



T
621.54
R934
C.2

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería Eléctrica



"TOTALIZADOR ELECTRONICO INDUSTRIAL
PARA BANDAS TRANSPORTADORAS"

TESIS DE GRADO
Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACION: ELECTRONICA

Presentada por:
ELIZABETH YOLANDA RUIZ MARIN

Guayaquil - Ecuador

1.988

A G R A D E C I M I E N T O

A mis padres, quienes se esforzaron por darme una educación.

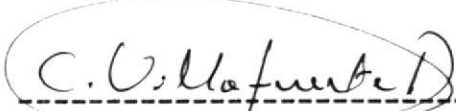
Al Ing. RODRIGO BERREZUETA, Director de Tesis, por su colaboración prestada en el desarrollo del presente trabajo.

A todos mis profesores, compañeros y amigos.

DEDICATORIA

A MIS PADRES


A MIS HERMANOS




Ing. C. Villafuerte P.
SUB-DECANO



Ing. R. Berrezueta P.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. N. Chootong Ch.
M. PRINCIPAL



Ing. L. Gorenkova L.
M. PRINCIPAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).



ELIZABETH YOLANDA RUIZ MARIN

R E S U M E N

El presente trabajo describe el diseño y construcción de un integrador de peso en el tiempo para material que es llevado en bandas transportadoras, mediante la multiplicación de la señal de velocidad de la banda por la señal de peso instantáneo del material, proceso que es realizado en forma analógica.

Las señales de peso y velocidad que ingresan al equipo, son tomadas de una balanza de pesaje continuo y de un tacómetro de frecuencia respectivamente; la balanza suministra voltajes DC positivo y negativo proporcionales al peso que se transporta y el tacómetro proporciona una señal de pulsos cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de la banda.

Las señales de la balanza ingresan a un circuito de compensación de tara para la eliminación del peso propio de la banda transportadora, obteniéndose a su salida un voltaje DC correspondiente al peso real del material, esta señal es convertida luego en una señal de pulsos. La señal de velocidad de la banda activa un interruptor electrónico, el mismo que actúa directamente en la generación de los pulsos proporcionales al peso del material, el resultado de este proceso en un intervalo determinado de tiempo, es un número de pulsos proporcional al pe-



so y a la velocidad.

Los pulsos resultantes finalmente se procesan en circuitos digitales (CMOS) y la cantidad total de material transportado durante un período determinado, se muestra en indicadores numéricos de siete segmentos.

El equipo posee un indicador del porcentaje al cual opera y para comunicarse con dispositivos periféricos, tiene una interfase analógica de salida.

I N D I C E G E N E R A L

	Pág.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS	X
INDICE DE TABLAS	XIII
INTRODUCCION	14
I. DESCRIPCION DEL DIAGRAMA DE BLOQUES	15
II. MODIFICADOR DE VELOCIDAD	18
2.1 Circuito Modificador del Ciclo de Trabajo	19
2.2 Interruptor Electrónico	21
III. PROCESAMIENTO DE SEÑALES	26
3.1 Compensación de tara de la señal de peso y ajuste de la Sensibilidad	26
3.2 Obtención de Señales Analógicas para efecto de Calibración	28
3.3 Circuito de Autochequeo	30
IV. CIRCUITO DE MEDICION	32
4.1 Convertidor de Voltaje a Frecuencia	32
4.2 Multiplicación Analógica	34
V. CIRCUITO DE LECTURA Y PRESENTACION DE RESULTADOS ...	42
VI. INTERFASE ANALOGICA DE SALIDA	48

	Pág.
VII. CALIBRACION	54
7.1 Inicialización del Equipo-en cero	56
7.2 Ajuste del Modificador del Ciclo de Trabajo....	57
7.3 Ajuste del número de pulsos en el Circuito de Medición	59
7.4 Compensación del Peso de la Banda Transpor- tadora	63
7.5 Ajuste de la Sensibilidad	67
7.6 Calibración de la Interfase de Salida	72
VIII. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	76
8.1 Señales experimentales obtenidas en varios pun- tos del equipo construido	76
8.2 Curva de Lectura Total vs Peso, manteniendo constante la Velocidad	81
8.3 Curva de Lectura Total vs Velocidad, manteni- do constante el Peso	86
8.4 Curva de Corriente de Salida vs Frecuencia de la Interfase Analógica de Salida.....	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
APENDICES	97
A. DATOS TECNICOS	98
B. TACOMETROS DE FRECUENCIA	102
C. TRANSDUCTORES DE PESO	106
BIBLIOGRAFIA	119

I N D I C E D E F I G U R A S

No.		Pág.
1.1	Diagrama de Bloques del Equipo	15
2.1	Onda Cuadrada	18
2.2	Circuito Modificador del Ciclo de Trabajo	19
2.3	Señales del Circuito de la Fig. 2.2	21
2.4	Opto-Aislador	22
2.5	Diagrama de terminales del ECG 3086.....	23
2.6	Circuito Modificador de Velocidad	24
3.1	Circuito de Compensación de tara de la señal de Peso y Ajuste de la Sensibilidad	26
3.2	Interruptor ENV	29
3.3	Interruptor ENF	30
4.1	Convertidor de Voltaje a Frecuencia	33
4.2	Señales del circuito de la Fig. 4.1	34
4.3	Circuito de Medición	36
4.4	Forma de las señales del Circuito de Medición	37
4.5	Voltaje de salida V_{sc} vs voltaje de entrada V_{SM}	41
5.1	Circuito de Lectura y Presentación de Resultados	43
5.2	Señales del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados	46
6.1	Interfase Analógica de Salida	49

6.2	Señal del Circuito de Medición (V_0) y señal de salida del temporizador (V_{IS})	50
7.1	Montaje del Totalizador Electrónico Industrial para Bandas Transportadoras	55
8.1	Señal de velocidad a la entrada del equipo y señal de velocidad con ciclo de trabajo modificado	77
8.2	Señal de velocidad con ciclo de trabajo modificado y señales en el Circuito de Medición	78
8.3	Señales en el Circuito de Lectura y Presentación de Resultados	80
8.4	Señales en la Interfase Analógica de Salida	81
8.5	Lectura Total vs Peso manteniendo constante la Velocidad	84
8.6	Error de Lectura Total al variar el voltaje proporcional al Peso	85
8.7	Lectura Total vs Velocidad manteniendo constante el Peso	88
8.8	Error de Lectura Total al variar la frecuencia proporcional a la velocidad	89
8.9	Corriente de Salida vs Frecuencia en la Interfase Analógica de Salida	93
B.1	Configuración de un Tacómetro de Rotor Dentado	103
B.2	Señal de Voltaje de Salida V_0	104
B.3	Tacómetro de Fococelda acoplado al eje de un motor	104
B.4	Circuito Sensor de Velocidad	105
C.1	Constitución de una galga de filamento	108

C.2	Constitución de una Galga Laminar	109
C.3	Constitución de una Galga Semiconductora	111
C.4	Diagrama esquemático de un Transformador Diferencial	112
C.5	Constitución de un LVDT comercial	112
C.6	Voltaje de salida en función del desplazamiento del núcleo	113
C.7	Acondicionamiento de las señales del LVDT con demo- dulador pasivo	115
C.8	El efecto piezoeléctrico	116
C.9	Circuito clásico de un amplificador de carga	118

I N D I C E D E T A B L A S

No.		Pág.
I	Lecturas en una hora para cada terminal de salida de CI-9	61
II	Rangos de voltaje de Compensación cuando $V^+ - V^- = 8 V$ y $V_f = 4 V$	66
III	Lectura Total al variar el Voltaje proporcional al Peso	83
IV	Lectura Total al variar la Frecuencia proporcional a la velocidad	87
V	Resultados Experimentales en la Interfase Analógica de Salida	92
VI	Características de los materiales que se utilizan en las Galgas Extensométricas	110

I N T R O D U C C I O N



El Totalizador Electrónico proporciona el valor real ~~de la~~ cantidad de material que se ha transportado en una banda durante un intervalo determinado de tiempo, tiene gran aplicación en sistemas de acumulación y proceso de material granulado, como por ejemplo en plantas procesadoras de asfalto, piladoras, etc., en las cuales la velocidad del motor que mueve la banda y el peso del material que se transporta varían.

En el desarrollo del presente trabajo de tesis, se realiza primeramente un diagrama de bloques, describiéndose las funciones específicas de cada uno de ellos.

A continuación se diseñan las etapas que constituyen el equipo; en la construcción, en esta aplicación particular por su bajo costo se ha usado tecnología analógica - digital discreta, los elementos empleados se encuentran disponibles en nuestro medio.

Finalmente se procede a calibrar el equipo para su correcto funcionamiento, para conocer la verdadera capacidad del equipo, se realizan las pruebas experimentales pertinentes y se presentan los resultados obtenidos.

CAPITULO I

DESCRIPCION DEL DIAGRAMA DE BLOQUES

Este equipo tiene por objetivo entregar el valor real de la cantidad de material granulado que sea transportada por una banda cuando el peso por unidad de longitud y la velocidad del transportador sean variables, teniendo como equipos accesorios el tacómetro y la balanza de pesaje continuo. El diagrama de bloques del equipo construido es el siguiente.

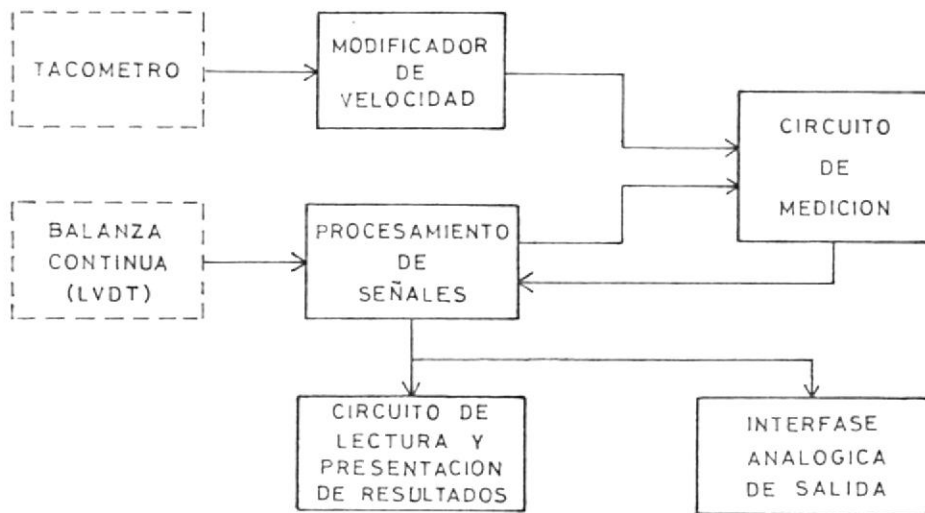


Fig. 1.1 Diagrama de Bloques del Equipo.

A continuación se detalla brevemente las funciones que cumplen cada uno de los bloques en mención.

Tacómetro

El instrumento que sensa la velocidad de la Banda Transportadora es un tacómetro de frecuencia, es decir que entrega una cantidad de pulsos por segundo proporcional a la velocidad de la banda (Apéndice B).

Modificador de Velocidad

Modifica el ciclo de trabajo de la señal del tacómetro en forma proporcional a la frecuencia de la misma.

Balanza Continua (LVDT)

Esta balanza sensa el peso de material que se transporta en la banda y funciona a base de un transformador diferencial excitado con una señal de frecuencia elevada (3 KHz.), entregando un voltaje igual en los devanados secundarios del transformador cuando el núcleo móvil se encuentra centrado, y produciendo una variación lineal de estos voltajes en función del desplazamiento del núcleo. Las señales de estos devanados son rectificadas y filtradas entregando dos voltajes DC, uno positivo y otro negativo (Apéndice C).

Procesamiento de Señales

En este bloque se compensa el peso muerto de la banda transportadora, se ajusta la sensibilidad para obtener un voltaje de salida DC que corresponda al valor real de la cantidad de mate-

rial que se transporta en la banda y además mediante interruptores se puede seleccionar el estado de funcionamiento del equipo, sea este calibración, operación normal o autochequeo.

Circuito de Medición

Entrega en su salida un número de pulsos proporcional al producto de la señal de salida del bloque Procesamiento de Señales (proporcional al peso del material) multiplicada analógicamente por la señal de salida del bloque Modificador de Velocidad.

Ciruito de Lectura y Presentación de Resultados

Los pulsos que son el resultado de la multiplicación analógica, son procesados en una circuitería digital, de tal forma que mediante despliegue visual de siete segmentos se logra presentar el resultado de la medición, es decir la cantidad total de material transportado en la banda.

Interfase Analógica de Salida

Sirve para comunicar el equipo con dispositivos periféricos, tales como registradores de la cantidad total, controladores del estado de operación del equipo, entre otros. Esta interfase está constituida básicamente por un convertidor de frecuencia a corriente.

CAPITULO II

MODIFICADOR DE VELOCIDAD

En esta etapa del equipo se obtendrá una señal de pulsos con ciclo de trabajo que varíe en forma proporcional a la frecuencia de la señal de entrada y será acondicionada de tal forma que sea utilizada por la etapa del Circuito de Medición. La señal de entrada proviene del tacómetro que sensa la velocidad de la banda transportadora.

Considerando la Fig. 2.1, el ciclo de trabajo CT, cuantifica el tiempo del período T en el cual la señal está en estado alto Ta (3).

$$CT = \frac{T_a}{T} \quad (2.1)$$

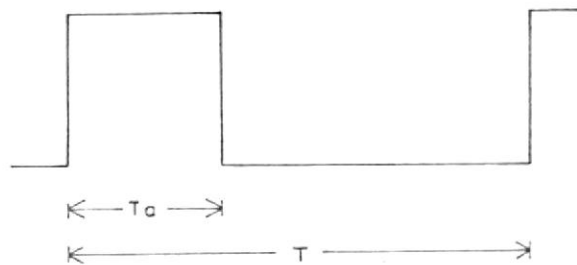


Fig. 2.1 Onda Cuadrada.

T es el inverso de la frecuencia (f) de la señal de entrada, y

reemplazando en la ecuación anterior se tiene:

$$CT = Ta f \quad (2.2)$$

Si se mantiene Ta en un valor constante, entonces el ciclo de trabajo es directamente proporcional a la frecuencia, siempre que $T > Ta$.

Para cumplir con el objetivo propuesto se usa la circuitería que está constituida por el circuito modificador del ciclo de trabajo y por el interruptor electrónico, que se detallan a continuación.

2.1 Circuito Modificador del Ciclo de Trabajo

Recibe la señal del tacómetro y genera un pulso de duración constante en la transición positiva de esta señal (Fig. 2.3). El circuito diseñado para cumplir con este requerimiento se muestra en la Fig. 2.2.

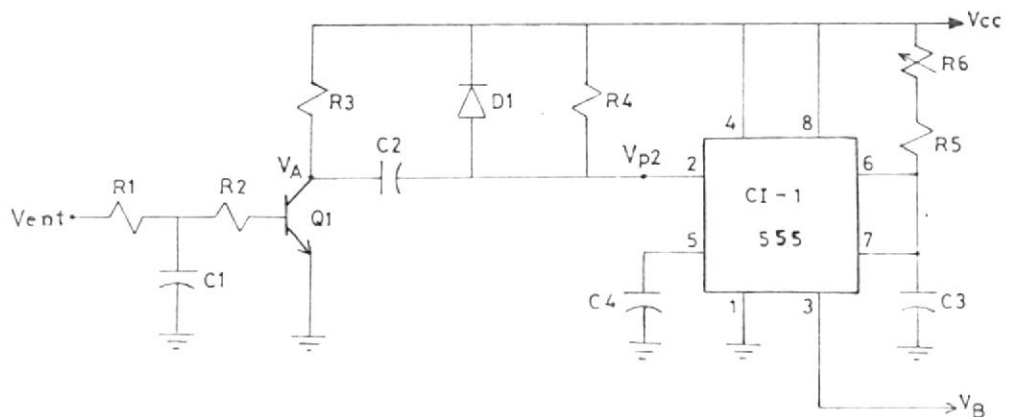


Fig. 2.2 Circuito Modificador del Ciclo de Trabajo.

La señal del tacómetro (V_{ent}) ingresa al filtro pasa bajos formado por $R1$ y $C1$ para evitar que señales de ruido ingresen al circuito, el transistor $Q1$ es activado por V_{ent} , por lo tanto se requiere que esta señal tenga una magnitud suficiente (V_T) para que el transistor trabaje en corte y saturación, de esta forma $Q1$ invierte la señal V_{ent} y la convierte en una señal cuadrada (V_A) que varía entre $0 V$ y V_{cc} ($+15 V$).

La salida de $Q1$ (V_A) ingresa a la red diferenciadora formada por $R4$ y $C2$ para disparar el temporizador 555 en su configuración monoestable, el diodo $D1$ asegura que la transición positiva en el terminal 2 del temporizador no exceda significativamente al voltaje de polarización del circuito integrado, evitando dañarlo.

La duración (T_a) del pulso que genera el temporizador, está determinada por $R5$, $R6$ y $C3$ de acuerdo a la siguiente expresión (1):

$$T_a = 1.1(R5 + R6)C3 \quad (2.3)$$

Con $C3 = 1\mu F$, $R5 = 3.3K\Omega$ y $R6$ un potenciómetro de $20 K\Omega$, se obtiene un pulso cuya duración está entre $3.63 ms$ y $25.63 ms$ de acuerdo al valor de $R6$. En consecuencia la frecuencia máxima de la señal V_{ent} que se permite utilizando estos elementos, será de $242 pps$ (pulsos por segundo), en este valor se ha considerado una disminución del $.12 \%$ por seguridad, es decir para que no se opere en la región límite, de-

bido a que se desea modificar únicamente el ciclo de trabajo de la señal V_{ent} y no su frecuencia. La Fig. 2.3 muestra las formas de las señales referentes a este circuito, considerando que $T \geq \frac{1}{242}$ s .

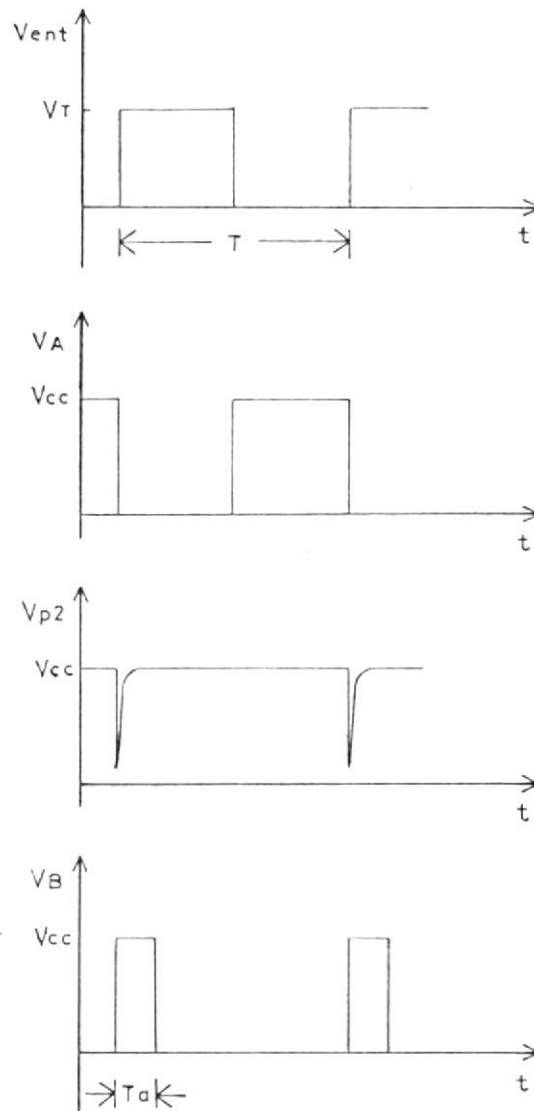


Fig. 2.3 Señales del Circuito de la Fig. 2.2.

2.2 Interruptor Electrónico

Constituye un medio de acoplar el Circuito Modificador del Ciclo de Trabajo con el Circuito de Medición, para que la señal de velocidad modificada sea multiplicada analógicamente en este último circuito por la señal proporcional al peso del material; el Interruptor Electrónico proporciona además un aislamiento eléctrico entre los dos circuitos mencionados. El elemento básico que se utiliza en el diseño de este interruptor es el opto-aislador u opto-acoplador.

Un opto-aislador es un elemento opto-electrónico integrado, conformado por un diodo emisor de luz y un fototransistor, como se indica en la Fig. 2.4.

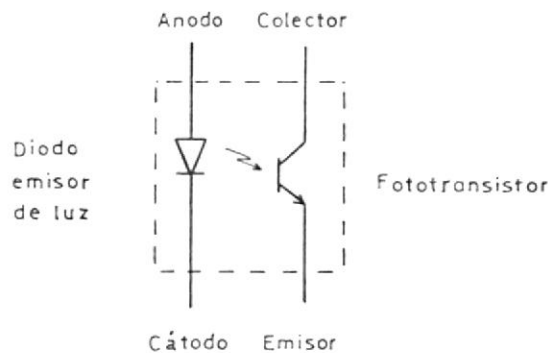


Fig. 2.4 OPTO-AISLADOR

Cuando circula una corriente directa por el diodo, éste emite luz la misma que causa la conducción del fototransistor, estando éste previamente polarizado directamente. Para el diseño se utiliza un opto-aislador tipo ECG 3086 cuyo diagrama de terminales se muestra en la Fig. 2.5.

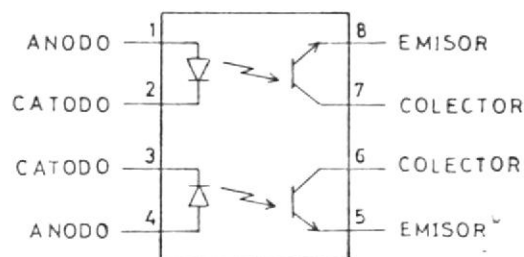


Fig. 2.5 Diagrama de terminales del ECG 3086.

La característica eléctrica más importante del opto-aislador es su familia de curvas de la corriente de colector (I_c) en función de la corriente directa (I_f) del diodo emisor de luz. Estas curvas son particulares para cada tipo de opto-aislador.

El interruptor electrónico está en una rama del Circuito de Medición, por lo tanto es necesario el uso del opto-aislador el mismo que permite acoplarse a dicho circuito proporcionando un aislamiento eléctrico, la Fig. 2.6 muestra el circuito completo del Modificador de Velocidad.

Se conectan dos opto-aisladores con polaridades opuestas a través de diodos como se indica en la Fig. 2.6, con el propósito de que funcionen como un interruptor bidireccional, es decir interrumpir una corriente que circule en un sentido o en sentido inverso. Los diodos D2 y D3 se utilizan para protección de los opto-aisladores, el opto-aislador se conecta al temporizador monoestable mediante el transistor Q2 para el conveniente funcionamiento del circuito.

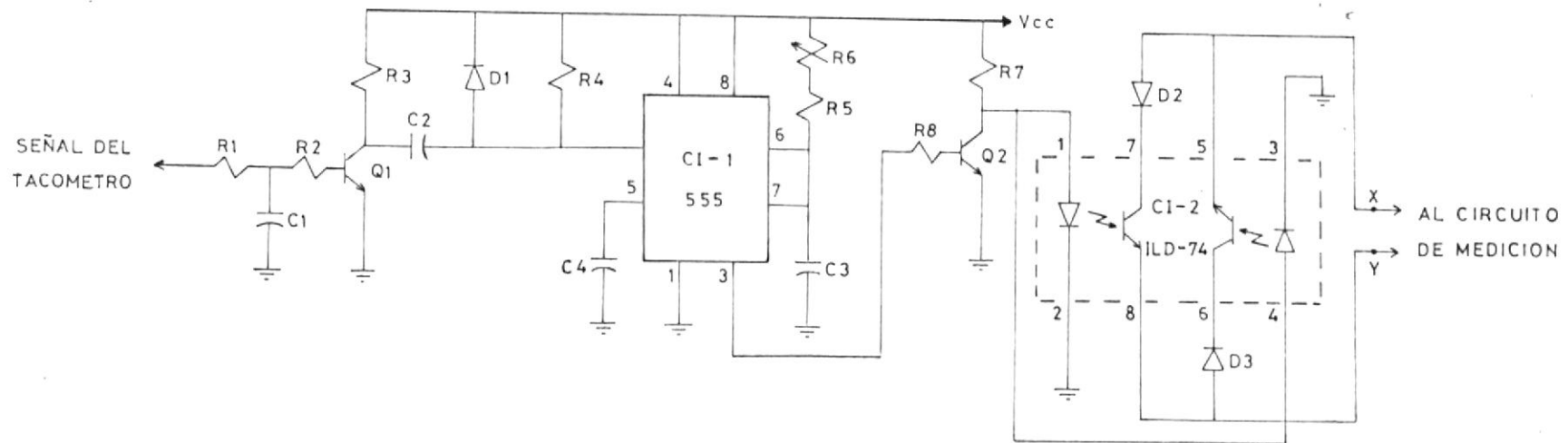


Fig. 2.6 Circuito Modificador de Velocidad

En este circuito con los terminales conectados al circuito de Medición, el fototransistor trabaja en saturación cuando el diodo emisor de luz conduce, esto es cuando la señal de salida del temporizador (V_B) es baja, y va a corte cada vez que esta señal es alta, por lo tanto se tiene que a menor frecuencia el interruptor permanece mayor tiempo cerrado en un ciclo de Vent y a mayor frecuencia ocurre lo contrario.

La corriente máxima en estado estable del diodo emisor de luz del ECG 3086 es de 60 mA y para el diseño se ha elegido un valor de 25 mA para esta corriente, considerando este parámetro se ha escogido un resistor de 560Ω 1 W como valor satisfactorio para R7.

El voltaje del Modificador de Velocidad entre los puntos X y Y cuando un opto-aislador conduce, está determinado por:

$$V_{X-Y} = \pm(V_D + V_{CE \text{ SAT}}) \quad (2.4)$$

Donde:

V_D : Voltaje del diodo D2 ó D3 (0.6V)

$V_{CE \text{ SAT}}$: Voltaje colector-emisor del fototransistor en saturación (0.2V)

Con estos datos el voltaje V_{X-Y} es de aproximadamente 0.8V cuando el interruptor se cierra.

CAPITULO III

PROCESAMIENTO DE SEÑALES



3.1 Compensación de tara de la señal de peso y ajuste de la Sensibilidad

La banda transportadora tiene su propio peso, llamado también peso muerto o tara. Para que la medición corresponda únicamente al peso del material depositado en la banda, el peso muerto debe excluirse, con esta finalidad se ha diseñado el circuito de compensación de tara ilustrado en la Fig. 3.1.

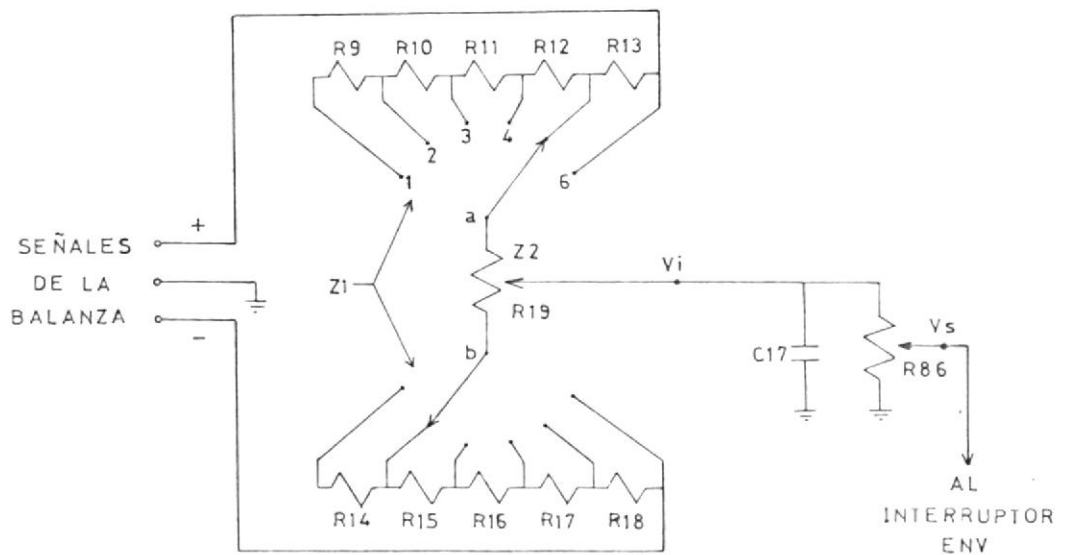


Fig. 3.1 Circuito de Compensación de tara de la señal de Peso y Ajuste de la Sensibilidad.

Las señales de voltaje positivo y negativo de la balanza de pesaje continuo que funciona a base de un transformador diferencial lineal variable (LVDT), ingresan a una red resistiva para sustraer el peso de la banda transportadora sin material, el valor correspondiente de compensación se selecciona mediante Z1 que consiste en un interruptor de dos polos seis posiciones y Z2 que es un potenciómetro para obtener un mejor ajuste (cero absoluto).

Haciendo, $R_9 = R_{10} = \dots = R_{18} = R$, los voltajes en los puntos a y b están determinados por:

$$V_a = V_f + V_{pb} - \frac{(V^+ - V^-)(6 - n)R}{5R + R_{19}} \quad (3.1)$$

$$V_b = V_a - \frac{(V^+ - V^-)R_{19}}{5R + R_{19}} \quad (3.2)$$

donde:

V_f : voltaje en el terminal positivo de la balanza de pesaje continuo, cuando el núcleo del LVDT está en su posición inicial (sistema sin banda).

V_{pb} : voltaje correspondiente al peso propio de la banda.

V^+ : voltaje en el terminal positivo de la balanza de pesaje continuo.

V^- : voltaje en el terminal negativo de la balanza de pesaje continuo.

n : número de la posición del selector Z1 ($1 \leq n \leq 6$).

Igualando a cero las ecuaciones anteriores, se deduce la expresión siguiente, que define el rango de voltaje de compensación del peso de la banda para una posición (n) del selector Z1 entre 1 y 6:

$$\frac{(V^+ - V^-)(6 - n)R}{5R + R19} - V_f \leq V_{pb} \leq \frac{(V^+ - V^-)[(6 - n)R + R19]}{5R + R19} - V_f$$

En la sección 7.4 se determinan los voltajes que puede compensar el equipo construido.

El ajuste de la Sensibilidad consiste en seleccionar el nivel de voltaje (V_s) apropiado para obtener un voltaje DC que corresponda al valor real de la cantidad de material que se transporta en la banda, es decir por medio de este ajuste es posible obtener lecturas en los indicadores numéricos de siete segmentos no equivocadas. El ajuste se realiza mediante el potenciómetro R86 ilustrado en la Fig. 3.1 y su calibración se detalla en la sección 7.5.

3.2 Obtención de Señales Analógicas para efecto de Calibración

Para efectos de calibración y prueba del equipo se utilizan dos interruptores de dos polos tres posiciones con sus circuiterías apropiadas, denominados ENV y ENF respectivamente.

Con el interruptor ENV, mostrado en la Fig. 3.2 se verifica la operación normal del Circuito de Medición; así, en la posición PV se simula la señal proporcional al peso del mate-

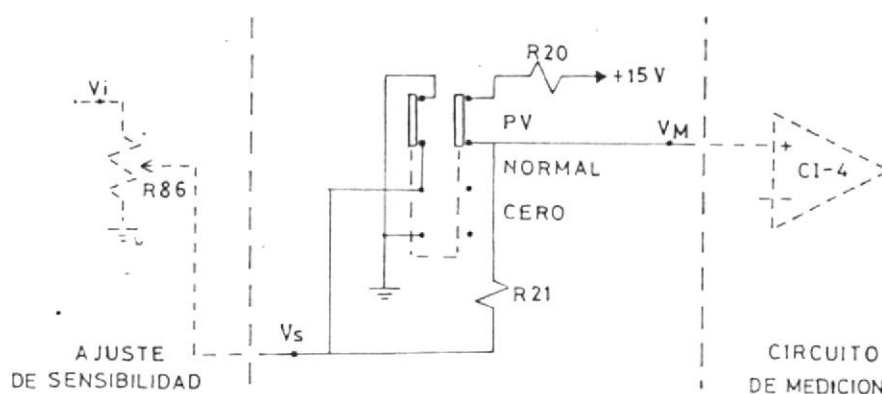


Fig. 3.2 Interruptor ENV.

rial en la banda con un voltaje DC, elegido para calibrar el equipo, este voltaje es de 0.75 V tomado del divisor de voltaje formado por R20 y R21, en la posición Cero la señal antes indicada se reemplaza por 0 V, en esta posición se somete a ajuste el Circuito de Medición, con la finalidad de obtener respuesta nula que corresponde a la multiplicación por cero, a diferencia del resultado que se obtiene en la posición anterior, cuyo valor depende de las conveniencias del usuario. Estas dos posiciones permiten efectuar la calibración del equipo, como se explica en el capítulo VII. En la posición Normal, el interruptor ENV conecta la señal proporcional al peso del material en la banda transportadora (V_s) al Circuito de Medición.

El interruptor ENF, permite verificar el estado de operación del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados y de la Interfase Analógica de Salida del equipo, mediante el Circuito de Autochequeo.

3.3 Circuito de Autochequeo

El Circuito de Autochequeo está constituido por un generador de pulsos, los cuales reemplazan a los pulsos que se generan en el Circuito de Medición, con la finalidad de probar el funcionamiento de las etapas del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados y de la Interfase Analógica de Salida. La salida del generador de pulsos se conecta a la entrada de las etapas mencionadas, mediante el interruptor ENF en la posición PF como se muestra en la Fig. 3.3.

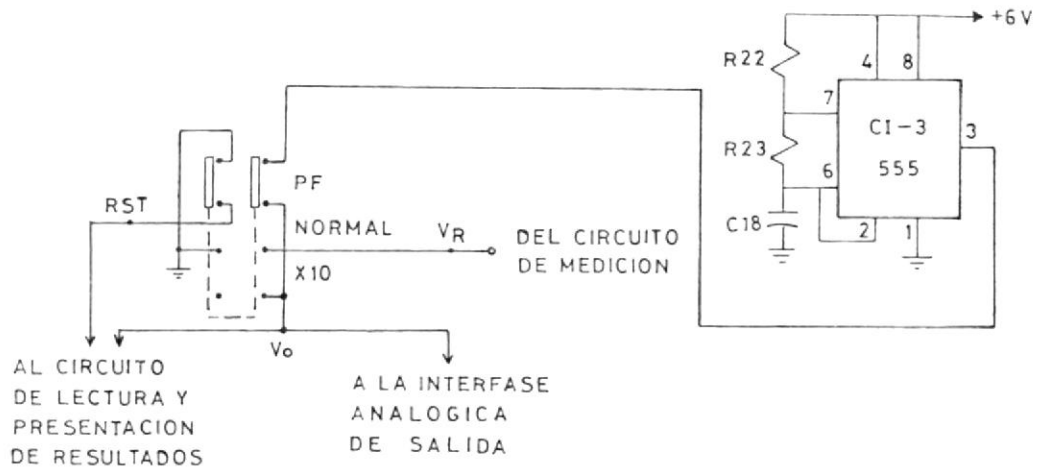


Fig. 3.3 Interruptor ENF.

El generador de pulsos lo conforma el temporizador 555 (CI-3) funcionando como multivibrador estable, para el cual la frecuencia de oscilación está determinada por la siguiente expresión (1) :

$$f_{os} = \frac{1.443}{(R22 + 2R23)C18} \quad (3.3)$$

Se ha escogido una frecuencia de oscilación de 118 Hz, para lo cual se utiliza: $C18 = 0.1 \mu F$, $R22 = 56 K$, $R23 = 33 K$. Experimentalmente la frecuencia de oscilación difiere del valor esperado en un 2.5 %, es decir que es de 115 Hz.

Cuando se coloca el interruptor en la posición PF, se debe observar que la lectura en los indicadores numéricos de siete segmentos del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados, se va incrementando con el tiempo; en cambio en la Interfase Analógica de Salida se debe obtener una corriente constante diferente de cero (los resultados específicos se determinan en el capítulo de Calibración).

Si el interruptor se coloca en la posición Normal o X10, la señal de salida del Circuito de Medición (V_R) se conecta a los circuitos de la etapas en referencia. La posición X10 es necesaria para la calibración de enceramiento del equipo, en cuyo caso la velocidad de conteo del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados se incrementa por un factor de diez, esta acción es ejecutada por la señal RST que para el efecto, en esta posición se desconecta del nivel de 0 V (tierra) en la que permanece en las otras posiciones, de tal manera que produce el nivel apropiado (nivel alto) en el circuito integrado correspondiente en el circuito de la etapa en mención.

CAPITULO IV

CIRCUITO DE MEDICION



BIBLIOTECA

Los pulsos que entrega el Tacómetro y la señal de la Balanza de Pesaje Continuo (DC) son multiplicadas analógicamente para obtener como resultado una señal de pulsos, de esta manera el número de pulsos en un tiempo determinado es directamente proporcional a la velocidad y al peso del material que transporta la banda.

Un método para realizar esta multiplicación requiere, de un convertidor de voltaje a frecuencia en el cual el voltaje de entrada es directamente proporcional al peso del material en la banda, y de un interruptor electrónico accionado por la señal del tacómetro cuyo funcionamiento se analiza en el Capítulo II.

Las señales de entrada al Circuito de Medición son tomadas de las etapas del Modificador de Velocidad y del Procesamiento de Señales.

4.1 Convertidor de Voltaje a Frecuencia

Este convertidor está constituido por el generador de onda Diente de Sierra que se muestra en la Fig. 4.1, la señal V_M que entra al terminal no inversor del Amplificador Opera-

cional 741 (CI-4) es una señal DC positiva (proporcional al peso que transporta la banda), esta hace que el capacitor C_t se cargue linealmente hasta alcanzar el nivel de voltaje de activación (voltaje de pico V_p) del UJT (ECG 6409), en consecuencia el capacitor se descarga a través de este elemento puesto en conducción produciéndose un pulso en R30, para este funcionamiento es necesario que la fuente de polarización del UJT tenga otra referencia.

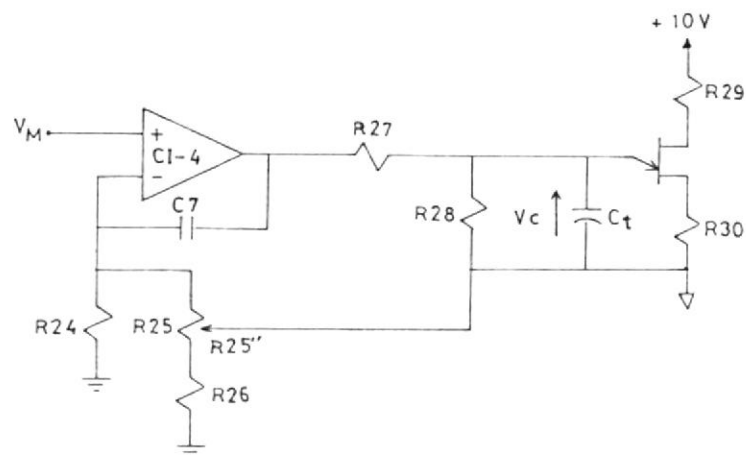


Fig. 4.1 Convertidor de Voltaje a Frecuencia

El UJT conduce hasta que la corriente en el emisor alcanza la corriente de valle (I_v), luego abruptamente deja de conducir y el capacitor C_t comienza otra vez a cargarse, repitiéndose el proceso descrito.

De esta manera se genera una onda Diente de Sierra cuyos niveles de voltaje en el capacitor C_t varían entre voltaje de pico (V_p) y voltaje de valle (V_v), como se muestra en

la Fig. 4.2, experimentalmente en este circuito $V_p = 7.6V$ y $V_v = 1.6V$.

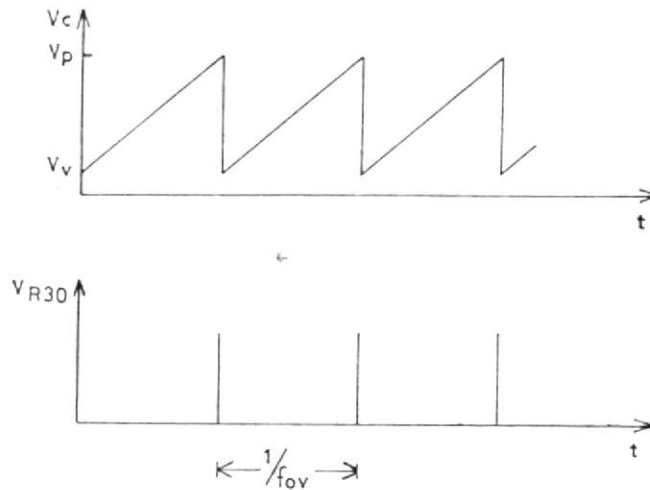


Fig. 4.2 Señales del circuito de la Fig. 4.1

La frecuencia de oscilación de este circuito es:

$$f_{ov} = \frac{(R24 + R25 + R26)V_M}{Ct R24(R25 + R26)(V_p - V_v)} \quad (4.1)$$

Si se mantienen invariables los parámetros resistivos y capacitivos, la frecuencia de oscilación varía directamente proporcional con el voltaje V_M .

Para minimizar efectos de ruido cuando la señal V_M es cero se utilizan C7 y R28, de esta manera se asegura no tener pulsos en la salida que por esta causa serían producidos.

4.2 Multiplicación Analógica

El Interruptor Electrónico de la etapa del Modificador de Velocidad se conecta en el Convertidor de Voltaje a Fre-

cuencia entre los puntos X-Y como se indica en la Fig. 4.3, de tal manera que cada vez que se cierre impida la generación de la onda Diente de Sierra, y en consecuencia en un determinado tiempo el número de pulsos resultantes cambiará si ocurre una variación en el voltaje de la señal V_M (proporcional al peso de material en la banda) y/o una variación en la frecuencia de la señal Vent (proporcional a la velocidad de la banda). En este diseño $C_t = C_5 + C_6$.

Los pulsos que se producen en R30 que son el resultado de la multiplicación analógica, son transferidos a través del transformador de pulsos T al interruptor ENF de la etapa Procesamiento de Señales, con este transformador se logra que los pulsos resultantes se desacoplen de la fuente de polarización del UJT.

Con la finalidad de obtener pulsos cuando la señal de entrada V_M sea positiva o negativa, se utilizan cuatro diodos, D4 y D7 para la conducción positiva y D5 con D6 para la conducción negativa, por lo tanto el capacitor C_t se carga siempre con la misma polaridad; en el instante que el interruptor electrónico se cierra éste presenta un camino de baja impedancia a la corriente que entra o sale de CI-4, en consecuencia el proceso de carga del capacitor C_t se detiene, el mismo que se reanuda cuando el interruptor se abre. Como resultado se obtiene un tren de pulsos cada vez que el interruptor esté abierto, como se muestra en la Fig.

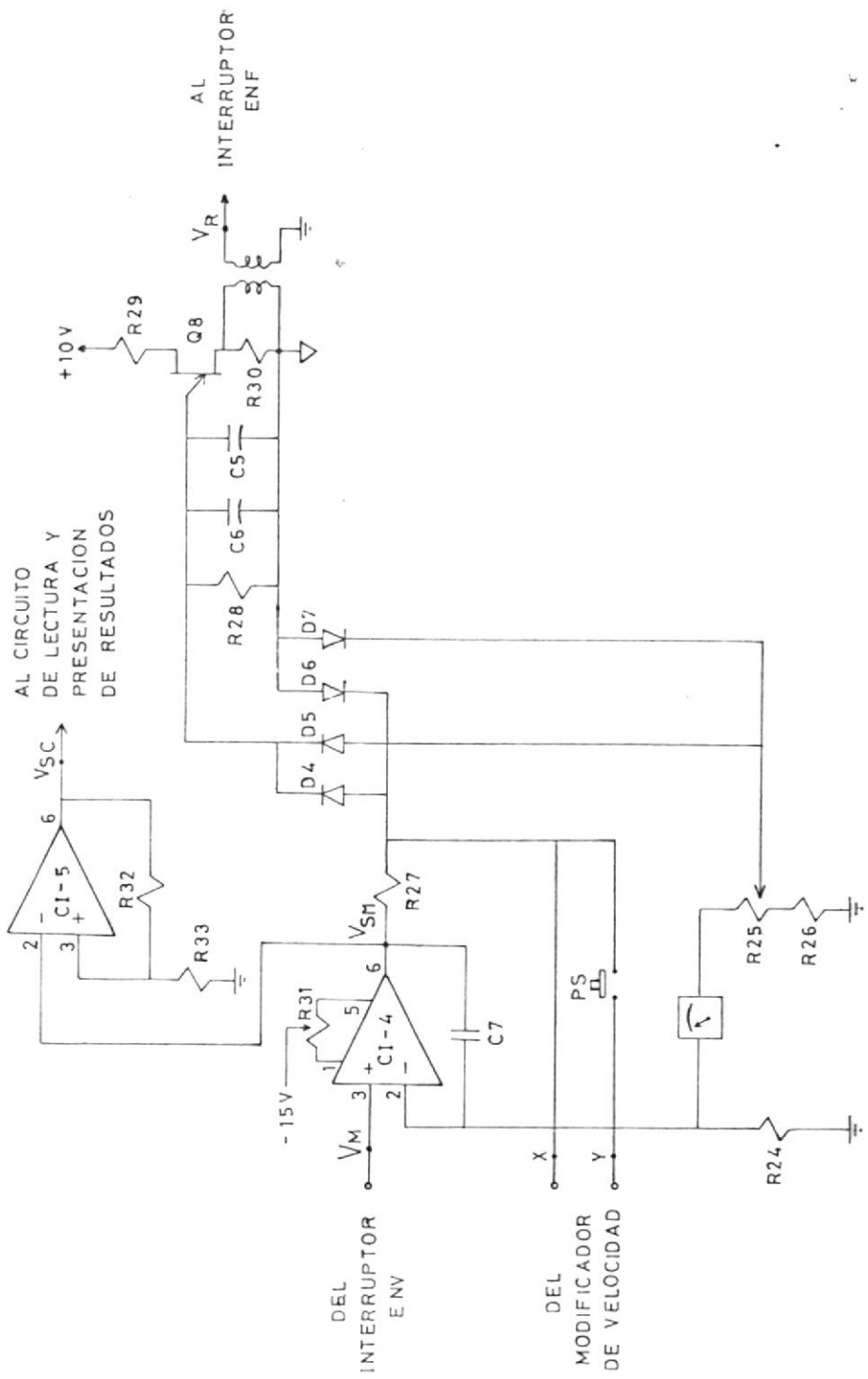


Fig. 4.3 Circuito de Medición

4.4, T_a es la duración del pulso que se genera en el circuito del Modificador de Velocidad y durante el cual el interruptor electrónico permanece abierto, en esta situación el voltaje de salida (V_{SM}) de CI-4 para un tiempo comprendido dentro del período de carga (t_{ov}) del capacitor C_t (voltaje de generación de una rampa), está determinado por:

$$V_{SM} = V_M \left[1 + \frac{R_{25}'}{R_{24}} + \frac{R_{27}(R_{24} + R_{25} + R_{26})}{R_{24}(R_{25}'' + R_{26})} \right] + \frac{R_{24} + R_{25} + R_{26}}{C_t R_{24}(R_{25}'' + R_{26})} V_M t + 2V_D$$

siempre que: $0 \leq t \leq t_{ov}$

$C_t = C_5 + C_6$ y $2V_D$ es el voltaje de conducción de los diodos D_4 y D_7 ó D_5 y D_6 , además $R_{25}' = R_{25} - R_{25}''$

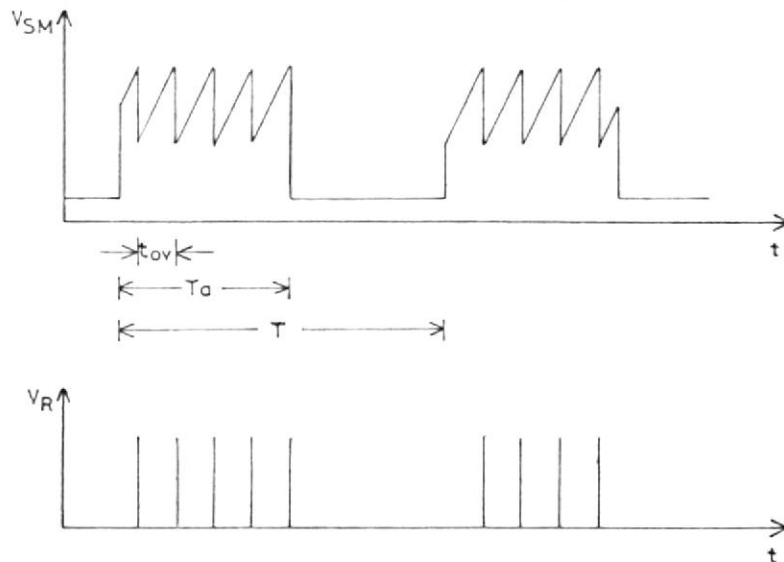


Fig. 4.4 Forma de las señales del Circuito de Medición.

Cuando el interruptor se cierra, el integrado CI-4 trabaja como amplificador en configuración no inversor, en este ca-

so el voltaje de salida está determinado por:

$$V_{SM} = V_M \left(1 + \frac{R_{27}}{R_{24}}\right) + V_{X-Y}$$

V_{X-Y} es la caída de voltaje en el Interruptor Electrónico y es de aproximadamente 0.8 V.

El medidor MP indica el porcentaje del máximo nivel de entrada (peso) que se está acumulando y está constituido por un miliamperímetro cuya escala máxima es 1 mA equivalente al 100 %.

Cuando el equipo se encuentra en funcionamiento, el Interruptor Electrónico se abre y se cierra alternativamente y el miliamperímetro indica la corriente promedio, la que está determinada por la siguiente expresión:

$$I_M = \frac{1}{T} \left[T_a \frac{V_M}{R_{24}} - (T - T_a) \frac{V_M}{R_{25} + R_{26}} \right] \quad (4.2)$$

Reemplazando T por 1/f, se tiene:

$$I_M = \frac{V_M T_a f (R_{24} + R_{25} + R_{26}) - V_M R_{24}}{R_{24} (R_{25} + R_{26})} \quad (4.3)$$

donde:

T_a : duración del pulso que se genera en el Modificador de Velocidad.

f : frecuencia de la señal del tacómetro.

El número de pulsos por segundo resultante en la multiplicación, viene dado por:

$$\frac{\text{Pulsos}}{\text{seg.}} = f_{OV} f T_a \quad (4.4)$$

f_{OV} es la frecuencia de oscilación del Convertidor de Voltaje a Frecuencia.

La botonera PS es un interruptor manual que causa iguales efectos en el Circuito de Medición que el Interruptor Electrónico; es útil cuando se somete a calibración el equipo; en esta situación, si se presiona PS luego de un tiempo determinado, se puede tomar lectura (en el indicador visual numérico) del total acumulado en dicho tiempo y si es necesario aumentar la cuenta o disminuirla, se emplea el potenciómetro R25, que como puede observarse en la ec.(4.1) al variar R25" se produce una variación en la frecuencia f_{OV} .

El potenciómetro R31 anula el pequeño error de voltaje de salida del amplificador operacional CI-4 producido por los desbalances internos propios del integrado, el ajuste de R31 se efectúa cuando la señal V_M se reemplaza (en calibración) por OV.

La señal V_{sc} del Detector de Cruce por Cero con Histerénesis formado por CI-5, R32 y R33 gobierna el sentido de conteo de los respectivos contadores de la siguiente etapa correspondiente al Circuito de Lectura y Presentación de Resultados, cuando la señal V_{SM} es positiva V_{sc} es igual a $-V_{SAT}$, lo contrario ocurre cuando V_{SM} es negativa. La realimentación positiva en este comparador elimina las transiciones

falsas en la salida, que se producen cuando la señal V_{SM} no es efectivamente cero sino una señal que oscila en un rango de voltaje comprendido entre $+0.8V$ y $-0.8V$ medidos experimentalmente. La realimentación positiva hace que una fracción del voltaje de salida V_{sc} sea realimentado a la entrada positiva y crea una referencia de voltaje que depende de V_{sc} , llamado Voltaje de Umbral; como existen dos polaridades entonces hay dos voltajes de umbral, denominados voltaje de umbral superior y voltaje de umbral inferior (3).

El Voltaje de Umbral Superior (V_{US}) está determinado por:

$$V_{US} = \frac{R_{33}}{R_{32} + R_{33}} (+V_{SAT})$$

El Voltaje de Umbral Inferior (V_{UI}) está determinado por:

$$V_{UI} = \frac{R_{33}}{R_{32} + R_{33}} (-V_{SAT})$$

En el circuito se han utilizado: $R_{32} = 12 \text{ K}\Omega$, $R_{33} = 1 \text{ K}\Omega$ y con los voltajes de saturación medidos experimentalmente ($+V_{SAT} = +14.5 \text{ V}$, $-V_{SAT} = -13 \text{ V}$), los voltajes de umbral son $V_{US} = 1.1 \text{ V}$ y $V_{UI} = -1 \text{ V}$.

La diferencia entre los voltajes V_{US} y V_{UI} se denomina voltaje de Histéresis (V_H).

$$V_H = V_{US} - V_{UI}$$

Con los datos anteriores $V_H = 2.1V$, de esta manera los voltajes de umbral en este circuito cubren el rango de ruido de la señal V_{SM} . La curva característica de la salida ver-

• sus la entrada del Detector de Cruce por Cero con Histéresis se muestra en la Fig. 4.5

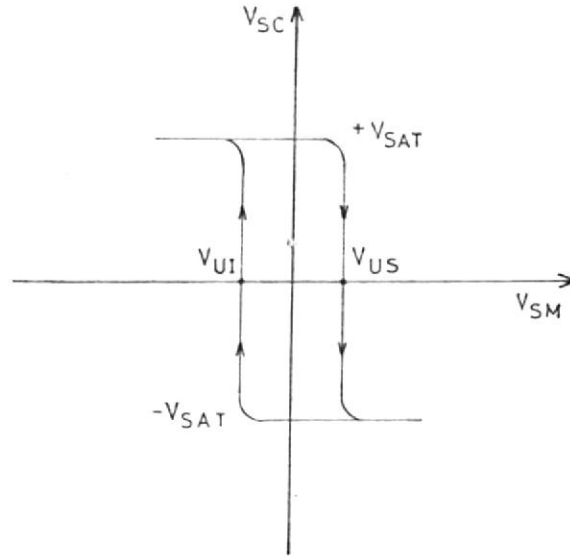


Fig. 4.5 Voltaje de salida V_{sc} vs voltaje de entrada V_{sm} .



CAPITULO V

CIRCUITO DE LECTURA Y PRESENTACION DE RESULTADOS

Este circuito tiene como finalidad procesar los pulsos resultantes de la multiplicación analógica que se realiza en el Circuito de Medición, para que por medio de indicadores numéricos de siete segmentos sea posible tomar lectura de la cantidad total de material que se transporta en la banda y además mediante una memoria permanente debe mantener visualizados estos resultados. Para cumplir con estos objetivos se ha diseñado el circuito de la Fig. 5.1.

Esta etapa está constituida básicamente por circuitos digitales de tecnología CMOS, elegida por la característica de bajo consumo de potencia, la misma que evita el desgaste rápido de la batería que se emplea en la alimentación de los contadores de pulsos representativos de la cantidad total y sus respectivos decodificadores, permitiendo de esta manera mantener visualizada la lectura del resultado en los indicadores numéricos, sin tomar en consideración la alimentación del resto de la circuitería del equipo.

Para evitar que ingresen al circuito perturbaciones de alta frecuencia, la señal de pulsos V_0 ingresa al filtro pasa bajos

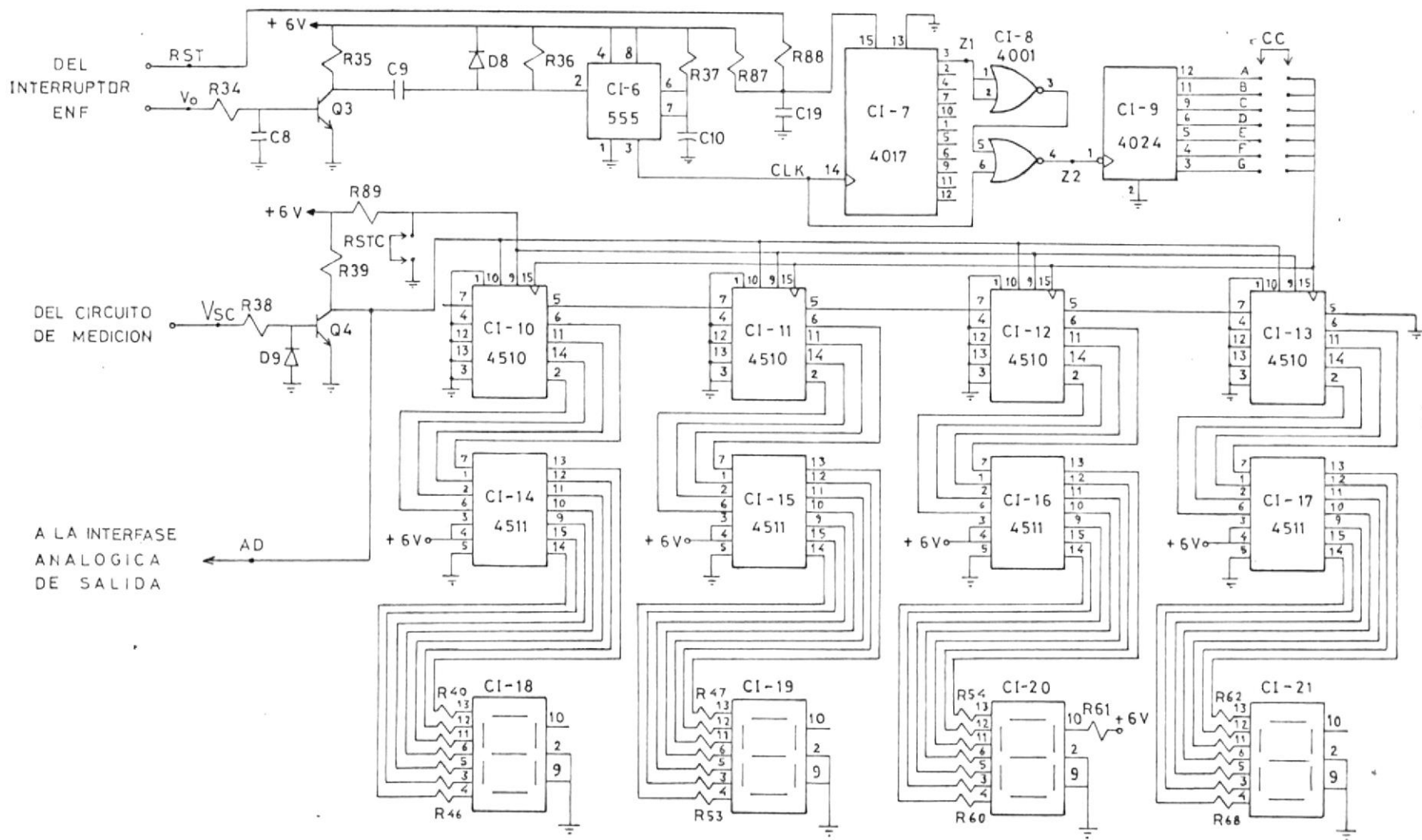


Fig. 5.1 Circuito de Lectura y Presentación de Resultados

formado por R34 y C8, a continuación la forma de esta señal se modifica en una señal de pulsos cuadrados a fin de que los niveles lógicos necesarios en la circuitería digital queden bien definidos, esto se realiza en base de un temporizador 555 (CI-6) en configuración monoestable, el que está activado por la señal de pulsos de entrada a esta etapa (Vo) mediante el transistor Q3 y la red diferenciadora R36 C9; de esta manera un pulso de Vo produce un pulso cuadrado en el temporizador entre 0V y Vcc (+6V) y su duración está determinada por:

$$T_e = 1.1 R_{37} C_{10}$$

Con $R_{37} = 8.2 \text{ K}\Omega$ y $C_{10} = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$, usando esta ecuación se obtiene $T_e = 0.9 \text{ ms}$, experimentalmente $T_e = 0.82 \text{ ms}$.

La señal de salida del temporizador (CLK) ingresa al contador de décadas CI-7 (4017), para obtener mediante este elemento y el contador binario de siete etapas CI-9 (4024) conectados como se muestra en el diagrama de la Fig. 5.1 los pulsos representativos de la cantidad de material que se transporta en la banda, los mismos que son contabilizados por contadores BCD de modo de cuenta ascendente/descendente (4510) conectados en cascada, y finalmente a través de decodificadores BCD a siete segmentos (4511) se presenta el resultado de la cuenta en indicadores numéricos de siete segmentos (ECG 3057).

Las puertas NOR (4001) hacen posible incrementar la sensibilidad de los indicadores numéricos, debido a que cuando el nivel

de voltaje en el terminal 15 (desactivación) de CI-7 es alto, éste cesa su funcionamiento y por lo tanto el número de pulsos de la señal de entrada de CI-9 (Z2) se incrementa diez veces y en consecuencia la velocidad de conteo aumenta, este funcionamiento es requerido cuando se desea ajustar a cero el equipo (calibración); el nivel de voltaje alto o bajo del terminal 15 de CI-7 está controlado por la señal RST proveniente de la etapa de Procesamiento de Señales. El diagrama y la característica funcional de cada circuito integrado CMOS es proporcionado por el fabricante (8).

Las señales de salida del contador binario de siete etapas se las ha denominado A, B, C, D, E, F y G, las mismas que son seleccionadas mediante el puente CC y son determinadas de acuerdo a la unidad de peso a emplearse en la medición de esta variable (calibración). Las señales correspondientes al circuito de esta etapa del equipo se muestran en la Fig. 5.2, el contador binario de siete etapas es un divisor de frecuencia en el que cada señal de salida tiene una frecuencia que es la mitad de la frecuencia de la salida precedente y en esta figura se muestran tres de ellas.

Cada contador BCD (4510) corresponde a un dígito de la lectura resultante y en este trabajo con el objeto de demostrar el funcionamiento, se utilizan cuatro dígitos: Tres para la parte de los enteros y uno para la parte decimal.

El modo de cuenta ascendente o descendente de los contadores BCD

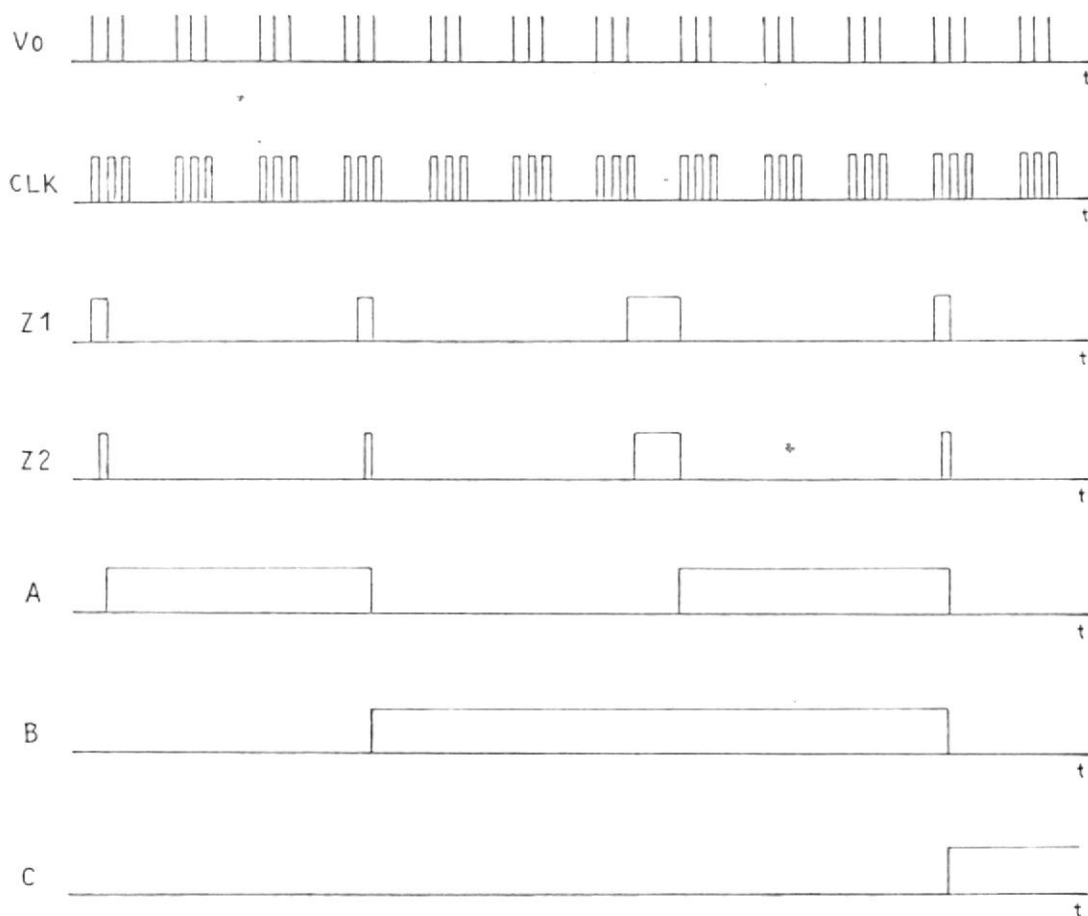


Fig. 5.2 Señales del Circuito de Lectura
y Presentación de Resultados.

4510 está determinado por la señal V_{sc} proveniente del Circuito de Medición y mediante Q4 se obtienen los niveles lógicos requeridos en estos circuitos digitales; de esta manera el terminal 10 (conteo ascendente/descendente) del contador, tendrá un nivel alto cuando V_{sc} sea negativa ($-V_{SAT}$) entonces de acuerdo a las características expuestas en la referencia (8) para este elemento se efectuará el conteo ascendente, y tendrá un nivel bajo dicho terminal cuando V_{sc} sea positiva ($+V_{SAT}$) efectuándose en este caso el conteo descendente.

El interruptor RSTC encera los contadores 4510 y por lo tanto la lectura en los indicadores numéricos es cero, esto se efectúa cuando RSTC envía un nivel alto a estos contadores.

La fuente externa de polarización de los contadores 4510 y de los decodificadores 4511 consiste de cuatro baterías de 1.5 V tamaño AA cada una, utilizadas por las razones expuestas al inicio de esta sección.



BIBLIOTECA

CAPITULO VI

INTERFASE ANALOGICA DE SALIDA

Para que el equipo tenga la capacidad de comunicarse con dispositivos periféricos tales como controladores de la operación del equipo o registradores de la cantidad total de material que se transporta en la banda ubicados en lugares alejados del área de funcionamiento del equipo, se ha diseñado un circuito analógico que constituye la interfase de salida.

El circuito convierte la señal de pulsos que se obtiene en el Circuito de Medición en una señal de corriente, de esta forma un valor de corriente corresponde a un valor instantáneo de la cantidad de material que se transporta en la banda. Para cumplir con este requerimiento, la forma de los pulsos de la señal de entrada es modificada mediante un temporizador 555 en configuración monoestable obteniéndose una señal de pulsos cuadrados, luego por medio de un filtro pasa bajos es convertida en una señal de voltaje DC, la misma que es finalmente transformada a través de Amplificadores Operacionales y transistores en una señal de corriente; además el circuito posee un control de rapidez de respuesta (corriente de salida), el que se ajusta de acuerdo a las necesidades del usuario.

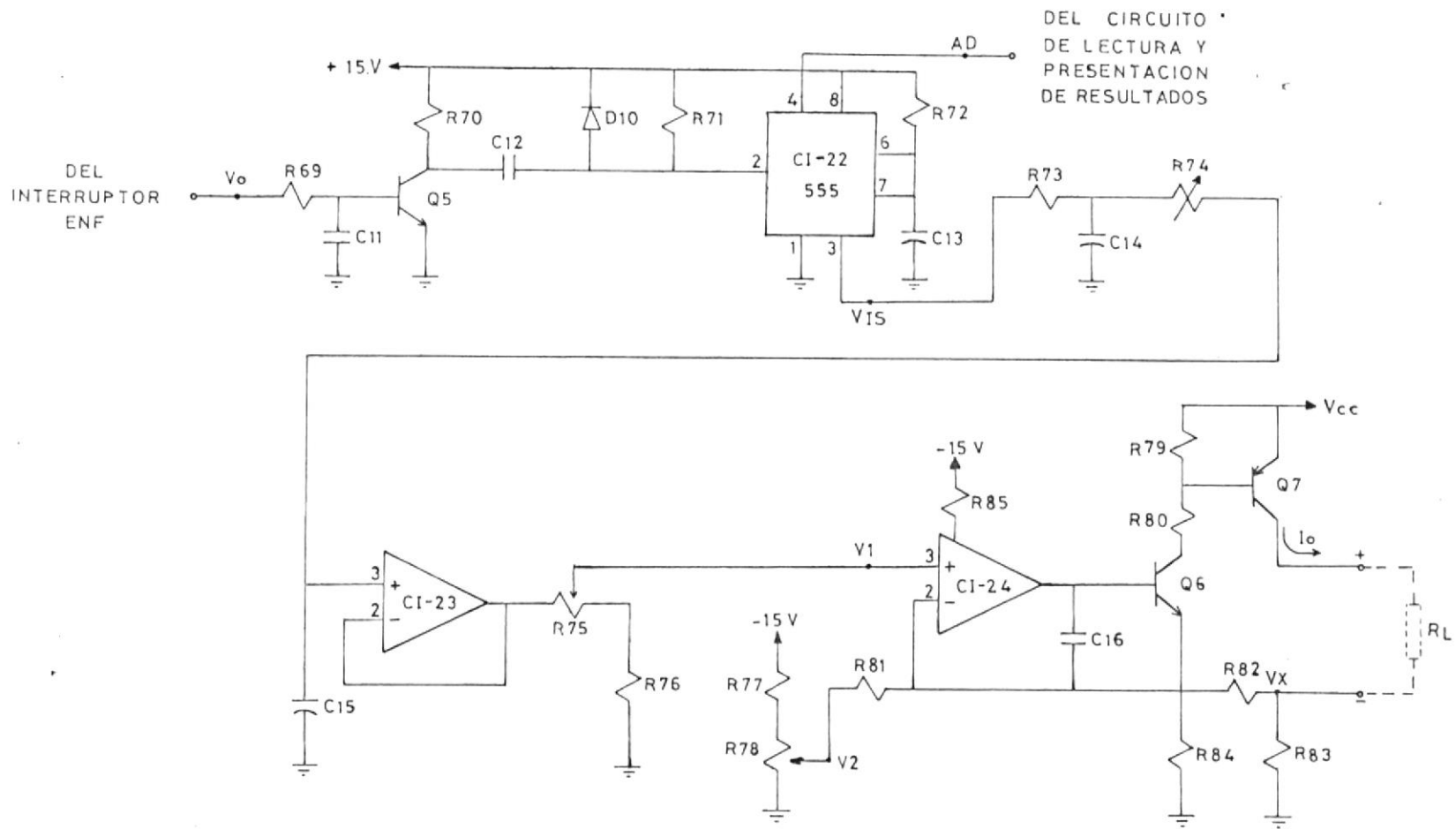


Fig. 6.1 Interfase Analógica de Salida

Esta interfase está diseñada para que procese la señal del Circuito de Medición cuando el voltaje de entrada a éste (proporcional al peso del material) sea positivo y opere en un rango de 4 mA a 20 mA. El circuito diseñado se muestra en la Fig.6.1, los pulsos resultantes en el Circuito de Medición llegan a esta interfase a través del interruptor ENF de la etapa de Procesamiento de Señales.

La señal V_o es aplicada a la base de Q5 para que la señal del colector dispare el temporizador 555 (CI-22) en configuración monoestable, de esta forma los pulsos de V_o son transformados en pulsos cuadrados, como lo muestra la Fig. 6.2. La duración del pulso que se genera en CI-22 está determinada por:

$$T_r = 1.1 R_{72} C_{13} \quad (6.1)$$

Con $R_{72} = 8.2K\Omega$ y $C_{13} = 0.1 \mu F$, usando esta ecuación se obtiene $T_r = 0.9 \text{ ms}$ y experimentalmente, $T_r = 0.8 \text{ ms}$.

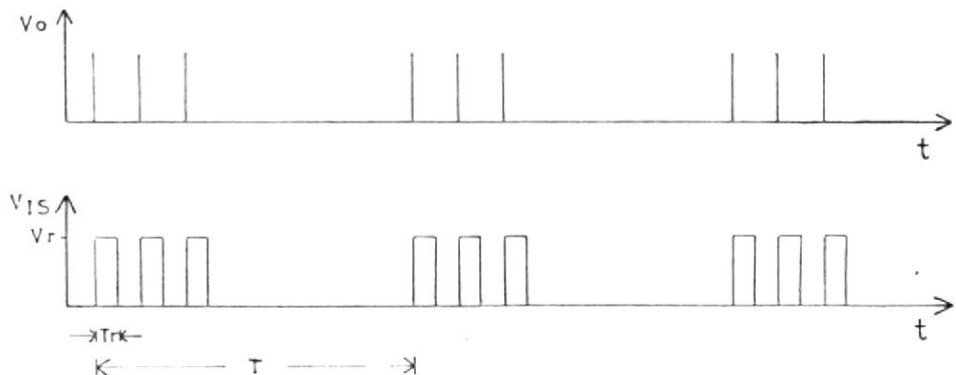


Fig. 6.2 Señal del Circuito de Medición (V_o) y señal de salida del temporizador (V_{IS}).

La señal de salida de CI-22 ingresa a una red RC, que constituye un filtro pasa bajos con la finalidad de convertir los pulsos en una señal de voltaje DC, la misma que está determinada por:

$$V_N = (\text{Pulsos/seg.}) Tr Vr$$

reemplazando Pulsos/seg. definido en la ec. (4.4), se obtiene

$$V_N = f_{OV} f Ta Tr Vr \quad (6.2)$$

donde:

f_{OV} : frecuencia de oscilación del convertidor de voltaje a frecuencia.

f : frecuencia de la señal del Tacómetro.

Ta : duración del pulso que se genera en el Modificador de Velocidad.

Tr : duración del pulso a la salida del temporizador CI-22.

Vr : nivel alto del pulso a la salida del temporizador CI-22.

La señal AD de enceramiento del temporizador está controlada por la señal Vsc que se genera en el Circuito de Medición, el enceramiento se efectúa cuando el voltaje en el terminal 4 de CI-22 es 0V y esto tiene lugar cuando el Circuito de Medición sensa una señal negativa proveniente de la balanza de pesaje continuo.

El potenciómetro R74 controla el flujo de corriente de carga de

C15, introduciendo en consecuencia un retardo en la respuesta de la corriente de salida, con este potenciómetro se logra atenuar los efectos producidos por variaciones bruscas de la señal de entrada y su ajuste se realiza de acuerdo a las conveniencias del usuario. El retardo máximo en la respuesta introducido por R74 es:

$$tr_{\max} = 2.2 R74 C15 \quad (6.3)$$

Con $R74 = 100 \text{ K}\Omega$ y $C15 = 220 \text{ }\mu\text{F}$, se consigue $tr_{\max} = 48.4 \text{ s}$.

Por medio del amplificador de aislamiento o seguidor de voltaje CI-23, se acopla la señal de voltaje de C15 a la circuitería que convierte voltaje a corriente.

La señal V2 corresponde al nivel mínimo (4 mA) del rango de operación y es seleccionada por R78 cuando no hay señal de entrada a la interfase. V2 está determinada por la siguiente ecuación:

$$V2 = -I_o \frac{R81 R83}{R81 + R83} \quad (6.4)$$

Para $I_o = 4 \text{ mA}$ y con $R81 = 22 \text{ K}\Omega$, $R83 = 180\Omega$, R78 debe ajustarse hasta obtener $V2 = -0.71 \text{ V}$, de acuerdo a esta ecuación.

La corriente de salida (I_o) de la Interfase está determinada por la siguiente expresión, haciendo $R81 = R82 = R_e$:

$$I_o = V1 \left(\frac{1}{R_e} + \frac{2}{R83} \right) - V2 \left(\frac{1}{R_e} + \frac{1}{R83} \right) \quad (6.5)$$

V1 es la señal de voltaje DC proporcional al número de pulsos

de la señal de entrada y es una fracción del voltaje V_N , V_1 es seleccionada mediante el potenciómetro R75.

Si el estado de operación del equipo es máximo, la corriente de salida de la Interfase debe ser de 20 mA, para obtener este resultado, con los valores de resistencias anotados anteriormente y de acuerdo a la ecuación 6.5, el potenciómetro R75 debe ajustarse hasta obtener $V_1 = 1.44$ V; en estas condiciones la máxima resistencia de carga (R_1) a conectarse a la Interfase es de aproximadamente:

$$R_{1_{\max}} \cong \frac{V_{CC} - V_x}{I_o}$$

siendo $V_x = 2V_1 - V_2$

La máxima resistencia de carga depende sobre todo de la fuente de polarización de los transistores, en este circuito se utiliza $V_{CC} = +15$ V y de las ecuaciones anteriores se obtiene un valor de 570.5Ω para dicha resistencia, experimentalmente resulta ser de 565Ω .



BIBLIOTECA

CAPITULO VII

CALIBRACION

Previo a la calibración se describe seguidamente el montaje del equipo construido. Las circuiterías de las etapas fueron montadas sobre tarjetas de circuito impreso que se las encuentra en el mercado local, todos los elementos de los circuitos fueron soldados sobre estas tarjetas con la excepción de los integrados de tecnología CMOS, que por precaución a algún daño al soldarlos, se los colocó por medio de zócalos en las tarjetas correspondientes a la etapa del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados.

El medidor de porcentaje (MP), el interruptor de dos polos seis posiciones (Z1) y el potenciómetro R19 (Z2) del circuito de compensación del peso de la banda transportadora, han sido colocados en una caja metálica. Las tarjetas interconectadas y la caja metálica, se las ha colocado sobre una lámina de baquelita de 30 x 36 centímetros cuadrados de dimensión, en esta lámina se encuentran los interruptores que determinan el estado de operación del equipo (ENV y ENF), la botonera PS y una regleta de 12 terminales que sirve para conectar al equipo las fuentes DC, que suministran la polarización necesaria para el funcionamiento del mismo, así como también, conectar las señales

de entrada, las mismas que provienen de la balanza de pesaje continuo y del tacómetro. La Fig. 7.1 muestra el montaje descrito.

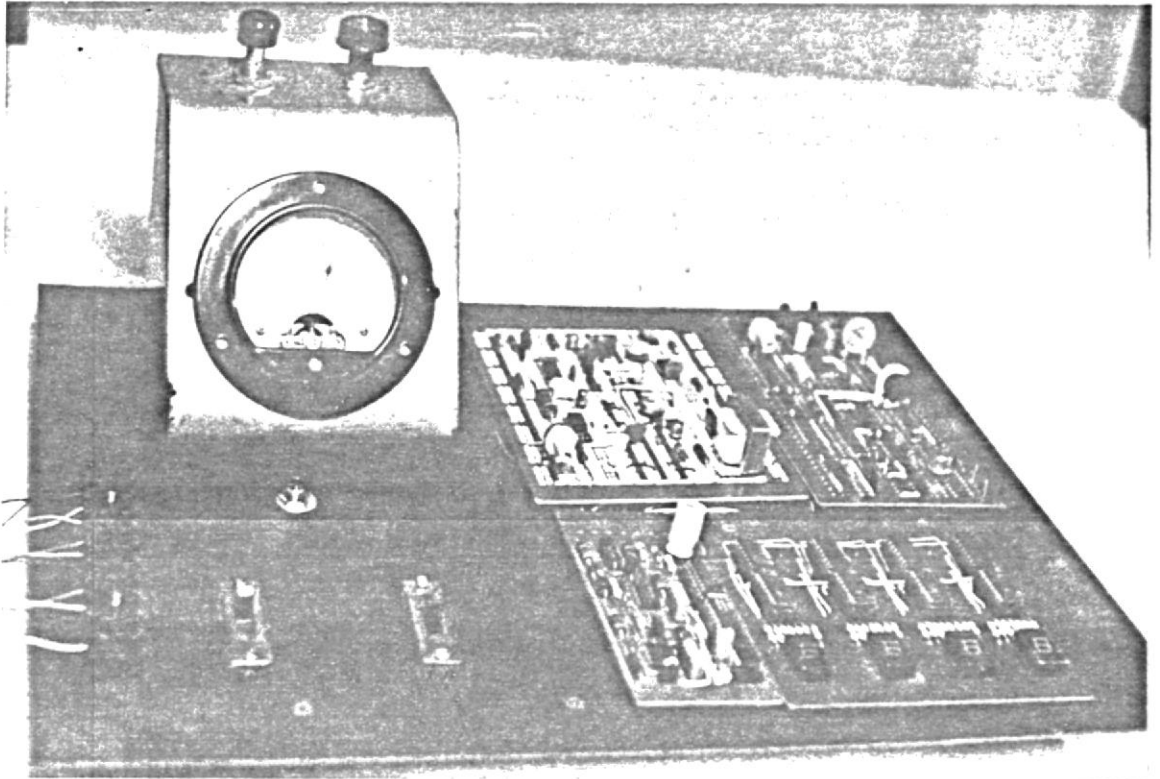


Fig. 7.1 Montaje del Totalizador Electrónico Industrial para Bandas Transportadoras.

A continuación se describe la Calibración del equipo para que su funcionamiento sea eficiente, para lo cual previamente es necesario que la banda transportadora esté alineada correctamente. Con la banda transportadora vacía en movimiento y con los equipos accesorios (balanza de pesaje continuo y tacómetro) conectados al Totalizador Electrónico Industrial energizado apropiadamente, se procede a calibrarlo.

7.1 Inicialización del Equipo en Cero

Esta calibración permite inicializar el equipo en cero, mediante el ajuste del voltaje remanente (offset). Los pasos a seguirse son los siguientes:

1. Interruptor ENV en la posición CERO, en esta posición se reemplaza por 0V la señal de voltaje DC (proporcional al peso) que ingresa al Circuito de Medición ($V_M = 0V$).
2. Interruptor ENF en la posición X10, con esta acción el contador de décadas CI-7 se deshabilita, debido a que su terminal de desactivación (Reset) adquiere un nivel alto y por lo tanto la sensibilidad de conteo se incrementa diez veces.
3. Ajustar el voltaje remanente del Amplificador Operacional CI-4 a un valor mínimo mediante el potenciómetro R31, de tal manera que se obtenga una lectura de cero en el medidor de porcentaje (MP) y la cantidad que se muestre en los Indicadores Numéricos de siete segmentos (Indicador Visual) permanezca invariable, la misma que puede ser cero si se desactivan los contadores 4510, lo que se logra desconectando el puente RSTC y luego reponiéndolo; con este ajuste se garantiza que el Circuito de Medición no genere pulsos cuando la señal de voltaje DC proporcional al peso sea cero.
4. Retornar el interruptor ENF a la posición NORMAL.

7.2 Ajuste del Modificador del Ciclo de Trabajo

Este ajuste tiene como finalidad fijar la duración del pulso (T_a) que se genera en la etapa del Modificador de Velocidad, de acuerdo a la máxima velocidad de operación de la banda transportadora. El procedimiento a seguirse es el siguiente:

1. Incrementar la velocidad del motor que mueve la banda transportadora a un valor máximo de operación.
2. Colocar el interruptor ENV en la posición PV, de esta manera se reemplaza la señal de la balanza de pesaje continuo (V_M) que entra al Circuito de Medición por 0.75 V DC, esto causa la deflección positiva de la aguja del medidor de porcentaje, en cambio la lectura en el indicador visual se incrementa ascendentemente.
3. Disminuir R_6 , es decir girar totalmente el potenciómetro R_6 en dirección contraria a las manecillas del reloj ($R_6 = 0\Omega$), de esta manera el ancho del pulso T_a llega a ser mínimo y en este caso la ecuación (2.3), se reduce a:

$$T_a = 1.1 R_5 C_3$$

reemplazando valores se tiene

$$T_a = 1.1 (3.3 \text{ K}\Omega)(1 \text{ }\mu\text{F})$$

$$T_a = 3.63 \text{ ms.}$$

4. Incrementar lentamente R6 hasta que el medidor de porcentaje indique un 65 %, este resultado se obtiene debido a que se ha considerado una disminución del 12 % en el período de la señal del tacómetro, con el objeto de asegurar el funcionamiento en una región estable, por lo tanto:

$$T_a = \frac{0.88}{f_{\max}} \quad (7.1)$$

La corriente en el medidor de porcentaje está determinada por la ecuación (4.3), reemplazando en ésta la ecuación (7.1) y sustituyendo valores: $V_M = 0.75 \text{ V}$, $f = f_{\max}$, $R_{24} = 1 \text{ K}\Omega$, $R_{25} = 4.7 \text{ K}\Omega$, $R_{26} = 4.7 \text{ K}\Omega$, se obtiene:

$$I_M = 0.65 \text{ mA}$$

y en consecuencia:

$$\text{Porcentaje} = 65 \%$$

Con estas consideraciones, se determinan a continuación los niveles de frecuencia de la señal del tacómetro.

De la ecuación (7.1) la frecuencia máxima de la señal del tacómetro es:

$$f_{\max} = \frac{0.88}{T_a} \quad (7.2)$$

y reemplazando T_a por la ecuación (2.3), se tiene

$$f_{\max} = \frac{0.88}{1.1(R_5 + R_6)C_3}$$

Con $C3 = 1 \mu F$, $R5 = 3.3 K\Omega$ y $R6$ un potenciómetro de $20 K$, se obtiene el rango de f_{max} , esto es

$$34 \text{ pps} \leq f_{max} \leq 242 \text{ pps}$$

La frecuencia mínima de la señal del tacómetro, requerida para el funcionamiento normal del equipo, se determina cuando el medidor de porcentaje indica cero, entonces igualando a cero la ecuación (4.3), se tiene

$$f_{min} = \frac{R24}{T_a(R24 + R25 + R26)} \quad (7.3)$$

reemplazando los valores de resistencias, resulta

$$f_{min} = \frac{1}{10.4 T_a}$$

y haciendo uso de la ecuación (7.1), se obtiene

$$f_{min} = \frac{f_{max}}{9.152} \quad (7.4)$$

De esta ecuación se puede decir, que la frecuencia mínima que le permite operar al equipo en condiciones normales, es aproximadamente el 11 % de la frecuencia máxima.

7.3 Ajuste del número de pulsos en el Circuito de Medición

La frecuencia de oscilación del convertidor de voltaje a Frecuencia del Circuito de Medición, está determinada por la ecuación (4.1), usando esta ecuación para los valores de calibración $V_M = 0.75 V$ y $R25 = 4.7 K\Omega$, se tiene:

$$f_{OV} = \frac{(R24 + R25 + R26)VM}{CtR24(R25 + R26)(Vp - Vv)}$$

$$f_{OV} = \frac{(1K\Omega + 4.7K\Omega + 4.7K\Omega) 0.75 V}{1.1 \mu F (1K\Omega)(4.7K\Omega + 4.7K\Omega)(7.6V - 1.6V)}$$

$$f_{OV} = 125 \text{ pps}$$



BIBLIOTECA

El número de pulsos resultantes en el Circuito de Medición cuando la velocidad de la banda es máxima, se calcula sustituyendo la ecuación (7.1) en la ecuación (4.4), es decir:

$$\frac{\text{Pulsos}}{\text{seg.}} = 0.88 f_{OV} \quad (7.5)$$

Reemplazando el valor de f_{OV} calculado anteriormente, se obtiene

$$\frac{\text{Pulsos}}{\text{seg.}} = 110$$

En el Circuito de Lectura y Presentación de Resultados, este número de pulsos es dividido para diez en el integrado 4017 (CI-7), es decir que a su salida resultan 11 pps, estos pulsos ingresan al integrado 4024 (CI-9), que consiste en un contador binario de siete etapas y en una hora la lectura que se obtendrá en el indicador visual (construido para una cantidad de tres cifras enteras y una decimal) será una de las indicadas en la Tabla I, en esta tabla se muestran las lecturas para cada uno de los terminales de salida de CI-9, que pueden ser seleccionados mediante el puente conector CC.

De acuerdo con la ecuación (4.1), cuando $R25$ se hace cero,

TABLA I

LECTURAS EN UNA HORA PARA CADA
TERMINAL DE SALIDA DE CI-9

TERMINAL	LECTURA
A	1980.0
B	990.0
C	495.0
D	247.5
E	123.7
F	61.8
G	30.9

el número de pulsos se incrementa en un 100 %, por lo tanto con $V_M = 0.75$ V DC y $f = f_{max}$ en el indicador visual se puede obtener en una hora de operación del equipo, una lectura máxima de 3960.0 (terminal A) y una lectura mínima de 30.9 (terminal G); para estos valores de calibración, se considera un porcentaje de operación del equipo del 65 %, de acuerdo a lo expuesto en la sección 7.2, entonces la lectura correspondiente a un funcionamiento del 100 %, se la puede escoger dentro del rango aproximado de 50 a 6000 unidades de peso por hora.

Para una operación al 100 %, la máxima cantidad de material transportada por la banda en una hora, es elegida de acuerdo a las conveniencias del usuario, en esta ocasión se con-

sideran 200 TPH (toneladas por hora), entonces para un funcionamiento del 65 % se deben obtener 130 TPH. Los pasos a seguirse para la calibración del número de pulsos con la finalidad de obtener 130 TPH al 65 %, son los siguientes:

1. Interruptor ENF en la posición NORMAL, en esta posición los pulsos resultantes en el Circuito de Medición, son procesados por el Circuito de Lectura y Presentación de Resultados.
2. Interruptor ENV en la posición PV, el medidor de porcentaje en esta posición indicará 65 % como se determinó en la sección 7.2.
3. Girar totalmente el potenciómetro R25 en dirección contraria a las manecillas del reloj ($R25 = 4.7 K\Omega$) y de acuerdo a los resultados de la Tabla I, colocar el puente selector CC en la posición E.
4. Mediante un cronómetro y haciendo uso de la botonera PS ajustar el potenciómetro R25 hasta obtener 130 TPH. Al presionar la botonera PS, la generación de pulsos en el Circuito de Medición se detiene. Desconectando el puente RSTC se enceran los contadores 4510, por lo tanto la lectura en el indicador visual se hace cero. Una forma práctica de obtener los resultados correspondientes a una hora de funcionamiento es, tomar lectura solamente para seis minutos de operación y la cantidad obtenida

multiplicarla por diez.

5. Si se trabaja con el mismo tipo de material y si se desea cambiar la unidad de medición de Toneladas a Kilogramos, la cantidad que se lee en el indicador visual debe multiplicarse por un factor de 10^3 , por ejemplo en este caso sería 130×10^3 Kg/h.

Si se desea que la medición sea en libras, para el mismo tipo de material, en el indicador visual debe leerse el número 286, por lo tanto el puente selector CC debe colocarse en la posición D y ajustarse el resultado a este valor usando el potenciómetro R25, además la lectura debe multiplicarse por un factor de 10^3 , por ejemplo en esta calibración se tendrán 286×10^3 Lb/h.

Si el material que se transporta es de peso más ligero o de un gran peso, se debe operar con otro tipo de sensor de peso (balanza).

7.4 Compensación del Peso de la Banda Transportadora

De la curva de error de lectura al variar el peso (Fig. 8.6) y considerando un error máximo del 3 % en la respuesta, se obtiene el rango útil de la señal de voltaje (proporcional al peso) que ingresa al Circuito de Medición (V_M), es decir un mínimo de 0.18 V y un máximo de 1.86 V.

La atenuación que presenta el Circuito de Compensación de

tara ilustrado en la Fig. 3.1, se determina de la siguiente manera: cada resistor de la red (de R9 a R18) es de 820Ω , el potenciómetro R19 es de $1 \text{ K}\Omega$ y el potenciómetro R86 del control de Sensibilidad es de $100 \text{ K}\Omega$; llamando R a los resistores de 820Ω , la resistencia equivalente (R_e) de la red de compensación es

$$R_e = \frac{5R + R_{19}}{4}$$

sustituyendo en esta ecuación los valores antes mencionados se obtiene, $R_e = 1.275 \text{ K}\Omega$ y la atenuación (c) está dada por

$$c = \frac{R_{86}}{R_{86} + R_e}$$

reemplazando por los correspondientes valores, se obtiene $c = 0.987$.

Por lo tanto para que el Circuito de Medición trabaje de una forma aceptable, la máxima señal de voltaje (punto V_i en la Fig. 3.1) proporcional a la máxima cantidad de material que se transporta en la banda será:

$$V_{\max} = \frac{V_{i\max}}{0.987} = \frac{1.86 \text{ V}}{0.987}$$

$$V_{\max} = 1.88 \text{ V}$$

y la mínima señal de voltaje será

$$V_{\min} = \frac{V_{i\min}}{0.987} = \frac{0.18 \text{ V}}{0.987} = 182 \text{ mV}$$

En consecuencia la balanza que se conecte al Totalizador Electrónico Industrial, debe operar dentro de este rango útil.

Para conocer los rangos de voltaje (proporcional al peso de la banda) que se pueden compensar en el equipo, se utiliza la expresión definida en la sección 3.1, para lo cual es necesario conocer además de los valores de los resistores del circuito de compensación de tara, el voltaje diferencial entre los terminales positivo y negativo ($V^+ - V^-$) de la balanza de pesaje continuo y el voltaje en el terminal positivo cuando la balanza está sin banda (V_f). Los resistores en el circuito compensador son: $R = 820\Omega$ y $R_{19} = 1k\Omega$.

Si por ejemplo se utiliza una balanza que tiene los siguientes voltajes: $V^+ - V^- = 8V$ y $V_f = 4V$, para este caso, se obtiene la siguiente tabla, en la que se indica el rango de voltaje proporcional al peso de la banda que se puede compensar en el circuito, para cada posición (n) del selector Z1 (Tabla II).

La máxima compensación que se obtiene en este circuito es cuando una de las señales (positiva o negativa) es aproximadamente cinco veces mayor que la otra. Los voltajes negativos se tendrían cuando la banda posea poco peso y la posición inicial del núcleo del LVDT sea diferente a la posición central (núcleo desplazado), en la cual se obtendrá un mayor voltaje (en valor absoluto) en el terminal negativo que en el terminal positivo.

Para calibrar el circuito de compensación del peso de la banda, se siguen los siguientes pasos:

TABLA II

RANGOS DE VOLTAJE DE COMPENSACION
 CUANDO $V^+ - V^- = 8 V$ Y $V_f = 4 V$

n	MINIMO VOLTAJE	MAXIMO VOLTAJE
1	2.43	4.00
2	1.14	2.71
3	-0.141	1.43
4	-1.43	0.141
5	-2.71	-1.14
6	-4.00	-2.43

1. Interruptores ENV y ENF en la posición NORMAL.
2. Con la banda vacía en movimiento, ajustar el selector Z1 y el control Z2 (R19), hasta que en el medidor de porcentaje se lea cero; por ejemplo si el voltaje proporcional al peso de la banda es de 0.55 V y si se emplea una balanza con características iguales a las del ejemplo anterior, entonces de acuerdo a los resultados de la Tabla II, para eliminar el peso de la banda el selector Z1 debe colocarse en la posición 3.
3. Interruptor ENF en la posición X10, esta acción permite incrementar por un factor de diez la sensibilidad de los contadores del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados, ofreciendo de esta manera mayor facilidad en

la calibración del equipo.

4. Ajustar el control Z2 hasta que la lectura promedio en el indicador visual permanezca invariable. La lectura en el indicador visual puede incrementarse o decrementarse si no hay uniformidad en el peso de la banda, por ejemplo, si la banda que se utiliza posee uniones.
5. Retornar el interruptor ENF a la posición NORMAL.

7.5 Ajuste de la Sensibilidad

Después de haber realizado los ajustes indicados en las secciones anteriores, se efectúa la calibración de la sensibilidad, con la finalidad de obtener un resultado que corresponda al valor real de la cantidad de material que se transporta en la banda. El ajuste de la sensibilidad se realiza para una velocidad de la banda y para un peso del material predeterminados, los niveles de estas señales deben estar comprendidos dentro de los rangos de operación del equipo, los mismos que han sido determinados en las secciones anteriores.

Mediante el siguiente ejemplo se explica la forma de ajustar la Sensibilidad.

Suponiendo que los sensores de velocidad y peso que se utilizan tienen las siguientes características:

Tacómetro: Cuando la velocidad es de 1 m/s, la señal de pulsos que se obtiene, tiene una frecuencia de 53 pulsos por segundo (pps).

Balanza: Cuando el peso por unidad de longitud es de 4.25 Kg/m, el voltaje DC que se obtiene proporcional a este valor, es de 0.5 V.

Si las señales de entrada son:

Velocidad de operación de la banda transportadora (v)

$$v = 2.64 \text{ m/s} \quad v_{\max} = 3 \text{ m/s}$$

Peso del material por unidad de longitud (P)

$$P = 8.5 \text{ Kg/m}$$

Con estas señales de entrada y haciendo uso de las características de los sensores, se obtiene:

Voltaje DC (V_i) proporcional al peso del material

$$V_i = 1 \text{ V}$$

Frecuencia (f) de la señal de pulsos proporcional a la velocidad de la banda

$$f = 140 \text{ pps} \quad f_{\max} = 160 \text{ pps}$$

La cantidad real de material transportada por la banda, está determinada por la multiplicación de la velocidad (v) de la banda por el peso (P) del material, por lo tanto para un intervalo de una hora de operación, la lectura real (L_r) que

se debe obtener será:

$$L_r = v.P (3600 \text{ s}) \quad (7.6)$$

Reemplazando en esta ecuación los datos anteriores,

$$L_r = 2.64 \text{ m/s } (8.5 \text{ Kg/m})(3600 \text{ s})$$

$$L_r = 80784 \text{ Kg/h}$$

$$L_r = 80.8 \text{ TPH}$$



En la Fig. 3.1, el control de Sensibilidad es el potenciómetro R86, V_i es la señal de voltaje DC correspondiente al peso del material que se transporta en la banda y V_s es una fracción de este voltaje. El procedimiento a seguirse para ajustar la Sensibilidad es el siguiente:

1. Interruptores ENV y ENF en la posición NORMAL.
2. Con la banda transportadora operando a una velocidad de 2.64 m/s y con un peso por unidad de longitud de 8.5Kg/m, girar el potenciómetro R86 en dirección de las manecillas del reloj, en su totalidad; de esta forma se incrementa la sensibilidad hasta su valor máximo, es decir:

$$V_s = 100 \% V_i$$

3. Para una hora de funcionamiento, tomar lectura (L_t) en el indicador visual del equipo, dicha lectura resultará ser igual a:

$$L_t = K_t f V_M \quad (7.7)$$

donde:

V_M : voltaje que ingresa al Circuito de Medición.

K_t : constante del Totalizador Electrónico.

En la Fig. 3.2 se puede apreciar que las señales V_s y V_M son iguales, debido a la alta impedancia que presenta el amplificador operacional 741 (CI-4) al estar aplicada la señal V_M en el terminal no inversor de este circuito, además de acuerdo al paso anterior $V_s = V_i$, por lo tanto la ecuación (7.7) resulta ser

$$L_t = K_t \cdot f \cdot V_i \quad (7.8)$$

K_t es una constante que depende de los parámetros propios del equipo (elementos analógicos y digitales) y se la calcula en base de los valores utilizados en los ajustes realizados en las secciones 7.2 y 7.3, es decir:

$$K_t = \frac{L_{mo}}{f_{max} \cdot V_{pv}} \quad (7.9)$$

siendo:

L_{mo} : lectura igual al 65 % de la capacidad máxima.

V_{pv} : voltaje constante utilizado en calibración (0.75 V).

En este caso se consideran 130 TPH para L_{mo} , de igual forma como se especificó en la sección 7.3.

Reemplazando la ecuación (7.9) por los correspondientes valores, se obtiene

$$K_t = \frac{130 \text{ TPH}}{160 \text{ pps}(0.75 \text{ V})}$$

$$K_t = 1.0833 \frac{\text{TPH}}{\text{pps}(V)}$$

entonces sustituyendo los valores de K_t , f y V_i en la ecuación (7.8), la lectura en el indicador visual del totalizador electrónico será:

$$L_t = 1.0833 \frac{\text{TPH}}{\text{pps.V}} (140 \text{ pps})(1 \text{ V})$$

$$L_t = 151.6 \text{ TPH}$$

4. Ajustar el control de sensibilidad, de tal forma que se obtenga la lectura real correspondiente a la cantidad de material transportada por la banda en una hora (80.8 TPH). Con esta finalidad, mediante la siguiente expresión se determina el porcentaje (S) al cual debe ajustarse la sensibilidad

$$S = \frac{L_r}{L_t} \times 100 \quad (7.10)$$

reemplazando valores

$$S = \frac{80.8 \text{ TPH}}{151.6 \text{ TPH}} \times 100$$

$$S = 53.3 \%$$

Por lo tanto para obtener la lectura real, la señal V_s será el 53.3 % de V_i , es decir

$$V_s = 533 \text{ mV}$$

7.6 Calibración de la Interfase de Salida

Se calibra la Interfase Analógica de Salida con el objeto de que proporcione una señal de corriente en un rango de 4 mA a 20 mA, se ha escogido este rango debido a que un gran número de dispositivos electrónicos industriales operan dentro de estos niveles de corriente. Se obtendrán 4 mA cuando por lo menos una de las señales de entrada al equipo (velocidad de la banda o peso del material) sea cero, es decir cuando el estado de operación del equipo sea del 0% y se obtendrán 20 mA cuando el equipo opere al 100%. Se utiliza una corriente diferente de cero para el nivel mínimo del rango de operación, en este caso 4 mA, con la finalidad de evitar confusión con 0 mA producidos por algún daño en el cable que conduce la corriente hacia los dispositivos periféricos o por alguna falla en el circuito de la interfase.

Para calibrar la Interfase Analógica de Salida, se siguen los siguientes pasos:

1. Ajustar al máximo el control de rapidez de respuesta de la corriente de salida, es decir girar totalmente el potenciómetro R74 en dirección contraria a las manecillas del reloj ($R74 = 0\Omega$), de esta forma no se produce un retraso en la respuesta.

2. Interruptores ENV y ENF en la posición NORMAL.



3. Con la banda vacía en movimiento ajustar el potenciómetro R78 hasta que la corriente de salida (I_o) sea 4 mA o de otra forma, hasta que V_2 (voltaje en el terminal variable del potenciómetro R78) sea -0.71 V como se determinó en la ecuación (6.4).
4. Incrementar la velocidad del motor que mueve la banda transportadora a un valor máximo de operación.
5. Colocar el interruptor ENV en la posición PV, en la cual el medidor de porcentaje indicará 65 %, como se determinó en la sección 7.2.
6. Ajustar el potenciómetro R75 hasta obtener la corriente de salida correspondiente al 65 %, esto es:

$$I_o = 0.65(20 - 4) \text{ mA} + 4 \text{ mA}$$

$$I_o = 14.4 \text{ mA}$$

7. Ajustar el potenciómetro R74 de tal forma que se obtenga el retardo o amortiguamiento deseado en la respuesta de corriente, muy poco amortiguamiento causará fluctuaciones en la respuesta y demasiado amortiguamiento producirá una respuesta muy lenta. De acuerdo a la ecuación (6.3), el retardo máximo es de 48.4 s.

Autochequeo

Con el interruptor ENF en la posición PF (Fig. 3.3), se re-

emplaza la señal de pulsos del Circuito de Medición por la señal de 115 pps generada por el temporizador 555 (CI-3) en configuración astable, con la finalidad de probar si es correcto el funcionamiento de las etapas: Circuito de Lectura y Presentación de Resultados e Interfase Analógica de Salida.

En el Circuito de Lectura y Presentación de Resultados, para un intervalo de funcionamiento de una hora, a la salida del contador de décadas 4017 se obtienen 41400 pulsos, este número de pulsos ingresan al contador binario de siete etapas 4024 y si el puente selector CC se colocara en la posición C (tercer terminal de salida), los contadores 4510 contabilizarán en una hora el siguiente número de pulsos:

$$41400 \text{ pulsos} \div 2^3 = 5175 \text{ pulsos}$$

y en el indicador visual se leerá la cantidad 517.5; este resultado obtenido indica que el Circuito de Lectura y Presentación de Resultados se encuentra en buen estado.

En la Interfase Analógica de Salida para comprobar su buen funcionamiento, se deben obtener los siguientes resultados:

Con el potenciómetro R75 ajustado al máximo, de tal manera que

$$V_N = V_1$$

siendo V_1 el voltaje DC en el terminal no inversor de CI-24

y V_N el voltaje DC proporcional a la frecuencia (f) de la señal de entrada a la interfase. V_N está determinado por la ecuación (6.2) que en este caso se reduce a:

$$V_N = f \cdot T_r \cdot V_r$$

Si $f = 115$ Hz, $T_r = 0.8$ ms y $V_r = 13.8$ V (medidos experimentalmente), entonces:

$$V_N = 1.27 \text{ V}$$

Con este resultado y teniendo 4 mA como nivel mínimo del rango de operación, la corriente de salida definida por la ecuación (6.5) será:

$$I_o = 18.16 \text{ mA}$$

CAPITULO VIII

PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se comprueba experimentalmente el funcionamiento del equipo, luego del análisis teórico realizado en los capítulos anteriores. Con esta finalidad se presentan fotografías de las señales en diferentes puntos de la circuitería para señales de peso y velocidad específicas, así como también se muestran curvas de operación del equipo.

8.1 Señales experimentales obtenidas en varios puntos del equipo construido.

A continuación se pueden apreciar las fotografías correspondientes a las diferentes señales obtenidas en varios puntos del equipo, teniendo como señales proporcionales al peso y a la velocidad a 0.75 V DC y 100 pps respectivamente. 0.75 V es el voltaje proporcional al peso del material en la banda a la entrada del Circuito de Medición (interruptor ENV en la posición PV) y 100 pps es la frecuencia de la señal del tacómetro para una máxima velocidad de la banda.

En la Fig. 8.1 se aprecian las formas de las señales de entrada (Vent) y salida (V_B) del bloque Modificador de Velo-

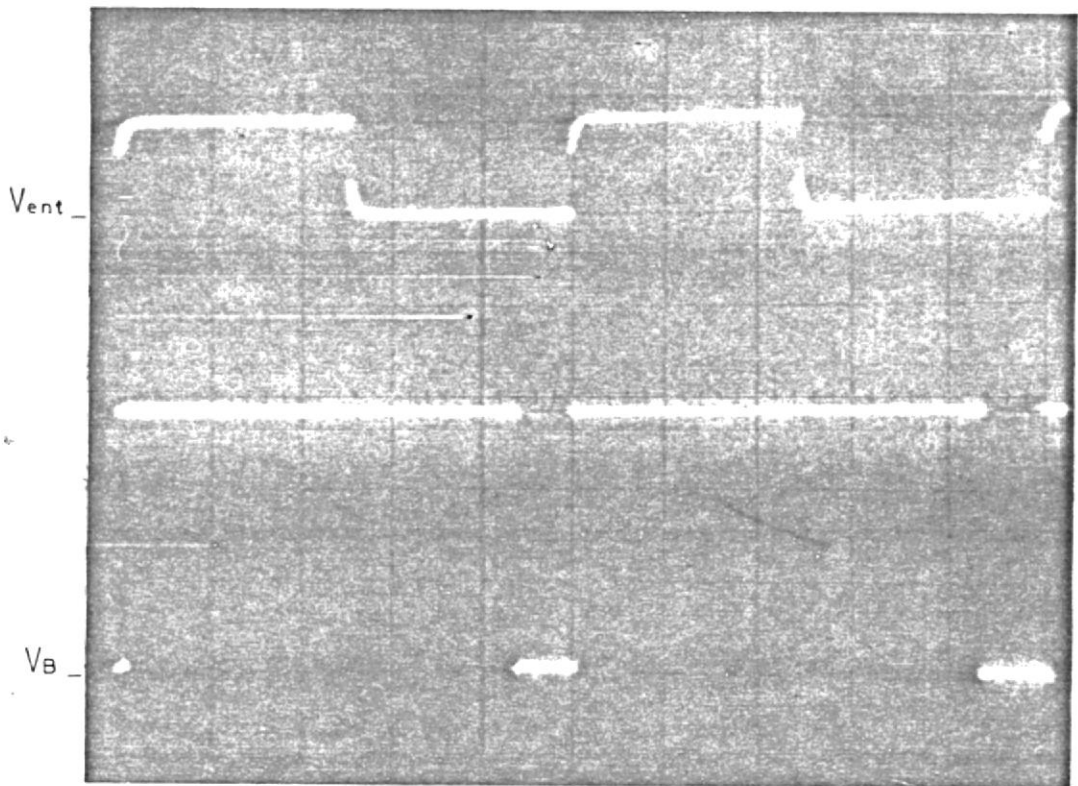


Fig. 8.1 Señal de velocidad a la entrada del equipo y señal de velocidad con ciclo de trabajo modificado.

Escala Vertical: 5 V/div.

Escala Horizontal: 2 ms/div.

cidad. V_{entr} es la señal de 100 pps proveniente del tacómetro, correspondiente en este caso a la máxima velocidad de la banda; entonces de acuerdo a la ecuación (7.1) para esta velocidad, el ancho del pulso que se genera en el temporizador monoestable del Circuito Modificador del Ciclo de Trabajo se ha fijado en 8.8 ms.

Con 0.75 V DC aplicados en el terminal no inversor del Amplificador Operacional CI-4 del Circuito de Medición, se ob-

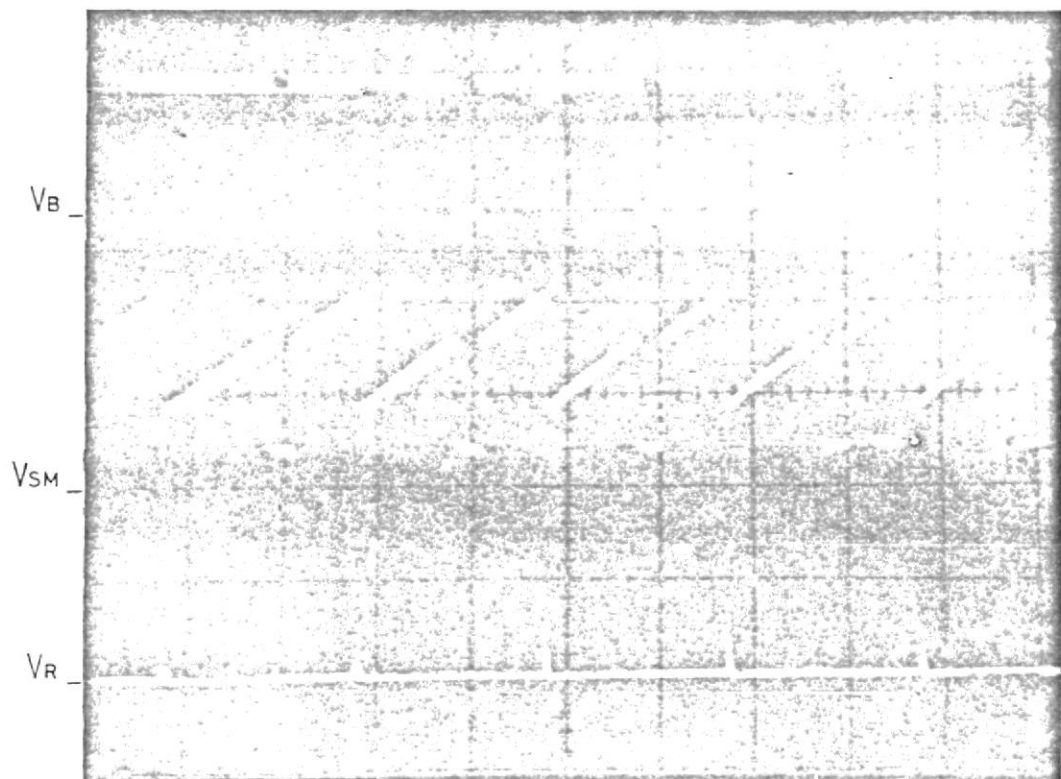


Fig. 8.2 Señal de velocidad con ciclo de trabajo modificado y señales en el Circuito de Medición.

Escala Vertical: 10 V/div. en V_B ; 5 V/div. en V_{SM} y V_R

Escala Horizontal: 5 ms/div.

tienen las señales que se muestran en la Fig. 8.2, siendo:

V_B : salida del Modificador de Velocidad.

V_{SM} : salida del generador de onda Diente de Sierra.

V_R : pulsos resultantes en el Circuito de Medición.

En esta figura puede apreciarse el efecto que causa el interruptor electrónico (activado por la señal V_B) en la generación de la Onda Diente de Sierra; esto es, cada vez que

este interruptor se cierra (cuando V_B es baja) impide la formación de dicha onda, resultando la señal de pulsos V_R en el UJT. A su vez la señal V_R es proporcional al producto de 0.75 V por la señal de 100 pps; es decir, V_R es la resultante de la multiplicación analógica de las señales de peso y velocidad. Es necesario anotar que, durante esta prueba experimental y en las siguientes que se realizan en este capítulo, el potenciómetro R25 del Circuito de Medición, se encuentra fijo en aquella posición que se alcanza al girarlo totalmente en dirección contraria a las manecillas del reloj ($R25 = 4.7 k\Omega$), así también el puente selector CC del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados, se encuentra colocado en el terminal de salida E.

En la Fig. 8.3 se presentan las siguientes señales del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados:

V_R : pulsos resultantes en el Circuito de Medición.

CLK: salida del temporizador 555.

Z1: salida del contador de décadas.

Z2: entrada del contador binario de siete etapas.

A, B, C: salidas (primeras) del contador binario de 7 etapas.

En esta figura pueden observarse las modificaciones a las que se somete la señal de pulsos V_R , con la finalidad de obtener los pulsos que son procesados en los contadores BCD para luego finalmente, mediante indicadores numéricos de siete segmentos, se logre mostrar en cuatro dígitos la can-

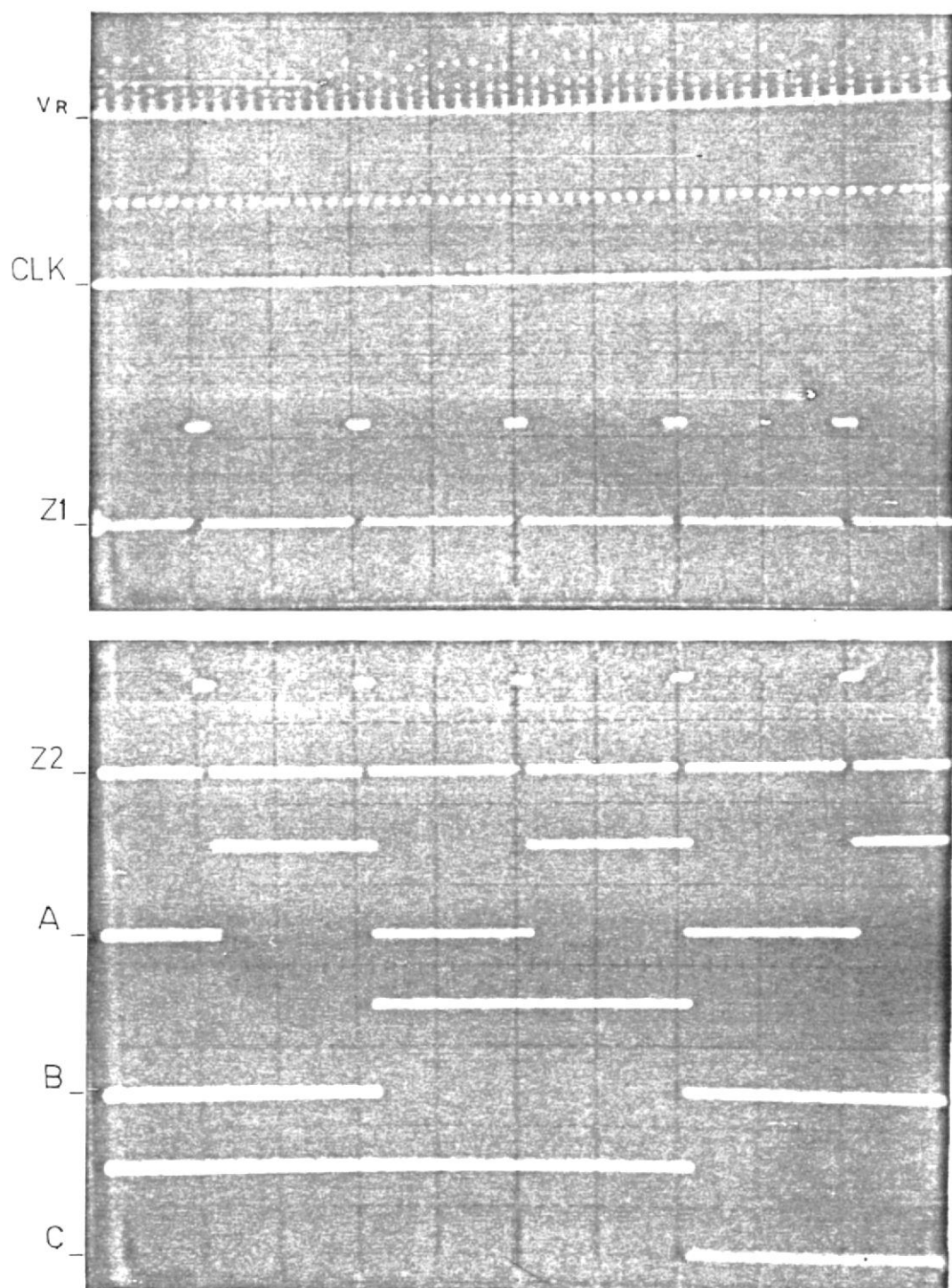


Fig. 8.3 Señales en el Circuito de Lectura y Presentación de Resultados.

Escala Vertical: 5 V/div.

Escala Horizontal: 50 ms/div.

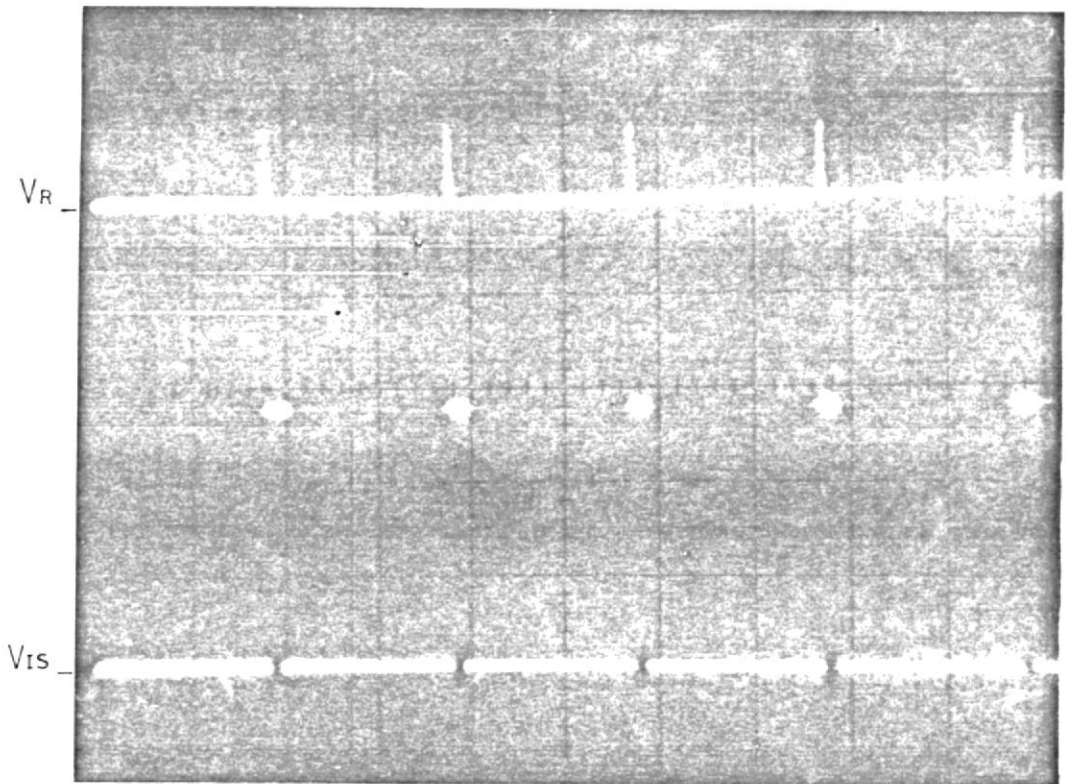


Fig. 8.4 Señales en la Interfase Analógica de Salida.

Escala Vertical: 5 V/div.

Escala Horizontal: 5 ms/div.



BIBLIOTECA

tividad total de material que se transporta en la banda.

La Fig. 8.4 muestra la señal de pulsos V_R resultante en el Circuito de Medición y la señal V_{IS} que es la salida del temporizador 555 en la Interfase Analógica de Salida. El voltaje DC de la señal V_{IS} , mediante el circuito apropiado, produce la corriente DC de salida de la interfase proporcional a los pulsos de entrada V_R .

8.2 Curva de Lectura Total vs Peso, manteniendo constante la

Velocidad

Esta curva de operación del equipo permite observar el comportamiento que tiene la salida (Lectura Total) frente a variaciones en el Peso, mientras la velocidad de la banda permanece constante.

Para trazar la curva se tomó varios datos de voltaje (proporcional al peso) a la entrada del Circuito de Medición (V_M) y sus correspondientes valores de Lectura Total (L_t) en el indicador visual, la frecuencia de la señal de pulsos permaneció constante en 100 pps y en esta ocasión se la consideró proporcional a la máxima velocidad de la banda por lo que el ancho del pulso (T_a) generado en el Modificador de Velocidad, se fijó en 8.8 ms.

Cada lectura se ha tomado al término de 5 minutos de funcionamiento del equipo, además en esta prueba experimental se mantienen las condiciones anotadas anteriormente, esto es: $R_{25} = 4.7 \text{ K}\Omega$ y puente selector CC colocado en el terminal de salida E.

Los datos y resultados experimentales se registran en la Tabla III y a partir de estos valores se obtiene el gráfico (en trazos continuos) que se presenta en la Fig. 8.5. En esta figura se ha trazado también una recta aproximada de la relación lineal L_t vs V_M (recta punteada) y sus respectivos valores (V_M y L_a) constan en la Tabla III.

VM [V]	Lt [udp]	La [udp]	Error %
0.10	1.3	1.38	5.80
0.20	2.7	2.77	2.53
0.40	5.5	5.53	0.54
0.60	8.3	8.30	0.00
0.80	11.1	11.06	0.36
1.00	13.8	13.83	0.22
1.20	16.4	16.60	1.20
1.40	19.1	19.36	1.34
1.60	21.8	22.13	1.49
1.80	24.2	24.89	2.77
2.00	26.6	27.66	3.83
2.20	28.8	30.43	5.36
2.30	29.7	31.81	6.63
2.36	29.3	32.64	10.23
2.40	29.7	33.19	10.52
2.46	29.0	34.02	14.76

LECTURA TOTAL AL VARIAR EL
VOLTAJE PROPORCIONAL AL PESO

TABLA III

Las unidades en que se expresa la lectura total son unidades de peso (udp), sean éstas, Toneladas (T), kg o lb y son elegidas de acuerdo a las conveniencias del usuario.

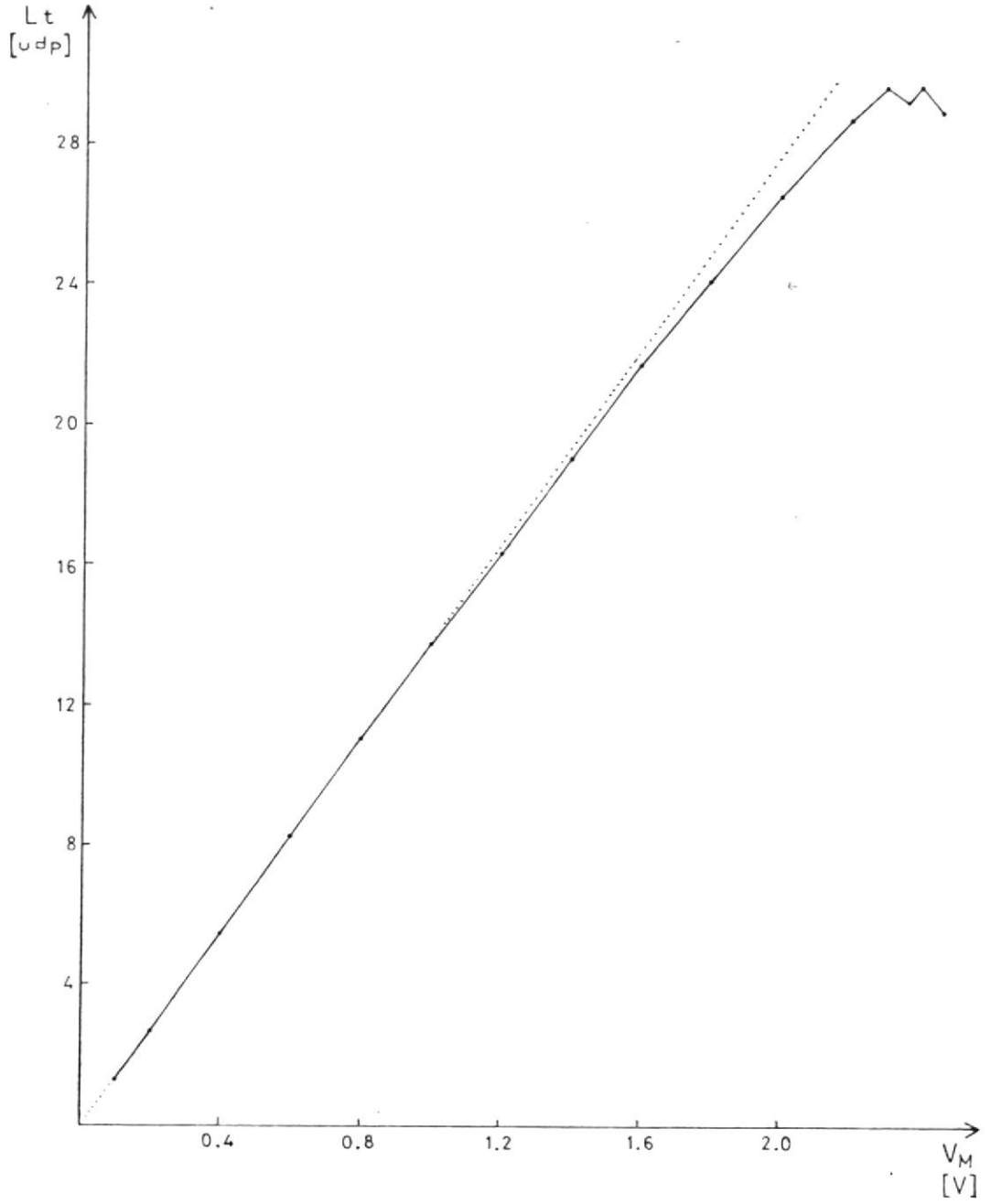


Fig. 8.5 Lectura Total vs Peso manteniendo constante la Velocidad

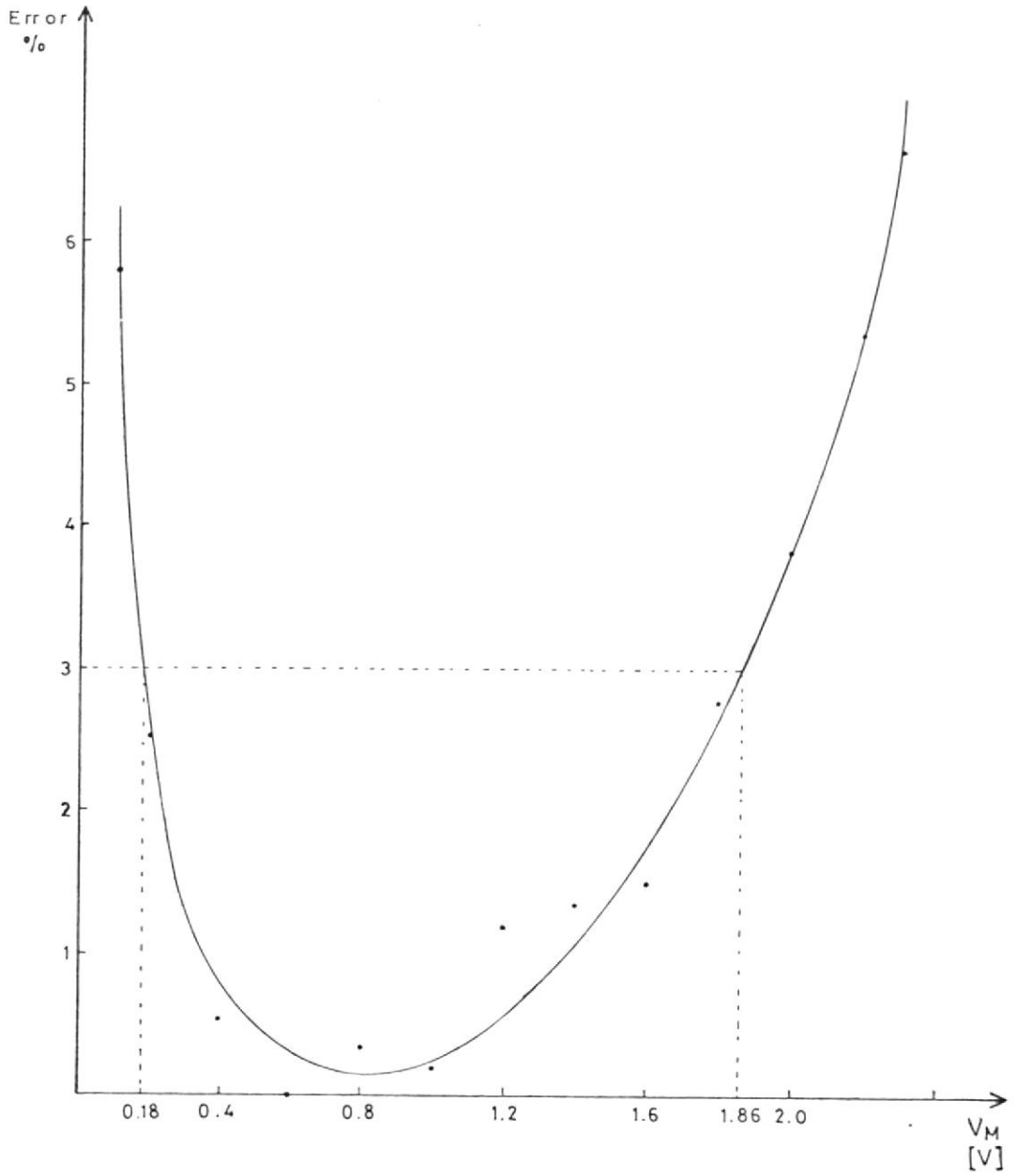


Fig. 8.6 Error de Lectura Total al variar el voltaje proporcional al Peso

La Tabla III contiene además el porcentaje de error que existe entre un valor de la recta y un valor experimental, estos resultados permiten obtener la curva de error de Lectura Total al variar el voltaje proporcional al peso, la misma que se muestra en la Fig. 8.6. Mediante esta figura es posible obtener el rango útil de la señal de voltaje V_M , para lo cual se ha considerado un error máximo del 3 % en la Lectura Total, resultando 0.18 V para el nivel mínimo y 1.86 V para el nivel máximo de dicho rango.

8.3 Curva de Lectura Total vs Velocidad, manteniendo constante el Peso

Esta curva de operación del equipo permite observar el comportamiento que tiene la respuesta (Lectura Total) frente a variaciones en la velocidad de la banda, mientras el peso del material permanece constante. Con esta finalidad y de manera similar al caso anterior, se ha trazado una curva con los resultados experimentales y se ha graficado una recta de aproximación de la relación lineal L_t vs f , para lo cual se han tomado varios datos de frecuencia (f) de la señal de pulsos a la entrada del equipo y sus correspondientes valores de Lectura Total en el indicador visual. La señal de pulsos fue tomada de un generador de onda cuadrada (Generador de Funciones Hewlett Packard).

Las condiciones de prueba bajo las cuales se ha trazado la

TABLA IV
LECTURA TOTAL AL VARIAR LA
FRECUENCIA PROPORCIONAL A LA VELOCIDAD

f [pps]	Lt [udp]	La [udp]	% Error
20	2.0	2.08	3.85
30	3.1	3.11	0.32
40	4.1	4.15	1.20
50	5.2	5.19	0.19
60	6.2	6.22	0.32
70	7.3	7.26	0.55
80	8.3	8.30	0.00
90	9.4	9.34	0.64
100	10.3	10.38	0.77
110	11.4	11.41	0.09
113	11.6	11.72	1.02
114	5.9	11.83	50.13
120	6.2	12.45	
125	6.5		

curva, son las siguientes:

- $R_{25}'' = 4.7 \text{ K } \Omega$
- Voltaje constante: $V_M = 0.75 \text{ V}$
- Puente selector CC colocado en la salida E
- Ancho del pulso que se genera en el Modificador de Velo-

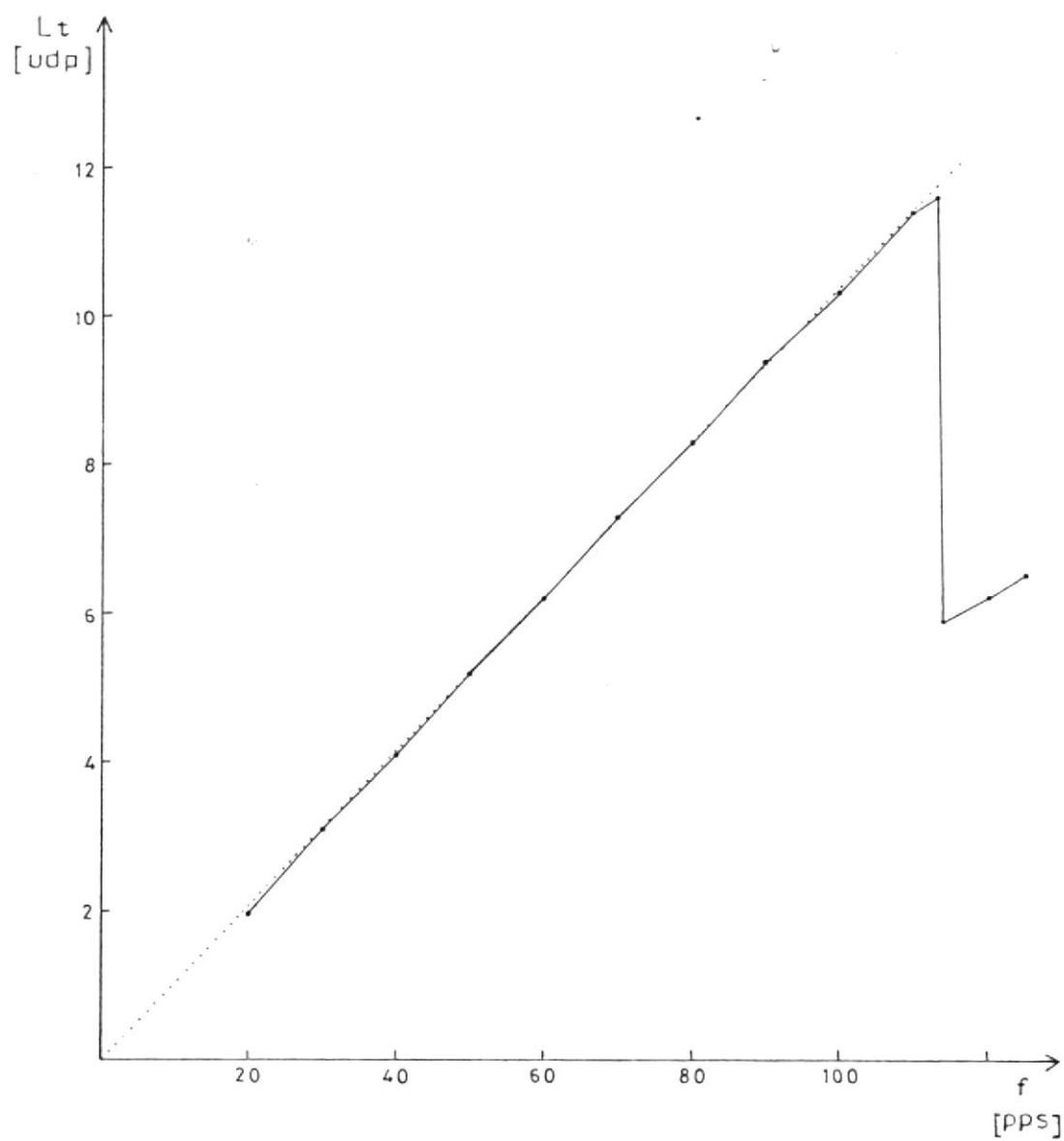


Fig. 8.7 Lectura Total vs Velocidad manteniendo constante el Peso

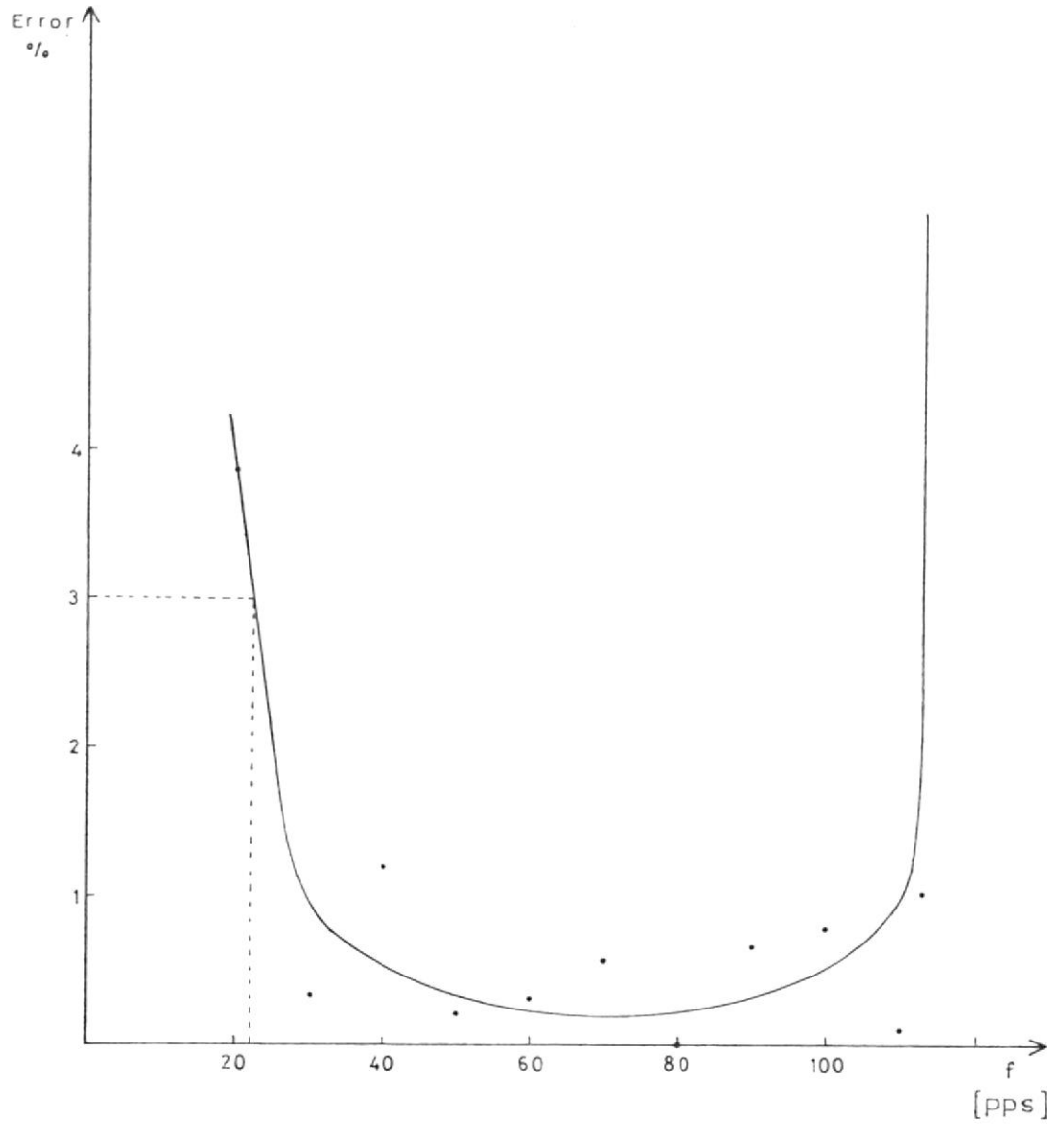


Fig. 8.6 Error de Lectura Total al variar la frecuencia proporcional a la velocidad

cidad: $T_a = 8.8$ ms

- Cada lectura corresponde a un intervalo de 5 minutos de funcionamiento del equipo

Los datos y resultados experimentales se registran en la Tabla IV, así como también los correspondientes valores de la recta de aproximación y los gráficos respectivos se muestran en la Fig. 8.7.

Con los porcentajes de error de la Tabla IV se obtiene la curva de error de Lectura Total al variar la frecuencia proporcional a la velocidad, esta curva se muestra en la Fig. 8.8. Considerando un 3 % para el error máximo en la Lectura Total, la frecuencia mínima aceptable en esta prueba experimental y de acuerdo a la Fig. 8.8, es de 22 pps, siendo la máxima frecuencia igual a 100 pps como se asumió inicialmente en esta prueba; en consecuencia la relación que existe entre el valor máximo y el valor mínimo de la frecuencia proporcional a la velocidad de la banda, es de 4.545.

8.4 Curva de Corriente de Salida vs Frecuencia de la Interfase Analógica de Salida

Con el objeto de comprobar que la corriente de salida de la Interfase Analógica es una función lineal de la frecuencia de la señal de entrada, se tomaron datos de frecuencia de la señal de pulsos a la entrada de la interfase (suminis-

trada por el generador de funciones Hewlett Packard) y sus correspondientes valores de corriente de salida.

Esta prueba experimental se realizó bajo las siguientes condiciones:

- En ausencia de la señal de pulsos de entrada, se obtuvo el nivel mínimo del rango de operación elegido, es decir 4 mA, para lo cual se ajustó el potenciómetro R78 ($V_2 = -0.71 V$) tal como se indica en calibración.
- El potenciómetro R75 se fijó en aquella posición que se alcanza al girarlo totalmente en dirección contraria a las manecillas del reloj.
- Retardo mínimo: $R74 = 0\Omega$
- Sin resistencia de carga: $R1 = 0\Omega$

Los datos de frecuencia (f_s) y los valores de corriente (I_o) obtenidos, se registran en la Tabla V y el gráfico correspondiente se muestra en la Fig. 8.9. En este gráfico puede apreciarse que los valores de corriente comprendidos dentro del rango de operación elegido (de 4 mA a 20 mA), se encuentran en la región lineal. De esta forma se comprueba que la Interfase Analógica de Salida, cumple con el requerimiento de linealidad en su operación.

TABLA V

RESULTADOS EXPERIMENTALES EN LA
INTERFASE ANALOGICA DE SALIDA

f_s [Hz]	I_o [mA]
0	4.0
20	6.5
40	8.9
60	11.3
80	13.9
100	16.3
120	18.8
140	21.2
160	23.8
180	26.2
200	28.7
220	31.0
240	33.5
260	35.6
285	39.0
286	0.0

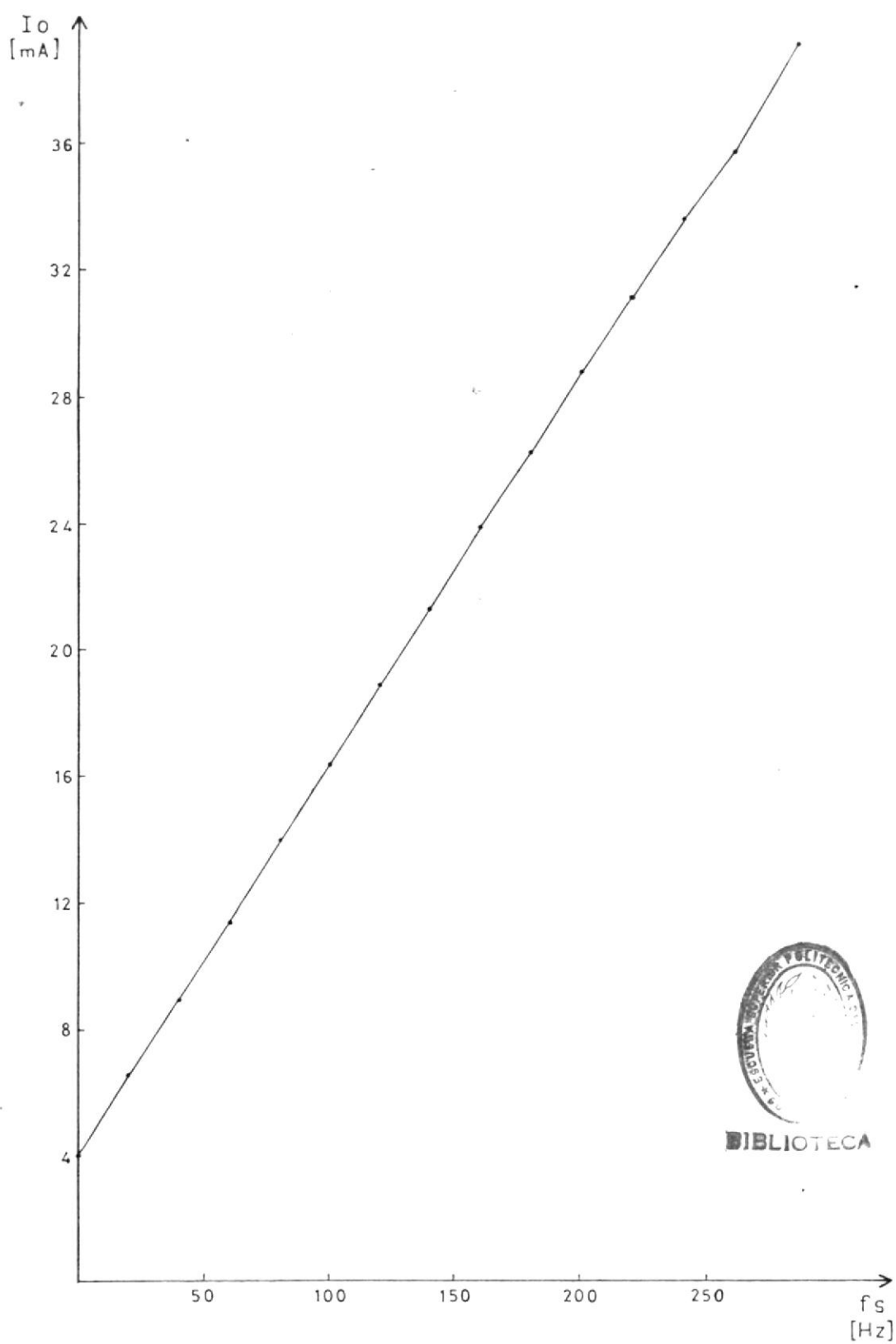


Fig. 8.9 Corriente de Salida vs Frecuencia en la Interfase Analógica de Salida

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. De las curvas experimentales correspondientes a la Lectura Total al variar el voltaje proporcional al Peso y para el circuito de compensación de tara utilizado, se determina que el rango útil de la señal de voltaje correspondiente al peso del material para que el equipo tenga una operación aceptable, es de 182 mV a 1.88V.
2. De las curvas experimentales correspondientes a la Lectura Total al variar la frecuencia de la señal de pulsos proporcional a la velocidad de la banda, se deduce que la relación entre la velocidad máxima y la mínima, para una aplicación determinada es de 4.545, valor que es aceptable por cuanto en un proceso industrial, como máximo este factor es de 1.22.
3. La máxima frecuencia de la señal de velocidad que puede procesar el equipo es de 242 pps y la mínima es de 15 pps.
4. La corriente de salida en la Interfase Analógica, es una función lineal de la frecuencia de los pulsos de entrada a esta etapa.

5. El empleo de cuatro baterías de 1.5 V en serie (6 V) en la polarización de los circuitos digitales, garantizan la permanencia de la lectura de la cantidad total, ante alguna interrupción en el suministro de energía del equipo.
6. Mediante la lectura en el indicador visual, se puede probar el funcionamiento de la Interfase Analógica de Salida, del Circuito de Lectura y Presentación de Resultados, del Circuito de Medición y del Modificador de Velocidad. Para comprobar la operación de los dos primeros anotados, se coloca el interruptor ENF en la posición PF; para probar el funcionamiento del Circuito de Medición, se desacopla el Modificador de Velocidad desconectando el interruptor electrónico y se coloca el interruptor ENV en la posición PV; luego de probar el funcionamiento normal de estas etapas, se verifica la operación del Modificador de Velocidad, reconectándolo al Circuito de Medición y aplicando al equipo señales de Peso y Velocidad determinadas.
7. La exactitud de los resultados depende de la precisión de los elementos y de la correcta calibración.

Recomendaciones:

1. Para que el funcionamiento del equipo sea óptimo, es conveniente usar elementos de precisión y para tener mayor exactitud en la calibración, es necesario que los potenciómetros empleados para el efecto, tengan más de una vuelta.

2. Para mayor duración de las baterías que energizan los circuitos digitales, usar pantalla de cristal líquido para presentar los resultados.
3. Para aumentar el número de dígitos en la lectura total, acoplar en cascada contadores BCD con sus respectivos decodificadores e indicadores visuales en el Circuito de Lectura y Presentación de Resultados.
4. Utilizar el equipo en un sistema de control de velocidad del motor que mueve la banda y/o en un sistema de control del suministro del material que se deposita en la banda.

A P E N D I C E S

APENDICE A

DATOS TECNICOS

A continuación se detalla la lista de elementos.

INTEGRADOS:

CI-1, CI-3	Temporizador.....	NE555P
CI-6, CI-22	Temporizador.....	NE555P
CI-2	Opto-Aislador.....	ILD-74
CI-4, CI-5	Amplificador Operacional.....	UA741CP
CI-23, CI-24	Amplificador Operacional.....	UA741CP
CI-7	Contador/Divisor de décadas.....	CD4017AE
CI-8	Cuatro puertas NOR de dos entradas..	CD4001AE
CI-9	Contador binario de siete etapas ..	CD4024AE
CI-10, CI-11	Contador BCD ascendente/descendente	CD4510BE
CI-12, CI-13	Contador BCD ascendente/descendente	CD4510BE
CI-14, CI-15	Decodificador BCD a siete segmentos	CD4511BE
CI-16, CI-17	Decodificador BCD a siete segmentos	CD4511BE
CI-18, CI-19	Indicador numérico de siete segmentos	5082-7740
CI-20, CI-21	Indicador numérico de siete segmentos	5082-7740

R25	.....	Potenciometro.....	4.7 K	1/2 W
R24, R33, R39	.....	.....	1 K	1/2 W
R23	.....	.....	33 K	1/2 W
R22	.....	.....	56 K	1/2 W
R21	.....	.....	5.6 K	1/2 W
R20, R89	.....	.....	100 K	1/2 W
R19	.....	Potenciometro.....	1 K	1 W
R9 a R18	.....	.....	820	1/2 W
R8, R38	.....	.....	68 K	1/2 W
R7	.....	.....	560	1 W
R6	.....	Potenciometro.....	20 K	1/2 W
R5	.....	.....	3.3 K	1/2 W
R4, R36, R71	.....	.....	10 K	1/2 W
R3, R80	.....	.....	15 K	1/2 W
R2	.....	.....	47 K	1/2 W
R1	.....	.....	1.2 K	1/2 W

RESISTORES:

D1 a D10 1N914

DIODOS:

Q8 UJT..... 2N2647
 Q7 2N2905A
 Q1 a Q6 2N2222A

TRANSISTORES:

R26, R87	.....	4.7 K	1/2 W
R27	.....	560	1/2 W
R28	.....	680 K	1/2 W
R29	.....	120	1/2 W
R30	.....	22	1/2 W
R31	Potenci6metro.....	10 K	1/2 W
R32	.....	12 K	1/2 W
R34, R35	.....	2.7 K	1/2 W
R37, R72, R77	.....	8.2 K	1/2 W
R40 a R68	.....	460	1/4 W
R69, R70	.....	2.7 K	1/2 W
R73	.....	2 K	1/2 W
R74, R86	Potenci6metros.....	100 K	1/2 W
R75	Potenci6metro.....	5 K	1/2 W
R76	.....	1.5 K	1/2 W
R78	Potenci6metro.....	550	1/2 W
R79, R84, R85	.....	1 K	1/2 W
R81, R82	.....	22 K	1/2 W
R83	.....	180	1/2 W
R88	.....	100	1/2 W

CAPACITORES:

C1, C19	.....	0.05 uF	100 V
C2, C4, C8, C9	.....	0.01 uF	100 V
C3, C6, C14, C17	.....	1 uF	50 V
C5, C10, C13, C18	.....	0.1 uF	100 V

C7	.....	0.02 μ F	100 V
C11, C12, C16	.....	0.01 μ F	100 V
C15	.....	220 μ F	25 V



APENDICE B

TACOMETROS DE FRECUENCIA

Tacómetros son dispositivos que miden la velocidad angular de un eje que gira y aquellos en los cuales esta velocidad es representada por la frecuencia de un voltaje generado, son conocidos como Tacómetros de Frecuencia. A continuación se describen los más usuales.

B.1 Tacómetro de Campo Rotativo

Es un generador AC que tiene un campo giratorio. El rotor posee imanes permanentes y cuando gira, induce un voltaje AC en las bobinas del estator. Dependiendo de la velocidad con que gira el eje, es la frecuencia del voltaje inducido.

La ecuación para la frecuencia del voltaje generado es (6):

$$f = \frac{P(RPM)}{120}$$

donde f es la frecuencia expresada en Hz, P el número de polos magnéticos en el rotor y RPM es la velocidad rotacional.

Puede observarse que la frecuencia obtenida es una medida exacta de la velocidad angular del eje.

8.2 Tacómetro de Rotor Dentado

Este tacómetro tiene varios dientes ferromagnéticos en el rotor. En el estator tiene dos imanes permanentes y sobre cada uno una bobina. En la Fig. A.1 se ilustra este tacómetro para un rotor de seis dientes.

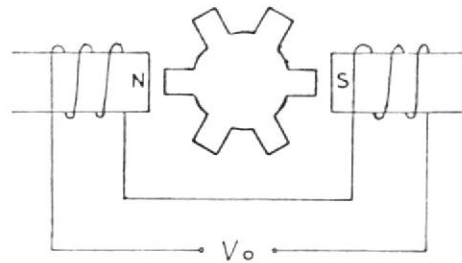


Fig. B.1 Configuración de un Tacómetro de Rotor Dentado.

Cuando los dientes están frente a los polos, la reluctancia es baja, por lo tanto el flujo magnético se incrementa; y cuando las ranuras están frente a los polos, la reluctancia es alta por lo tanto el flujo magnético se decrementa. Esta variación en el flujo magnético induce un voltaje en las bobinas, produciéndose de esta manera un pulso de voltaje por cada diente del rotor. La forma de la señal de voltaje de salida (V_o) se muestra en la Fig. B.2

La relación entre la frecuencia de la señal de pulsos y la velocidad angular, está determinada por:

$$\text{rev/seg.} = \frac{\text{Pulsos/seg.}}{\text{dientes}} = \frac{f}{\text{dientes}}$$

$$\text{RPM} = \frac{60 f}{\text{dientes}}$$

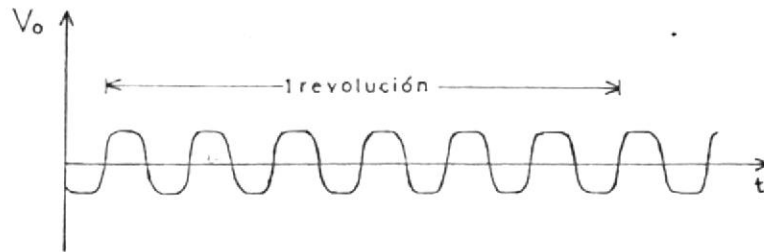


Fig. B.2 Señal de Voltaje de Salida V_o .

B.3 Tacómetro de Fotocélula

Un disco con muchos agujeros se acopla directamente al eje al cual se quiere medir su velocidad, el disco se coloca entre una fuente luminosa y una celda fotovoltaica, como se aprecia en la Fig. B.3. Únicamente cuando un haz de luz pasa un agujero, activa la fotocelda, obteniéndose como resultado un pulso de voltaje por cada agujero del disco. Mientras más agujeros tenga el disco, se obtendrá una mejor resolución al respecto.

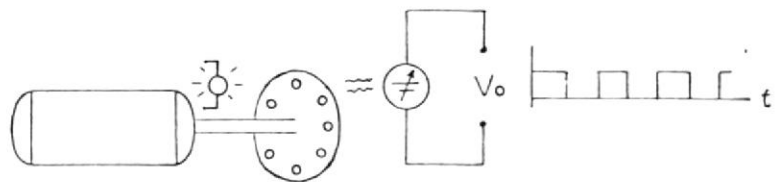


Fig. B.3 Tacómetro de Fotocelda acoplado al eje de un motor.

La relación entre la frecuencia de la señal de pulsos generada por la fotocelda y la velocidad angular, está determinada por:

$$\text{RPM} = \frac{60 f}{\text{agujeros}}$$

Una variación en este tipo de tacómetro, son aquellos que utilizan un fototransistor con su correspondiente circuito de polarización en lugar de la fotocelda, como se muestra en la Fig. 8.4.

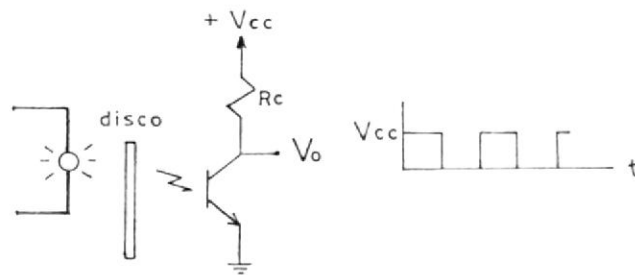


Fig. 8.4 Circuito Sensor de Velocidad.

El fototransistor opera en la región de saturación cuando el haz luminoso pasa un agujero del disco y opera en la región de corte cuando el haz de luz se interrumpe.

APENDICE C

TRANSDUCTORES DE PESO

Los Transductores de Peso son dispositivos que transforman la variable física Peso, en una señal eléctrica.

Entre los transductores eléctricos más usados en la medición de deformación (o desplazamiento) que sufre un material cuando una fuerza (peso) actúa sobre él, están:

- Transductor de Galga Extensométrica.
- Transductor LVDT.
- Transductor Piezoeléctrico.

C.1 Transductor de Galga Extensométrica

Es un transductor pasivo y su elemento sensible (extensómetro) es un hilo conductor cuya resistencia varía en función de pequeños cambios de longitud; el término pasivo significa que el transductor necesita de excitación eléctrica para cumplir su cometido. El elemento sensible se adhiere a una estructura de tal forma que el porcentaje de cambio en longitud del extensómetro y la estructura son idénticos; al conjunto solidario formado por la estructura y el extensómetro se denomina Galga Extensométrica. El valor de la

deformación se obtiene por medio de la medición del cambio de resistencia eléctrica del elemento y la aplicación de la siguiente expresión obtenida del análisis presentado en la referencia (4).

$$\Delta L/L = \frac{\Delta R/R}{FG}$$

esta ecuación indica que la deformación unitaria local $\Delta L/L$ puede expresarse en términos del factor de galga FG, la resistencia del extensómetro (R) y el cambio en la resistencia ΔR con la deformación.

El fabricante especifica los valores del factor de galga y de la resistencia, por lo tanto para determinar la deformación unitaria local es necesario solamente medir el valor de ΔR ; generalmente el valor de FG se mantiene constante en un amplio rango de deformaciones.

Para la mayoría de las Galgas Extensométricas comerciales, el Factor de Galga es el mismo para deformaciones por tensión o por compresión. En la práctica es deseable que el factor de galga tenga un valor alto, ya que con esto se produce un mayor cambio de resistencia (ΔR) para una deformación dada, lo que permite que el equipo necesario de registro sea de menor sensibilidad.

Existen tres tipos más comunes de Galgas Extensométricas:

- Galga Extensométrica de Filamento.
- Galga Extensométrica Laminar.

- Galga Extensométrica Semiconductora.



Fig. C.1

Galga Extensométrica de filamento

El elemento sensible es un hilo conductor metálico (aleación de Niquel con cobre o cromo) con una sección circular de 0.025 mm aproximadamente de diámetro y adherido sobre un soporte aislante de resina epóxica u otro material análogo. Para ofrecer la máxima longitud activa dentro de un área reducida, el hilo presenta varios repliegues siguiendo la disposición que se muestra en la Fig. C.1.

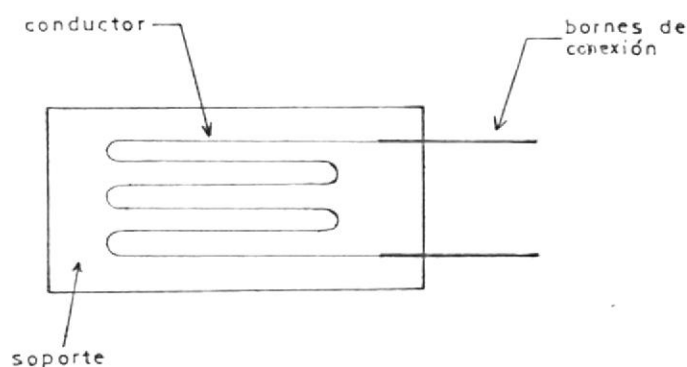


Fig. C.1 Constitución de una galga de filamento.

Galga Extensométrica Laminar

El elemento sensible es una película metálica de pocas micras de espesor. La longitud activa está bien determinada, pues los bucles y las pistas de conexión son prácticamente insensibles a causa de su anchura (Fig. C.2).

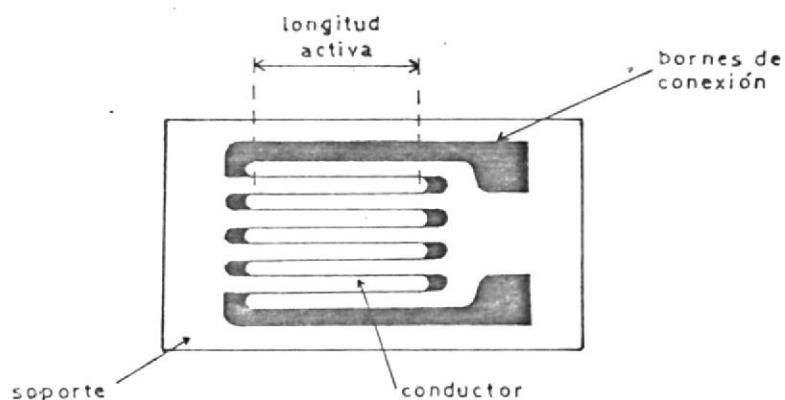


Fig. C.2 Constitución de una Galga Laminar.

Galga Extensométrica Semiconductora

El elemento sensible es una banda de cristal semiconductor con un cierto grado de contaminación. La resistividad del cristal depende de la concentración específica de portadores y de la orientación cristalográfica respecto al esfuerzo principal. El factor de galga (FG) en las galgas extensométricas metálicas básicamente depende de la modificación de la geometría de las mismas, en cambio en las galgas extensométricas semiconductoras se basa en la variación de resistividad del material, consiguiéndose grandes valores de FG; es decir, su sensibilidad a los cambios de longitud es 50 ó 60 veces mayor que en las galgas extensométricas metálicas, aunque también acusa más las variaciones de temperatura (Fig. C.3).

La Tabla VI presenta un resumen de las características de los tres materiales más comunes de que están hechas las gal-

TABLA VI

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES QUE SE UTILIZAN EN LAS GALGAS EXTENSOMETRICAS

Material	FG aproximado	Resistencia aproximada Ω	Coefficiente de temperatura por resistencia $^{\circ}\text{F}^{-1} \times 10^6$	Observaciones
57 % Cu, 43 % Ni	2	100	6	FG es constante sobre un amplio rango de deformaciones unitarias, apropiado para usarlo a temperaturas menores a 500°F.
Aleaciones de platino	4	50	1200	Apropiado para usarlo a temperaturas mayores a 1000°F.
Semiconductor de silicio	50 a 200	200	50 000	Es frágil, no es adecuado para mediciones de grandes deformaciones unitarias.

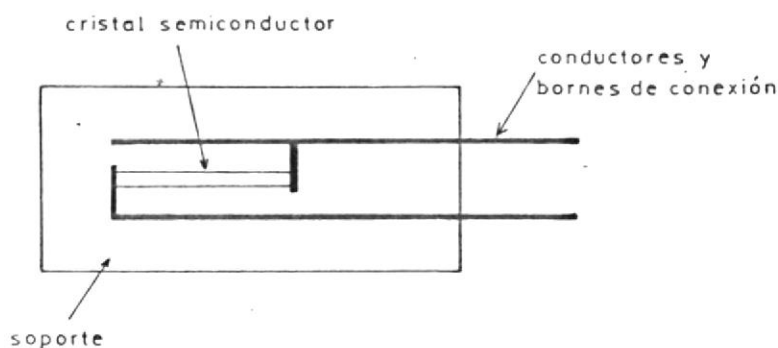


Fig. C.3 Constitución de una Galga Semiconductora.

gas extensométricas.

Las galgas extensométricas de filamento y las laminares se pueden fabricar en diferentes formas, pero lo importante en todas ellas es que el elemento resistivo debe pegarse firmemente a su base. Es esencial que la adherencia entre el elemento resistivo que lo mantiene unido a la estructura sea más fuerte que el propio alambre, de tal forma que la variación de resistencia sea debida estrictamente a la deformación del elemento. Información más detallada sobre el montaje de las galgas, acondicionamiento y amplificación de la señal, puede consultarse en las referencias (3) y (7).

C.2 Transdutor LVDT (Transformador Diferencial Lineal Variable)

Es un transdutor pasivo que convierte el desplazamiento a una señal de voltaje, la Fig. C.4 muestra el diagrama del principio de funcionamiento de un transformador diferencial. El LVDT es un transformador que consta de una bobina primaria, 2 bobinas secundarias idénticas y un núcleo

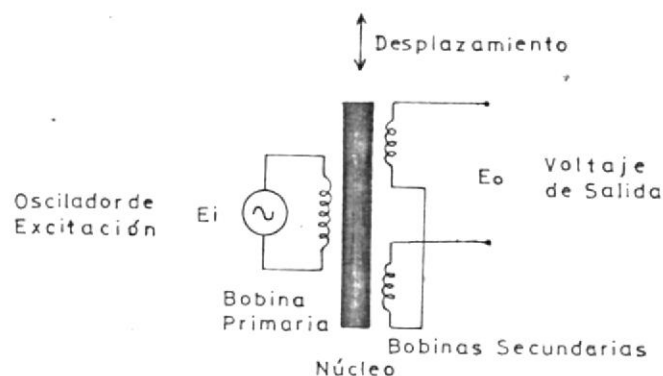


Fig. C.4 Diagrama esquemático de un Transformador Diferencial.

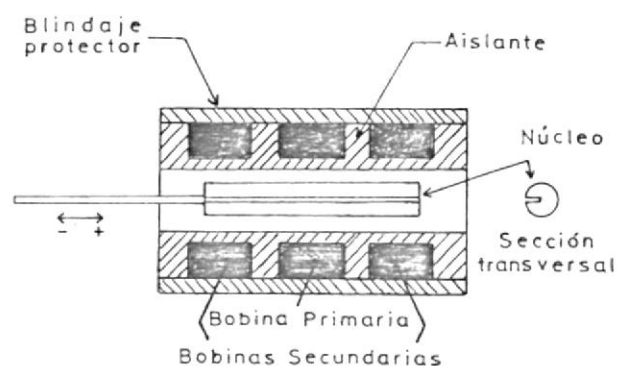


Fig. C.5 Constitución de un LVDT comercial.

magnético móvil, dispuestos como se indica en la Fig. C.5.

Las bobinas están montadas sobre una estructura aislante cilíndrica, guardando estricta simetría entre sí. Alojado en el interior, el núcleo ocupa la posición del eje y puede desplazarse de un extremo a otro sin fricción.

El voltaje de salida de las dos bobinas secundarias, depende del acoplamiento magnético entre el núcleo y las bobinas, el mismo que a su vez depende de la posición del núcleo.

Por lo tanto, el voltaje de salida del dispositivo es una indicación del desplazamiento del núcleo; siempre que el núcleo se desplace cerca de la posición central, la salida será aproximadamente lineal, como se observa en la Fig. C.6. Hay un desfaseamiento de 180° entre un lado y otro de la posición central; el rango lineal de los transformadores diferenciales comerciales se especifica claramente, y en raras ocasiones, los dispositivos se hacen operar fuera de este rango.

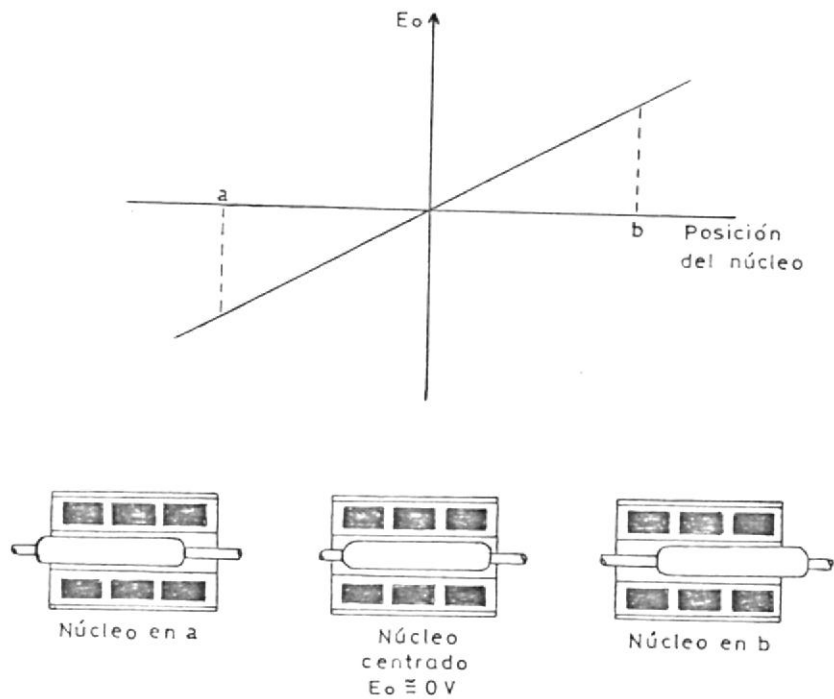


Fig. C.6 Voltaje de salida en función del desplazamiento del núcleo.

Entre las características más importantes de un LVDT, se encuentran:

- Rango total del nivel de entrada: ± 0.005 a ± 3 pulgadas.
- Sensibilidad de entrada: 0.5% del rango total de entrada.
- Características de error y ruido: las desviaciones de la linealidad son de aproximadamente el 0.5%, generalmente tiene una exactitud de $\pm 1\%$.
- La respuesta a la frecuencia tiene limitaciones mecánicas, esencialmente por la inercia del aparato, en general la frecuencia del voltaje aplicado debe ser 10 veces la frecuencia de la respuesta deseada.
- Efectos de la temperatura: las pequeñas influencias de ésta se pueden reducir utilizando un circuito con termistor.
- Rango de salida: de 0.4 a 4 (mV/0.001 pulg)/voltio de entrada, dependiendo de la frecuencia de excitación. Entre menor sea la frecuencia, se obtiene menor salida.

Los transformadores diferenciales lineales variables comerciales, se encuentran en una gran variedad de tamaños y se utilizan ampliamente para mediciones de desplazamiento en una variedad de aplicaciones.

El LVDT suministra una señal alterna cuyas variaciones de amplitud y fase representan la magnitud y el sentido de la fuerza a medir. La Fig. C.7 muestra una configuración del LVDT empleada para proporcionar voltajes DC positivo y negativo, mediante un demodulador pasivo a base de diodos.

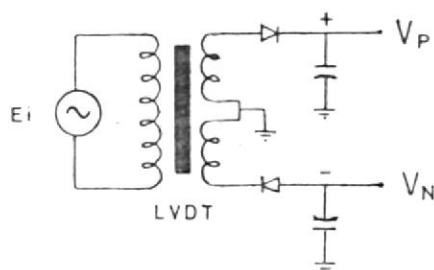


Fig. C.7 Acondicionamiento de señales del LVDT con demodulador pasivo.

C.3 Transductor Piezoeléctrico

Es un transductor activo, su principio de funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico, el mismo que se produce cuando las superficies de algunos cristales se cargan eléctricamente bajo la acción de sollicitaciones mecánicas (deformaciones). De los numerosos materiales piezoeléctricos, el cuarzo (SiO_2) es el que más conviene a la medida de fuerzas, dada su estabilidad.

El cristal piezoeléctrico se coloca entre dos placas que hacen las veces de electrodos, como se observa en la Fig. C.8. Cuando se aplica una fuerza a las placas se produce un esfuerzo y, por ende, una deformación. De acuerdo al análisis presentado en la referencia (4), la carga inducida sobre el cristal es proporcional a la fuerza aplicada y está dada por:

$$Q = dF$$

donde Q está en coulombs, F en newtons y d a la constante de

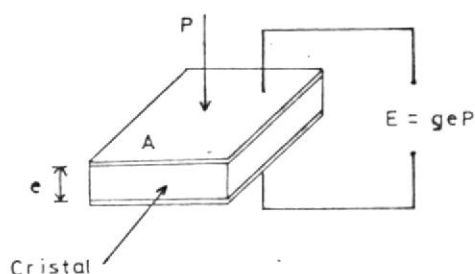


Fig. C.8 El efecto piezoeléctrico.

proporcionalidad d se le llama constante piezoeléctrica. El voltaje de salida del cristal está determinado por:

$$E = geP$$

donde e es el espesor del cristal, en metros; P es la presión aplicada en newton/m² y g es la sensibilidad de voltaje y está dada por:

$$g = \frac{d}{\epsilon}$$

donde ϵ es la permitividad del material entre las placas.

El voltaje de salida depende de la dirección en la cual se realiza el corte del cristal con respecto a los ejes del mismo. Otros transductores más complejos utilizan también cristales sensibles a fuerzas de cizalladura, pero en este caso el voltaje de salida es una función complicada de la orientación exacta del cristal.

Algunas de las características del transductor piezoeléctrico son:

- Rango de entrada: varía grandemente dependiendo del material del cristal.
- Sensibilidad de entrada: varía con el material,
Cuarzo: 0.05 V.m/newton
Sal de Rochelle: 0.15 V.m/newton
Titanato de bario: 0.007 V.m/newton.
- Características de error y ruido: sujetos a histéresis y a efectos de temperatura.
- Respuesta a la frecuencia: depende de los circuitos externos y del montaje mecánico. Se obtienen fácilmente de 20 Hz a 20 KHz, no responde a fuerzas estáticas.
- Efectos de la temperatura: las propiedades del cristal varían grandemente con la temperatura.
- Rango de salida: amplio, depende del tamaño y del material del cristal.

Los cristales piezoeléctricos se usan ampliamente como transductores de presión para mediciones dinámicas y se emplean comúnmente como fonocaptadores.

Los transductores piezoeléctricos precisan de un amplificador de carga que transforme las cargas electrostáticas en tensiones proporcionales. Eso se consigue mediante una fuerte contra-reacción capacitiva que compense la carga suministrada por el transductor. La Fig. C.9 muestra un circuito clásico de un amplificador de carga, la tensión de entrada E se hace casi nula mientras que el condensador de

realimentación C_r almacena la carga correspondiente; la tensión a la salida del circuito será Q/C_r y la gama de amplificación se obtiene modificando la realimentación. El amplificador para el efecto debe tener alta impedancia de entrada y alta ganancia de voltaje. .

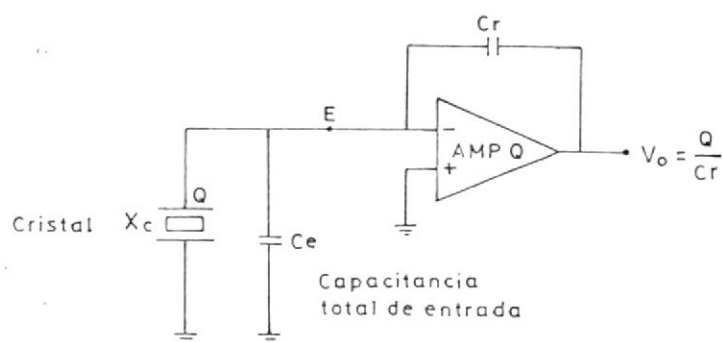


Fig. C.9 Circuito clásico de un amplificador de carga.

B I B L I O G R A F I A

1. BERLIN H., "The 555 Timer Applications Sourcebook, with Experiments", Howard W. Sams, Indianapolis, 1982.
2. BOYLESTAD R. - NASHELSKY L., "Electronic Devices and Circuit Theory", Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1982.
3. COUGHLIN R. - DRISCOLL F., "Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits", Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1982.
4. HOLMAN J., "Métodos Experimentales para Ingenieros", Mc Graw Hill, México, 1977.
5. JACOB J., "Applications and Design with Analog Integrated Circuits", Prentice Hall, Reston, 1982.
6. MALONEY T., "Industrial Solid-State Electronics", Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1982.
7. MOMPIN J., "Transductores y Medidores Electrónicos", Marcombo, Barcelona, 1983.
8. MOTOROLA, "CMOS Integrated Circuits", Motorola Inc, Austin, 1983.
9. SYLVANIA, "ECG Semiconductors Master Replacement Guide",

Philips ECG, Inc., Williamsport, 1985.

