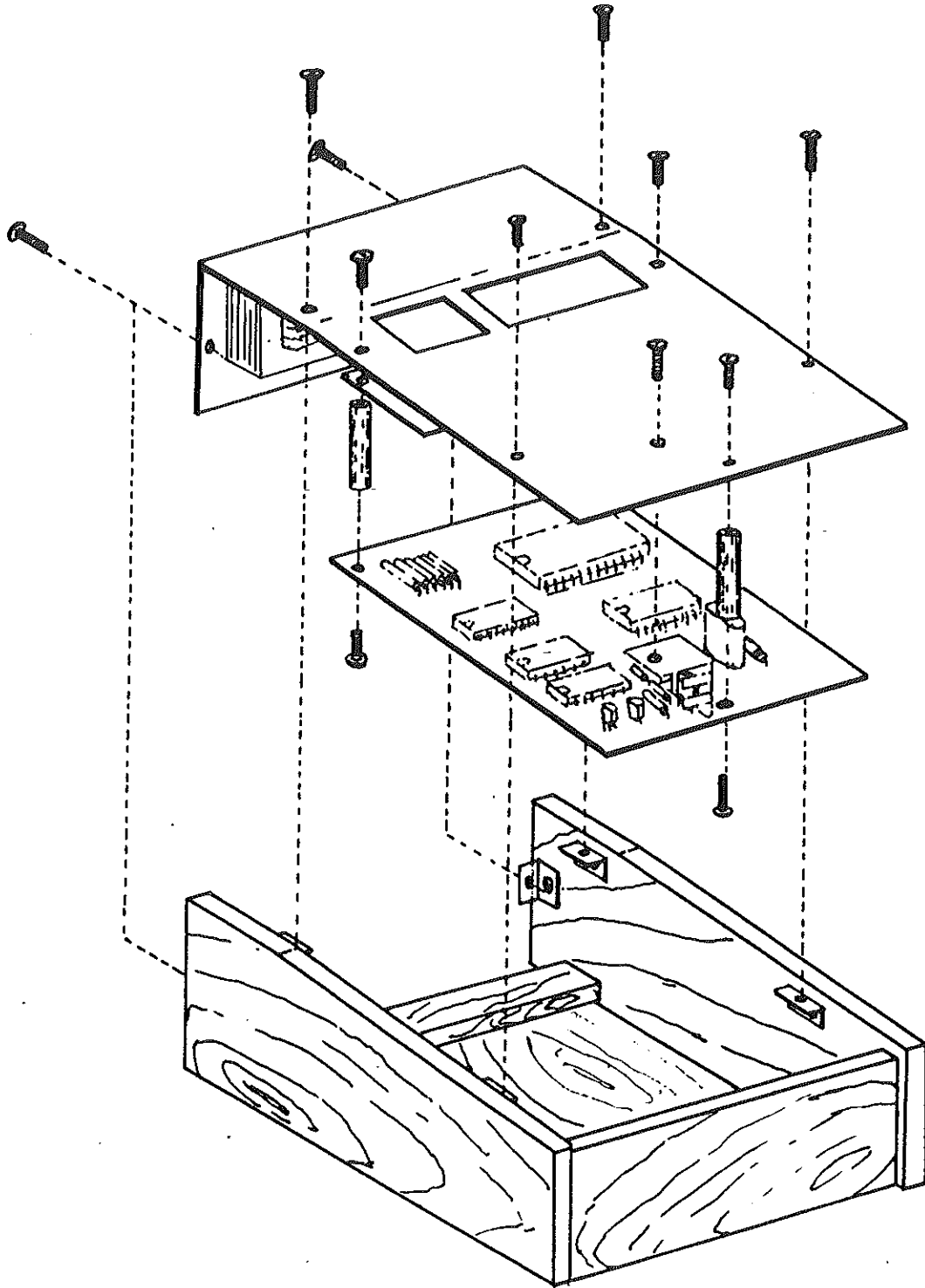


FIG. 14. ENSAMBLE DEL CONTADOR-CRONOMETRO.

CAPITULO II. GENERADOR DE CHISPAS

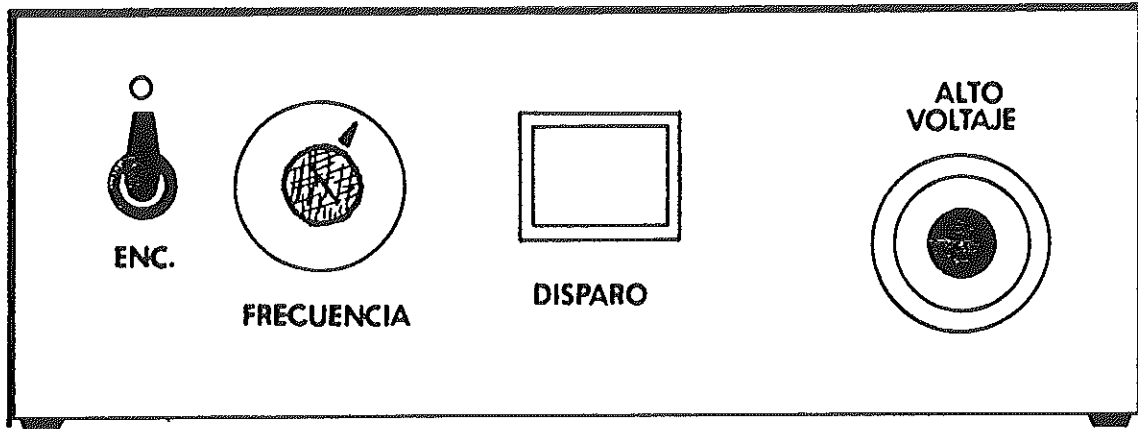
II.1 DESCRIPCION GENERAL.

El generador de chispas es un dispositivo electrónico utilizado para generar chispas de alto voltaje a cualquiera de las cinco frecuencias seleccionadas⁷. Las frecuencias son submúltiplos de la frecuencia de la línea de alimentación.

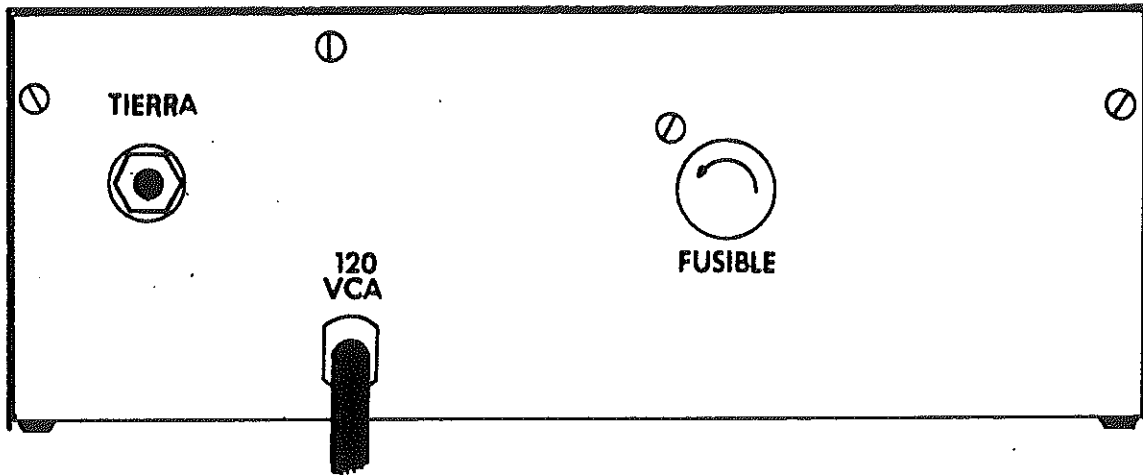
El generador es especialmente práctico para experimentos que requieren grabar en papel sensible la trayectoria de un cuerpo conductor. Un experimento sencillo es la caída libre de un cuerpo metálico. Grabándose en papel las diferentes posiciones del cuerpo y analizando la separación de las marcas de la chispa estadísticamente, se obtienen parámetros importantes para determinar aceleraciones y velocidades.

Los componentes están contenidos dentro de una caja metálica con los controles en la parte de enfrente, como se muestra en la Fig. 15.

En la parte posterior se encuentra el cable de alimentación y el depósito para el fusible de protección.



CARA DE ENFRETE



CARA DE ATRAS

FIG. 15. GENERADOR DE CHISPAS.

II.1.1 ALIMENTACION

El aparato está diseñado para funcionar a un voltaje de línea de 120 vca a 60 Hz (\pm 20 volts) que se conecta con un cable de tres conductores (incluyendo la tierra).

II.1.2 ENCENDIDO

El interruptor marcado "encendido" energiza el aparato para utilizarse. Un diodo emisor de luz (LED) indica el estado de encendido.

II.1.3 ALTO VOLTAJE

En la cara frontal se encuentra la salida de alto voltaje de aproximadamente 25 KV. Este es el conector de alto potencial utilizado en los accesorios, como el dispositivo para caída libre y el riel de aire que se describen en la sección II.3.

II.1.4 CHISPA ELECTRICA

Un interruptor de presión situado en la cara frontal sirve para disparar la chispa a la frecuencia seleccionada. Cuando se oprime, el alto voltaje está presente en el conector aislado.

II.1.5 ATERRIZAMIENTO

En la parte posterior se tiene un conector para aterrizar el aparato, en caso de que no exista una buena tierra en el conector de la línea de voltaje se recomienda utilizar la tubería de agua como tierra. Los accesorios utilizados se aterrizan por medio de este conector.

II.1.6 SELECCIONADOR DE FRECUENCIA

La perilla marcada "frecuencia" selecciona la frecuencia deseada para el experimento. Las frecuencias disponibles son 1, 2, 6, 10 y 30 Hz.

II.1.7 PRECISION DEL APARATO

La precisión en la frecuencia de la chispa depende directamente de la estabilidad de la frecuencia de la línea, aunque puede variar hasta en un 10% en el peor de los casos. Se recomienda medirla con un contador al efectuar el experimento.

II.2 DESCRIPCION TECNICA DEL DISEÑO

En esta sección se detalla electrónicamente como se genera la chispa de alto voltaje.

El circuito electrónico se divide en dos secciones: la sección de alto voltaje y la de circuitería lógica como se muestra en el diagrama de la Fig. 16.

La sección de alto voltaje proporciona la energía necesaria para generar la chispa eléctrica, y la circuitería lógica regula la frecuencia a la que se produce.

II.2.1 SECCION DE ALTO VOLTAJE

Está formada por el transformador T2, los diodos D5 y D6, la bobina L1, los capacitores C5 y C6, las resistencias R13, R14 y R15 y el rectificador controlado de silicio¹⁰ SCR (ver Fig. 17).

Al conducir el diodo D6, el capacitor C6 se carga al voltaje de pico de la media onda, y se descarga a través de la bobina de inducción L1 cuando el rectificador SCR conduce, produciéndose una chispa de alto voltaje en L1.

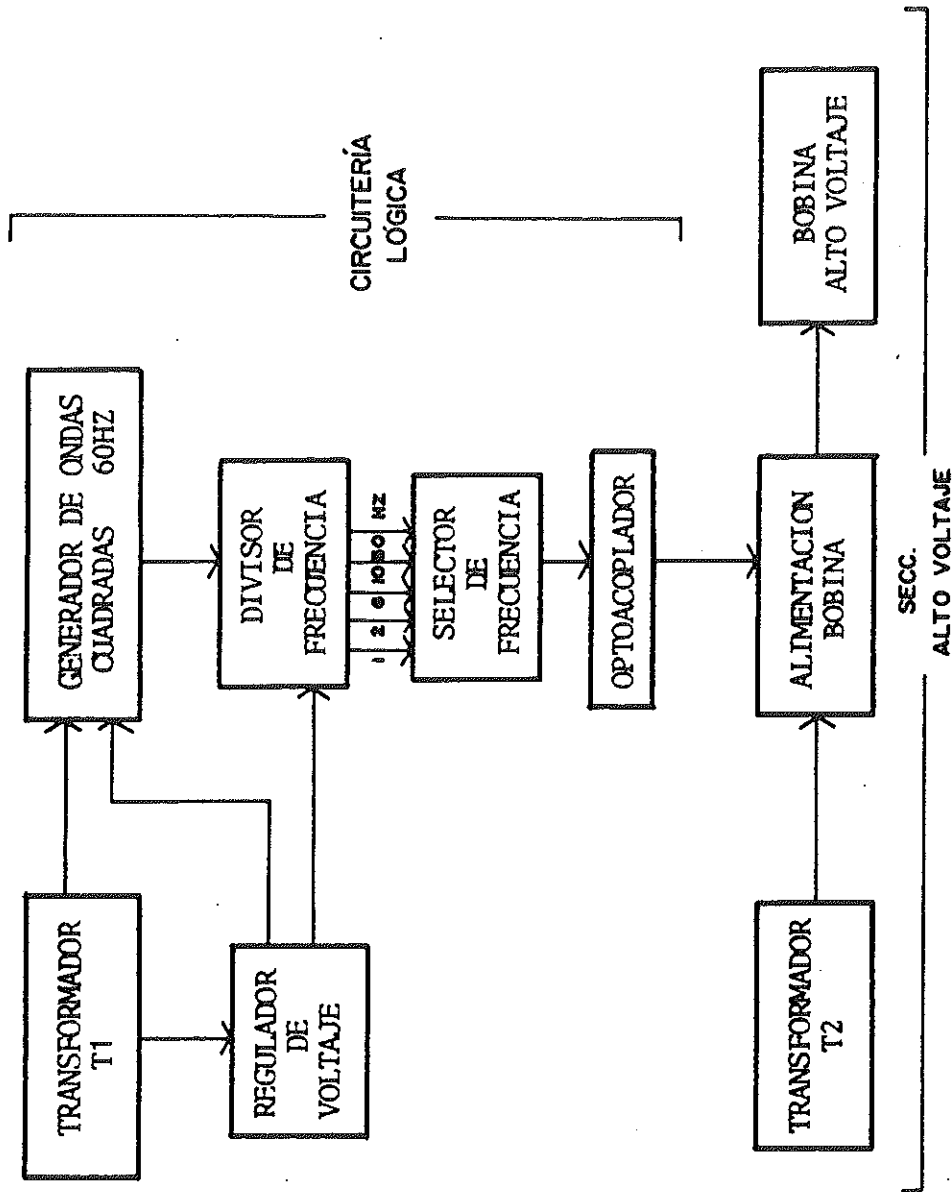


FIG. 16. - DIAGRAMA A BLOQUES DEL GENERADOR DE CHISPAS.

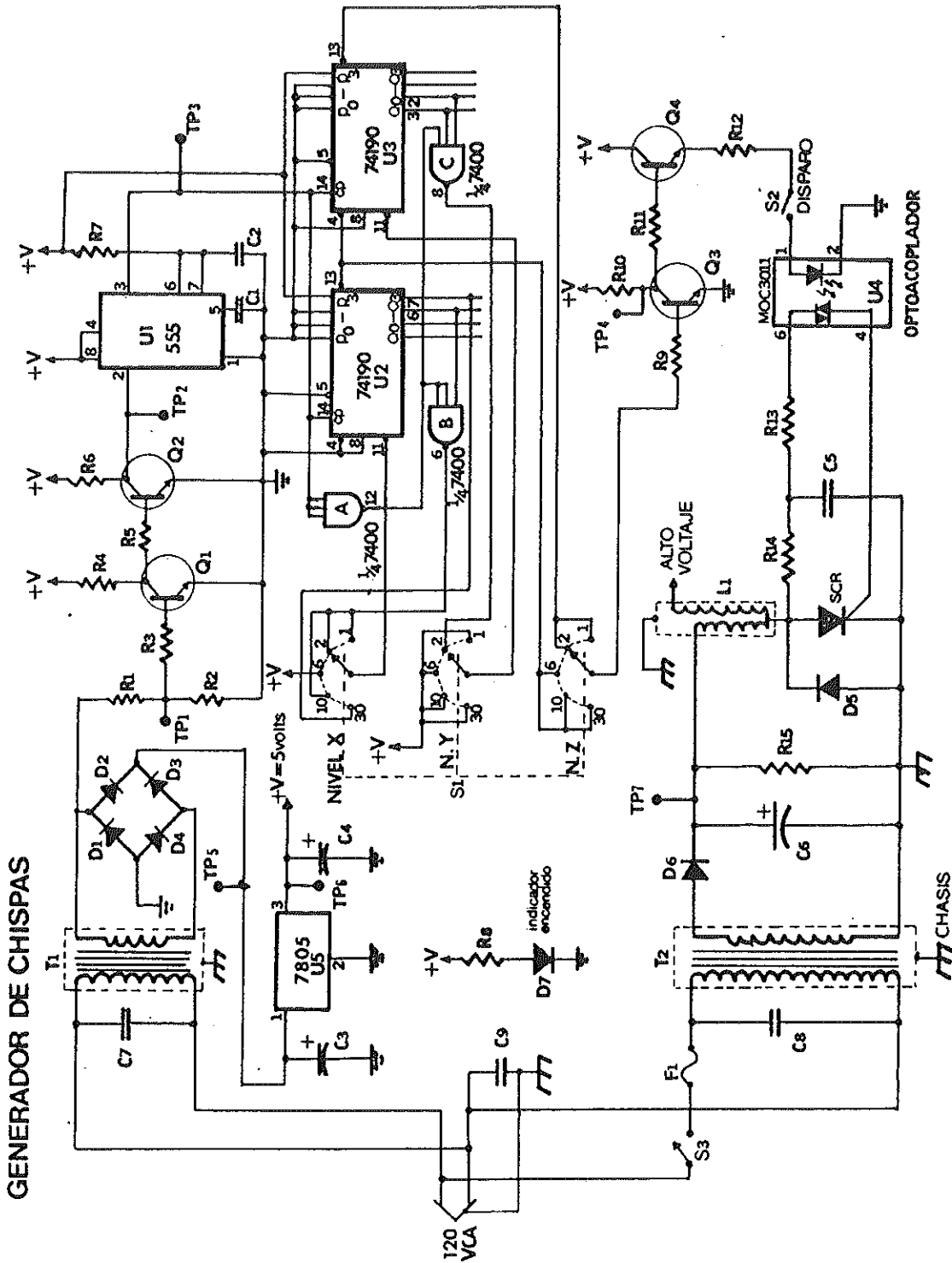


FIG. 17. CIRCUITO ELECTRONICO DEL GENERADOR DE CHISPAS.

GENERADOR DE CHISPAS

CHASIS

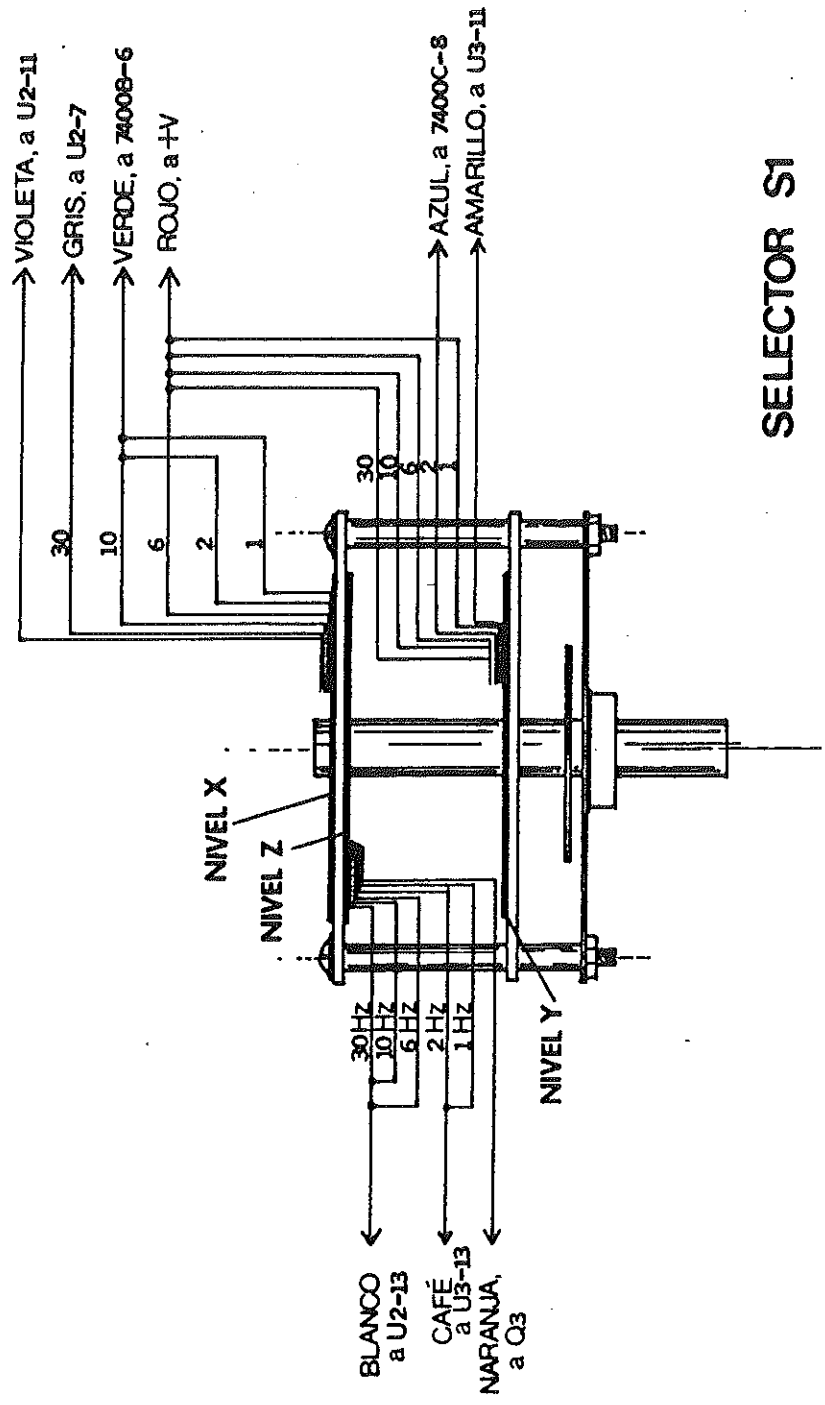
II.2.2 CIRCUITERIA LOGICA

Esta sección realiza la función de divisor de frecuencias. La circuitería lógica abarca los circuitos integrados U1, U2 y U3, los cuatro transistores Q1, Q2, Q3 y Q4, las compuertas 7400 A, B y C y demás componentes auxiliares.

Las resistencias R1 y R2 (Fig. 17) forman un divisor de voltaje, proporcionando una media onda senoidal de 5 volts pico a la base del transistor Q1. Este transistor, junto con Q2 y el circuito U1, convierten la media onda en una onda cuadrada de 60 Hz, que es dividida en 30, 10, 6, 2 y 1 Hz, por la sección del "divisor de frecuencia".

La Fig. 18 muestra el selector S1 (ver Fig. 17) donde se indica el color de los alambres de conexión y su destino. Este selector conecta la base del transistor Q3 con la frecuencia deseada. Cuando Q3 está en un estado de no conducción, Q4 proporciona una corriente de 15 miliamperes al diodo emisor del optoacoplador U4.

Es importante aclarar que la sección de alto voltaje y la sección de circuitería lógica, no comparten la misma tierra para evitar los problemas de ruido eléctrico que acarrea la generación de chispas eléctricas. Sin embargo, las dos secciones se acoplan ópticamente utilizando U4. La



SELECTOR S1

FIG. 18. DETALLE DEL SELECTOR S1.

tierra común de la sección de alto voltaje está conectada al chasis metálico que se aterriza externamente.

II.3 OPERACION

El manejo del generador de chispas es bastante sencillo, pero requiere de cuidado porque utiliza alto voltaje.

Como complemento a este aparato se acondicionó un riel de aire y se construyó un soporte especial para medir la aceleración de un cuerpo en caída libre.

En las Figs. 19 y 20 se puede observar en donde se conecta el alto voltaje y la tierra en estos aparatos.

En el riel de aire, la salida de alto voltaje del generador se conecta al móvil a través de un alambre fino de cobre debidamente aislado del resto del riel y conectado a una punta metálica que lleva el carrito, conservando una separación constante de aproximadamente medio centímetro entre ésta y el papel sensible.

El efectuar un experimento, ya sea para medir velocidad uniforme (riel horizontal) o aceleración (riel inclinado), se debe seleccionar la frecuencia adecuada de tal manera que los puntos obtenidos sean los óptimos.

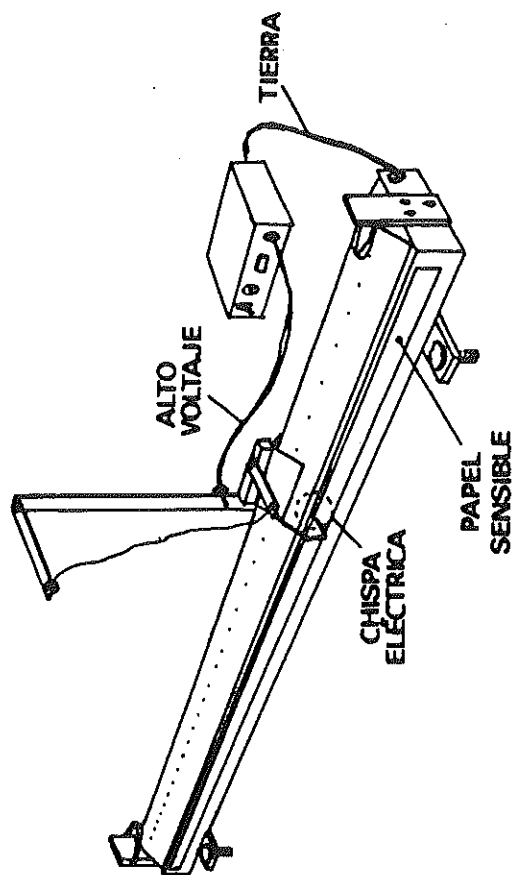


FIG. 19. RIEL DE AIRE.

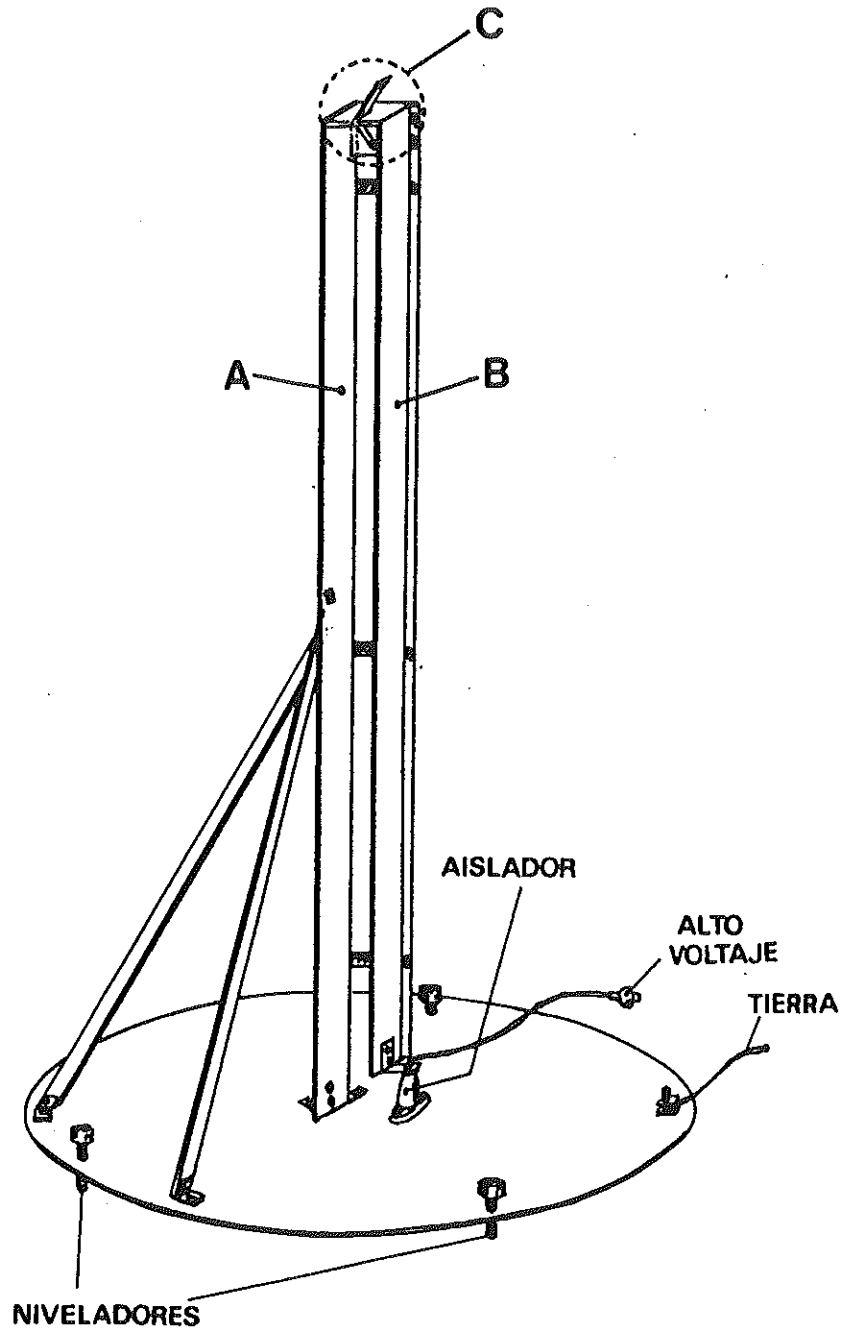


FIG. 20 . SOPORTE PARA LA CAIDA LIBRE DE UN BALIN METALICO.

En el experimento de caída libre⁸ (ver Fig. 20), se coloca una tira de papel sensible en la cara interior de la columna A que se conecta a tierra. La columna B se conecta a la salida de alto voltaje del generador.

Un balón metálico de aproximadamente 2.5 cm. se coloca en el soporte C. La frecuencia de la chispa debe ser de 30 Hz, para obtener así una mayor cantidad de puntos.

Al caer el balón metálico, salta una chispa de la columna B hacia la columna A, a través del balón, marcando el papel a lo largo de su trayectoria de caída.

En estos dos experimentos, se analizan los puntos obtenidos midiendo la separación entre cada uno de ellos. Conociendo la frecuencia de la chispa (y por lo tanto el tiempo transcurrido entre una chispa y la siguiente), se puede obtener velocidades y aceleraciones utilizando el método de análisis apropiado.

II.4 MANTENIMIENTO

El generador no requiere de ningún mantenimiento especial, pero se sugiere no utilizarse continuamente por un tiempo mayor a un minuto y a una frecuencia mayor de 30Hz para evitar el calentamiento de los componentes.

La tabla IV enumera los voltajes presentes en diferentes partes del circuito (ver Figs. 17).

La tabla V detalla las partes electrónicas del generador.

La Fig. 21 muestra un diagrama pictórico de la localización de los componentes electrónicos en la tableta del circuito impreso.

Las Figs. 22 y 23 ilustran la ubicación de los elementos del generador dentro de la caja metálica de protección.

TP	TIPO DE ONDA	FRECUENCIA	VOLTAJE (volts)
1	media onda	60 Hz	4 Vp
2	cuadrada	60 Hz	0 a 4.5
3	cuadrada	60 Hz	0 a 4.5
4	pulso positivo	según selector	0 a 5
5	c. directa	-----	13
6	c. directa	-----	5
7	c. directa	-----	150

NOTA: Todos los voltajes medidos con respecto a \oplus ,
excepto TP7, que es medido con respecto a \ominus .

TABLA IV: Terminales de prueba del
Generador de Chispas.

R1,R8: resistencias	470 ohms, 1/2 W
R2: "	220 " "
R3,R10: "	4.7K " "
R4,R5,R6,R9,R11: resistencias	2K " "
R7: "	8.2K " "
R12: "	130 " "
R13: "	180 " "
R14: "	2.2K " "
R15: "	33K " "
C1: capacitor cerámica	.01 uF, 50V
C2: "	.1 uF, 50V
C3,C4: capacitores electrolíticos	1000 uF, 35V
C5,C7,C8,C9: capacitores polyester	.1 uF, 200V
C6: capacitor electrolítico	20 uF, 450VDC
D1,D2,D3,D4: puente rectificador 50V,1A, CS805	
D5: diodo Si 600V, 1A, 1N4001	
D6: diodo Si 200V, 5A	
D7: diodo emisor de luz (LED)	
SCR - 103-3-M238 Motorola	
Q1,Q2,Q3,Q4: transistores Si, NPN, 2N2222	
U1: oscilador integrado NE555	
U2,U3: contadores BCD síncronos TTL, 74190	
U4: optoacoplador, MOC3010	
U5: regulador de voltaje, 7805 (LM340T-5)	
U6: compuertas lógicas NAND, TTL 7410	
T1: transformador 120-12VCA, 1A	
T2: transformador 120-110VCA	
L1: bobina de inducción de alto voltaje	
S1: selector tres polos, cinco tiros	
S2,S3: interruptores un polo, un tiro	
F1: fusible 2A	

TABLA V: Lista de partes del Generador de Chispas.

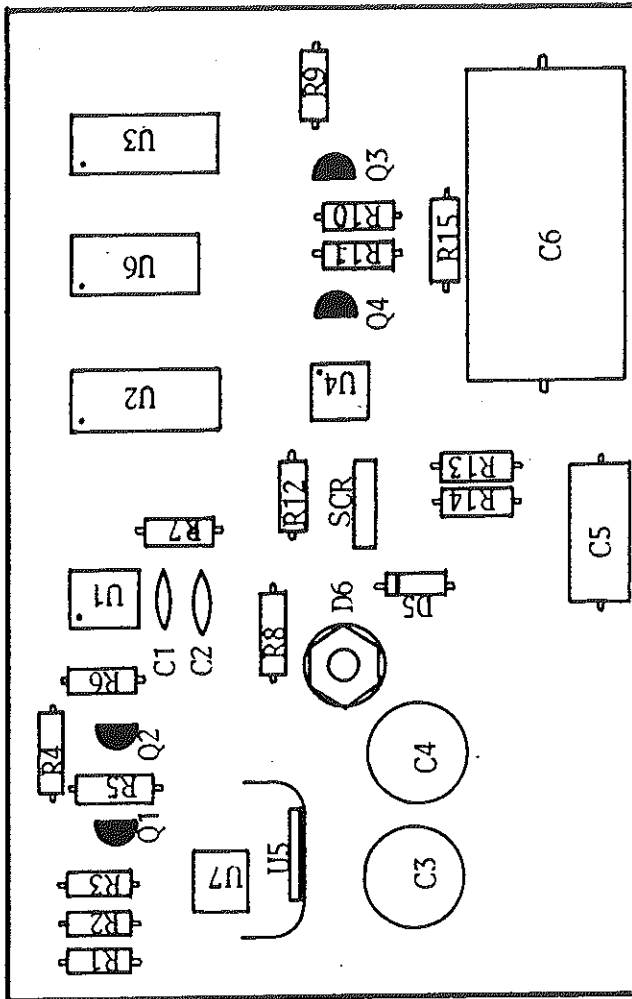


FIG. 21. TABLETA DEL CIRCUITO IMPRESO.

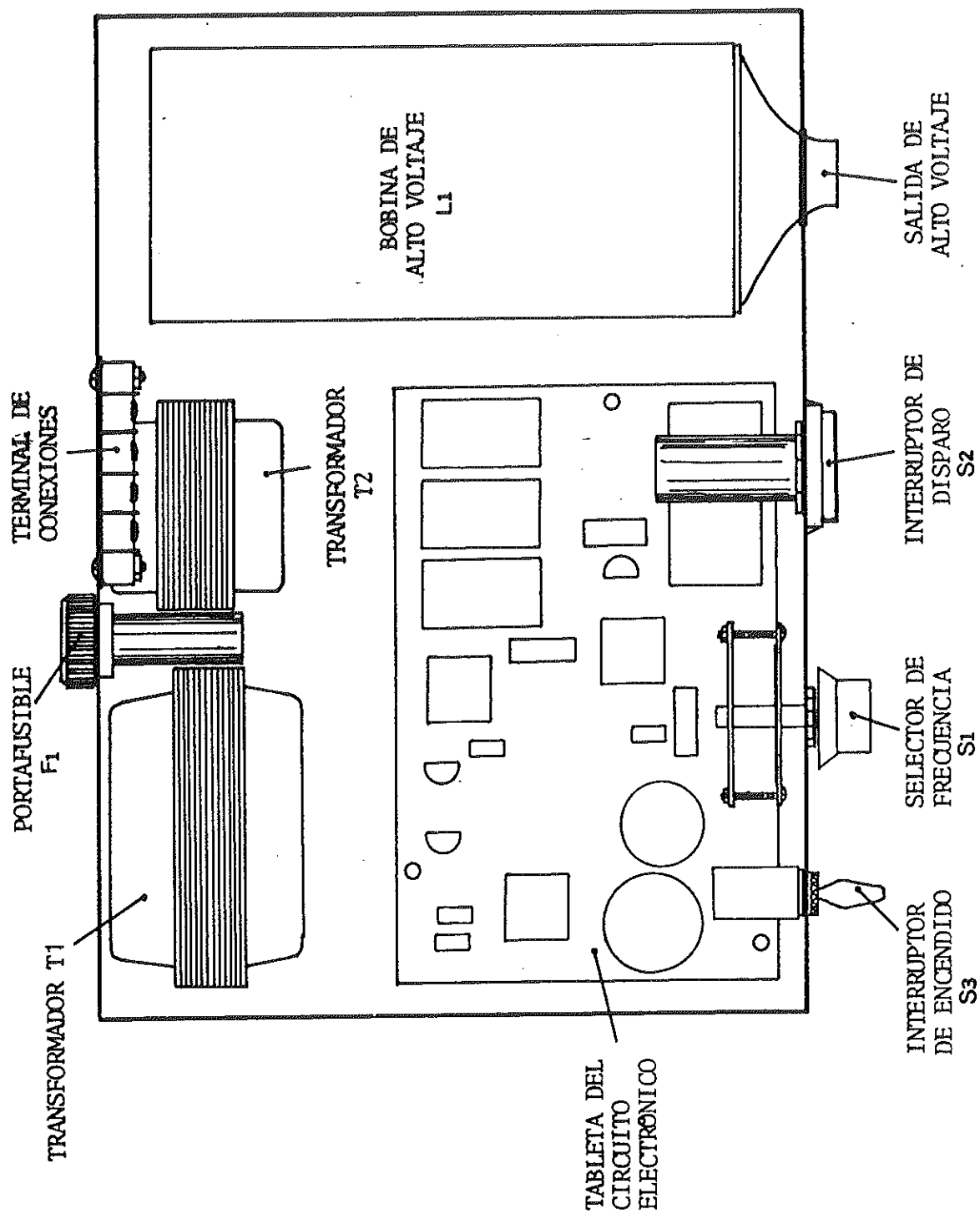


FIG.22 . LOCALIZACION DE PARTES.

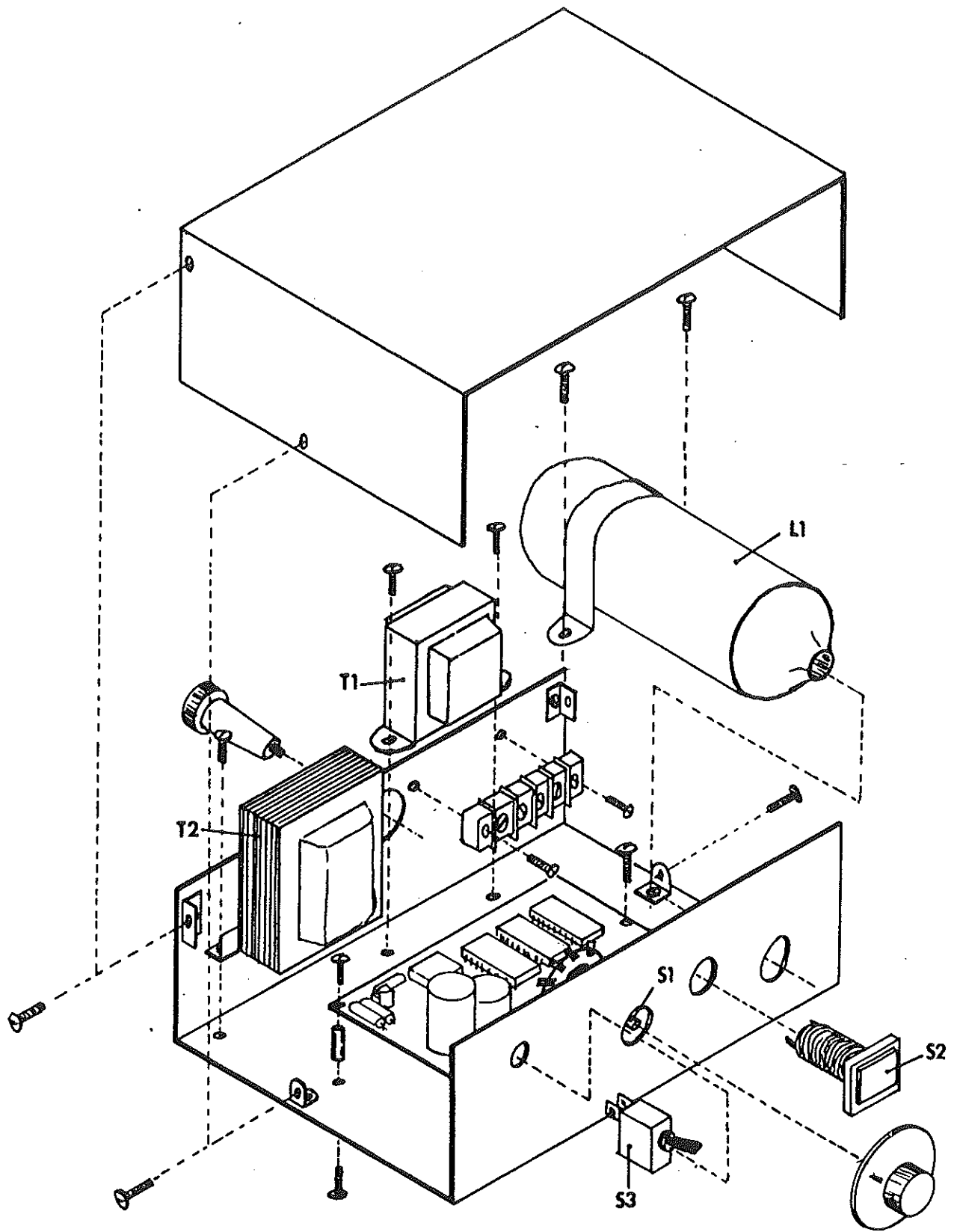


FIG. 23. ENSAMBLE DEL GENERADOR DE CHISPAS.

CAPITULO III. EXPERIMENTOS EFECTUADOS

A continuación se reportan varios experimentos efectuados con los aparatos anteriormente descritos. Lo que se pretende es obtener de aquí un instructivo modelo para una práctica de laboratorio formal, describiendo el objetivo del experimento, los aparatos utilizados, el procedimiento seguido y resultados. De esta forma tener una idea de cuales son las limitaciones del experimento y qué se puede esperar de un reporte presentado por el alumno.

III.1 CAIDA LIBRE CON EL CONTADOR-CRONOMETRO

OBJETIVO:

El experimento consiste en estimar el valor de la constante de gravedad midiendo el tiempo de caída libre de un balón metálico en una distancia "d", utilizando el Contador-Cronómetro Digital⁴.

TEORIA:

En ausencia de los efectos de resistencia del aire, la distancia de caída "d", el tiempo "t" y la aceleración de gravedad "g" están relacionados de la siguiente manera:

$$d = \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots(3.1)$$

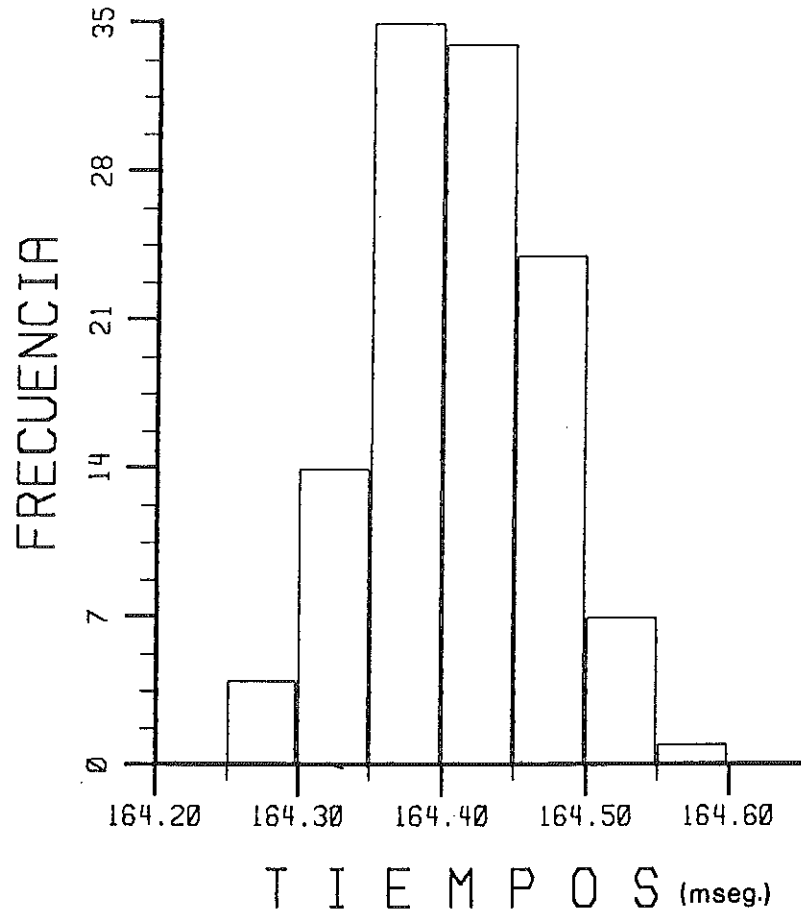


FIG. 24. HISTOGRAMA DE TIEMPOS DE CAIDA.

PROCEDIMIENTO:

Se utilizó el dispositivo de la Fig. 12 (sección I.3.6). Los conectores A y B se conectaron al cronómetro en sus respectivas entradas, el selector se colocó en la posición de "interruptores", la resolución seleccionada fué de ± 10 useg.

Se tomaron un total de 120 mediciones del tiempo de caída del balón, reemplazándose periódicamente la laminilla metálica del interruptor B. Esto aseguraba que el balón incidiera en una región nueva y así obtener datos más consistentes.

RESULTADOS Y DISCUSION:

La Fig. 24 muestra un histograma de las lecturas de los tiempos obtenidos, con una media de 0.16442 segundos y desviación estandar de 0.06 msec. La distancia de caída se midió con vernier, dando un valor de $d = 13.250 \pm .001$ cm.

El valor obtenido para "g" según la expresión (3.1) y los datos mencionados fué 980 ± 1.5 cm/seg .

La incertidumbre se obtuvo de la siguiente expresión:

$$\delta g = \frac{\partial g(d,t)}{\partial d} \delta d + \frac{\partial g(d,t)}{\partial t} \delta t \quad \dots(3.2)$$

donde

$$g(d,t) = \frac{2d}{t^2} \quad \dots(3.3)$$

∫t se estimó como dos veces la desviación estándar³ del tiempo:

$$\int t \approx 2\sigma = 0.12 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

La latitud local y elevación nos permite calcular un valor de gravedad de $979.45 \pm .05$ cm/seg . Nuestro resultado está de acuerdo con este valor en una parte por mil.

Los datos representados por el histograma de la Fig. 24 son los mejores obtenidos en varios experimentos efectuados. La geometría de interruptor A (ver Fig. 12) tuvo que modificarse en varias ocasiones para obtener una mejor consistencia en las lecturas. Por último cabe mencionar que debido a la precisión relativamente pobre del experimento, los efectos de resistencia del aire^{4,6} fueron ignorados.

III.2 CAIDA LIBRE CON EL GENERADOR DE CHISPAS

OBJETIVO:

El experimento consiste en estimar un valor de la constante de gravedad haciendo un análisis estadístico de los puntos obtenidos con el Generador de Chispas⁸ y el dispositivo de la Fig. 20.

TEORIA:

En este experimento estudiamos el movimiento de un cuerpo en caída libre empezando del reposo y moviéndose en línea recta.

El aparato nos da un registro de la posición del cuerpo en función del tiempo en forma de una secuencia de puntos. Puntos sucesivos están separados por una constante de tiempo τ (donde $\tau = 1/f$, siendo f la frecuencia de la chispa en Hertz), pero la separación espacial crece debido a la aceleración.

Para medir y tabular las coordenadas de espacio y tiempo de los puntos, uno de ellos se escoge como referencia o punto cero. En realidad cualquier puede servir como origen, pero por razones que aparecerán después, es ventajoso tomar aquel que se encuentra en el centro de la secuencia de los intervalos de tiempo. Esto quiere decir que debemos tener un

número impar de puntos. Para satisfacer esta condición probablemente sea necesario eliminar uno de ellos al principio o al final del registro.

Al escoger al punto central como origen temporal introduce una simetría en las coordenadas del tiempo de los demás puntos que simplifica los cálculos y resultados.

Hay varios métodos que se pueden aplicar a este experimento para estimar la aceleración, uno de ellos es el de "diferencias sucesivas". El método es directo y sencillo pero no exacto. Existe un acumulamiento grande de errores en los valores de la aceleración y una nulificación de los datos originales.

El método de análisis que proporciona mejores resultados para este experimento y para muchos otros es el método de mínimos cuadrados^{1,3} porque hace uso directo de los datos para el cálculo de la aceleración.

En el apéndice A se explica este método y se incluye un programa de computadora en lenguaje BASIC que se utilizó con los datos de este experimento.

PROCEDIMIENTO:

Para efectuar el experimento se siguió el procedimiento

descrito anteriormente en la sección II.3.

Hubo necesidad de repetir el experimento un par de veces porque se notaba la ausencia de algún punto en la secuencia del registro.

Los datos utilizados en el análisis se obtuvieron de un registro de nueve puntos. Cada uno de ellos se identificó con un índice j , que puede tomar valores de $-m$ a $+m$ incluyendo el cero, teniendo un total de $2m+1$ puntos. El punto $j=0$ es el punto central de referencia. Los puntos donde j es negativo se encuentran antes del punto de referencia y los de j positiva después.

Las coordenadas de posición correspondientes S_j son medidas con respecto al punto central, siendo una distancia positiva si j es positiva y negativa si j es negativa, de acuerdo a la convención anterior.

La Fig. 25 muestra el patrón de puntos con las coordenadas de posición.

RESULTADOS Y DISCUSION:

La tabla VI muestra los datos experimentales obtenidos. Estos parámetros, junto con la frecuencia del generador y el valor de m , se introdujeron como datos en el programa de

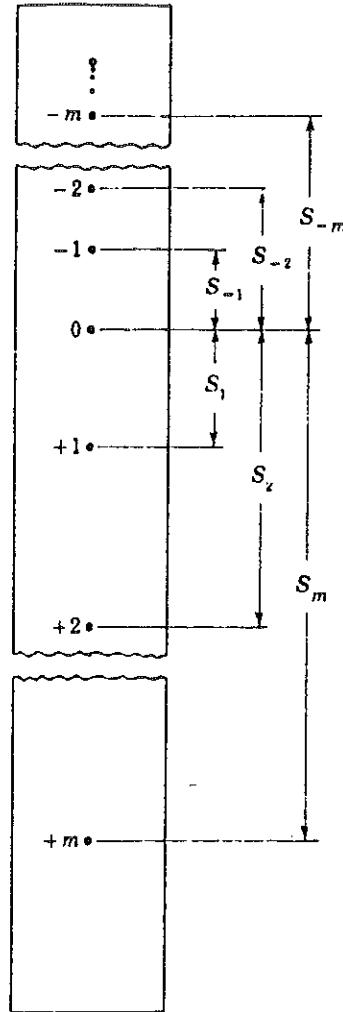


FIG. 25. PATRON DE PUNTOS OBTENIDOS EN CAIDA LIBRE.

j	S_j	S_{-j}
1	7.8	-6.65
2	16.7	-12.25
3	26.6	-16.75
4	37.6	-20.30

TABLA VI. COORDENADAS EXPERIMENTALES DEL REGISTRO DE PUNTOS.

mínimos cuadrados para estimar el valor de la aceleración y su incertidumbre asociada (ver apéndice A).

El valor de la aceleración "g" obtenido fué de 971 ± 12 cm/seg².

Puede verse que la precisión del experimento no es muy buena. Existe dispersión de puntos en el registro atribuible a la inhomogeneidad del aire y del papel como dieléctricos, i.e., la chispa no salta con la misma facilidad en un punto y otro durante la caída del balón. Este problema se puede reducir si disminuimos la separación de las columnas A y B del dispositivo de la fig. 20.

Por otro lado, se mencionó en la sección II.1.7 que la precisión y estabilidad en la frecuencia de la chispa es muy buena, que para todo propósito práctico puede considerarse como constante.

En conclusión, el experimento es ilustrativo en el sentido que introduce al alumno en las técnicas de ajuste de curvas por el método de mínimos cuadrados y lo familiariza en el uso del Generados de Chispas.

III.3 PRACTICAS DE LABORATORIO

En esta sección se presentan tres "instructivos modelo" para prácticas de laboratorio utilizando los dispositivos construídos.

Las prácticas I y III se refieren al Contador-Cronómetro es sus dos modalidades de operación: interruptores y fotodetectores.

La práctica II sugiere un experimento con el Generador de Chispas.

PRACTICA I

EXPERIMENTO: Caída libre de un cuerpo utilizando el Contador-Cronómetro.

INTRODUCCION:

Para la obtención de la constante de gravedad "g", el experimento de un cuerpo en caída libre es probablemente uno de los más sencillos⁴. Comúnmente la determinación del tiempo que tarda en caer un objeto se hace con cronómetro manual, teniendo como desventaja la terrible imprecisión causada por los reflejos humanos.

Utilizando un sistema totalmente electrónico, se puede tener una resolución de ± 10 useg.

OBJETIVO:

Estimar la constante de gravedad midiendo el tiempo y la distancia de caída de un cuerpo.

MATERIAL:

- Contador-Cronómetro digital.
- Soporte rígido con interruptores de contacto (Fig. 12)
- Laminillas de aluminio
- Balín metálico con diámetro aproximado de 1 cm.

- Vernier.

METODO:

Se coloca la laminilla de aluminio de aproximadamente 3 X 2 cm de área en el interruptor B. Esta servirá de interruptor de contacto cuando el balón caiga. Una vez conectados los interruptores A y B en cronómetro, se coloca el balón en el interruptor A.

Los selectores del aparato deben estar en las siguientes posiciones:

- Resolución \pm 10 useg.
- Límite de cuenta en 1.
- Selector en interruptores

Quando se inicia la caída del balón se abre al interruptor A activando el cronómetro. Al final de su caída se cierra el interruptor B, desactivando el cronómetro.

Mídase el tiempo para 100 o más caídas. Grafíquese los datos en un histograma y calcúlese el tiempo promedio y la desviación estándar. Mídase también la distancia de caída con un vernier.

Utilizando la siguiente expresión:

$$s = \frac{1}{2}gt^2 \quad \dots(3.1)$$

obtener el valor de "g" con su incertidumbre asociada al experimento.

Preguntas:

- Cuáles son las posibles causas de error en el experimento?
- Cómo puede mejorarse la precisión?
- Qué consecuencias traería tomar un número menor o mayor de datos del tiempo de caída?
- Investigue el valor "real" de la gravedad en la localidad según la latitud y elevación. Compare este valor con el obtenido experimentalmente.

PRACTICA II

EXPERIMENTO:

Caída libre de un cuerpo utilizando el Generador de Chispas.

INTRODUCCION:

El Generador de Chispas se utiliza para grabar en papel sensible la trayectoria de un cuerpo conductor^{7,8}. Analizando la secuencia de puntos con el método estadístico de mínimos cuadrados se puede calcular la aceleración correspondiente a esa secuencia.

OBJETIVO:

Estimar el valor de la constante de gravedad. Estudiar el método de ajuste de curvas por mínimos cuadrados.

MATERIAL:

- Generador de Chispas
- Soporte rígido especial para caída libre (fig. 20)
- Balín metálico de aproximadamente 2.5 cm de diámetro
- Papel sensible a chispas eléctricas
- Regla graduada en centímetros (mínima división: mm)
- Cinta adhesiva

- Plomada para nivelar

METODO:

Pegue una tira de papel sensible de 4 X 75 cm en la cara interior de la columna A (ver fig. 20). Conecte la columna B a la salida de alto voltaje del generador y la columna A a tierra (chasis).

Colocar el balín metálico en la parte C del soporte y utilizando la plomada nivelar verticalmente las columnas moviendo los tres tornillos de la base.

Haga pruebas de caída sin disparar la chispa para verificar que el cuerpo no roce en las paredes.

Una vez que esté listo el montaje y con el selector de chispa en la posición de 30 Hz, dispare el generador y deje caer el balín (en ese orden). Revise el registro obtenido. Si falta algún punto repita el experimento.

Si obtuvo un patrón aceptable, asigne a cada punto el índice j correspondiente, y mida las distancias S , según el dibujo de la fig. 25. Las distancias S , la frecuencia f y el número m relacionado con la cantidad de puntos obtenidos son los datos necesarios para aplicar el método de mínimos cuadrados.

Primero calcule las siguientes sumatorias (para una explicación más detallada del método ver el Apéndice A):

$$C_1 = \frac{\sum_1^m (S_j + S_{-j})}{2 \sum_1^m j^2} \quad \dots (3.4)$$

$$C_2 = \frac{\sum_1^m j^2 (S_j + S_{-j})}{2 \sum_1^m j^4} \quad \dots (3.5)$$

$$C_3 = \sum_1^m (S_j - S_{-j}) \quad \dots (3.6)$$

$$C_4 = 2 \sum_1^m j \quad \dots (3.7)$$

para obtener:

$$C = C_2 + 1.25 (C_2 - C_1) \quad \dots (3.8)$$

$$\epsilon = -\frac{3}{4} m^2 (C_2 - C_1) \quad \dots (3.9)$$

$$b = \frac{C_3}{C_4} \quad \dots (3.10)$$

La mejor estimación de la desviación estándar de S_j está dada por la relación:

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{\sum_{-m}^m d_j^2}{2m-2}} \quad \dots (3.11)$$

donde

$$d_j = S_j - (e + bj + cj^2) \quad \dots(3.12)$$

$$j = -m, \dots, 0, \dots, +m$$

Una vez que se haya determinado σ , puede demostrarse³ que el error estandar en c está dado por la ecuación:

$$\sigma^2\{c\} = \frac{(2m+1)\sigma^2}{2(2m+1)\sum_1^m j^4 - (2\sum_1^m j^2)^2} \quad \dots(3.13)$$

Entonces la determinación de $\{c\}$ depende directamente del valor de σ ,

dado por la ecuación (3.11).

Con estos valores podemos estimar el valor de "g" con la expresión:

$$g = 2cf^2 \quad \dots(3.14)$$

y su incertidumbre asociada:

$$\delta g = 6f^2\sigma\{c\} \quad \dots(3.15)$$

PREGUNTAS:

- Cuál es el error relativo de "g"?
- Cuáles son las posibles causas de error en el experimento?
- Qué sugerencias tiene para mejorar el experimento?
- Haga una gráfica de distancia contra t^2 ($t = j/f = j\tau$, donde $j = 1, 2, \dots, m$) para ajustar una recta por mínimos

cuadrado cuya pendiente es $g/2$. Compare este valor con el obtenido anteriormente. A qué atribuye las diferencias (si las hay)?

- Qué consecuencias traería obtener un mayor número de puntos en el registro?

PRACTICA III

EXPERIMENTO:

Verificar dentro de los límites experimentales, el principio de la conservación de la energía midiendo la energía cinética y potencial de un cuerpo⁵.

INTRODUCCION:

El principio de conservación de la energía es un postulado universal de las ciencias naturales que puede anunciarse de la siguiente manera: "La energía no se crea ni se destruye, solo puede transformarse en otros tipos de energía".

En este experimento veremos como la energía potencial que tiene un cuerpo cuando se encuentra a una altura h con respecto a un nivel de referencia, se transforma en energía de movimiento.

OBJETIVO:

Midiendo la energía potencial de un balón y su velocidad final cuando rueda por un plano inclinado, verificar la conservación de la energía.

TEORIA:

Considere un balón de masa m que baja rodando por un plano inclinado sin deslizar. El balón esférico se encuentra inicialmente en reposo. Al bajar rodando por el plano inclinado pierde una cantidad mgh de energía, siendo h la altura del plano inclinado. Su ganancia de energía cinética es igual a:

$$\frac{1}{2} I_{cm} \omega^2 + \frac{1}{2} m v^2 \quad \dots(3.16)$$

siendo v la velocidad lineal del centro de masa, ω la velocidad angular con respecto al centro de masa en la base del plano, e I_{cm} el momento de inercia del cuerpo.

El primer término de la ecuación (3.16) es la contribución de la energía cinética de rotación, y el segundo corresponde a la energía cinética de traslación del centro de masa.

Tenemos entonces la igualdad:

$$mgh = \frac{1}{2} I_{cm} \omega^2 + \frac{1}{2} m v^2 \quad \dots(3.17)$$

en la cual,

$$I_{cm} = \frac{2mr^2}{5} \quad \text{y} \quad \omega = \frac{v}{r}$$

r es el radio del balón, por consiguiente:

$$mgh = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{5} mr^2 \right) \left(\frac{v}{r} \right)^2 + \frac{1}{2} mv^2$$

$$mgh = \frac{mv^2}{5} + \frac{mv^2}{2}$$

$$mgh = \frac{7}{10} mv^2 \quad \dots(3.18)$$

La ecuación (3.18) nos indica entonces, los parámetros que tenemos que medir para ver la equivalencia de energía potencial y cinética.

MATERIAL:

- Contador-Cronómetro Digital
- Dos fotodetectores
- Balón metálico de 2.5 cm de diámetro
- Riel de aluminio acanalado
- Lámpara de luz blanca con fuente de corriente directa
- Soportes universales con pinzas

METODO:

El experimento se basa en el procedimiento descrito en la sección I.3.4.

Con el material citado, arme el montaje ilustrado en la Fig. 9 del capítulo I, procurando que los detectores estén

lo más cerca posible (el diámetro mismo del balón limita esta distancia mínima) y con su lámpara correspondiente que los ilumine.

El selector de cuenta del contador debe estar colocado en la posición de uno. Con lo que respecta a la resolución del cronómetro, el estudiante debe efectuar algunas pruebas de medición del tiempo y decidir el número de cifras significativas que tengan validez en el experimento.

Seleccione una altura h en el riel que mantendrá fija a lo largo del experimento. Suelte el balón desde esta altura y tome nota del tiempo marcado en el cronómetro .

Repita el procedimiento hasta obtener un total de diez valores de t y obtenga su media (\bar{t}) y desviación estandar (σ).

La velocidad promedio que tenía el cuerpo cuando atravesó los fotodetectores puede calcularse de la siguiente expresión:

$$v = \frac{d}{t}$$

donde d es la separación física de los fotodetectores. Conociendo la altura h de donde se soltó el balón, su masa m y su velocidad final, calcule ambos términos de la expresión (3.18) con sus respectivas incertidumbres.

PREGUNTAS:

- Coinciden los valores de las energías calculadas con la expresión (3.18) dentro de los límites de error?
- Si la respuesta anterior es negativa, a qué atribuye la discrepancia de valores?
- Qué soluciones propone para corregir el error?
- Repita el experimento para otra altura diferente y otra inclinación el riel. Qué resultados obtuvo?
- Si el cuerpo no rodara el caer, esperaría una equivalencia entre la energía potencial y la energía cinética adquirida?
- Si en lugar de un balón esférico tuviéramos un cilindro rodante, cilindro rodante, seguiría siendo válida la expresión (3.18)?. Por qué?

CAPITULO IV. CONCLUSIONES

Se construyeron dos aparatos para uso en laboratorio de Física: un Contador-Cronómetro Digital, y un Generador de Chispas. Cada uno de ellos se describe ampliamente en su circuitería electrónica, modo de operación y sus aplicaciones en experimentos específicos.

Mencionamos en la sección III.1, que el interruptor A del soporte mostrado en la Fig.12 fué modificado.

La posición del resorte del gatillo (que originalmente era la que tiene en la Fig.12) se trasladó de punto de apoyo de la barra horizontal hacia la columna cilíndrica vertical que sostiene el interruptor A. Esto se hizo porque se pensaba que al darle el golpe inicial al gatillo para soltar el balón, parte del impulso se le comunicaría directamente al mismo balón a través de la estructura que lo sostiene, dándole así una velocidad inicial diferente de cero que no se desea.

La otra modificación que se hizo fué al pequeño bloque de aluminio donde descansa el balón antes de caer (parte A Fig.12). Se recortó con la idea de que el balón no rozara en él al empezar su caída.

Se hicieron medidas del tiempo de caída antes y después

de haber efectuado estas modificaciones.

La Fig. 26a muestra un histograma de 64 mediciones del tiempo de caída del mismo balón utilizado en el experimento de la sección III.1. La media es de 0.16442 segundos, y una desviación estandar de 2.7×10^{-4} seg.

Se efectuó un segundo experimento con 150 datos. Su histograma se muestra en la Fig. 26b. La media calculada fué de 0.16440 seg. y desviación estandar de 4×10^{-4} seg.

Vemos claramente que al aumentar el número de datos aumenta también la dispersión de ellos alrededor de su media.

Estos dos experimentos se hicieron antes de las modificaciones mencionadas.

Un tercer experimento con un total de 120 datos se efectuó después de cambiar el gatillo. El histograma de los valores del tiempo se muestra en la Fig. 26c (es el mismo que se reporta en el capítulo III). La media fué de 0.16442 segundos y desviación estandar de 0.6×10^{-4} segundos.

Podemos entonces concluir que las correcciones al diseño original mejoraron el experimento en el sentido que disminuyó la incertidumbre en el tiempo.

MITAD DEL INTERVALO	NUMERO DE OBSERVACIONES	
O. 16420	1	*
O. 16425	4	****
O. 16430	7	*****
O. 16435	13	*****
O. 16440	7	*****
O. 16445	15	*****
O. 16450	7	*****
O. 16455	4	****
O. 16460	4	****
O. 16465	1	*
O. 16470	1	*

=0.16442 seg.
=2.7 X 10⁻⁴ seg.
N=64 DATOS

(a)

MITAD DEL INTERVALO	NUMERO DE OBSERVACIONES	
O. 16415	2	**
O. 16420	6	*****
O. 16425	8	*****
O. 16430	22	*****
O. 16435	28	*****
O. 16440	22	*****
O. 16445	27	*****
O. 16450	16	*****
O. 16455	9	*****
O. 16460	7	*****
O. 16465	2	**
O. 16470	1	*

=0.16440 seg.
=3.9 X 10⁻⁴ seg.
N=150 DATOS

(b)

MITAD DEL INTERVALO	NUMERO DE OBSERVACIONES	
O. 16420	1	*
O. 16425	1	*
O. 16430	6	*****
O. 16435	21	*****
O. 16440	37	*****
O. 16445	34	*****
O. 16450	16	*****
O. 16455	4	****

=0.16442 seg.
=0.6 X 10⁻⁴ seg.
N=120 DATOS

(c)

Fig. 26. Histograma de tiempos de caída.

Cabe mencionar que en cada nuevo experimento se cuidaba que la intensidad con que se golpeaba el gatillo fuese la necesaria para soltar el balón. Esto se hacía para tener una mejor consistencia en las lecturas obtenidas.

El segundo término de la derecha de la ecuación (3.2) sección III.1 depende fuertemente del tiempo ($\sim 1/t^3$), por lo que se recomienda mantener la incertidumbre δt al mínimo para obtener una mejor precisión en el experimento.

Por otro lado, el experimento III.2 puede mejorarse si se incluyen más puntos en el registro, y ésto se logra construyendo un dispositivo similar al de la Fig.20 con columnas de mayor longitud. Así el balón viajará una mayor distancia.

Existe una velocidad mínima a la que responde el Contador-Cronómetro cuando se utilizan los fotodetectores como transductores, i.e., para objetos que obstruyen muy lentamente el fotodetector el contador no los registra (en ocasiones da lecturas erróneas en el número de eventos). Esto se debe al efecto de umbral: cuando la intensidad de luz que incide en el detector está muy cerca de la intensidad mínima que mantiene al fototransistor conduciendo se producen oscilaciones entre 0 y 4.5 volts en el colector de los transistores 2N2222 de entrada. Pero esta velocidad mínima de obstrucción es tan baja, que el experimento que se quiere

medir puede hacerse con un cronómetro manual, sin necesidad de utilizar el Cronómetro Digital.

Cuando se emplean los interruptores como transductores el problema de rebote se elimina utilizando básculas "JK" (circuito integrado U2 de la Fig. 4).

Si se quiere utilizar interruptores en otro tipo de experimentos para medir intervalos de tiempo, únicamente tiene que seguirse las siguientes instrucciones:

- a) Colocar el selector en la posición de "interruptores"
- b) el interruptor que accione el cronómetro debe de colocarse en la entrada A, y el que lo para en B (ver Fig.1),
- c) para que empiece el reloj, el interruptor A debe de abrirse,
- d) para pararlo el interruptor B debe cerrarse, manteniendo el interruptor A abierto.

El tiempo de respuesta de un fototransistor a la luz incidente depende de varios factores¹¹ (corriente y voltaje de colector, intensidad de la luz incidente, etc.), pero generalmente es del orden de microsegundos. Esto nos limita el uso del fotodetector en ciertos experimentos, no podemos confiar en mediciones de tiempo que sean de este orden. Aunque se puede ver del diagrama de la Fig.4, que la señal de los fotodetectores que se conectan (A y B) tienen el mismo camino electrónico, y es de esperarse que sufran un retraso

igual, cancelándose el error. Idealmente los fototransistores, así como los transistores 2N2222 tienen características idénticas. En la práctica pueden diferir en varios de sus parámetros, y ésto introduce una diferencia en tiempo de respuesta para cada transductor.

Cuando se usan interruptores prácticamente no existe retraso en la respuesta, porque se tiene un contacto físico entre dos piezas metálicas que se tocan o se separan.

Utilizando interruptores sí podemos confiar en la mínima resolución de 1 μ seg que nos da el cronómetro.

Tenemos otro retraso en respuesta debido a las compuertas lógicas y contadores¹³, pero es mucho más pequeño que la mínima resolución del reloj (del orden de decenas de nanosegundos) por lo que podemos despreciarlo.

Se mencionaron las ventajas y desventajas para que sirvan como una guía para un buen experimento.

Otra sección que merece atención es la del oscilador del reloj. La confiabilidad de las lecturas depende de la estabilidad de éste.

Un factor que puede cambiar la frecuencia de oscilación es la temperatura ambiental. Originalmente el oscilador se

calibró a $1 \text{ MHz} \pm 1 \text{ Hz}$ con un contador universal (Hewlett-Packard, modelo 5314A) a la temperatura de 22°C , y se observó que varió aproximadamente 5 Hz al aumentar la temperatura a 50°C .

Cuando el experimento no requiere de mucha precisión, como es el caso de la mayoría de los ejemplos aquí tratados, las variaciones en la frecuencia del oscilador con la temperatura pueden ignorarse.

Los dispositivos se han estado utilizando en prácticas formales de mecánica desde el segundo período escolar de 1985 a la fecha de presentación de esta Tesis.

Algunos experimentos efectuados han sido: velocidad instantánea con el riel de aire (Contador-Cronómetro), equivalencia de energía cinética y potencial (Contador-Cronómetro), aceleración con el riel de aire (Generador de Chispas), período de un péndulo (Contador-Cronómetro), caída libre (Generador de Chispas).

Se ha notado que el uso del cronómetro manual prácticamente ha sido desplazado por el cronómetro digital en la mayoría de los experimentos donde se requiere medir tiempos.

APENDICE A

METODO DE MINIMOS CUADRADOS.

En 1806 Legendre propuso el principio de mínimos cuadrados como solución a los problemas de medición donde los datos experimentales son más que suficientes para determinar las incógnitas. Este principio es básico en la teoría de mediciones.

El método que se desarrollará en este apéndice está aplicado directamente al experimento descrito en la sección III.2, por lo tanto se mantiene la misma notación para los puntos experimentales.

Escribamos la ecuación de movimiento para un cuerpo en caída libre en la forma usual,

$$S = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots(A.1)$$

Esta ecuación nos da la posición S del cuerpo en cualquier tiempo t , en términos de su aceleración "g", su velocidad v_0 en $t=0$, y su posición s_0 en $t=0$. Cuando sustituimos los valores de S y t de nuestros datos en la ecuación (A.1), obtenemos una ecuación para cada punto de la

secuencia, cuya forma general es:

$$S_j \approx s_0 + v_0 \tau j + \frac{1}{2} \tau^2 j^2 g \quad \dots (A.2)$$

donde j toma los valores de $-m$ a $+m$. Las ecuaciones (A.2) son aproximadas, debido a que involucran valores experimentales de S y t . Sin embargo el valor de t ($=j\tau$) comunmente se conoce con un alto grado de precisión. Entonces nuestra fuente principal de error en este experimento está en los valores de S . Para simplificar las ecuaciones (A.2) hacemos:

$$s_0 = \epsilon, \quad v_0 \tau = b, \quad \frac{1}{2} g \tau^2 = c$$

y tomamos a ϵ , b y c como incógnitas, que tienen las mismas unidades de longitud como las de S_j . Las ecuaciones (A.2) se convierten en:

$$S_j = \epsilon + jb + j^2 c, \quad j = -m, \dots, 0, \dots, m \quad \dots (A.3)$$

desarrolladas tienen la forma:

$$S_{-m} \approx \epsilon - mb + m^2 c$$

$$S_{-2} \approx \epsilon - 2b + 4c$$

$$S_0 \approx \epsilon \quad \dots (A.3A)$$

$$S_{+2} \approx \epsilon + 2b + 4c$$

$$S_{+m} \approx \epsilon + mb + m^2 c$$

Las ecuaciones (A.3) o (A.3A) se conocen como ecuaciones

de condición (o de observación) en nomenclatura de mínimos cuadrados. Nótese que hay una ecuación por cada punto, un total de $2m+1$ ecuaciones. Estas ecuaciones son independientes e igualmente confiables, debido a que las S son coordenadas de posición de los puntos y todas medidas de la misma manera.

Podría argumentarse que se le ha dado un "peso" indebido al punto central al escogerlo como referencia para medir S_j . Esto sería cierto si hubiéramos supuesto en la ecuación (A.1) que s_0 ($\approx \epsilon$) fuese cero. Pero no se hizo tal suposición. En su lugar, incluimos en las ecuaciones una corrección del punto cero como una incógnita a determinar.

Las ecuaciones (A.3A) incompatibles cuando su número excede a tres (el número de incógnitas). Con tres incógnitas necesitamos sólo tres ecuaciones independientes. En este experimento podríamos tener nueve veces ese número y no existir un conjunto de ϵ , b y c que satisfagan todas las ecuaciones. Lo mejor que podemos hacer es buscar un conjunto de valores que mejor satisfagan todas las ecuaciones. El método de mínimos cuadrados nos dice como manejar estas ecuaciones de condición para encontrar los valores de ϵ , b y c .

Empezamos con la incógnita ϵ . Multiplicamos cada ecuación de condición en (A.3A) por el coeficiente de ϵ

en esa ecuación y las sumamos todas. Como el coeficiente de ϵ es 1 en todas las ecuaciones, obtenemos la primera ecuación normal:

$$\sum_{-m}^m S_j = \sum_{-m}^m \epsilon + \sum_{-m}^m c j^2 \quad \dots (A.4)$$

Repetimos la operación para b , cuyo coeficiente es j , que nos da la segunda ecuación normal:

$$\sum_{-m}^m j S_j = \sum_{-m}^m b j^2 \quad \dots (A.5)$$

Finalmente aplicamos la misma operación para c . El coeficiente general es j^2 . La tercera ecuación normal es:

$$\sum_{-m}^m j^2 S_j = \sum_{-m}^m j^2 \epsilon + \sum_{-m}^m c j^4 \quad \dots (A.6)$$

Las tres ecuaciones normales las reescribimos en una forma más manejable resolviendo la primera (A.4) para c , la segunda (A.5) para b , y la tercera (A.6) para c . Obtenemos respectivamente:

$$c = \frac{\sum_{-m}^m (S_j - \epsilon)}{\sum_{-m}^m j^2} \quad \dots (A.7)$$

$$b = \frac{\sum_{-m}^m j S_j}{\sum_{-m}^m j^2} \quad \dots (A.8)$$

$$c = \frac{\sum_{-m}^m j^2 (S_j - \epsilon)}{\sum_{-m}^m j^4} \quad \dots (A.9)$$

El valor de b se obtiene directamente de (A.3). Los valores de c y ϵ están dados por las ecuaciones (A.7) y (A.9). Debido a que el punto central es utilizado también como punto cero para la medición espacial, ϵ representa una pequeña corrección al punto cero de la posición observada.

Nuestro principal interés es el valor de c ($=1/2g\tau^2$), que nos da la aceleración multiplicada por una constante. Cuando examinamos las dos ecuaciones normales que contienen c (A.7 y A.9), vemos que ambas tienen pequeñas correcciones, pero éstas no son iguales. Es fácilmente demostrable que la corrección en la ecuación (A.9) es aproximadamente un medio (5/9) de la corrección de la ecuación (A.7). Entonces si simplemente despreciamos estas correcciones haciendo $\epsilon = 0$ en las dos ecuaciones, la ecuación (A.9) nos da una mejor estimación del valor de c que la ecuación (A.7), a menos que sea realmente cero. En este caso el valor de c es igual en ambas.

Esto nos permite poner a prueba el significado de la corrección, calculando y comparando los dos valores aproximados de c , digamos c_1 y c_2 , usando las ecuaciones no corregidas:

$$c \approx c_1 = \frac{\sum_{j=3}^N S_j}{\sum_{j=3}^N j^2} \quad \dots (A.10)$$

$$c \approx c_2 = \frac{\sum_{j=3}^N j^2 S_j}{\sum_{j=3}^N j^4} \quad \dots (A.11)$$

puede demostrarse hasta un alto grado de precisión que:

$$c = c_2 + \frac{5}{4} (c_2 - c_1) \quad \dots(A.12)$$

y que:

$$c_2 - c_1 = -\frac{4\epsilon}{3m^2} \quad \dots(A.13)$$

Conociendo pues los valores de c_1 y c_2 nos permite determinar c y ϵ .

La mejor estimación de la desviación estandar de los S_j medidos está dada por la relación conocida:

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{\sum_{-m}^m d_j^2}{2m-2}} \quad \dots(A.14)$$

donde d_j son las desviaciones:

$$d_j = S_j - (\epsilon + bj + cj^2), \quad j = -m, \dots, 0, \dots, m \quad \dots(A.15)$$

Conociendo σ puede demostrarse que el error estandar en c se determina por la ecuación:

$$\sigma^2\{c\} = \frac{(2m+1)\sigma^2}{(2m+1)\sum_{-m}^m j^4 - \left(\sum_{-m}^m j^2\right)^2} \quad \dots(A.16)$$

Para errores aleatorios, la posición de cualquier punto tiene un 68% de probabilidad de encontrarse dentro de una

distancia de la posición real, un 95% dentro de una distancia 2, y casi cero de probabilidad de encontrarse fuera de una distancia 3 alrededor de la posición real. Análogamente para $\sigma\{c\}$.

Considerando lo anterior, podemos tomar a $3\sigma\{c\}$ como una cota superior en el error de c .

El valor de la aceleración calculado por el método de mínimos cuadrados puede finalmente expresarse de la forma:

$$g = \frac{2}{T^2} \left[c \pm 3\sigma\{c\} \right] \quad \dots(A.17)$$

A continuación se presenta un programa para computadora en lenguaje BASIC de este método. Los datos de entrada son las distancias experimentales S_j y S_{-j} (en ese orden, y donde $j=1,2,\dots,m$), el valor de m , y la frecuencia f de la chispa. Los datos de salida son: $c, \sigma\{c\}$, la aceleración "g" y su incertidumbre σg , el valor de b y ϵ .

BIBLIOGRAFIA:

- [1] - BAIRD, D.C. 1962. Experimentation: an Introduction to Measurement Theory and Experiment Design, Prentice-Hall, Inc. New Jersey.
- [2] - BEERS, Y. 1957. Introduction to the Theory of Error, Addison-Wesley Publishing Company. Massachusetts.
- [3] - BEVINGTON, P.R. 1969. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, McGraw-Hill Book Company. New York.
- [4] - BLACKBURN, J.A., R. KOENIG. 1976. Precision falling body experiment. American Journal of Physics. Vol.44, Sep. 1976.
- [5] - HALLIDAY, D., R. RESNICK. 1976. Física , Parte I, Compañía Editorial Continental, S.A. México.
- [6] - LINDEMUTH, J. 1971. The effect of air resistance on falling balls. American Journal of Physics, Vol. 39, Jul. 1971.
- [7] - MEINERS, H.F., W. EPPENSTEIN, K.H. MOORE. 1980.