

## CIRCUITO DIGITAL QUE SIMPLIFICA LA MEDICION DE FLUJOS

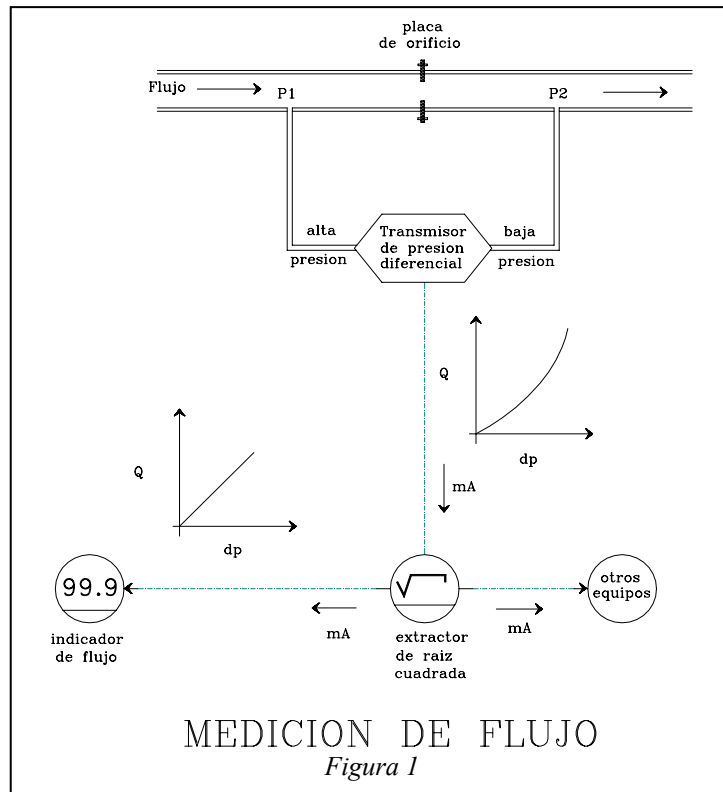
J. G. Mateos S., J. R. Rodríguez G, J. S. Fregoso P., L. Hernández M.  
Universidad de Guadalajara, C.U.C.E.I., Departamento de Electrónica  
[jmateos@proton.ucting.udg.mx](mailto:jmateos@proton.ucting.udg.mx), [rrodrigo@proton.ucting.udg.mx](mailto:rrodrigo@proton.ucting.udg.mx)  
[salomon@proton.ucting.udg.mx](mailto:salomon@proton.ucting.udg.mx), [lorenzo@proton.ucting.udg.mx](mailto:lorenzo@proton.ucting.udg.mx)

### RESUMEN:

En la automatización de procesos industriales es común encontrar la medición de variables con comportamiento no lineal. Para la visualización de una variable no lineal se utilizan escalas logarítmicas. En el caso del flujo, al realizar la medición con un instrumento transmisor de presión diferencial, acoplado a una placa de orificio, el transmisor responde en forma cuadrática a la diferencia de presiones, haciéndose presente el fenómeno descrito por el teorema de Bernoulli. En tiempo real la señal que se produce es de forma parabólica. Se recomienda el uso de un linealizador digital en los sistemas de medición y control de flujos. En este trabajo se presenta un **Circuito digital que simplifica la medición de flujos**, se configura el circuito en base a un microcontrolador de la familia ATMEL, se utiliza el AVR 90LS4433, el sistema digital proporciona una indicación de flujo lineal en código BCD, que se muestra en tres dígitos numéricos, como respuesta a una excitación no lineal de tipo parabólica.

### ABSTRACT:

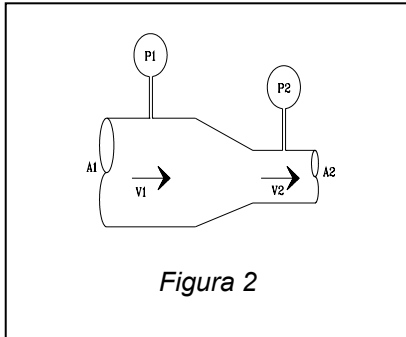
In the automation of industrial processes is common find the measurement of variables with behavior not lineal. For the visualization of a variable not lineal, logarithmic scales are used. In the case of the flow, upon carrying out the measurement with an instrument transmitter of pressure differential, coupled to a orifice plate, the transmitter responds in form logarithmic to the difference of pressures, reminding the phenomenon described by the Bernoulli theorem's. In real time the sign that takes place is of form parabolic. You are recommended the use of an instrument making lineal in the systems of measurement and control of flows. It in this work come a digital circuit that simplifies the measurement of flows, the circuit based on a



microcontroller of the ATMEL family it are configured, the AVR is used 90LS4433, the digital system provides an indication of lineal flow in BCD code, that sample in three numeric digits, like answer to

an excitement not lineal of type parabolic.

## 1. ECUACIÓN DE BERNOULLI PARA MEDICIÓN DE FLUJOS.



La formula que se cumple para la ecuación de la energía es:

$$Ek_1 + Ep_1 + Ef_1 + Ein_1 - \text{perdidas} = Ek_2 + Ep_2 + Ef_2 + Ein_2 \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde; Ek es la energía cinética, Ep es la energía de presión, Ef es la energía de flujo, Ein es la energía interna, a temperatura constante la energía interna es una constante, esto es;  $Ein_1 = Ein_2$ , sustituyendo las diferentes fórmulas de la energía en la ecuación de la energía se obtiene la aplicación de la ecuación de Bernoulli [1] con perdidas;

$$Q = A_2 \left[ (1 - \beta^4 + \zeta\beta^4) \right]^{-1/2} \sqrt{2g(P_2 - P_1)} \quad (\text{Ec. 2})$$

El caudal real Q es distinto por el expresado según la ecuación anterior, en virtud del rozamiento que no se ha tomado en cuenta y que puede valorarse por un coeficiente de velocidad  $C_v$ , que oscila entre  $0.95 \leq C_v \leq 1.1$ , [1] definiendo un coeficiente  $C_q$  que se encuentra experimentalmente se encuentra;

$$Q = A_2 C_q \sqrt{2g(P_2 - P_1)} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$Q = K \sqrt{dp} \quad (\text{Ec. 4})$$

Tanto  $C_q$  como  $C_v$  no se comportan como constantes, sino que dependen del numero de Reynolds

## 2. GENERACIÓN DE LA TABLA DE CALIBRACIÓN.

El circuito que se implementa como extractor no lo hace directamente con los valores de la señal de entrada, es decir, no es un extractor de raíz cuadrada aritmético, sino que cumple el siguiente algoritmo dado por la ecuación:

$$\text{Entrada} = (\%)^2 (\text{Span} - \text{Zero}) + \text{Zero} \quad (\text{Ec. 5})$$

En la ecuación anterior el porcentaje de entrada va desde 0% hasta el 100% y esta elevado al cuadrado, esto significa que se trata de una entrada exponencial. Se observa en la **Tabla de Calibración**, (véase la tabla 1 y la figura 6) la totalidad de los valores que se obtienen al aplicar la misma ecuación para todo el rango de entrada. La señal de salida, es la raíz cuadrada del porcentaje de entrada al cuadrado [ 2 ], multiplicada por el valor (Span-Zero), la ecuación es la siguiente:

$$\text{Salida} = \{ [(\%)(\text{Span-Zero})]^2 \}^{1/2} + \text{Zero} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{Salida} = (\%) (\text{Span-Zero}) + \text{Zero} \quad (\text{Ec. 7})$$



**SOMI XVIII Congreso de Instrumentación  
ELECTRONICA JMS1831**

Al proceder con todo el rango se obtiene la columna titulada como “salida” en la **Tabla de Calibración** (véase la Tabla 1).

**TABLA 1**

<b>%</b>	<b>Volts</b>	<b>Volts</b>	<b>mA</b>	<b>mA</b>
Display	(Entrada)	(Salida)	(Entrada)	(Salida)
00	0.25	0.25	04.00	4.00
10	0.26	0.35	04.16	5.60
20	0.29	0.45	04.64	7.20
30	0.34	0.55	05.44	8.80
40	0.41	0.65	06.56	10.4
50	0.50	0.75	08.00	12.0
60	0.61	0.85	09.76	13.6
70	0.74	0.95	11.84	15.2
80	0.89	1.05	14.24	16.8
90	1.06	1.15	16.96	18.4
100	1.25	1.25	20.00	20.0

*Tabla 1. Tabla de calibración del extractor de raíz cuadrada.*

### **3. LA FAMILIA ATMEL AVR 8-Bit RISC.**

Los Microcontroladores de la familia Atmel, contienen una arquitectura tipo RISC, el funcionamiento esencial es que sus instrucciones son de tan solo un ciclo máquina, su estructura elimina la necesidad de usar componentes extra externos, contiene; osciladores, cronómetros, UART, SPI, resistencias pull-up, modulación por anchura de pulso (PWM), convertidor ADC, comparador analógico y cronómetros, estas son solo algunas de las características que se encuentran en los dispositivos AVR. Al programar los microcontroladores AVR, se disminuye el tamaño del código ensamblador que se genera, la codificación es posible realizarla en Lenguaje C ó en assembly. Todo su sistema está depositado en una sola pastilla, dispone de una memoria tipo flash reprogramable EEPROM, el AVR es la opción perfecta para perfeccionar la optimización de costos.

#### **3.1 EI MICROCONTROLADOR AVR4433.**

Las características del Microcontrolador de 8 bits AVR4433 son las siguientes:

Alto rendimiento y bajo consumo, AVR ® de 8 bit's con arquitectura RISC, 118 instrucciones, el ciclo de ejecución es simple, 32 x 8 Registros de propósito general, genera 8 MIPS, (millones de instrucciones por segundo) con un cristal de 8 Mcps [3], memoria de datos y memoria de programa permanentes, 4 KBytes de memoria flash en un arreglo programable, resiste 100,000 ciclos de escribir/borrar, 128 Bytes de SRAM, 256 Bytes de EEPROM en arreglo programable, programación de cerrojo en la memoria flash, para la seguridad de datos en la EEPROM

#### **3.2 CARACTERÍSTICAS PERIFÉRICAS DEL AVR4433**

Un temporizador/contador de 8 bit's con preescala separada, temporizador/contador expandido de 16 bits con preescala separada, compara en modos de captura a 8, 9 y 10 bit's PWM, incluye un



## SOMI XVIII Congreso de Instrumentación ELECTRONICA JMS1831

comparador análogo interno [3], un temporizador “watch dog” programable con oscilador separado, receptor transmisor asíncrono universal ( UART ) programable full dúplex, ADC de 6 canales, con 10 bit’s de resolución e interface de programación serial ( SPI ) Maestro/Esclavo.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL MICROCONTROLADOR AVR4433.

Circuito de reset al energizar el AVR, modo en estado ocioso y modo de bajo consumo, consumo de energía a 4Mhz, 3V,25°C, activo: 3.4 mA, modo ocioso: 1.4 mA, modo bajo consumo: menor que un microamperes.

Terminales de Entrada/Salida	Voltaje de operación	Velocidades
20 Lineas programables	2.7V a 6.0V AT90LS4433	0 a 4 Mhz AT90LS4433
28 lead PDIP y 32 lead TQFP	4.0V a 6.0V AT90S4433	0 a 8 Mhz AT90S4433

Tabla 2

.db \$00,	\$0A,	\$0E,	\$12,	\$14,	\$17,	\$19,	\$1B,	\$1C,	\$1E;
.db \$20,	\$22,	\$23,	\$25,	\$26,	\$27,	\$28,	\$2A,	\$2B,	\$2C;
.db \$2D,	\$2E,	\$2F,	\$30,	\$31,	\$32,	\$33,	\$34,	\$35,	\$36;
.db \$37,	\$38,	\$38,	\$39,	\$3B,	\$3B,	\$3C,	\$3D,	\$3E,	\$3F;
.db \$40,	\$40,	\$41,	\$42,	\$43,	\$43,	\$44,	\$45,	\$45,	\$46;
.db \$47,	\$48,	\$49,	\$4A,	\$4A,	\$4B,	\$4C,	\$4C,	\$4D,	\$4E;
.db \$4E,	\$4F,	\$4F,	\$50,	\$51,	\$51,	\$52,	\$53,	\$53,	\$54;
.db \$54,	\$55,	\$56,	\$56,	\$57,	\$57,	\$58,	\$58,	\$59,	\$59;
.db \$5A,	\$5B,	\$5B,	\$5C,	\$5C,	\$5D,	\$5D,	\$5E,	\$5E,	\$5F;
.db \$5F,	\$60,	\$60,	\$61,	\$61,	\$62,	\$62,	\$63,	\$63,	\$63;

Tabla 2. Valores hexadecimales que facilitan la linealización.

### 4. EL ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN.

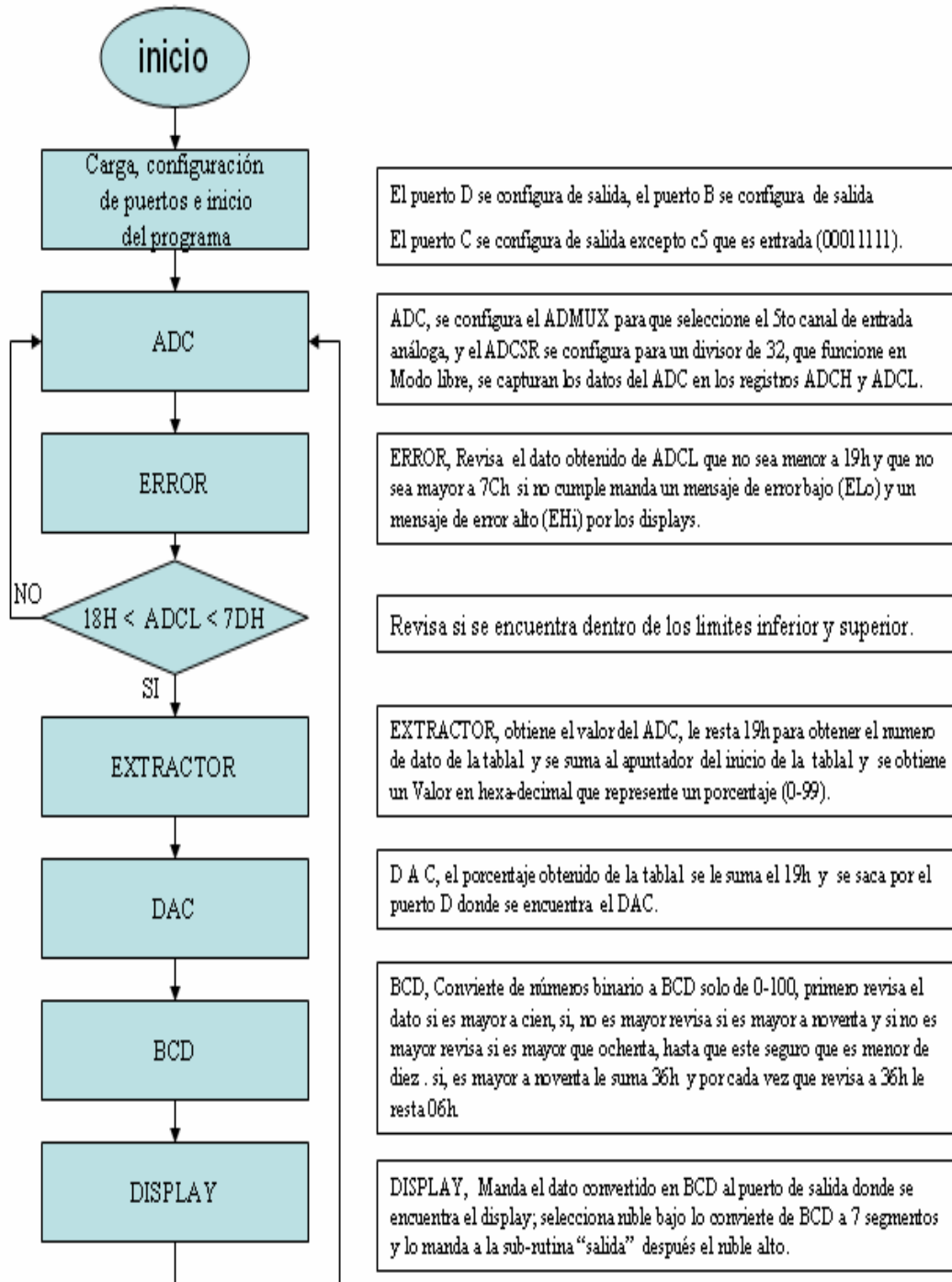
**Objetivo;** Realizar un sistema extractor de raíz cuadrada utilizando un microcontrolador que cumpla con los estándares de instrumentación y comparar su eficiencia con respecto a un sistema analógico tradicional.

**Secuencia:** Primeramente se introduce el dato proveniente del flujo a medir a través del transmisor de presión diferencial (véase Fig. 1), la señal se dirige al ADC interno del AVR4433, enseguida se procede a observar si la señal esta dentro del rango de instrumentación llamando a la subrutina "rango", avisa si está por arriba o por abajo del rango a medir, el paso siguiente es extraer la raíz cuadrada de la tabla de valores grabada en la memoria (véase Tabla 2), se utilizan cien valores que corresponden a la raíz de 0 a 99, equivalentes al lazo de corriente de 4 a 20 mA, que se codifican en hexadecimal. Los valores de la raíz cuadrada están grabados como sigue; las unidades están sobre la horizontal y las decenas sobre la vertical, y la tabla de valores del extractor se graba desde la dirección mínima de la tabla 2, esta es la dirección que le corresponde al menor valor de raíz, hasta la dirección mínima más 99, que le corresponde al valor mayor, es decir, la dirección mínima contiene el dato 19h y la dirección mínima más uno, el dato 23, y así consecutivamente, se muestra en la figura 3 el diagrama de flujo en bloques para el algoritmo extractor de raíz cuadrada.

#### 4.1 EL PROCEDIMIENTO QUE SIGUE EL ALGORITMO ES EL SIGUIENTE:

Para obtener el valor de la raíz de cada dato en particular simplemente se forma un apuntador de dirección de memoria con el mismo, y el contenido de dicha dirección se carga en el registro de salida y ese será el valor linealizado que se desea encontrar. Se saca el dato hacia el DAC08 externo dirigiéndose la señal hacia otros instrumentos (véase Fig. 5), la medición resultante se

muestra en %, a continuación se visualiza el dato en la pantalla de salida dispuesta en tres dígitos numéricos, para ello es necesario convertir el dato a código BCD, ésta etapa se logra llamando a la subrutina "BCD". Se decodifica el dato BCD a siete segmentos llamando a otra subrutina denominada "salida".



*Fig. 3 Diagrama a Bloques del algoritmo extractor de raíz cuadrada.*

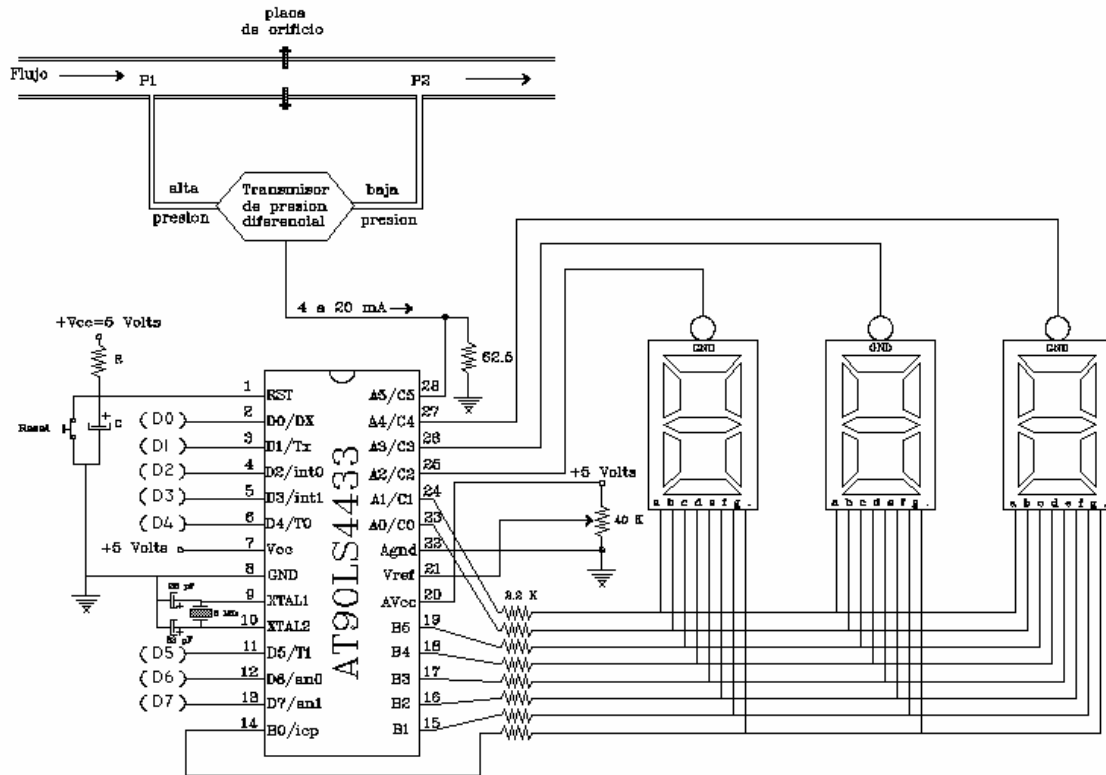


Figura 4 Extractor digital de raíz cuadrada con microcontrolador.

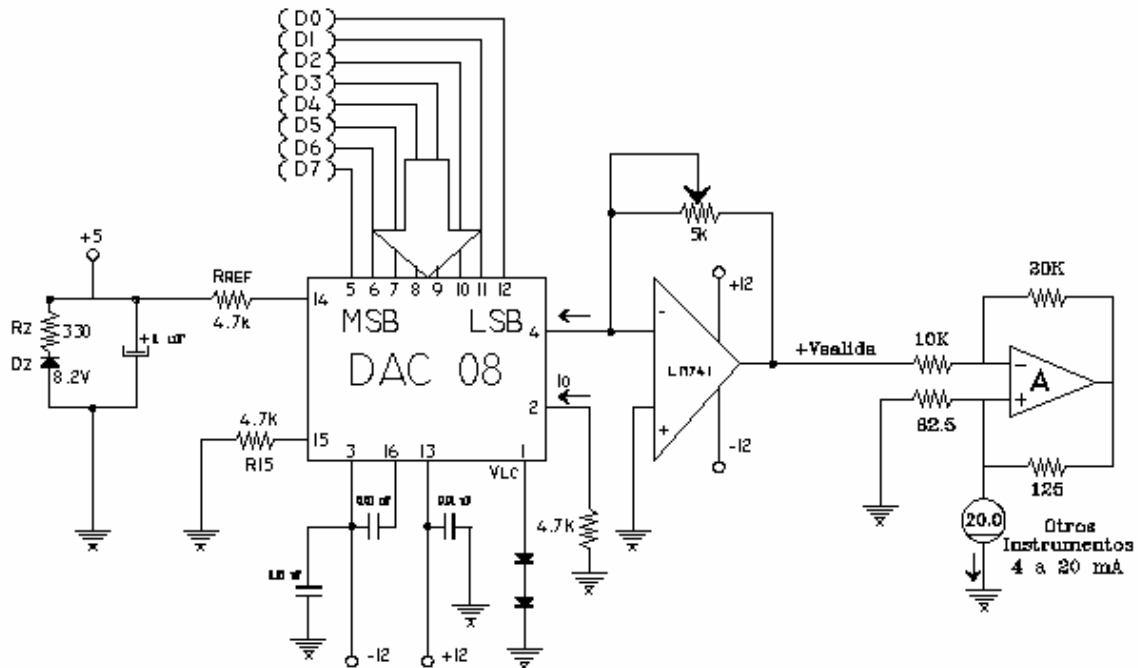


Figura 5 El convertidor digital-corriente de 8 bits a 4 20 mA.

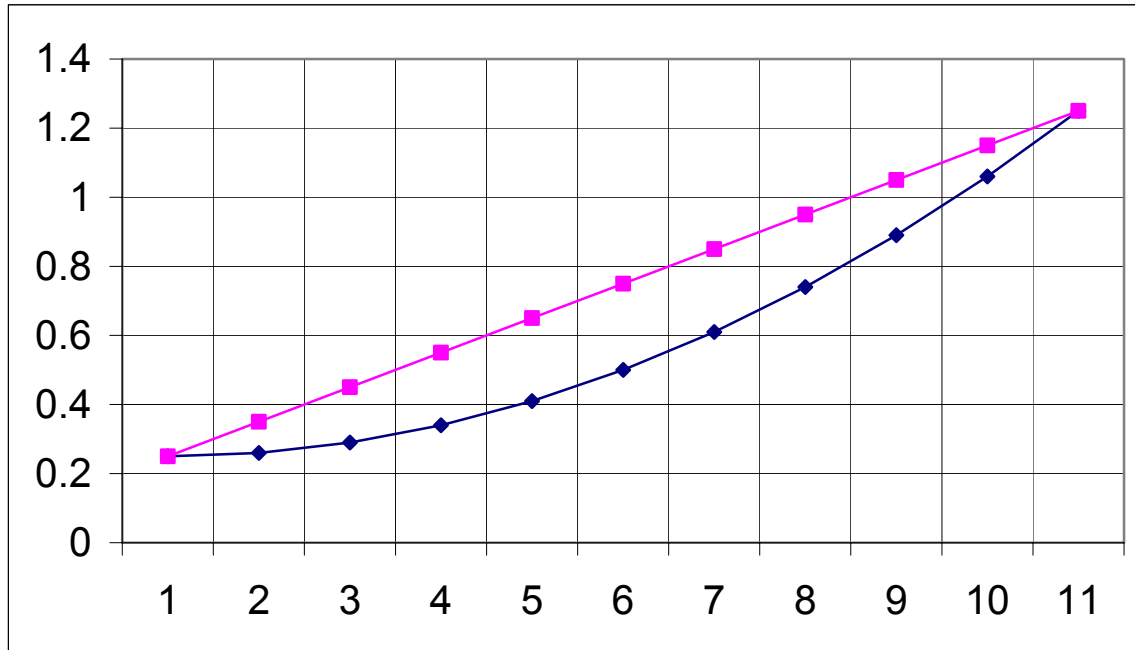


Figura 6. Graficación de los datos generados por la Tabla 1.

La curva inferior de la Figura 6, tiene comportamiento parabólico, es la señal de entrada al circuito de la figura 4, y la recta que se observa en la parte superior de la grafica es la señal de salida que se genera en el nodo de salida del circuito de la figura 5.

##### 5. ALTERNATIVA DE DISEÑO:

Una alternativa de diseño, y que logra mejores resultados es el generar un algoritmo matemático que realice la función de extraer al raíz cuadrada con punto flotante, así se obtienen más dígitos en el resultado final, con menos líneas de código en lenguaje ensamblador, se necesitan aproximadamente 30 instrucciones en lenguaje assembly, para hacer que en el desarrollo actual de este documento aumente un dígito más se hace necesario aumentar la tabla a mil localidades, y si se desea otro dígito más se deben aumentar a diez mil localidades, y así en forma progresiva exponencial, obviamente no es práctico proceder de esa forma, pero si es menos complicado aunque laborioso, si se tiene suficiente memoria de almacenamiento para los datos es posible proceder de la forma más fácil, la memoria actualmente ya no es una restricción importante, sin embargo con un algoritmo en punto flotante, la solución es elegante, óptima y deseable.

##### 6. NIVEL DE INCERTIDUMBRE DE LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES.

Las mediciones que se hacen con el "Circuito Digital que Simplifica la Medición de Flujos", logran una resolución del 1% de error en  $\pm 10$  mVolts, esto es  $1/2$  de LSB en  $\pm 5$  mVolts, el valor más inseguro lo proporcionan los parámetros de los componentes pasivos, la calibración del circuito digital es simple y segura, el circuito posee una precisión suficiente para aplicaciones de tipo industrial. En la referencia [ 4 ], se realizó un circuito con amplificadores operacionales en base a amplificadores logarítmicos y antilogarítmicos, estos circuitos se realizan con diodos y la influencia de la temperatura es considerable, generándose inestabilidad y errores en las mediciones, con el circuito de la figura 4 se logran evitar los efectos que se producen por medio de la temperatura, las mediciones son más estables y los resultados se mejoran considerablemente.



## SOMI XVIII Congreso de Instrumentación ELECTRONICA JMS1831

### 7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

- El circuito incluye convertidores analógicos/digitales y digitales/analógicos (Fig. 4).
- Se genera un programa en lenguaje ensamblador para ejecutar las operaciones de un sistema operativo, en un microcontrolador.
- Se desarrollan subrutinas para manejar los cambios de códigos que se producen durante el proceso de linealización.
- El desarrollo se implementa al depositar los datos linealizados en la sección de memoria.
- La salida es una señal estandarizada en forma de lazo de corriente de 4 a 20 mA, se hace así, para indicar el valor del flujo, principalmente si se desea conectar un controlador para utilizarlo en un sistema de lazo cerrado.
- Si se hace una comparación de los resultados del diseño digital con respecto al circuito analógico original, se observa como la solución propuesta en forma digital no tiene problemas con los cambios de temperatura [ 4 ].
- La temperatura es muy problemática en los sistemas analógicos, ya que el circuito analógico incluye diodos en los amplificadores logarítmicos y antilogarítmicos [ 4 ].
- La resolución que proporciona el circuito digital el 1% de error en  $\pm$  10 mVolts, esto es 1/2 de LSB en  $\pm$  5 mVolts.
- Se cumple con las normas de estandarización en la instrumentación al acoplar las señales con un lazo de corriente de 4 a 20 mA.

### 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [ 1 ] Claudio Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Harper & Row, 1970/ pp 139 – 141
- [ 2 ] Manual de Servicio de SICARTSA, Instrumentación Industrial Tomos I y II, Taylor, 1978.
- [ 3 ] AVR STK500, Flash Microcontroller Starter Kit, User Guide, 2002.
- [ 4 ] Diseño de un Circuito para Simplificar la Medición de Flujos, J. G. Mateos S. , J. M. Cañedo C, J.R. Rodríguez G., R. M. Jiménez A. SOMI XI, Morelia Michoacan 1996.
- [ 5 ] Ziebolz H., Solutions for Flow Measurement, rev. Sci. Instr., vol. 15 pp. 80-87 april 1944.
- [ 6 ] Wingo H. E., Thermistors Measure Low Liquid Velocities, Control, Eng, vol 6 October, 1959.
- [ 7 ] T. Clarke, Design and operation of target flowmeters, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol 1, Houston, TX: Gulf Publishing Company, 1986.
- [ 8 ] R. Philip-Chandy, Ph.D. thesis, *Fluid flow measurement using electrical and optical fibre strain gauges*, Liverpool John Moores University, UK, 1997.