

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS COMPONENTES PASIVOS I: RESISTENCIAS Y TERMISTORES.

I.- Resistencias.

La resistencia, R , de un material específico es el resultado de la resistividad, que define su oposición a ser atravesado por una corriente eléctrica, y de la longitud y sección transversal).

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

donde ρ es la resistividad específica del material en Ω por metro, l es la longitud en metros y A es la sección transversal en metros².

La relación entre la corriente y la tensión en una resistencia ideal de valor R es puramente lineal:

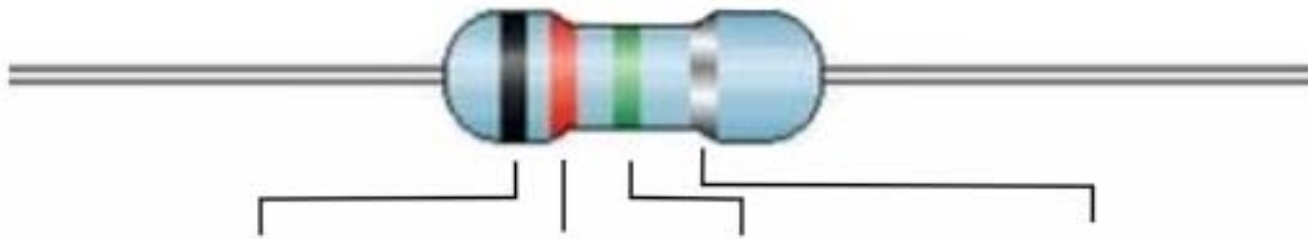
$$v(t) = i_R(t)R \quad \text{ó} \quad i(t) = \frac{V_R(t)}{R}$$

En toda resistencia real el valor de la resistencia efectiva es una función, usualmente creciente con la temperatura, el fabricante especifica el valor a una temperatura de referencia, usualmente 25°C, y debe además indicar cual es el factor de variación con la temperatura.

Además de ser una función de la temperatura, el valor exacto de una resistencia normalmente no coincide con el valor nominal, ya que los procesos de fabricación producen componentes con una cierta variación.

El fabricante especifica ese margen como un % de tolerancia, que puede ser del orden de 10% para las resistencias ordinarias y del 1% o menor para las resistencias "de precisión"

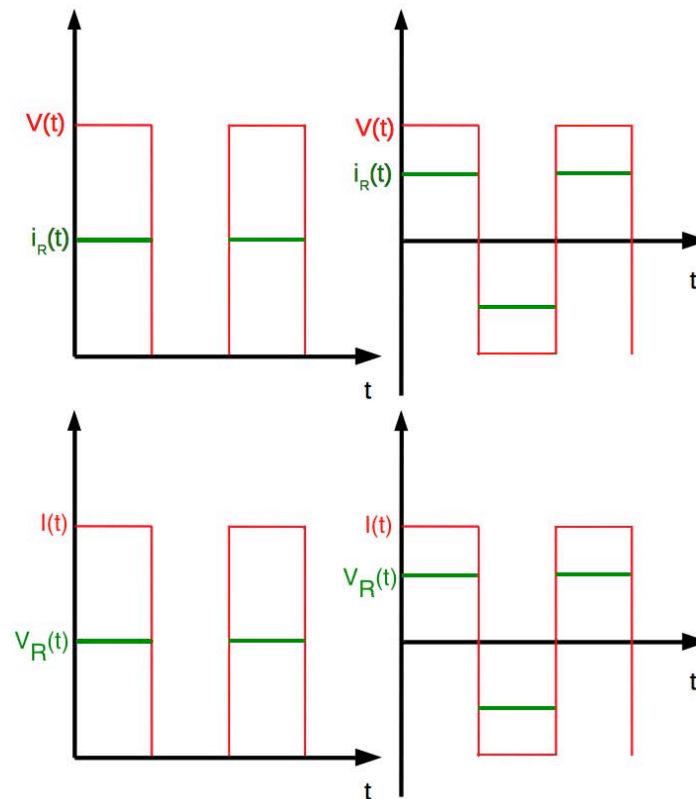
EL valor de la resistencia viene indicado con un código de colores estándar:



Color	1ra. Banda	2da. Banda	3ra. Banda Multiplicador	Tolerancia %
Negro	0	0	x1	
Cafe	1	1	x10	
Rojo	2	2	x100	2%
Naranja	3	3	x1000	
Amarillo	4	4	x10000	
Verde	5	5	x100000	
Azul	6	6	x1000000	
Violeta	7	7	x10000000	
Gris	8	8	x100000000	
Blanco	9	9	x1000000000	
				Dorado 5%
				Plata 10%

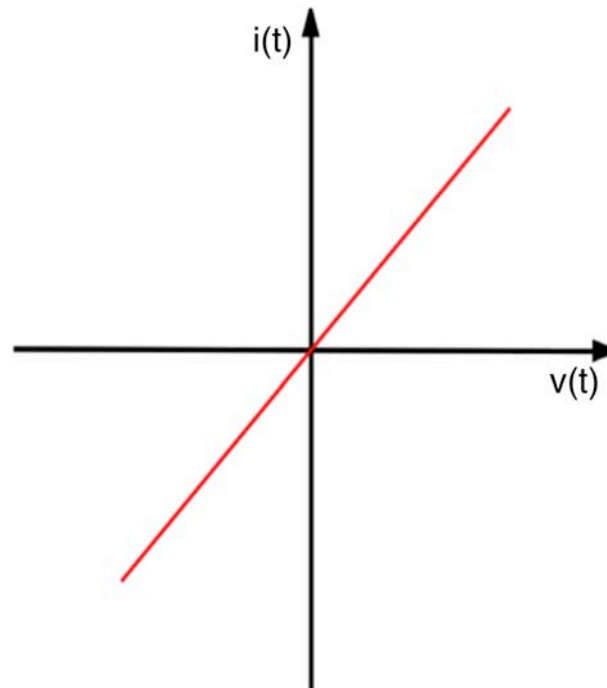
Circuitos Básicos

Los componentes resistivos puros solo disipan energía eléctrica y no la almacenan. Por lo tanto pueden ser conectados directamente tanto a una fuente de tensión como a una fuente de corriente. También es posible la desconexión instantánea en ambos casos.



Respuesta de una resistencia: escalones de voltaje (arriba); de corriente (abajo).

La ecuación característica de la resistencia puede graficarse en el plano $v(t)/i(t)$ como:



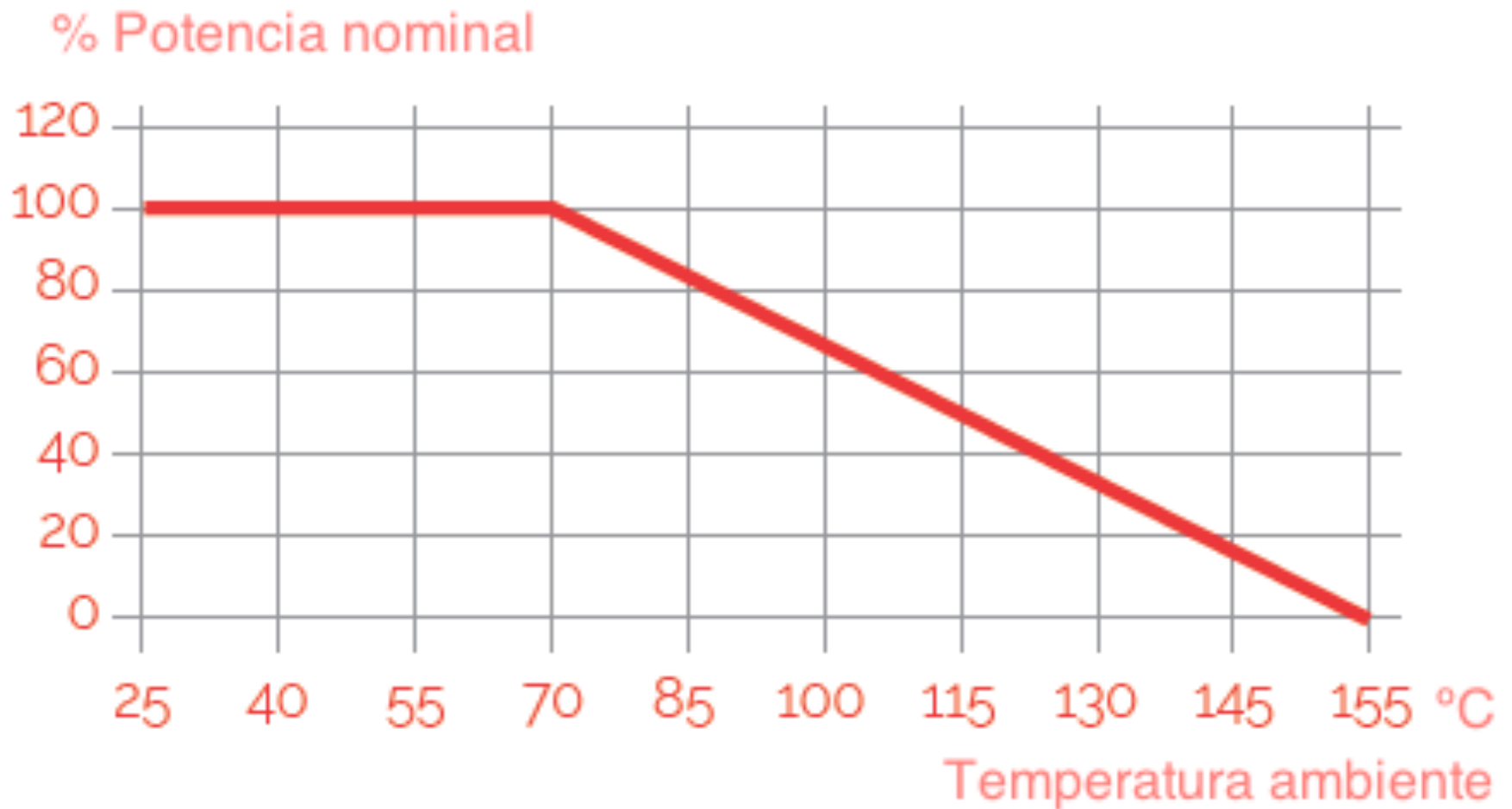
Característica i/v de una resistencia ideal

La potencia instantánea disipada en una resistencia es:

$$p_R(t) = i_R^2(t)R = \frac{v_R^2(t)}{R}$$

El fabricante debe indicar cual es la potencia máxima que puede disipar la resistencia sin sufrir daños cuando opera en las condiciones nominales de temperatura ambiente permitida.

La capacidad nominal de disipar calor de una resistencia sin sufrir daños depende de la temperatura del ambiente que la rodea, por lo que el fabricante de una resistencia de potencia debe incluir en sus especificaciones la curva de reducción ("de-rating") térmico del componente.



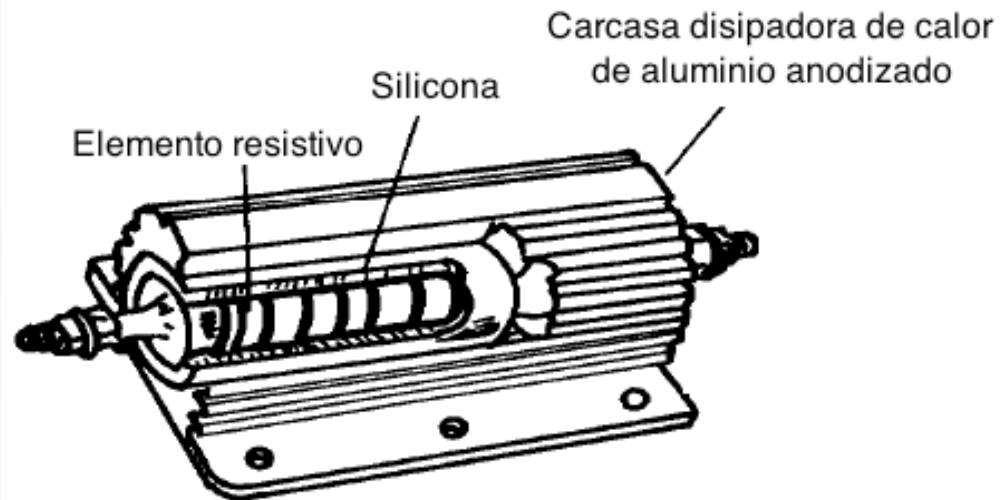
Grafica de potencia disipable en la resistencia vs. temperatura de la misma.

Tipos de resistencias.

Por su composición y forma de fabricación las resistencias pueden ser:

1.- De carbón:

1.a.-Prensado.

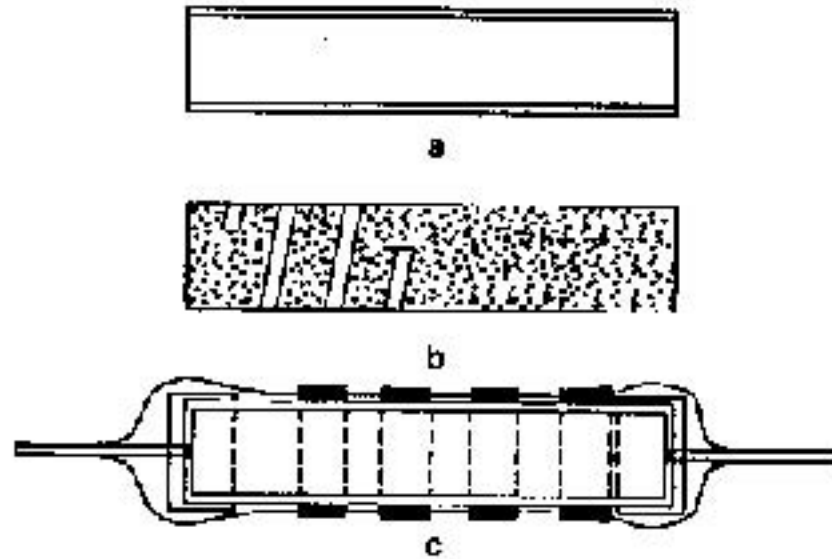


Resistencia de carbón prensado de 15W.

Son las de tecnología mas antigua y en su momento dominaron el mercado por ser las mas baratas. Su componente principal es el grafito, que se prensa en el interior de un tubo de cerámica (o de metal con aletas para las de potencia) que le da forma y consistencia y define su diámetro y longitud, fijando su resistencia. Su uso actual es reducido, porque son inestables con la temperatura, y la tolerancia de fabricación es igual o superior al 10%.

Tienen la ventaja de que la inductancia parásita es muy baja.

1.b.-De película de carbón.



Resistencia de película de carbón. A: Cilindro de soporte.

B: Cilindro recubierto con una capa de grafito.

C: Corte de la resistencia terminada mostrando la espiral de grafito que forma la resistencia.

La base de sustentación es un tubo de cerámica, sobre cuya superficie exterior se deposita una capa de grafito de espesor definido que luego se corta en espiral removiendo material hasta que se alcanza la resistencia deseada. El grafito se recubre con un esmalte para sellarlo. La tolerancia de fabricación es del 5% o mejor. Son usadas en aplicaciones de pequeña señal, y están limitadas a una potencia máxima de entre 2W y 5W.

2.-De metal.

metal	resistividad relativa (Cu = 1)	Coef. Temperatura a (20° C)
Aluminio	1.63	+ 0.004
Cobre	1.00	+ 0.0039
Plata	0.94	+ 0.0038
Constantan	28.45	± 0.0000022
Karma	77.10	± 0.0000002
Manganina	26.20	± 0.0000002
Cromo-Níquel	65.00	± 0.0004

Tabla de resistividades y coeficientes de temperatura de los metales y aleaciones que se usan para fabricar resistencias bobinadas.

Los metales puros tienen muy baja resistividad y se usan para resistencias especiales de medición de corrientes elevadas (shunt resistors).

Las aleaciones metálicas de alta resistividad se usan para fabricar las resistencias de propósitos generales.

2.-De película de metal.

Su construcción es similar a las de película de carbón, pero sobre el tubo de cerámica se deposita una capa de metal (resistencias de película metálica) o de óxido de metal (resistencias de película de óxido metálico) la cual se corta en espiral removiendo material hasta obtener la resistencia deseada. La película resistiva se cubre con esmalte para sellarla.

Son las mas usado en aplicaciones de pequeña señal de precisión hoy en día, ya que tienen mejores características de figura de ruido y de estabilidad que las de película de carbón, su coeficiente de temperatura es muy pequeño, del orden de 50ppm/°C (partes por millón/°Centígrado) y su valor es mas estable en el tiempo. La tolerancia de fabricación estándar es del 1%. La potencia máxima suele estar entre 2W y 5W.

Las de oxido metálico son similares, pero mas resistentes a la humedad y a otros factores ambientales debido a que el material ya está oxidado. Se usan preferentemente en aplicaciones especiales de tipo militar o médico.

2.2.- De alambre bobinado:



Corte parcial del recubrimiento de una resistencia de alambre bobinado unifilar (alambre resistivo en azul)

Se construyen bobinando un alambre metálico de alta resistividad con la longitud requeridas para lograr la resistencia deseada sobre un núcleo de cerámica, y luego se recubre con esmalte o con otra capa de cerámica.

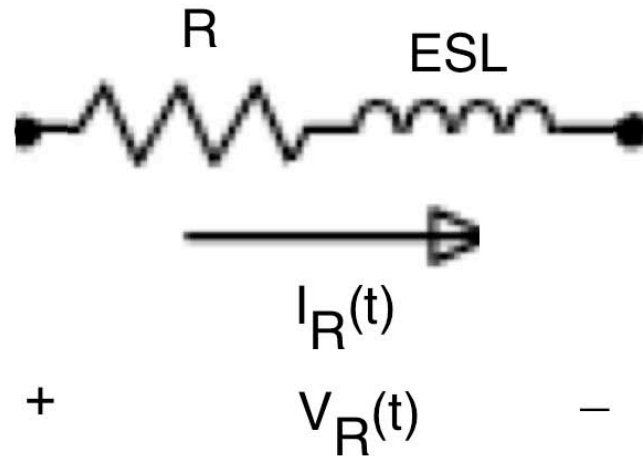
2.2.1.-bobinado unifilar.



Resistencia de alambre bobinado unifilar sin recubrimiento (arriba) y terminada con el recubrimiento (abajo).

Las resistencias de potencia mas usadas se construyen en base a un alambre de alta resistividad bobinado en forma unifilar sobre un núcleo cerámico, lo que inevitablemente significa que además de la resistencia deseada se forma una inductancia serie, ESL ("Equivalent Series Inductance") definida por las n vueltas del alambre.

El modelo a considerar en este caso es:



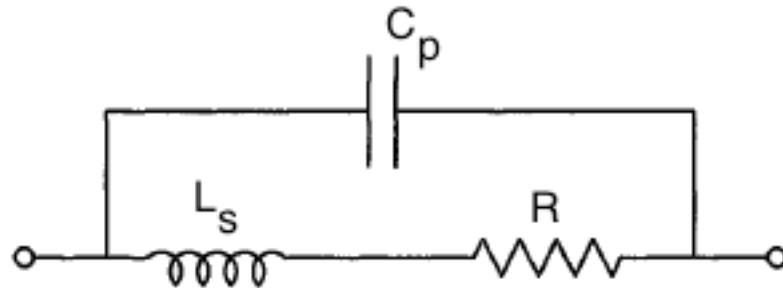
La ecuación a considerar cuando se requiere modelos con precisión el comportamiento del circuito es:

$$v_R(t) = i_R(t)R + ESL \frac{di_R(t)}{dt}$$

La inductancia parásita serie puede ser elevada, del orden de $10\mu\text{H}$ o mas y su efecto debe ser tomado en cuenta cuando la resistencia se usa en aplicaciones que la someten a un di/dt elevado.

La resistencias de película de metal también tienen una ESI, pero su valor es usualmente mucho mas bajo, del orden de 10nH/cm .

Como resultado de la interacción entre las cargas de una vuelta de la espiral en relación con las otras aparece además un efecto de capacitancia parásita en paralelo con la resistencia, .



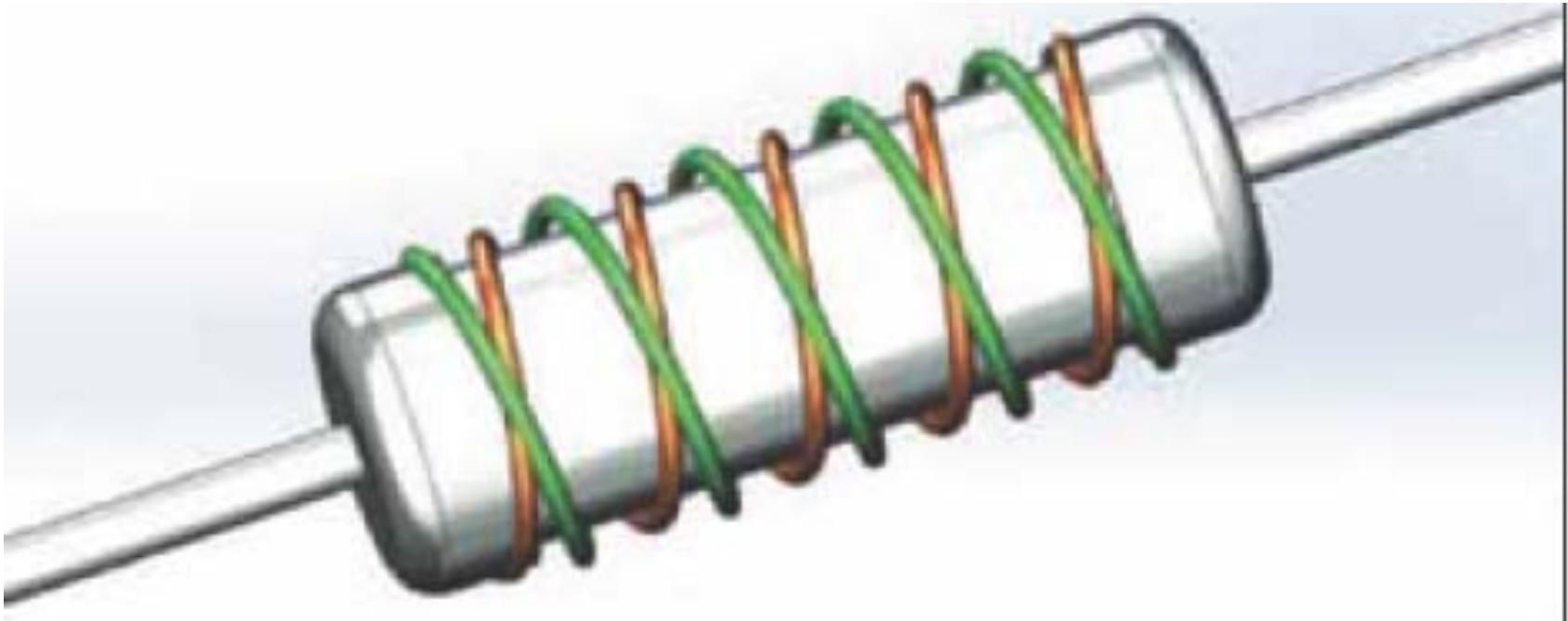
Modelo equivalente completo de una resistencia de alambre bobinado unifilar.

R : Valor de la resistencia deseada.

L_s : Valor de la inductancia "parásita" (indeseada) serie.

C_p : Valor de la capacitancia parásita (indeseada) en paralelo.

2.2.2.-Bobinado bifilar.



Resistencia no inductiva de alambre de enrollado bifilar o Aryton-Perry.

El valor de la inductancia se puede minimizar empleando un bobinado bifilar; la estructura es similar a las de bobinado unifilar, pero la segunda capa de alambre, de la misma longitud y el mismo número de vueltas se bobina de forma inversa, para que el campo magnético generado por la corriente en esta capa tenga sentido opuesto al generado por la primera, de forma que idealmente ambos campos se anulen por superposición. La eliminación total del componente inductivo parásito puede no ser posible, y el componente capacitivo parásito puede resultar mayor al haber mas capas de bobinado.

Este tipo de resistencias es mas costoso que el unifilar y por lo tanto menos usado.

Uso de resistencias en circuitos electrónicos de potencia.

Dado que las resistencias ideales son elementos puramente disipativos, y que en los circuitos electrónicos de potencia uno de los objetivos fundamentales es minimizar las pérdidas en el circuito, las resistencias solo son elementos auxiliares en la electrónica de potencia, que se emplean en sub-circuitos determinados, en los cuales por diversas razones técnicas es preciso disipar la energía que queda atrapada en ciertos componentes reactivos, o definir un valor de carga mínimo en convertidores de potencia, o como elementos sensores de temperatura o corriente.

En primera aproximación los componentes parásitos pueden ser ignorados y las inductancias, condensadores y resistencias pueden ser considerados componentes ideales.

Usar los modelos completos es necesario cuando se requiere precisión en los resultados, especialmente durante el diseño de las redes de control para alcanzar altos niveles de rendimiento en una aplicación específica.

			carbon composition	carbon deposited film	metal thin film	glazed thick film		metal oxide film	power wire wound
						LV	HV		
Resistance range	R	Ω	10-22M	1-10M	1-5M	1-2M	300k-1G	15-100k	0.1-1.5M
Watts @ 70°C	P_R	W	1	2	2.5	2	90	7	>300
Maximum temperature	T_h	°C	150	125	300	175	100	235	275
Working voltage	V_m	V	500	500	500	1k	100k	650	2.5k
Voltage coefficient	ϕ	$10^{-5}/V$	200	50	5	10	-	0.1	<1
Residual capacitance	C_R	pF	¼	½	-	-	$\frac{1}{10}$	½	-
Temperature coefficient	α	$10^{-5}/K$	-500 -1000	+50 -350	±350	±200	±150	±500	50
Thermal resistance	R_θ	K/W	80	27	90	35	13	26	0.3
Reliability	λ	$10^{-5}/hr$ fit	1	10	1		-	3	300
Stability $\frac{\Delta R}{R}$ %	@ $P_R, T_s = 70^\circ C, @ 10^3$ hours		5	3	5	½	2	3	3
Tolerance %			10	5		1	1	1	

Resumen de características de los tipos de resistencias de potencia.

2.- Termistores.

Aunque en primera aproximación durante un diseño circuital las resistencias se consideran como elementos ideales de valor constante, en realidad el valor exacto de la resistencia es una función de la temperatura: $R=f(T)$

En el modelo mas simplificado, la relación entre resistencia y temperatura se considera lineal:

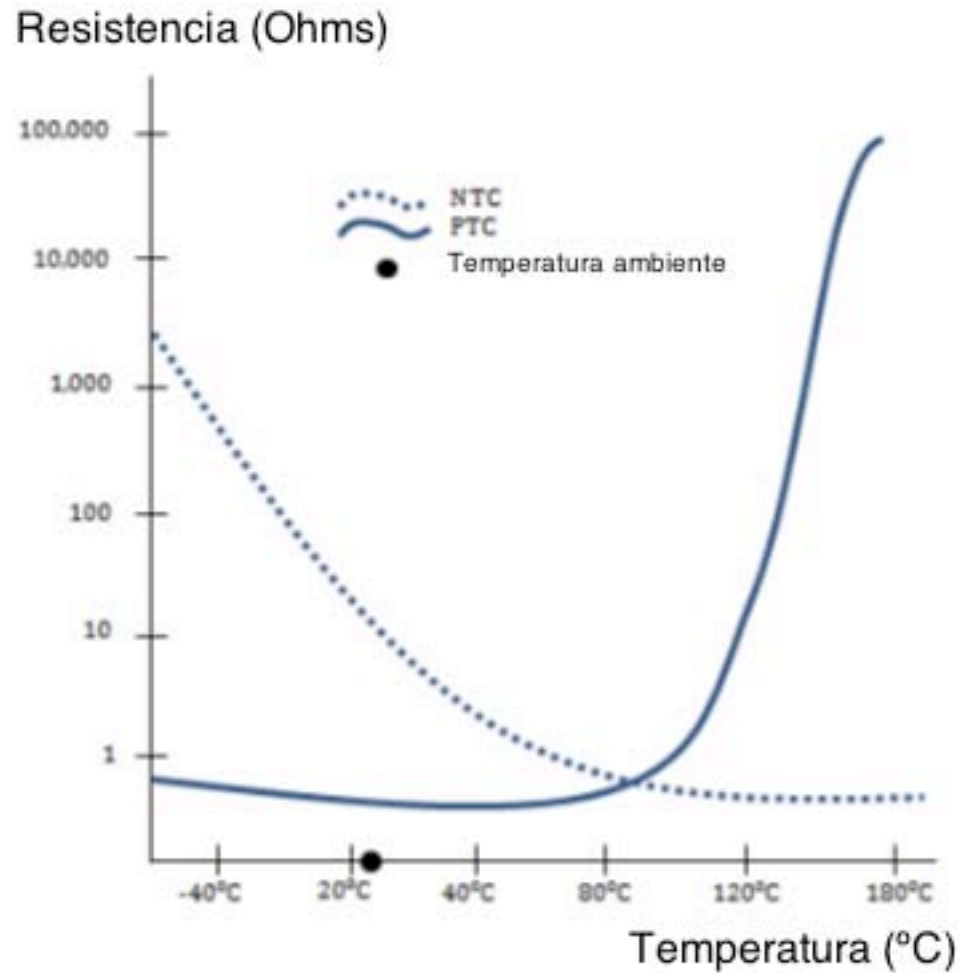
$$\Delta R(T) = k\Delta T$$

donde k es el coeficiente de temperatura de primer orden.

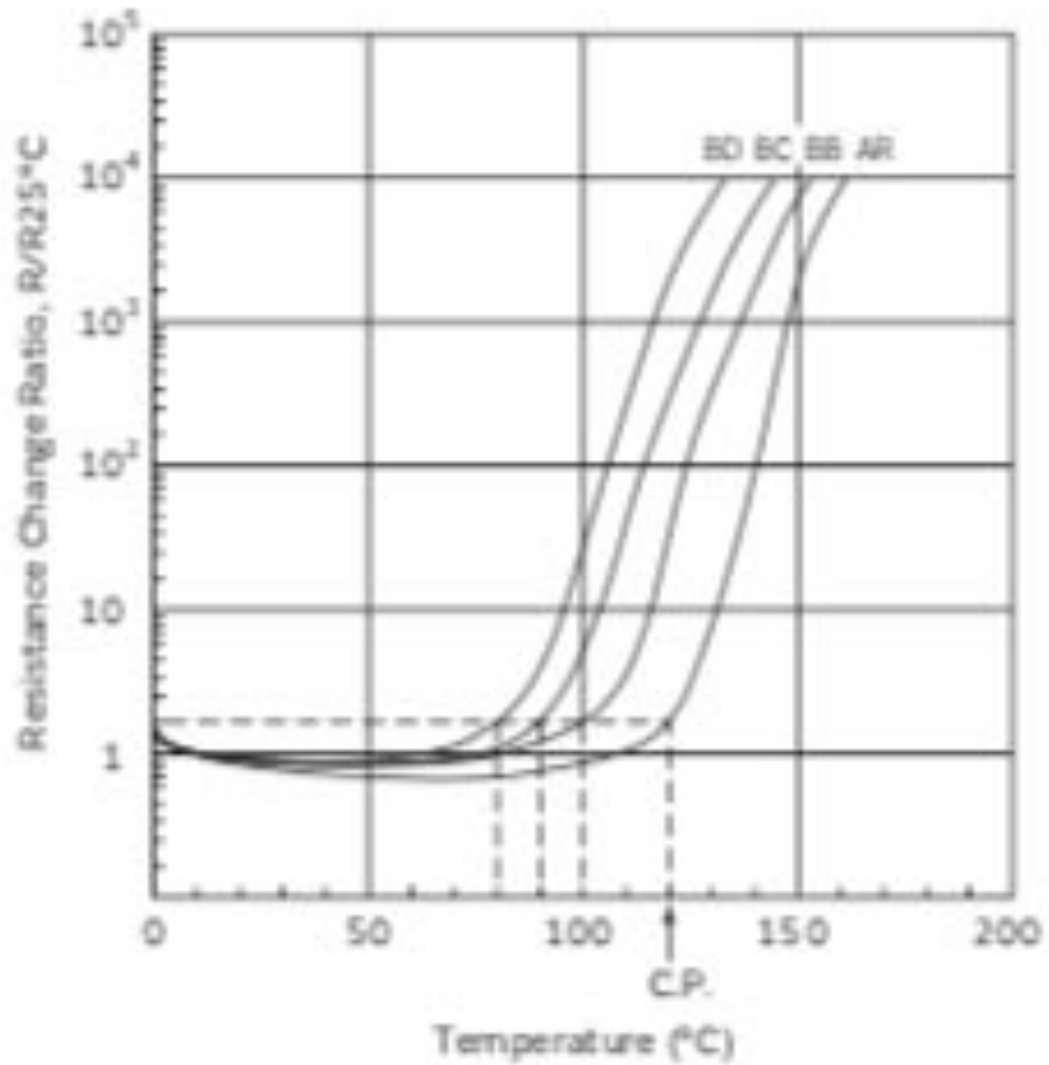
Por razones evidentes, las resistencias "normales" empleadas como elementos que deben tener valor constante en un circuito se diseñan y construyen de forma que su k sea lo mas cercana a cero que sea posible.

Sin embargo, hay aplicaciones, tales como la medición de temperatura o la protección de circuitos contra sobre corrientes, en las cuales el parámetro de interés es precisamente el cambio de resistencia con la temperatura.

En este caso el componente, llamado termistor para enfatizar esa propiedad, se diseña para lograr las mayores variaciones posibles.



Comparación de las curvas resistencia/temperatura típicas de termistores con k positiva (PTC) y k negativa (NTC).



Curvas características de "positores", cortesía muRata.

Los materiales donde k es positivo aumentan su resistencia con un incremento de la temperatura, y son por lo tanto llamados "termistores tipo PTC" (Positive Temperature Coefficient), aunque algún fabricantes se refiere a ellos como "posistores".

El punto de Curie (C.P. en la gráfica) es el punto donde el valor de la resistencia es el doble del valor a 25°C ; el eje vertical esta graduado en base a la relación $R_{\text{caliente}}/R_{25^{\circ}\text{C}}$

Los materiales donde k es negativo reducen su resistencia con un incremento de la temperatura, y son por lo tanto llamados "termistores tipo NTC" (Negative Temperature Coefficient).

La relación entre temperatura y resistencia en un termistor no es lineal.

Usualmente se emplea para describirla la "ecuación de Steinhart-Hart", que es una aproximación de tercer orden, dependiente de tres parámetros (a, b y c, los "parámetros de Steinhart-Hart") que son característicos de cada familia de termistores.

En esta aproximación la relación temperatura, T, en grados absolutos (°K) vs. la resistencia, R, en Ohms (Ω), es:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c [\ln(R)]^3$$

Despejando para R:

$$R = e^{\left[\left(x - \frac{y}{2} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(x + \frac{y}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]}$$

donde:

$$y = \frac{1}{c} \left(a - \frac{1}{T} \right)$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{b}{3c} \right)^3 + \left(\frac{y}{2} \right)^2}$$

En general, cuando la resistencia medida en un termistor se usa para determinar temperatura, el error es menor de 0,02°C en un rango de 200°.

Como un caso especial, los termistores tipo NTC suelen ser caracterizados mediante la "ecuación de parámetros B", que es una descripción tipo Steinhart-Hart, con los siguientes valores de los parámetros a, b y c:

$$a = \frac{1}{T_o} - \left(\frac{1}{B} \right) \ln R_o$$

$$b = \frac{1}{B}$$

$$c = 0$$

donde R_o es la resistencia a la temperatura de referencia
 $T_o=25^\circ$

Y, resolviendo para $R(T)$:

$$R(T) = R_o e^{-\left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T}\right) \frac{B}{T}} = r_\infty e^{\frac{B}{T}}$$

$$\text{donde } r_\infty = R_o e^{-\frac{B}{T_o}}$$

de forma que la temperatura $T(R)$ resulta:

$$T(R) = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{r_\infty}\right)}$$

En todo caso el termistor sigue siendo una resistencia (aunque de valor variable), sometida tanto a la ley de Ohm como a la de Joule.

Específicamente, si a los terminales del termistor de valor inicial R , se le aplica una tensión V , circulará una corriente de valor $I = \frac{V}{R}$, y se disipará en el dispositivo una energía dada por $P_e = VI = I^2 R$.

La energía disipada se manifiesta en forma de calor. Esto eleva la temperatura del termistor, cambiando el valor inicial de la resistencia.

El termistor alcanza el equilibrio térmico cuando la energía térmica generada en el termistor por unidad de tiempo se hace igual a la energía transferida al ambiente, por lo que no hay cambio adicional en la temperatura ni en la resistencia del termistor.

Todo termistor tiene una temperatura crítica máxima; operarlo por encima de esta temperatura causa daños destructivos.

El fabricante usualmente indica cual es la energía máxima que puede disipar el termistor en una determinada condición de temperatura ambiente y medio de intercambio de calor (usualmente aire quieto y/o aceite de transformador en movimiento).

Superar este valor en un tiempo determinado provoca el sobre calentamiento y, por consiguiente, la destrucción del tiristor.

Las aplicaciones de los termistores son múltiples, aunque se pueden agrupar en dos grandes bloques:

1.- Medición de la temperatura (usualmente con termistores NTC).

2.- Protección de circuitos contra sobre corrientes.

Las aplicaciones de protección, que son de interés en el contexto de la electrónica de potencia se pueden subdividir en:

a.- Limitar la corriente de salida. Se emplean termistores PTC, calibrados de forma que estén en equilibrio térmico con el ambiente a la temperatura nominal de operación del equipo operando con la corriente nominal máxima de salida.

En caso de falla la corriente aumenta, aumenta la disipación de potencia en el termistor, lo que aumenta su temperatura y con ella el valor de la resistencia; si la velocidad de crecimiento de la resistencia y su valor final son suficientemente altos, la corriente puede quedar limitada en un valor seguro, mientras se limpia la falla por otros procedimientos.

b.-Limitar la corriente de avalancha de inicio ("inrush current") producida cuando se aplica un escalón de tensión a partir de una fuente de baja impedancia de salida a una carga capacitiva o, en general, a una impedancia cuyo valor inicial es significativamente menor que su valor en condiciones estacionarias de operación.

En este caso se emplea un termistor NTC, cuyo valor resistivo a temperatura ambiente con el equipo apagado es suficientemente alto para limitar la corriente de encendido a un valor tolerable; esta corriente calienta el termistor, reduciendo el valor de la resistencia ; idealmente la situación se debe estabilizar cuando la corriente alcanza el valor nominal, y este es suficiente para mantener la temperatura del NTC en un valor que produce una resistencia despreciable.