Revista Colombiana de Física, Vol. 43, No. 1 de 2011.

El Voltímetro Digital Y La Comparación A Partir De Transistores

The Digital Voltmeter And A Comparison Based On Transistors

G. Ramos P.[a,b], E. J. Olaya G. [a,b], L. C. Jiménez B. [a], O. L. Castiblanco [* b]

[a] *Grupo de Películas Delgadas. Depto. de Física. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., Colombia.*
[b] *P.C.Lic. Física. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia.*

Recibido 12.04.10; Aceptado 25.02.11; Publicado en línea 24.04.11.

Resumen

Se desarrolló un sistema para describir y explicar cabalmente el principio físico del voltímetro digital a partir de los conceptos fundamentales de comparación, interruptor, balanceo y estado discreto. El sistema permite hacer una analogía estructural entre la medición con una balanza mecánica y la medición de la tensión eléctrica con este voltímetro básico. El voltímetro está basado en un circuito comparador conformado por dos transistores acoplados por emisor común (amplificador diferencial), que tiene como función comparar una tensión de prueba con una tensión de referencia. La tensión de referencia es la magnitud de la unidad de medida discreta. Se obtuvo un voltímetro elemental que permite al estudiante de física básica hacer inferencia analógica sobre otros procesos de medición de cantidades electromagnéticas como especular formalmente sobre nuevas estructuras de medición.

Palabras clave: Comparador; Estado discreto; Transistor; Corte y saturación; Amplificador diferencial; Balanceo.

Abstract

We developed a system to fully describe and explain the physical principle of the digital voltmeter from the fundamental concepts of comparison, switch, balancing and discrete state. The system allows a structural analogy between the measurement with a mechanical balance and the electrical voltage measurement with a basic voltmeter. The voltmeter is based on a comparator circuit composed of two common-emitter-coupled transistors (differential amplifier), which has the function of comparing a test voltage with a reference voltage. The reference voltage is the magnitude of the discrete unit of measure. The result was a basic voltmeter that allows the student of basic physics to make analogy inferences about other processes of measuring of electromagnetic quantities and to formally speculate on new measurement structures.

Keywords: Comparator; Discrete state; Transistor; Cut off and saturation; Differential amplifier; Balancing.

PACS: 06.30.Ka, 01.50.Pa.

© 2010 Revista Colombiana de Física. Todos los derechos reservados.

1. Introducción

Es indudable que el desarrollo de la conmutación electrónica es una de las áreas de mayor interés en Ingeniería y en Física, que va desde los dispositivos MOS hasta los basados en estados cuánticos, para el desarrollo de los procesadores y ordenadores lógicos con algebra de Boole. Esta soporta otras áreas importantes como la comunicación y almacenamiento de información. El fenómeno de los estados discretos en la naturaleza y su manipulación teórica y técnica es un objetivo prioritario. En el camino tanto de su comprensión como de su modelación teórica están los casos intermedios de la detección y medición de cantidades electromagnéticas a través de estados discretos. El paso de la medición análoga a la digital de cantidades electromagnéticas, lleva un cambio conceptual físico y

* ocastiblanco@yahoo.com

técnico significativo. En un primer acercamiento, el transistor es el dispositivo central de esta arquitectura y por otro lado un buen puente para el cambio conceptual hacia los principios de los futuros dispositivos. Un caso que se puede tomar como núcleo de estudio para la presentación de estos cambios teóricos, es la medición de tensión eléctrica a través de cambios de estados en transistores. De manera inmediata se describe y explica el principio del voltímetro digital esencial en todo laboratorio. Por fortuna el principio es a su vez un buen ejemplo de la "comparación de cantidades físicas", fundamento de la medición. Finalmente el sistema de comparación con transistores es a su vez una unidad base de los llamados amplicadores operacionales, el sistema más elemental que funciona en base a la "retroalimetación" o "feedback", una operación significativa en la fidelidad de la información en física e ingeniería. Se presentan los principios de funcionamiento del transistor en corte y saturación y el arreglo de transistores para el amplificador diferencial de alta impedancia y comparador de tensiones.

2. Modelo Teórico

2.1 Zonas de Trabajo del Transistor

El transistor es un dispositivo semiconductor que posee 3 terminales: colector (C), emisor (E) y base (B), tal como se muestra en la figura 1. Un primer modo de funcionamiento básico es en configuración como switch. En este modo de trabajo el transistor opera bajo tres regiones [1]: corte, activo y saturación, las cuales definen su comportamiento. Éste se puede describir por medio de un circuito que utiliza la configuración del transistor como tipo switch. La figura 1 muestra el circuito equivalente usado en donde V_B es el voltaje de alimentación de la base y V_A es la encargada de alimentar el circuito. En esta configuración se puede hacer una analogía funcional muy próxima con el funcionamiento de un relé.

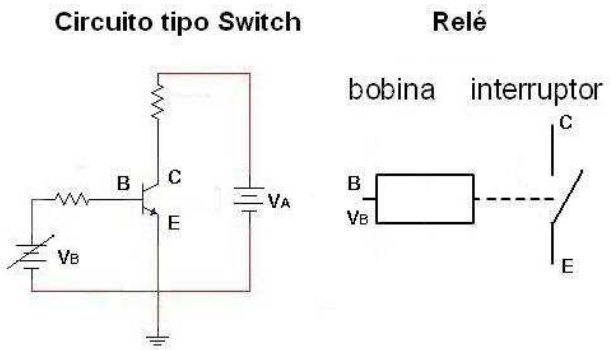

Fig. 1: A la izquierda: circuito transistor tipo switch implementado. A la derecha: relé como análogo del transistor como switch.

El relé esta basado en un electroimán que al polarizarse con V_B, por fuerza magnética cierra un interruptor. El voltaje de polarización del relevo es el análogo funcional al voltaje de base V_B. Cuando se cierra el relevo, la tensión entre los terminales C y E del relevo es cero (el voltaje $V_{CE} = 0$). Para el transistor cuando se polariza entre B y E con V_B, el voltaje V_{CE} del transistor es próximo a cero.

La señal de entrada es el voltaje V_B, la cual genera un flujo de corriente a través de la base del transistor y la señal de salida es el voltaje V_{CE} encontrada entre colector y emisor. La gráfica de la figura 2 muestra la variación de V_{CE} en función de V_B. Se puede ver el comportamiento del transistor en sus tres regiones. La inicial de corte con $0 \leq V_B \leq 0.7$ V, que se manifiesta por que $V_A = V_{CE}$, es decir, la corriente de V_A es cero y la malla de V_{CE} esta "abierta". La siguiente como región activa cuando $0.7 \text{ V} \leq V_B \leq 0.8$ V, y V_{CE} decae de manera progresiva a "0". La región de saturación con $0.8 \text{ V} \leq V_B$, y $V_{CE} \approx 0$, la malla de V_{CE} se "cierra". Este comportamiento es el mismo que con el relé en la figura 2.

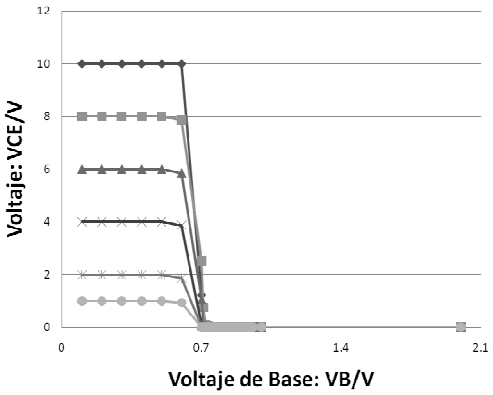

Fig. 2: Característica V_{CE} vs V_B, que define las regiones corte, activo y saturación.

2.2 Analogía de la Configuración del Transistor Tipo Switch con el Funcionamiento de un Relé.

Imagine que el transistor es un relé conformado por un núcleo cubierto por una bobina, un electroimán, ver figura 1. Al pasar cierto flujo de corriente por la bobina del relé éste se activa permitiendo que dos placas flexibles de metal entren en contacto.

Al revisar el funcionamiento del relé y compararlo con el transistor se encuentra que si por la bobina no hay flujo de corriente el electroimán no funciona por tanto no hay paso de corriente por los contactos (estado de corte del transistor); al aumentar ese flujo de corriente hasta lograr activar el electroimán las placas entran en contacto similar al estado de saturación en el transistor. El relé es también conocido como un interruptor eléctrico que permite la conmutación de varios circuitos. De igual forma en el caso

del voltímetro digital se aprovecha el uso de un transistor que al igual que un relé trabaja como un interruptor que funciona mediante un flujo de corriente en la base.

2.3 El Circuito Comparador. Amplificador Diferencial [2]

El amplificador diferencial consta de dos transistores T_1 y T_2 unidos por emisor común y dos entradas V_1 y V_2 respectivamente en las bases de cada transistor. La salida del circuito V_{o2} se encuentra entre el colector de T_2 y tierra, es la que se utiliza para construir la lógica del circuito, ver figura 3.

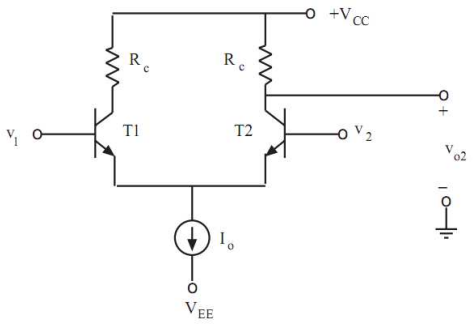

Fig. 3: Esquema de transistores acoplados por emisor común [2].

El comportamiento del circuito depende de las entradas V_1 y V_2, cuando V_1 se hace igual a V_2 las tensiones entre base y emisor son iguales y por lo tanto conducen la misma corriente $I_o/2$, cuando V_1 es mayor que V_2 el transistor T_1 conduce más corriente por tener mayor tensión entre base y emisor; en este caso la corriente en el emisor de T_2 es menor. Si se aumenta la diferencia entre las corrientes, el transistor T_1 absorbe toda la corriente y el transistor T_2 queda en estado de corte. En el caso en que V_1 sea menor que V_2 se presenta el comportamiento inverso.

3. Desarrollos

3.1 El Circuito Comparador

El circuito comparador, se realiza a partir de un acople entre dos transistores BJT 2N2222, en configuración tipo switch. La figura 3 muestra el circuito usado en el acople de los transistores donde $R_1 = R_2 = 39K\Omega$, $R_3 = R_4 = 100\Omega$, y $R_5 = 33K\Omega$, las fuentes V_+, V_- indican una diferencia de potencial de entrada de entrada positiva y negativa suministrada por una fuente dual. Las fuentes V_1 y V_2 son las encargadas de alimentar las bases de los transistores, de manera similar a como se tenía en la configuración tipo switch.

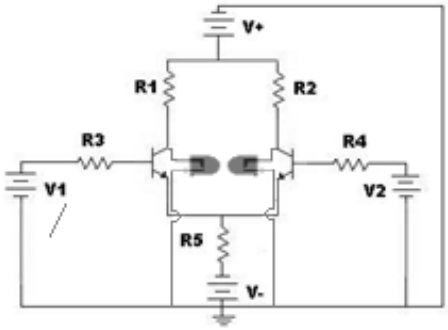

Fig. 4: Circuito comparador.

El comportamiento del circuito depende exclusivamente de las alimentaciones en la base de cada transistor. Al dejar V_1 fijo, el transistor de esta entrada permanece en corte hasta que el voltaje V_2 suministrado a la base del segundo transistor, que se encuentra saturado en ese momento, es aumentado a tal punto que las dos entradas se encuentran con la misma diferencia de potencial. En este momento los voltajes entre colector y emisor de los transistores son iguales. Cuando $V_2 > V_1$ el transistor con entrada fija pasa de su estado de corte a saturación e igualmente el transistor que se encontraba saturado pasa a su estado de corte, ver figura 4.

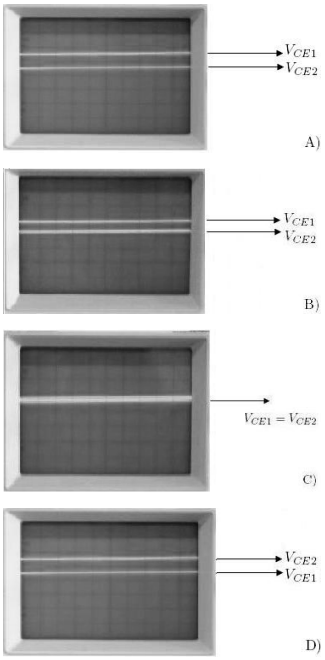

Fig. 5: Señal de salida comparador vista en el osciloscopio. A) Salida con un voltaje en las bases de los transistores; B) Salida con un voltaje en las bases de los transitores; C) Salida con un voltaje en las bases de los transistores y D) Salida con un voltaje en las bases de los transistores.

Los estados de corte y saturación de los transistores son una señal que indica cuándo el voltaje V_1 es igual, mayor o menor a V_2, es decir, si se tiene un voltaje de referencia, se puede saber si un voltaje de prueba es mayor menor o igual; ésto es una simple comparación.

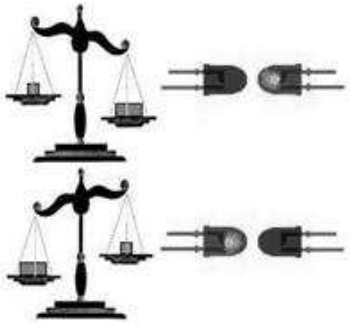

Fig. 6: Esquema de la analogía utilizada para el comparador. A la izquierda las balanzas con dos posibles configuraciones utilizando masas de diferente valor. A la derecha los diodos mostrando dos posibles configuraciones, un voltaje mayor o menor al otro. Otra posible configuración es una balanza en equilibrio y dos diodos iluminando a la misma intensidad.

Este principio de comparación es similar a la comparación de masas realizada por una balanza. La balanza se inclina hacia donde se encuentra la mayor masa y permanece en equilibrio cuando las masas son iguales, de manera tal que se puede saber si una masa de prueba es mayor, menor o igual a una masa de referencia conocida. En el caso del circuito comparador, la guía que indica la igualdad o diferencia es el estado de corte o saturación de uno de los dos transistores. El hecho de saber cuándo suceden estos dos eventos se puede interpretar como una medición.

3.2 Comparación de más de un Voltaje de Referencia

El comportamiento de un circuito comparador puede ser utilizado como base para definir cuándo se tiene un voltaje determinado en un circuito de prueba, funcionamiento básico de un voltímetro.

Al acoplar en paralelo varios circuitos comparadores se tiene la posibilidad de tener varios voltajes de referencia que permitan definir cuándo un voltaje de prueba se encuentra en uno de esos estados discretos de referencia. En la figura 7 se muestra el acople de dos circuitos comparadores, que permiten en principio saber cuándo un voltaje de prueba se encuentra entre los valores discretos 1 y 2 voltios. El comparador 1 tendra una referencia en el transistor de referencia ($T_{r\ izquierda}$) de 1V mientras que el comparador 2 ($T_{r\ derecha}$) tiene una referencia de 2V.

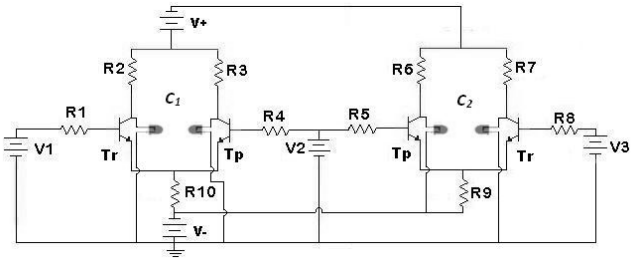

Fig. 7: Arreglo de comparadores acoplados en paralelo.

Cuando el voltaje V_1 de prueba supera el valor de referencia V_2 el diodo de T_{r1} se apaga y el diodo de T_{p1} se enciende. Cuando el voltaje de prueba supera el voltaje de referencia V_3 del comparador 2 el diodo de T_{r2} se apaga y el diodo de T_{p2} se enciende cambiando los estados de corte a saturación para los transistores de referencia y viceversa para los transistores de prueba.

De esta forma si se quiere saber cuándo un valor de prueba esta en un valor *n* discreto de referencia es necesario tener *n* comparadores que permitan comparar dicho voltaje de prueba.

Como los dos comparadores están acoplados en paralelo, un único valor de prueba está conectado a los dos comparadores. Conectarlos en paralelo permite el acople de *n* comparadores a los cuales llega la señal de prueba que se desea comparar, cada comparador se puede referenciar a un voltaje diferente.

3.3 Comparación como Principio de Medición

Se puede hablar de medición, por ejemplo, si se tiene como referencia un voltaje V_1 y en la otra entrada un voltaje de prueba, cuando el transistor de la entrada de referencia pasa de estado de corte a saturación, significa entonces que se ha medido un voltaje mayor a V_1. Sin embargo utilizar este circuito como instrumento de medida requiere de la utilización de varios voltajes de referencia. Para tal efecto se deben acoplar varios circuitos comparadores, cada uno con voltajes de referencia V_1, V_2, V_3,..., V_n para *n* comparadores. El circuito se puede utilizar entonces para saber cuándo un voltaje de prueba se encuentra en intervalos de voltaje de referencia, por ejemplo, V_1 - V_2, V_2 - V_3, etc. La exactitud del instrumento de medida depende del que tan pequeños sean esos intervalos.

Fundamentalmente cuando se habla de medición se hace referencia a una comparación entre dos parámetros determinados que se basan en una unidad de medida establecida. El voltaje de referencia representa esa unidad establecida como patrón; es así como un voltaje de referencia de 1V permite saber cuándo un voltaje de prueba es mayor, menor o igual a ese patrón establecido como 1

voltio. Esta capacidad del circuito es propia de un instrumento de medición, por lo tanto se puede decir que todo el circuito en conjunto es un voltímetro que además es digital por el hecho de realizarse una conversión de un parámetro análogo continuo a un parámetro discreto representado por el cambio de estado de los diodos.

4. Conclusiones

Es posible construir un dispositivo primitivo que permita ahondar paso a paso en los principios físicos base del voltímetro digital, permitiendo de una manera sencilla hacer enfasis en el concepto de medición a partir de la comparación de voltajes.

5. Agradecimientos

A la OFI de la Pontificia Universidad Javeriana y al P.C.Lic. Fisica de la Univerisdad Distrila F. J. de Caldas, por el apoyo logístico a este trabajo.

Referencias

[1] P. San Miguel. Electrónica General Circuitos Editorial Parainfo S.A. 2003 de electrónica. Editorial UPC. Barcelona, 1998.

[2] P. Viñas. Circuitos y Dispositivos Electrónicos fundamentos de electrónica. Editorial UPC. Barcelona, 1998.

[3] J. Abella., D. Martinez Fundamentos de Electrónica Física y microelectrónica. Editorial Addison Wesley, 1996.

[4] A. Ankrum. Electrónica de los semiconductores, Editorial Prentice Hall, 1974.