Anales PANEL'81/12 JAIIO
Sociedad Argentina de informática
e Investigación Operativa. Buenos Aires, 1981

DESARROLLO DE UN COMPUTADOR PARA MEDIR VELOCIDAD AEREA VERDADERA

José Schlein
Laboratorio de Electrónica Computacional de la
Facultad de Tecnología de la Universidad de Belgrano
Buenos Aires, Argentina

Este trabajo fué auspiciado por el Departamento de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Argentina

MEDICION DE LAS PRESIONES Y TEMPERATURAS EN UN AVION EN MOVIMIENTO

En general, los aviones actuales vienen provistos de una "antena" Pitot, es decir, un tubo de Pitot colocado en un lugar donde las perturbaciones provocadas por el desplazamiento del avión en el aire sean mínimas.

De la antena Pitot se obtiene dos señales de presión

a) Presión total P_t (en el orificio central)

b) " estática P_s (en los orificios laterales)

De las relaciones

$$\frac{P_t}{P_s} = (1 + 0{,}2\, M_t^2)^{3{,}5}$$

y $$M_t = \frac{V_t}{Cs} = \frac{\text{Velocidad aérea verdadera}}{\text{Velocidad del sonido}}$$

Se puede obtener:

$$V_t = 39{,}84 \quad \frac{T_i}{1/M_t^2 + K_r}$$

Donde T_i = temperatura medida en un sensor de tempratura con coeficiente K_r de recuperación.

Para poder computar el valor de V_t es necesario medir P_s, P_t y T_i, con una precisión acorde al resultado que se quiera obtener.

Por ejemplo: para obtener V_t con un error menor que el 0,5%, será necesario tener los valores de P_s, con un error menor del .1% P_t menor del .1% y T_i menor del 0,3%.

Los valores del número de Mach determinados a partir de esos valores de presión se llaman de "Mach indicado".

Cada avión tiene, para el conjunto formado por el fuselaje y el tubo de Pitot, una curva de corrección del nº de Mach debido a los errores provocados por las perturbaciones del propio avión.

Para el A4B, por ejemplo, se cuenta con la curva que convierte el Mach indicado a Mach real.

Existe además una curva que permite corregir el valor de la presión estática por las perturbaciones, en función del valor de velocidad indicada con la cual se puede corregir el valor de altura calculada con el valor de P_s obtenido del tubo de Pitot.

Para sensar las presiones con una exactitud suficiente (del órden del 0.1%) se eligen los sensores PAROSCIENTIFIC que consisten en un oscilador a cristal de cuarzo cuya frecuencia varía con la tensión a la cual está sometido, que a su vez está relacionada con la presión (absoluta ó diferencial) que mide (1). Cada sensor particular esta calibrado para tener los valores de A, B, y T_o

$$(1) \quad P = A\left(1 - \frac{T_o}{T}\right) - B\left(1 - \frac{T_o}{T}\right)^2$$

T = período de oscilación con la presión P

A, B, y T_o = coeficientes de calibración

Es decir que la medición de presión se convierte en una medición del período de oscilación.

Dado que la frecuencia es la inversa del período, también

$$P = A\left(1 - \frac{F}{F_o}\right) - B\left(1 - \frac{F}{F_o}\right)^2$$

que tambien es una forma válida de medir la presión. Ambos métodos se ilustran en Fig.1, habiéndose elegido el de medición de período para este proyecto.

La medición de frecuencia o período debe dar una precisión y resolución suficientes para que P tenga asimismo precisión y resolución adecuadas. Suponiendo a A, B, y T_o con errores despreciables, para medir P con .1% de error a plena escala sería necesario un error menor del .01% puesto que por el rango de variación de la frecuencia de salida (de 36 a 40K Hz) para una variación de la presión de entrada de 0 a plena escala (100%) solo se varía un 10% la frecuencia de salida.

Esto determinaría que fuese necesario medir el período con ± .01%, es decir midiendo 10.000 pulsos de la frecuencia de conteo (por ejemplo 1M Hz).

Pero con esa cantidad, la resolución de la ecuación (1) hace que para bajas presiones no haya suficiente resolución (de diferencia de dos valores posibles de presión consecutivos mayor del .1%).

Eso nos hace imprescindible aumentar la cantidad de pulsos a contar por dos métodos 1) Aumentar la frecuencia del reloj patrón; 2) Contar mas pulsos de salida del sensor.

Se decide que, dado que existe un cristal en el equipo que genera una frecuencia de 1M Hz, se lo puede usar como patrón de tiempo y será entonces necesario incrementar el número de períodos de señal durante el cual contar pulsos.

Para obtener un adecuado nº de pulsos es necesario contar 64.000 razón por la cual obrendríamos números de 16 bits con contadores acordes.

Los contadores comerciales cuyas salidas son accesibles son los del tipo 4040 (de 12 bits) y necesitamos 16 bits de resolución, dado que esos don los bits necesarios para que, por ejemplo a Mach 0,8 y Hp = 40.000 pies tengamos un error en TAS menor de 0,5%, especificación del sistema. Este problema se encuentra cuando las presiones a medir son bajas, como en el caso mencionado.

Podemos adoptar como solución acoplar otro contador más (por ejemplo un 4024 de 7 bits) pero como los números de salida van a estar comprendidos entre CXXX y DXXX, se puede prescindir de los tres primeros bits (mas significativos) colocando en el registro de salida esos datos fijos en forma permanente. Queda todavía un bit por definir. Ese bit puede ser el bit 0 ó el bit 12 según se coloque un divisor detrás del 4040 ó un flip-flop delante, con la ventaja que, colocando ese flip-flop se puede reducir el tiempo de conversión a la mitad del que sería si hubiese un divisor posterior.

Se eligen entonces para contar los pulsos del sensor la siguiente configuración

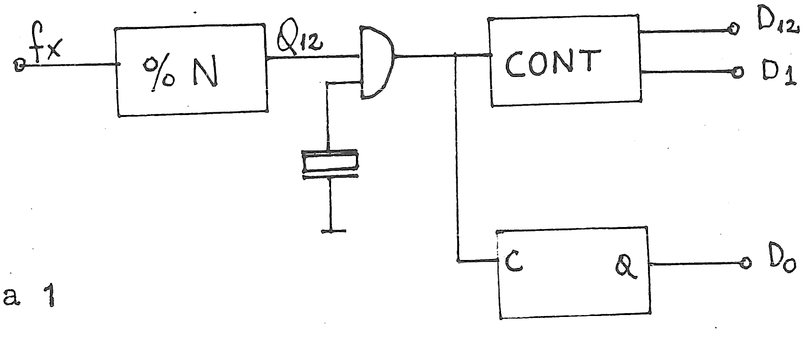

Figura 1

De esta manera se obtiene los 16 bits de información en <u>58 mseg</u> aproximadamente, con números comprendidos entre \$ CC60 y \$ DF 50 para el par de sensores actualmente en nuestro poder y para el rango de presiones a que deberán estar sometidos.

(P_s = 75 a 800 mbar; Pt - Ps = Qc = 0 a 800 mbar dif)

Por ejemplo, para el sensor P_s tenemos

$A = 11486$ milibares

$B = 6445,3$ "

$T_0 = 25,37936$ Seg

La relación entre P_s y T es:

$$T = T_0 \frac{2B - A - \quad A^2 - 4BP_s}{2\ (P_s - A + B)}$$

Para P = 75 mbar	T =	nº <u>52320</u>, \$ CC60
P = 800 "	T =	\$ DAEE

Para el sensor de presión diferencial:

$A = 10981,6$

$B = 5999,77$

$T_0 = 25,79242$

Para $Q_c = 0$	\$ C E 57
$Q_c = 800$	\$ D F 50

Tenemos el rango del nº que representa la presión será

CC 60	1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0
DF 50	1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0

Los tres primeros bits son fijos, por lo que solo será necesario discriminar los trece restantes con el contador de 12 bits tipo 14040 y el flip-flop D tipo 4013.

Para poder efectuar, una vez obtenido el número, el periodo del sensor para poder calcular la presión se debe convertir el número obtenido al periodo real.

La compuerta de la figura 1 dejará pasar los pulsos del relój patrón mientras la salida del divisor por N esté en su estado alto, es decir durante medio periodo de la onda de salida.

Si tomamos como salida Q_{12} del 4040, el periodo se multiplica por $2^{12} = 4096$, es decir que el medio periodo multiplica al periodo original por 2048.

Durante ese tiempo se pueden medir un dado número de pulsos del relój patrón de T pat =1useg, número que será el de salida (N_p) de donde $N_p \times Tpat = T \times 2048$.

$$T = \frac{N_p \times Tpat}{2048} = \frac{N_p \times 1 \text{ useg}}{2048}$$

Reemplazando en la ecuación de P = f (T)

$$(A)\ P = A\left(1 - \frac{To}{T}\right) - b\left(1 - \frac{To}{T}\right)^2 = (A) \times \left(1 - \frac{To \times 2048}{Np \times \text{useg}}\right) -$$

$$-(B)\left(1 - \frac{To \times 2048}{Np \times 1 \text{ useg}}\right)^2$$

Resulta factoreando

$$(B)\ P = H1 + \left(H - \frac{H2}{N1}\right)\frac{1}{N1}$$

$$H1 = A - B \qquad H2 = BK^2$$

$$H = 2BK - AK \qquad K = \frac{To \times 2048}{1 \text{ useg}}$$

Para el caso del sensor de presión absoluta

$H1 = A - B = 5040{,}7$ milibares

$K = 51976{,}93 = To \times 2048$

$H2 = 1{,}741263007 \times 10^{13} = B \times K^2$

$H = 73006795{,}88$

Para el de presión diferencial

$H1 = 4981{,}83$

$K = 52822{,}88$

$H2 = 1{,}674089815 \times 10^{13}$

$H = 53770522{,}50$

A pesar que la ecuación (A) lleva para su resolución 1 operación de multiplicación más que la ecuación (B), se deberá usar la primera, puesto que las constantes que intervienen en la resolución de la segunda son muy grandes para operar con ellas, se obtienen pues, los datos básicos de presión estática y dinámica.

Para la obtención del dato de temperatura se cuenta con un sensor de platino, cuya Ley R = f(T) es

$$R_t = Ro \left(1 + \alpha \left[T - \left(\frac{T}{100}\right)\left(\frac{T}{100} - 1\right)\gamma - \beta\left(\frac{T}{100} - 1\right)\left(\frac{T}{100}\right)^3\right]\right)$$

$$\alpha = .003925 \qquad \beta = \begin{cases} .1 & T < 0ºC \\ 0 & T > 0\ C \end{cases}$$

$$\gamma = 1{,}45$$

T = temp en º C

Para la medición de esa resistencia vamos a usar una configuración tipo puente de Wheatstone

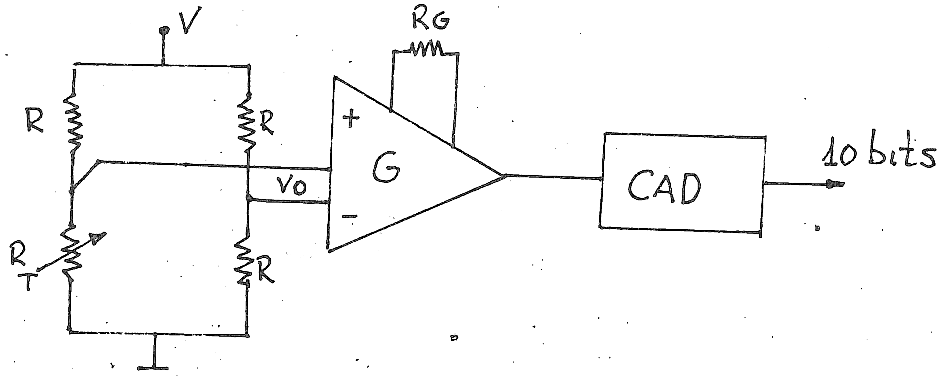

Figura 2

Para que Vo sea de una sola polaridad, R debe ser del valor mínimo de Rt, ó sea el equivalente a una temperatura de -55ºC (389,59Ω.

El valor mas cercano normalizado es de 383 . Dado que Rt a 55ºC (el valor mas alto de temperatura en atmósfera caliente normal) tiene un valor de 608,64Ω y dada la tensión de referencia V = 10V, el rango de variación de tensión Vo será de 0,04V a 1,14V, que es escaso, por lo cual entre el puente de Wheatstone y el conversor analógico-digital que entregará los datos a la computadora deberá haber un amplificador de instrumentación que lleve esa variación al rango de entrada del conversor.

El CAD elegido es el AD 571, conversor de 10 bits, con registros de salida y rango de entrada 0 a + 10 V.

Por lo tanto, la ganancia G del amplificador será

$$G = \frac{10}{1.14} = \frac{\text{Vin Max}}{\text{Vo Max}} = 8.077$$

La ecuación de ganancia del amplificador elegido, el AD 522 es

$$G = 1 + \frac{200.000}{RG} \qquad R_g = \frac{200.000}{G-1}$$

$$= 25733,63$$

(26,1 k) valor normalizado

Con ése valor de R_g, la tensión Vin tendrá un rango de variación entre 0,35 y 9,88 V, con lo que se podrá aprovechar toda la resolución de AD 571, conversor elegido.

Para referencia de tensión usamos el AD 581, cuya precisión alcanza para nuestras necesidades. Dado que debe alimentar al puente de Wheatstone y a los dos conversores digital-analógico (AD7524), se deberá proveer una amplificación de corriente por medio de un transistor PNP. R_s fija el valor a partir del cual comienza a aportar corriente.

Para obtener la correspondencia entre el número que entrega el conversor analógico-digital y la temperatura que mide el sensor se hace una tabla con los valores correspondientes, dado que, como R_t es una función cúbica de la temperatura, es muy difícil realizar la expresión donde se de $T = f(R_t)$. El proceso de cálculo es el siguiente:

$$T \qquad Rt = Ro\ (1 + \quad T - \quad \left(\frac{T}{100}\right)\left(\frac{T}{100} - 1\right) - \left(\frac{T}{100}\right)^3 \left(\frac{T}{100} - 1\right)$$

$$Vo = \frac{VREF}{R/RT + 1} \qquad Vi = Vo \cdot G \quad \ldots \quad NT = \frac{1024 \times Vi}{10\ V}$$

Donde finalmente se obtiene N_t = (T) en forma numérica.

Esta tabla es discreta, y se debe interpolar linealmente entre los puntos que figuran en ella.

El proceso de interpolación utiliza la fórmula de la recta que pasa por dos puntos para lograr el valor intermedio, en tanto que las entradas en la tabla se minimizan de tal manera que el error máximo en la linealización sea menor al permitido.

Proceso de cálculo de TAS y H_p

Obtenidos los datos de los respectivos conversores, es decir, NQ_c; NPs, NT, números que representarán a la presión dinámica, estática y temperatura, respectivamente, se comienza con los cálculos

1) Se calcula

$$A = \frac{Qc}{PS} = \frac{AQc\left(1 - \frac{Toqc \times 2048}{NQc}\right) - Bqc\left(1 - \frac{Toqc \times 2048}{NQC}\right)^2}{APS\left(1 - \frac{Tops \times 2048}{NPS}\right) - Bps\left(1 - \frac{Tops \times 2048}{NPS}\right)^2}$$

Donde AQC; To QC = constantes del sensor diferencial
APS; BPS: TPS " " " absoluto

2) Se calcula $H_p = f(PS)$ de una tabla obtenida de las funciones.

para 76 Ps 169,753 $H'p = 40090{,}76996 - 5665{,}722379 \ln PS$ ALTA
para 169,753 PS $H'p = 44332{,}30769 \; 1 - 0{,}28307401 \times PS^{\frac{1}{5{,}256}}$

Ambas ecuaciones son las definidas por la atmósfera standard y los valores numéricos dan H'_p en metros con P_s en milímetros de mercurio. Dado que la presión estática medida no está corregida en función del número de Mach o la velocidad, se efectúa una corrección sobre la altura resultante con las tablas que da el manual del avión (AHP en función de la velodidad indicada).

Empíricamente, si el valor A es menor de 0,4 no es necesario corregir pero a partir de ese valor

$$A\,H_p = -300 \times A + A\,H_p$$

Finalmente la altura resulta

$$Hp = H'p + A\,H_p$$

3) Por medio de una tabla, dado el valor A sacamos M_i

La tabla la da la función

$$Mi = \quad 5 \quad (A + 1) \frac{1}{3,5} - 1$$

4) Si M_i 0,6, no es necesario corregirlo, pero si M_i 0,6 se lo debe corregir en función de M_i, tabla que dá el manual del avión, para dar M (número de Mach real)

5) Se calcula

$$C = \frac{M^2}{1 + .1995 * M^2}$$

6) se calcula

$$TAS = 38.94 \quad C \times T$$

7) Se deban sacar los valores de TAS y HP en forma analógica, por lo que se convierten en el AD 7524, con los datos obtenidos. TAS tambien sale con forma digital de 8 bits con un latch open collector TTL.

ESTUDIO DE LOS ERRORES EN EL CALCULO DE LA ALTURA

1) h 11.000 m.

$$h = 44332,30769 - 12549,32411 \; P_s \quad \left(\frac{1}{5,256} \right)$$

El error absoluto máximo que puede admitirse es de alrededor de 25 m.

$$e_{hmáx} = \left(\frac{E \; P_s}{5,256} \right) \quad \left(\frac{1}{5,256} \right) + \; m) \; 12549,3211 \; P_{Smáx} \quad \left(\frac{1}{5,256} \right)$$

Descripción del Diagrama en Bloques

El problema a resolver consiste en calcular la velocidad verdadera del avión y su altura.

Para ello contamos con los siguientes datos:

Pt = Presión total, tomada del tubo de Pitot

Ps = Presión estática, tomada de la toma estática

T = Temperatura, tomada de una toma de temperatura que consiste en una resistencia variable con la temperatura.

Las salidas del sistema son:

TAS ANALOG: Señal analógica proporcional a la velocidad aérea verdadera.

TAS DIGITAL: Señal digital indicando en 8 bits la velocidad aérea verdadera.

h ANALOG: Señal analógica proporcional a la altura del avión.

Interfase para la adquisición de datos

Se eligieron para sensar la presión sensores de cuarso que proporcionan una señal eléctrica cuya frecuencia es proporcional a la presión a medir. La precisión de estos sensores es del orden del 0.1%.

Se diseñó una interfase para medir el período de esta señal tal como será analizado luego. Para la medición de temperatura se utilizó un sistema puente, amplificado luego mediante un amplificador de instrumentación.

CPU

Se eligió para la CPU un microprocesador NMOS M 6802 de 8 bits. Este microprocesador incluye 128 bytes de memoria RAM y el circuito de reloj.

MEMORIA PROM

Se diseñó esta memoria con circuitos M 2708 que son EPROM de 1K x 8 y que ocupan un total de 3K que es la longitud del programa.

INTERFASE ANALOGICA DE SALIDA

Se utilizaron conversores Digital/analógicos de tipo CMOS para las salidas de TAS ANALOG y h ANALOG.

INTERFASE TAS DIGITAL

Este circuito provee una señal digital de 8 bits en forma de buffers de colector abierto.

DIAGRAMA EN BLOQUES DEL T.A.C.

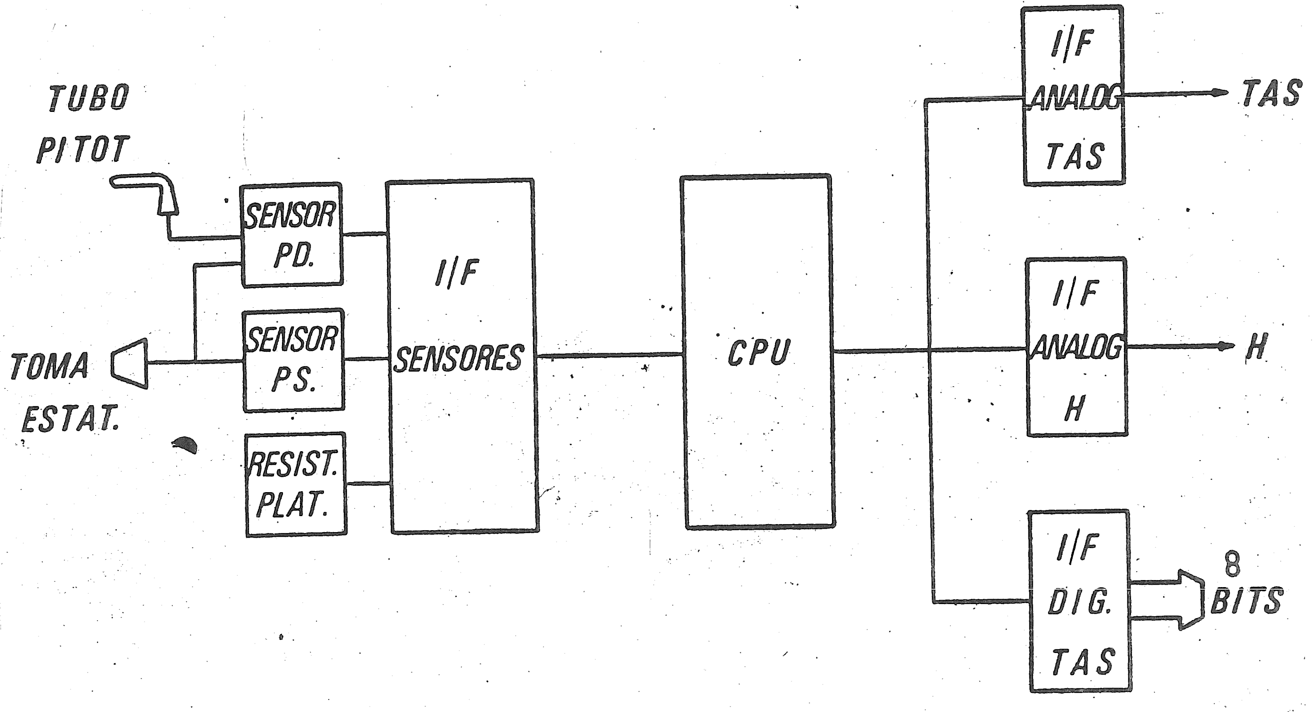

Fig. 8