Linealización de termistores NTC

Autor: Felix Mateo Lazaro

RESUMEN
El objeto del presente trabajo es el estudio de las técnicas existentes de linealización para termistores NTC, así como el estudio de técnicas nuevas en base a la linealización con amplificadores logarítmicos, ademas del uso de técnicas con amplificadores operacionales para mejorar el auto calentamiento de los termistores NTC.
Se abordan primeramente las técnicas mas difundidas de linealización, realizando después un estudio mas detallado del resto.
Palabras clave
Termistor NTC. Linealización de Termistores. Medida de temperatura. Instrumentación. Amplificador Logarítmico.

Abstrat
The purpose of this work is the study of technical techniques of linearization for NTC thermistors, as well as the study of new techniques based on linearization with logarithmic amplifiers, in addition to the use of techniques with operational amplifiers to improve the self-heating of NTC thermistors.
The most widespread linearization techniques are first approached, then carrying out a more detailed study of the rest.
Keywords
NTC Thermistor. Thermistor Linearization. Temperature measurement. Instrumentation. Logarithmic Amplifiers.

Sumario

1. Introducción a los termistores NTC

Un termistor NTC es un sensor de temperatura por resistencia, que varia su valor con la temperatura con un coeficiente negativo. La forma de la curva característica de esta resistencia puede verse en la figura 1 (curva A). Se ve que el valor de esta varia de forma negativa con un aumento de temperatura.

El uso de termistores NTC en la medida de temperaturas está ampliamente difundido dentro de la industria. La no linealidad del comportamiento de estos componentes restringe su uso al control de temperatura de diferentes procesos industriales, siendo mas difícil su utilización en la medida de estas de una forma precisa y lineal.

Existen diferentes métodos o circuitos de linealización para estos termistores que en la actualidad permiten su uso mas plenamente.

1.1 Ecuación de Steinhart-Hart

En 1968 Steinhar y Hart desarrollaron un modelo matemático para la característica R-T (resistencia - temperatura) de un termistor NTC para hacer mediciones precisas de temperatura en estudios oceánicos.

La ecuación de Steinhart-Hart tiene tres términos y es el modelo popular mas usado para el modelado R-T de termistores NTC. La ecuación en su forma general es la siguiente:

$$\frac{1}{T}=C_1+C_2\cdot\ln R_T+C_3\cdot(\ln R_T)^3 \qquad [1]$$

Donde T es la temperatura absoluta medida en Kelvin (0ºC = 273,15 K), y R_T la resistencia en Ω (ohmios). Los términos C_1, C_2, y C_3 son las constantes de Steinhart-Hart del termistor.

Para simplificar a ecuación [1] a dos términos puede usarse en algunos casos la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{T}=C'_1+C'_2\cdot\ln(R_T) \qquad [2]$$

Denominándose ecuación simplificada de Steinhart-Hart

Donde las constantes C'_1 y C'_2 son las nuevas constantes del termistor.

Téngase en cuenta que $C'_1 \neq C_1$ y $C'_2 \neq C_2$.

1.1.1 Ecuación de Steinhart-Hart simplificada normal

La ecuación simplificada de Steinhart-Hart puede ponerse de la siguiente manera:

$$R_T=A\cdot e^{\left(\frac{B}{T}\right)} \qquad [3]$$

Denominamos a esta, ecuación normal de un termistor NTC donde las nuevas constantes A y B valen:

$$A=e^{\left(\frac{C'_2}{C'_1}\right)} \qquad \text{y} \qquad B=\frac{1}{C'_2}$$

Donde A es una constante que depende del termistor NTC, y representa el valor de la resistencia del termistor NTC cuando la temperatura es supuestamente infinita.
B es la resistencia característica del material de que está hecho el termistor NTC. Su valor esta comprendido entre 2000K y 4000K.

Calculo de las constantes A y B del termistor para la nueva ecuación normal

Los fabricantes de termistores NTC normalmente dan tablas relacionando los valores de R_T y T, pero no dan los valores de de las constantes A y B por lo que hay que calcularlas para el intervalo de temperaturas en el que el termistor va a funcionar, de manera que se obtenga la mayor precisión posible en dicho intervalo.

Los valores de A y B hay que calcularlos según los valores de la resistencia R_T a diferentes temperaturas. Para ello realizamos la siguiente consideración:

$A=R_0\cdot e^{\frac{-B}{T_0}}$ donde igualando A para dos valores de R_0 y T_0 se obtiene: [4]

$$R_1 \cdot e^{\frac{-B}{T_1}} = R_2 \cdot e^{\frac{-B}{T_2}} \quad \text{de donde} \quad B = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

siendo R_1 y R_2 las resistencias del termistor NTC a las temperaturas T_1 y T_2 respectivamente. Una vez conocido B podemos calcular el valor de A sin mas que sustituirlo en la ecuación [4] para una temperatura y resistencia de referencia (R_0 y T_0 a 25ºC, o 0ºC por ejemplo).

Nota: Al valor nominal de un termistor NTC se le denomina R_{25} y es la resistencia de dicho termistor a la temperatura de 25ºC. Puede haber termistores con un valor nominal entre 15Ω y 470KΩ.

Los márgenes de temperatura entre los que pueden trabajar estos termistores esta normalmente entre -55ºC y 125ºC, con una tolerancia del valor nominal comprendida entre ±10% y ±5%.

1.1.2 Calculo de las constantes de Steinhart-Hart para la ecuación general

Teniendo la ecuación general, podemos plantear un sistema de tres ecuación con tres incógnitas (las constantes C_1, C_2, y C_3) sabiendo los valores de R_T para tres valores de T. Así tendremos:

$$\frac{1}{T_1} = C_1 + C_2 \cdot \ln R_1 + C_3 \cdot (\ln R_1)^3$$ Temperatura mínima del intervalo considerado

$$\frac{1}{T_2} = C_1 + C_2 \cdot \ln R_2 + C_3 \cdot (\ln R_2)^3$$ Temperatura media del intervalo considerado

$$\frac{1}{T_3} = C_1 + C_2 \cdot \ln R_3 + C_3 \cdot (\ln R_3)^3$$ Temperatura máxima del intervalo considerado

Haciendo las sustituciones siguientes para los términos de T, y R podemos simplificar la nomenclatura de estas ecuaciones:

$$A_1 = C_1 + C_2 \cdot D_1 + C_3 \cdot E_1$$

$$A_2 = C_1 + C_2 \cdot D_2 + C_3 \cdot E_2$$

$$A_3 = C_1 + C_2 \cdot D_3 + C_3 \cdot E_3$$

Operando se obtienen los valores de C_3, C_2, y C_1 , que usando la notación $X_{nm}=X_n-X_m$ se obtiene:

$$C_3 = \frac{A_{23} \cdot D_{12} - A_{12} \cdot D_{23}}{E_{23} \cdot D_{12} - E_{12} \cdot D_{23}} \quad ; \quad C_2 = \frac{A_{12}}{D_{12}} - C_3 \cdot \frac{E_{12}}{D_{12}} \quad ; \quad C_1 = A_2 - C_2 \cdot D_2 - C_3 \cdot E_2$$

Sustituyendo de nuevo por sus valores se obtiene:

$$C_3 = \frac{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3}\right) \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} - \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \cdot \ln \frac{R_2}{R_3}}{((\ln R_2)^3 - (\ln R_3)^3) \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} - ((\ln R_1)^3 - (\ln R_2)^3) \cdot \ln \frac{R_2}{R_3}}$$

$$C_2 = \frac{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}{\ln \frac{R_1}{R_2}} - C_3 \cdot \frac{(\ln R_1)^3 - (\ln R_2)^3}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \qquad C_1 = \frac{1}{T_2} - C_2 \cdot \ln R_2 - C_3 \cdot (\ln R_2)^3$$

Una vez calculadas las constantes C_1, C_2, y C_3 para un termistor en concreto podemos calcular una temperatura dada sabiendo su valor R_T para esa temperatura.

2. Uso de amplificadores operacionales con termistores NTC

Los termistores NTC suelen usarse en circuitos linealizados con una resistencia en serie, lo cual dificulta su utilización para obtener sensibilidades suficientes sin producir demasiado auto calentamiento. El uso con amplificadores operacionales minimiza este problema.

1.2 Circuitos para la obtención de la curva de la resistencia

La obtención de la curva de la resistencia R_T de un termistor se realiza alimentan dolo con una corriente constante de forma que se obtiene la siguiente igualdad:

$$V_0 = I_{cte} \cdot R_T$$

Si la corriente constante I es muy pequeña, el auto calentamiento que se producirá en el termistor sera muy pequeño también. Los circuitos de la figura 1 cumplen con esta condición.

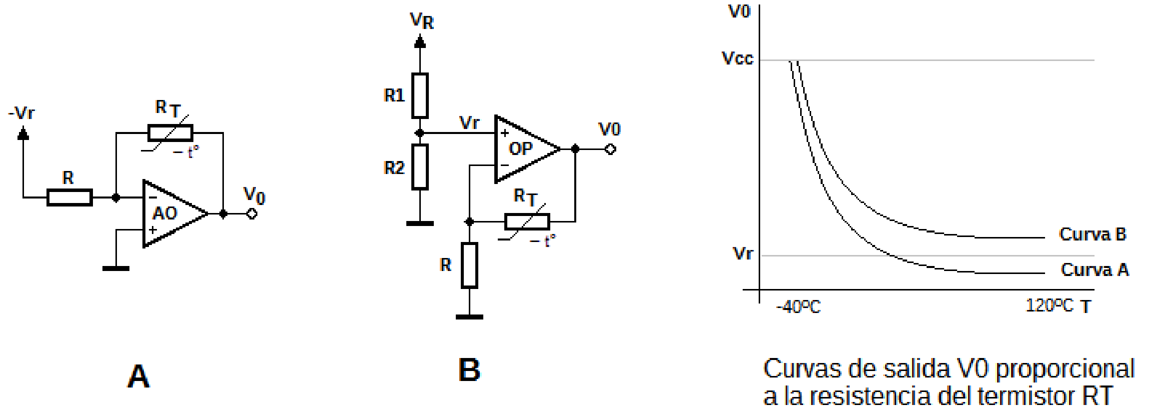

Figura 1: Circuito inversor (A) y no inversor (B). Y curvas de V_0 directamente proporcionales a la resistencia R_T del termistor para los dos circuitos.

Planteando las ecuaciones que rigen los circuitos A y B se obtiene:

A) $V_0 = \frac{V_r \cdot R_T}{R} = I_{cte} \cdot R_T$ V_0 es directamente proporcional a R_T

B) $V_0 = V_r \cdot \left(1 + \frac{R_T}{R}\right) = V_r + I_{cte} \cdot R_T$ V_0 es directamente proporcional a R_T mas un valor (V_r)

En algunas aplicaciones es posible que este valor añadido V_r sea problemático por lo que se deberá de utilizar preferentemente el circuito A, o añadir un restador al circuito B que reste el valor de V_r. Este valor de V_r debe de ser lo mas pequeño posible ya que actúa como un valor constante que limita el rango de salida de V_0, que valdrá desde V_r hasta la tensión de alimentación $+V_{CC}$

1.3 Circuitos para aumentar la sensibilidad en la zona de baja resistencia

Si se alimenta el termistor NTC con una tensión constante se obtiene una variación de la corriente que circula por el mismo con la variación de la resistencia R_T del termistor. El planteamiento es el siguiente:

$I_0 = \frac{V_{cte}}{R_T}$ Ya que la corriente que circula por R_T debe de ser muy pequeña para reducir el auto calentamiento del termistor, la tensión V_{cte} también debe de ser muy pequeña. Los circuitos de la figura 2 cumplen con esta condición.

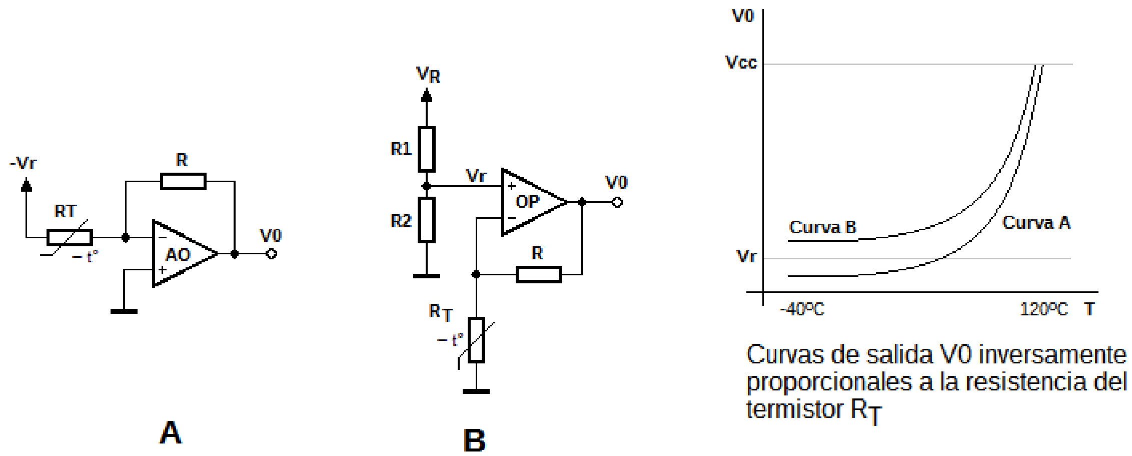

Figura 2: Circuito inversor (A) y no inversor (B). Y curvas de V0 inversamente proporcionales a la resistencia RT del termistor para los dos circuitos.

Planteando las ecuaciones que rigen los circuitos A y B se obtiene:

A) $V_0 = \frac{V_r \cdot R}{R_T} = \frac{K}{R_T}$ V_0 es inversamente proporcional a R_T

B) $V_0 = V_r \cdot (1 + \frac{R}{R_T}) = V_r + \frac{K}{R_T}$ V_0 es inversamente proporcional a R_T mas un valor (V_r)

El valor añadido V_r es problemático por lo que se deberá de utilizar preferentemente el circuito A_r. Este valor de V_r debe de ser lo mas pequeño posible ya que actuá sobre el auto calentamiento del termistor a la vez que limita el rango de salida de V_0, que valdrá desde V_r hasta la tensión de alimentación $+V_{CC}$

En los dos casos el auto calentamiento del termistor depende de la tensión de referencia constante V_r por lo que esta debe de ser lo mas pequeña posible (en torno a 1V o menos).

1.4 Circuitos de linealización por resistencia serie

La linealización clásica de un termistor NTC es conectandole una resistencia en serie de forma que se obtiene una linealización de la tensión en sus extremos. Este método es muy poco sensible en la zona de resistencia baja. Si se utiliza un amplificador operacional para medir la corriente que circula por el termistor en lugar de medir la tensión se obtienen mejores resultados. En la figura 3 se pueden ver dos circuitos que funcionan de esta manera.

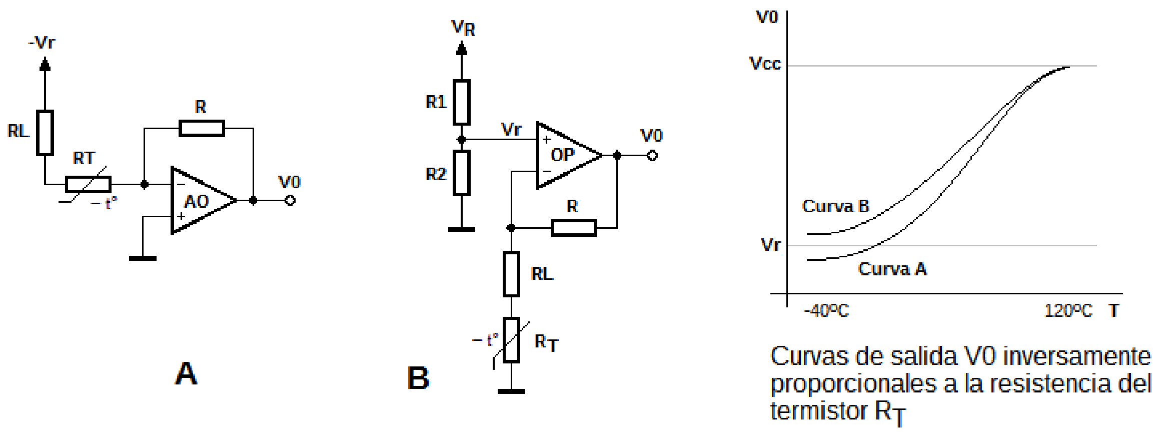

Figura 3: Circuito inversor (A) y no inversor (B). Y curvas de V0 inversamente proporcionales linealizadas para los dos circuitos.

Planteando las ecuaciones que rigen los circuitos A y B se obtiene:

A) $$V_0 = \frac{V_r \cdot R}{R_T + R_L} = \frac{K}{R_T + R_L}$$

B) $$V_0 = V_r \cdot \left(1 + \frac{R}{R_T + R_L}\right) = V_r + \frac{K}{R_T + R_L}$$

El valor añadido V_r es problemático por lo que se deberá de utilizar preferentemente el circuito A. Este valor de V_r debe de ser lo mas pequeño posible ya que actúa como un valor constante que limita el rango de salida de V_0, que valdrá desde V_r hasta la tensión de alimentación $+V_{CC}$

En los dos casos el auto calentamiento del termistor depende de la tensión de referencia constante V_r y por la limitación de la corriente que R_L produce en el termistor, por lo que en este caso la tensión de referencia V_r puede ser mayor que la utilizada en los circuitos de la figura 2.

3. Circuitos de linealización con circuitos logarítmicos

Si se utiliza una aproximación a la ecuación normal del termistor (ecuación [3]) para realizar la linealización, podemos usar un circuito logarítmico de forma que se obtiene una linealización bastante precisa para la mayoría de las aplicaciones.

1.5 Circuito logarítmico basado en la curva exponencial de un diodo

Usando un amplificador logarítmico para una lectura de la resistencia se obtiene en principio, una linealización de la función exponencial. En realidad obtendremos la función Cte/T (función inversa de la temperatura), que si utilizamos un circuito divisor podemos obtener una función lineal con la Tª.

En la figura 4 podemos ver el circuito de linealización para un termistor NTC.

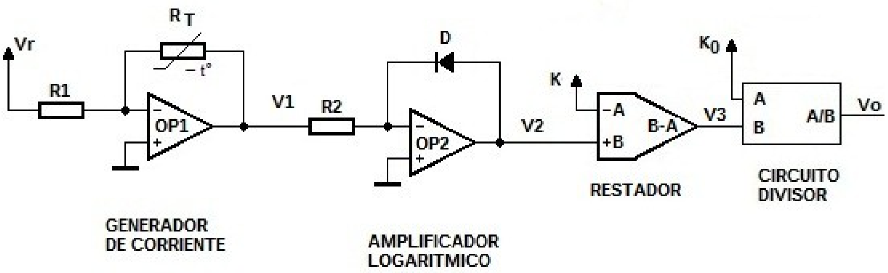

Figura 4: Circuito logarítmico para la linealización de un termistor.

El funcionamiento es como sigue: El circuito del operacional OP1 funciona como una fuente de corriente, de tal manera que la salida V_1 es una tensión proporcional a R_T, y por lo tanto la función exponencial de la temperatura T. La ecuación siguiente indica en que proporción se obtiene V_1.

$$V_1=\frac{-V_r}{R_1}\cdot R_T=\frac{-V_r}{R_1}\cdot A\cdot e^{(B/T)} \qquad [5]$$

El amplificador operacional OP2 funciona como un amplificador logarítmico cuyas características dependen del diodo D. La ecuación por la que se rige el diodo es la siguiente:

$$I_D=I_S\left(e^{(V_D/V_T)}\right) \qquad \text{de donde} \qquad V_D=V_T\cdot\ln\frac{I_D}{I_S} \qquad [6]$$

Donde:

V_D = tensión en el diodo para una corriente I_D, (V_D coincide con V_2).

V_T = tensión constante que depende del diodo utilizado.

I_S = corriente constante que depende del diodo utilizado.

I_D = corriente por el diodo, que en el circuito del amplificador OP2 será V_1/R_2.

También tenemos que:

$$I_D=\frac{-V_1}{R_2} \qquad \text{y} \qquad V_2=V_D$$

Sustituyendo estas ecuaciones y la ecuación [5] en la [6] y operando se obtiene:

$$V_2=V_D=V_T\cdot\ln\frac{I_D}{I_S}=V_T\cdot\ln\frac{-V_1}{I_S\cdot R_2}=V_T\cdot\ln\frac{V_r\cdot A}{I_S\cdot R_1\cdot R_2}+\frac{V_T\cdot B}{T}=K+\frac{V_T\cdot B}{T}$$

Si utilizamos un restador a la salida de OP2 para restar la constante K obtendremos una V3 que valdrá $V_T\cdot B/T$. Si esta tensión se lleva al divisor se obtiene una tensión V_0 lineal con la temperatura T.

Se tiene por lo tanto que:

$$V_3=V_2-K \qquad \text{y} \qquad V_0=\frac{K_0}{V_3}$$

Sustituyendo estas ecuaciones se obtiene:

$$V_0=\frac{K_0\cdot T}{V_T\cdot B} \qquad \text{De donde} \qquad T=\frac{V_0\cdot V_T\cdot B}{K_0}$$

En la figura 5 puede verse el método de conversión de forma grafica.

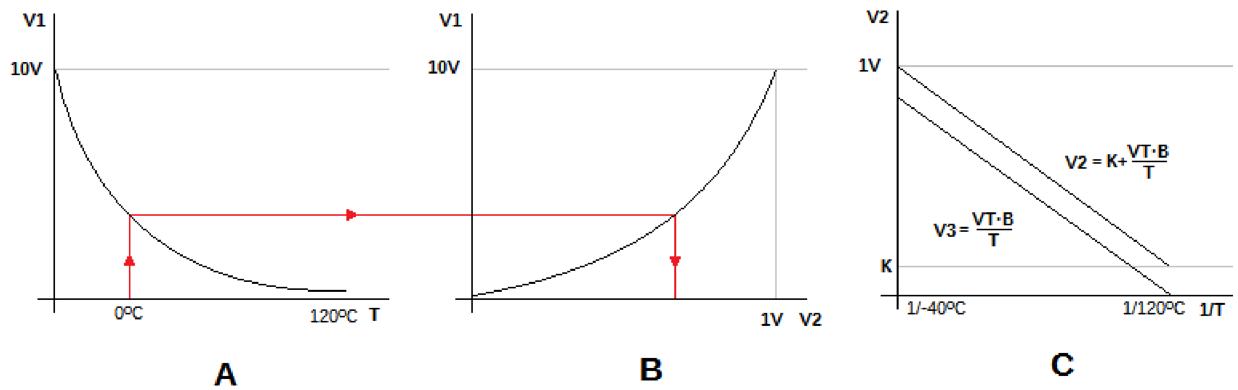

Figura 5: Curva de la resistencia R_T (A). Del logaritmo (B). Salida lineal con 1/T (C).

El amplificador OP2 debe de ser de precisión ya que la variación de la tensión V_2 sera entre 0 y 1V aproximadamente. Probablemente se necesitará amplificar esta tensión hasta 10V o mas antes de entrar en el circuito restador, de forma que V_3 esté entre los valores de 0,1V y 10V para obtener una tensión a la salida del divisor entre 10 y 0,1V respectivamente.

Para finalizar hay que tener en cuenta que la temperatura T esta dada en kelvin, por lo que si queremos obtener una salida en función de la Tª en ºC tendremos que utilizar otro restador que reste la parte proporcional de 273,15 K (constante de conversión de Kelvin a ºC) a la tensión V_0.

1.6 Circuito logarítmico basado en la curva exponencial de descarga de un condensador

Este circuito de linealización se basa en la descarga exponencial de un condensador a través de una resistencia. En realidad lo que se obtiene con el condensador es la curva exponencial (del tipo e^{-X}) a través del tiempo, por lo que si realizamos de alguna manera la la comparación de esta función con la función exponencial de R_T (del tipo $e^{1/X}$)obtendremos la linealización de la Tª. En la figura 6 podemos ver el circuito de descarga exponencial y comparación completo para una tensión V_1 dada.

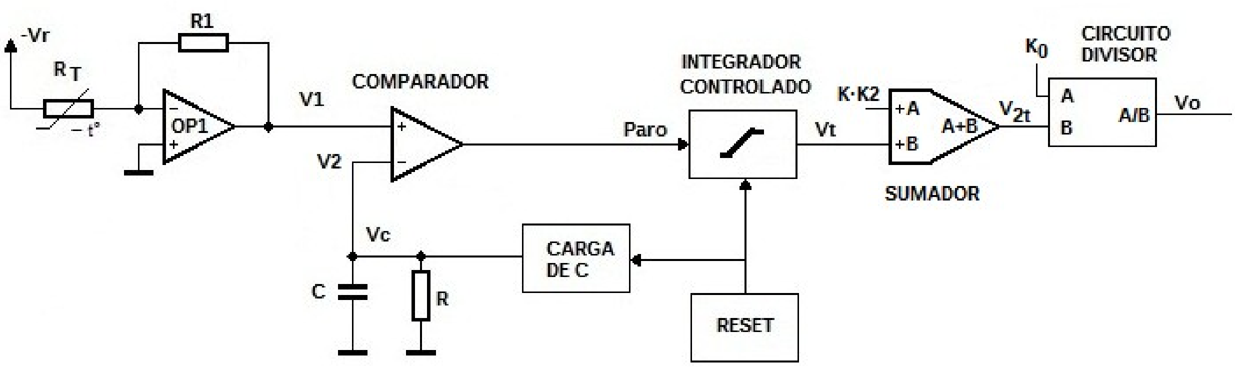

Figura 6: Circuito de linealización de termistor NTC con condensador.

El funcionamiento de este circuito es el siguiente:

La tensión V_1 inversamente proporcional a la resistencia del termistor NTC se compara con la tensión V_c de descarga exponencial del condensador C, que cuando son iguales el comparador activa la señal de Paro del integrador, de esta forma se obtiene una tensión V_t proporcional a V_1 y por lo tanto a la temperatura (aunque es la función inversa de la Tª). A esta tensión se le suma el valor de unas constantes que aparecen en el circuito de linealización y la salida se lleva a un circuito divisor para calcular la inversa, obteniéndose una tensión Vo directamente proporcional a la temperatura del termistor NTC en grados Kelvin. A este valor de V_0 podemos restarle la tensión correspondiente a 0ºC (273,15 K) obteniendo la temperatura en ºC.

El planteamiento de las ecuaciones es el siguiente:

$$V_1 = \frac{V_r \cdot R_1}{R_T} = \frac{V_r \cdot R_1}{A \cdot e^{(B/T)}} = \frac{V_r \cdot R_1}{A} \cdot e^{(-B/T)} \qquad [7]$$

$$V_2 = V_C = V \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \qquad [8]$$

Se tiene pues que el comparador dará la señal de Paro cuando $V_1 = V_2$ por lo que igualando las ecuaciones [7] y [8] se obtiene:

$$\ln \frac{V_r \cdot R_1}{V \cdot A} - \frac{B}{T} = \frac{-t}{R \cdot C} \quad \text{de donde} \quad \frac{B \cdot R \cdot C}{T} = t + R \cdot C \cdot Ln \frac{V_r \cdot R_1}{V \cdot A} = t + K \qquad [9]$$

Donde $$K = R \cdot C \cdot Ln \frac{V_r \cdot R_1}{V \cdot A}$$

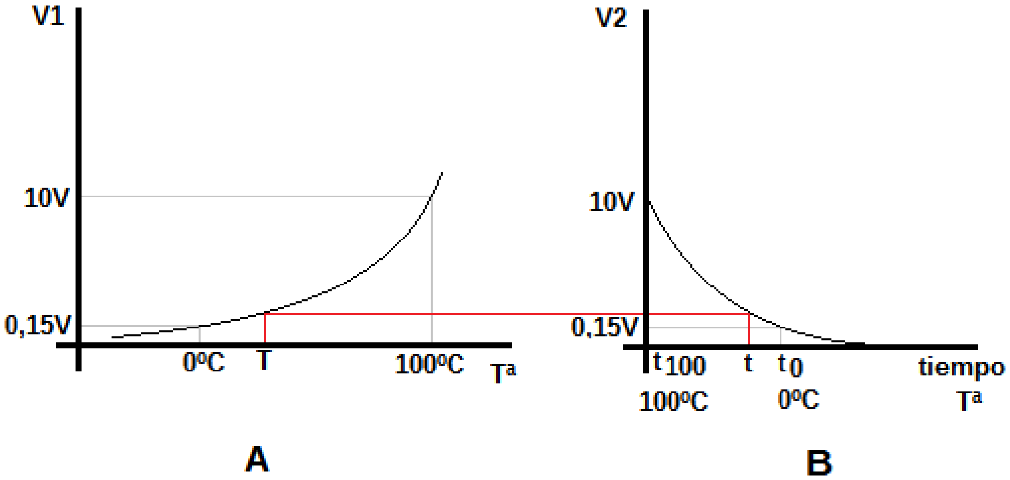

Figura 7: Tensiones V1 (A) y V2 (B).

Se tiene por lo tanto que K es una constante que depende de los valores de los componentes del circuito. V_r debe de ser del orden de 1V a 0,1V para evitar el auto calentamiento del termistor. La resistencia R_1 se calcula en base a obtener un rango de salida V_1 en torno a los 10V como máximo en la zona de temperaturas en que nos interese actuar. Y R y C podemos seleccionarlos para la constante de tiempo que nos interese. Valores normales obtenidos para K son en torno a 0,01.

El circuito integrador funcionará un tiempo t, de donde se obtiene una tensión V_t proporcional a t. Por lo que $V_t = K_2 \cdot t$. Donde K_2 es una constante que dependerá del integrador.

Se obtiene pues de la ecuación [9] que:

$$\frac{B \cdot R \cdot C}{T} = t + K \quad \text{y en tensiones} \quad \frac{B \cdot R \cdot C}{T} = \frac{V_t}{K_2} + K$$

Donde K_2 es una constante que depende del integrador.

De aquí se obtiene:

$$\frac{B \cdot R \cdot C \cdot K_2}{T} = V_t + K \cdot K_2$$

Esto quiere decir que si a la tensión V_t obtenida a la salida del integrador controlado le sumamos el valor $K \cdot K_2$ obtendremos:

$$V_{2t} = V_t + K \cdot K_2 = \frac{B \cdot R \cdot C \cdot K_2}{T}$$

Si se utiliza un circuito divisor a continuación de este sumador podemos obtener una tensión V_0 proporcional a T, obteniendo una $V_0 \equiv K_0 \cdot T$. A la salida del circuito divisor se tiene por lo tanto:

$$V_0 = \frac{K_0}{V_{2t}(t)} = \frac{T \cdot K_0}{B \cdot R \cdot C \cdot K_2} \quad \text{de donde} \quad T = V_0 \cdot B \cdot R \cdot C \cdot \frac{K_2}{K_0}$$

Hay que tener en cuenta que la temperatura T esta dada en grados Kelvin por lo que si se quiere obtener una salida en grados centígrados se deberá de utilizar un restador que ajuste la salida en la parte proporcional de 0ºC (273,15 K). Existen circuitos multiplicadores divisores que realizan la función A/B-Z como el AD734, por lo que si utilizamos este CI no tendremos que usar un restador adicional a la salida del circuito divisor.

4. Circuito de linealización utilizando la ecuación de Steinhart-Hart (con microprocesador)

Dada la ecuación general de Steinhart-Hart y calculadas sus constantes C_1, C_2, y C_3 según las ecuaciones del apartado "Calculo de las constantes de Steinhart-Hart para la ecuación general" en la página 3 para el termistor que se utilice, se puede usar el siguiente circuito para la medida de la resistencia R_T y procesar este valor con un microprocesador de acuerdo con la ecuación general de Steinhart-Hart. La linealización es la mas precisa que se puede obtener.

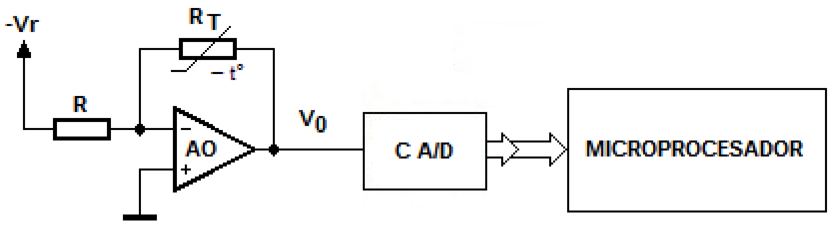

Figura 8: Circuito para la medida de la Tª linealizada con microprocesador.

El funcionamiento es el siguiente. El amplificador OP funciona como un generador de corriente constante por lo que V_0 será proporcional a la resistencia del termistor. Este valor analógico se convierte en digital con un conversor A/D (analógico/digital) que está controlado por un circuito con microprocesador, el cual trata numéricamente este valor medido de R_T para calcular la Tª en base a la ecuación de Steinhart-Hart.

5. Conclusiones

El uso de amplificadores operacionales para la conexión de termistores NTC permite disminuir el auto calentamiento del termistor a la vez que aumenta la sensibilidad en la zona de resistencia baja. Esto añadido al uso de circuitos logarítmicos permite una linealización completa de la Tª basándose en al ecuación simplificada de normal del termistor. Esta linealización se puede mejorar aún mas usando un circuito microprocesador que calcule la Tª en base a la medida de la resistencia R_T con un circuito de corriente constate y la ecuación general de Steinhart-Hart.