

Práctica no. 2: Diseño y caracterización de un regulador lineal de tensión para alimentar memorias DDR. Estudio Analítico.

El Objeto de esta práctica es el diseño de reguladores lineales de bajo nivel de tensión regulada y alta corriente. Unos de los primeros estándares (JEDEC desde el año 2007), que nos lleva a las tecnologías LVTTL (Low Voltage TTL) y LVCMOS (Low Voltage CMOS) para circuitos digitales, es la alimentación de 3.3 Voltios. Hoy, es una fuente de alimentación básica, junto con la fuente clásica de 5 Voltios en muchos dispositivos. Sin embargo, el desarrollo de memorias semiconductoras CMOS con longitudes de canal por debajo de los 22nm y esquemas de polarización subumbral para muy bajo consumo, nos ha llevado a un nuevo esquema de alimentaciones que van desde los 2.5 Voltios requeridos por las memorias DDR SDRAM (**D**ouble **D**ata **R**ate **S**ynchronous **D**ynamic **R**andom-**A**ccess **M**emory)(4.2 Gbps), los 1.8 Voltios de las memorias DDR2 (8.5 Gbps), los 1.5 Voltios de las memorias DDR3 (12.8 Gbps), los 1.2 Voltios de las memorias DDR4 (25.6 Gbps) y, finalmente, para el año 2021 (en el mercado a partir de tercer trimestre de 2021), las memorias DDR5 (51.2Gbps) con una alimentación de 1.1 Voltios.

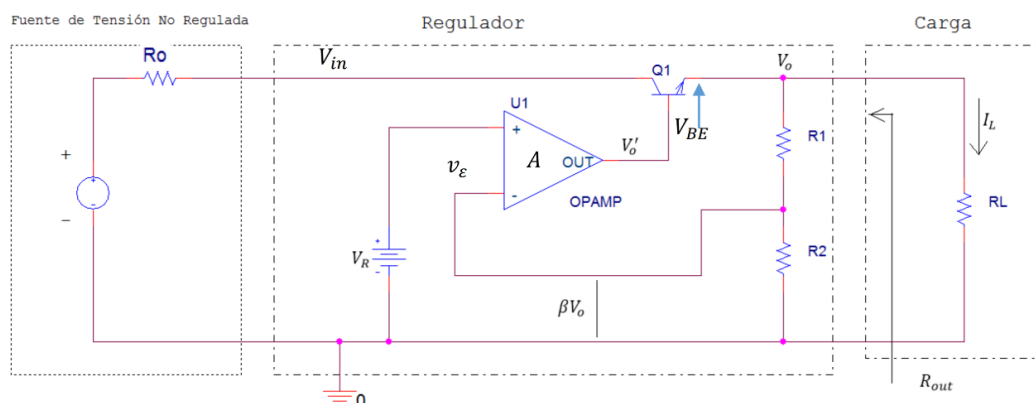
Vamos a diseñar un regulador lineal de tensión básico para alimentar memorias DDR5 a una tensión de 1.1Voltios. [El ejercicio a entregar debe hacerse para alimentar una memoria DDR4 \(Ver las especificaciones en la Hoja de Resultados\).](#)

Especificaciones:

1. Tensión nominal de entrada sin regular: $V_{in} = 4 \text{ Voltios}$ con posibles fluctuaciones de $\pm 1 \text{ Voltio}$.
2. Tensión de salida regulada: $V_o = 1.10 \text{ Voltios}$.
3. Máxima corriente en carga: $I_{RL_max} = 50mA$.

Con el objeto de construir un regulador de tensión de precisión, vamos a utilizar el circuito propuesto en el apartado 5.6.3 que hace uso de un amplificador operacional como comparador lineal con un transistor bipolar (para el suministro de la corriente requerida), y vamos a calcular analítica y experimentalmente los siguientes parámetros:

- a) El Factor de Regulación de entrada: S_V
- b) La Resistencia de Salida: R_{out}
- c) El Coeficiente de Temperatura (sólo analíticamente): S_T



De acuerdo con las ecuaciones (5.61), (5.62) y (5.63), si la ganancia en lazo abierto del AO es muy grande, la tensión de salida V_o es igual a la tensión de referencia V_R salvo un factor de escala que depende de las resistencias R_1 y R_2 :

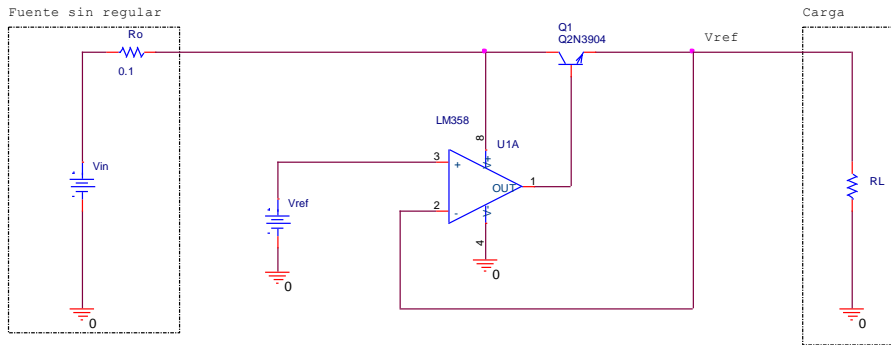
$$V_o = \frac{V_R}{\beta}$$

Siendo

(1)

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Si hacemos $R_1 = 0$ y $R_2 \gg$ muy grande podemos simplificar el circuito anterior al siguiente:



La tensión de referencia V_{ref} (de muy baja corriente), aparecerá regulada en los extremos de la Carga con la corriente exigida y suministrada por la Fuente de Tensión sin regular V_{in} a través del transistor bipolar Q1.

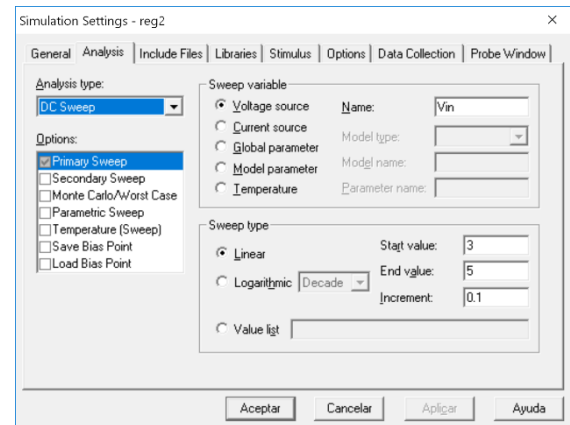
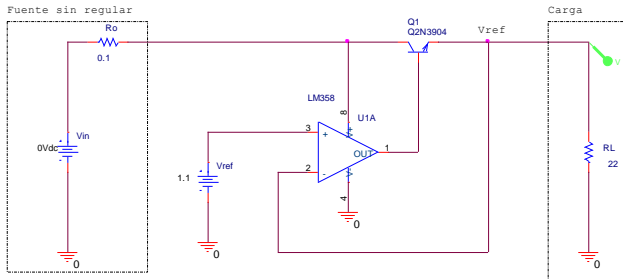
En el laboratorio y con el objeto de minimizar componentes usaremos la referencia de tensión programable que proporciona el dispositivo Analog Discovery 2. Esta referencia programable está basada en el conversor D/A de Analog Device AD5645R con resolución de 14 bits y deriva térmica de 10ppm/°C sobre una referencia de tensión basada en band-gap de 2.5 Voltios. Es una referencia realmente estable.

Determinación analítica de los parámetros del Regulador S_V , R_{out} y S_T .

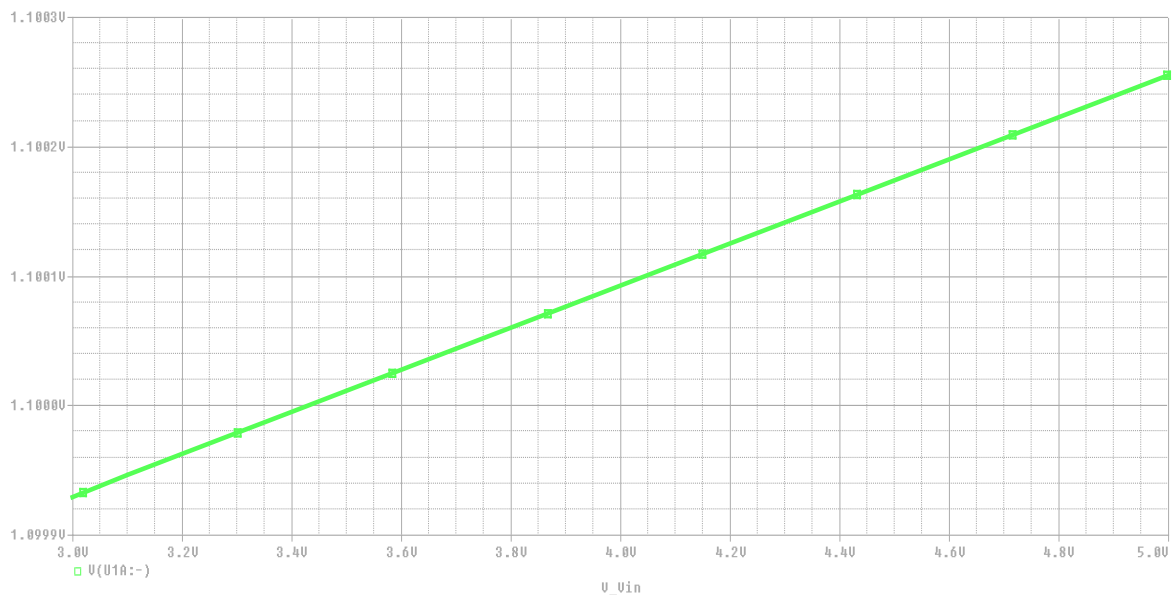
1. **Coefficiente de regulación S_V .** La expresión (5.11) nos muestra que el factor o coeficiente de regulación mide los cambios en la tensión de salida en relación con los cambios en la tensión de entrada manteniendo constantes los cambios en la corriente y en la temperatura:

$$S_V = \left. \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \right|_{I_L, T} \quad (1)$$

Fijando el valor de R_L para que circule una corriente constante y simulando a la temperatura estándar (27°C), hagamos un análisis DC_Sweep en la tensión de entrada de 3 a 5 Voltios en intervalos de 100mV:

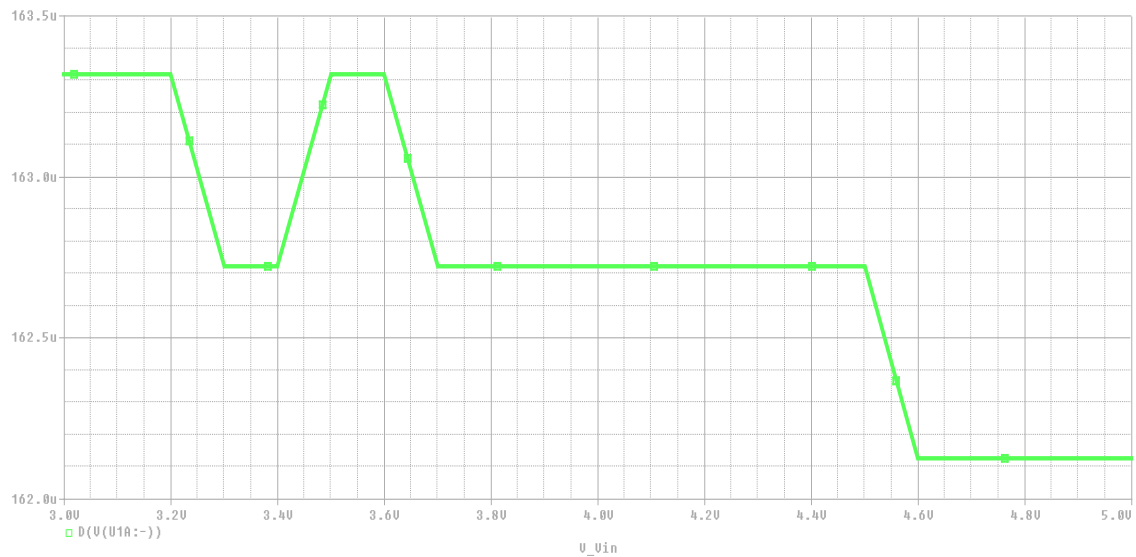


La relación entre la tensión de entrada (que hacemos cambiar entre 3 y 5 Voltios) y la tensión de salida en carga es:



Observemos que los cambios en la salida aparecen en la diezmilésima y la respuesta es lineal.

El coeficiente de regulación será la derivada de la recta anterior:



Siendo su valor de: $S_V = 162.7 \mu V/V$. Observemos que hemos tomado el valor en la tensión nominal de 4 voltios.

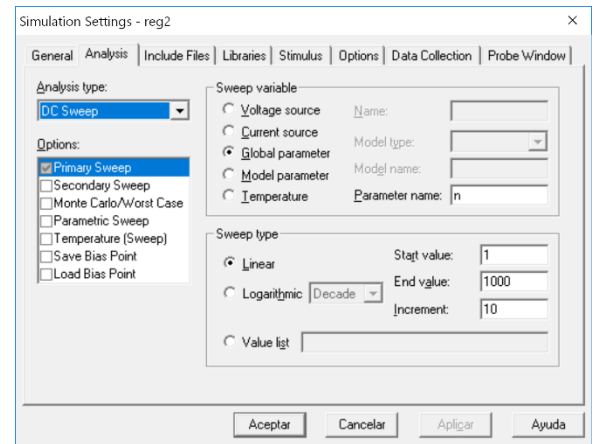
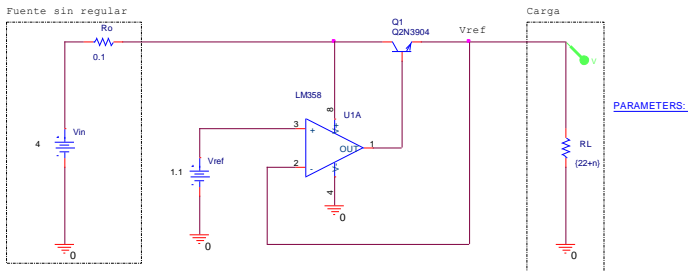
2. **Resistencia de Salida: R_{out} .** El coeficiente R_{out} o Resistencia de salida se define como la medida de los cambios en la tensión de salida respecto de los cambios en la corriente de salida manteniendo constantes la temperatura y la tensión de entrada:

$$R_{out} = \left. \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_{out}} \right|_{V_{in}, T} \quad (2)$$

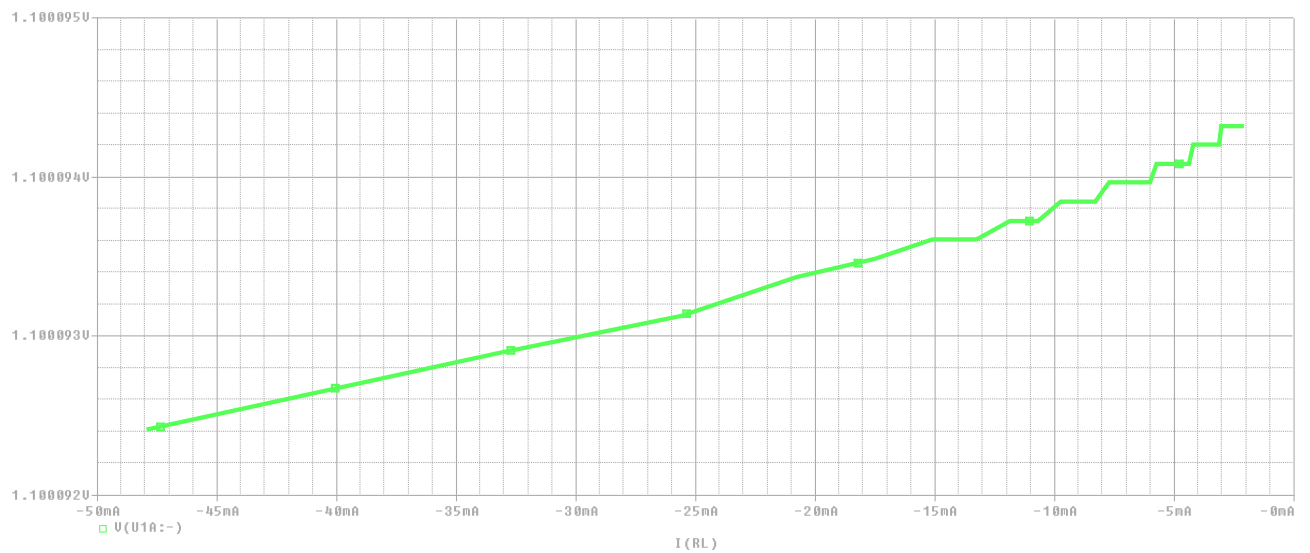
Para hacer esta medida con el simulador hemos de mantener la tensión de entrada constante (la nominal de 4 voltios), y provocar cambios en RL para estudiar la dependencia entre los cambios de la tensión de salida frente a los cambios en la corriente de salida.

La forma de hacer esto es mediante un análisis paramétrico en el que hacemos cambiar el valor de RL entre su valor mínimo (corriente de salida máxima por especificaciones), y un valor suficientemente alto.

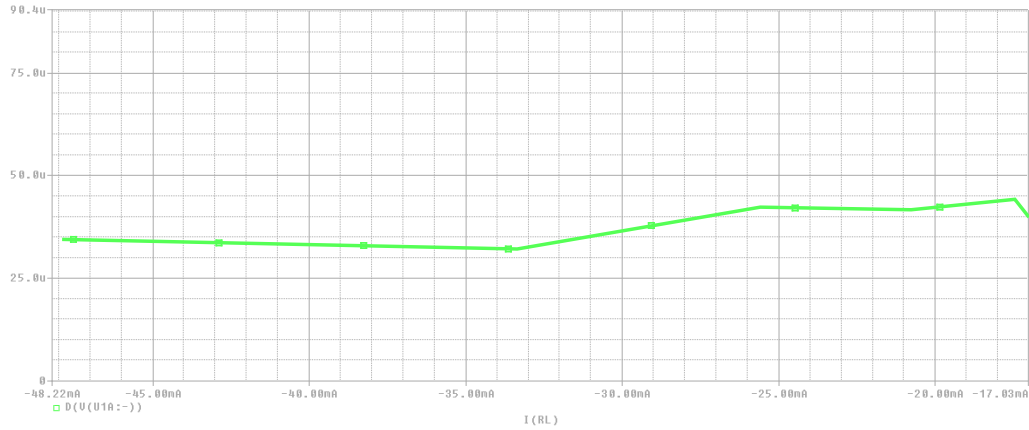
Partiendo del valor de R_L sumemos incrementos de 10 ohmios hasta alcanzar los 100 ohmios:



Tras el barrido paramétrico tenemos:



Derivando para obtener el valor de la resistencia tenemos:



Como la corriente que circula por el regulador puede ser variable entre un valor pequeño y el valor máximo (por especificaciones), habría que definir el coeficiente Resistencia de salida para una corriente en concreto que podría ser la máxima o cualquier otra. Para la corriente máxima tenemos un valor de

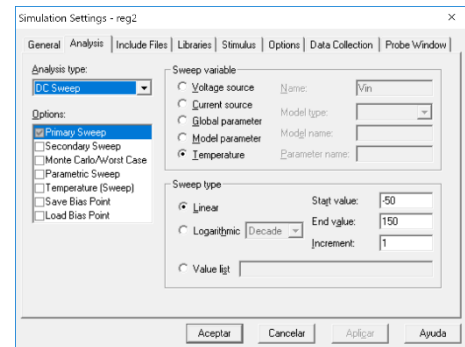
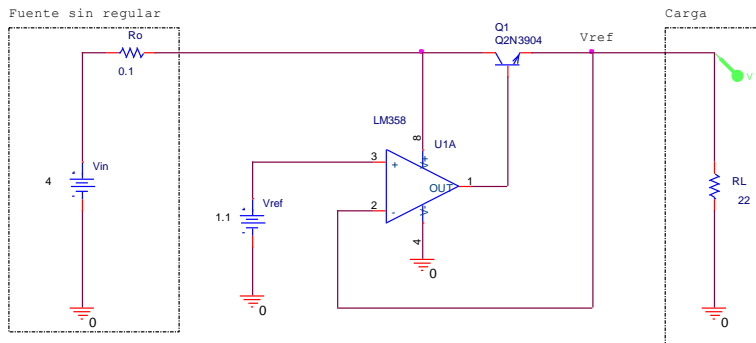
$$R_{out} = 30\mu\Omega$$

3. **Coefficiente de temperatura: S_T .** El coeficiente de Temperatura se define como los cambios en la tensión de salida frente a los cambios en la temperatura manteniendo constante la Tensión de entrada y la Corriente de salida:

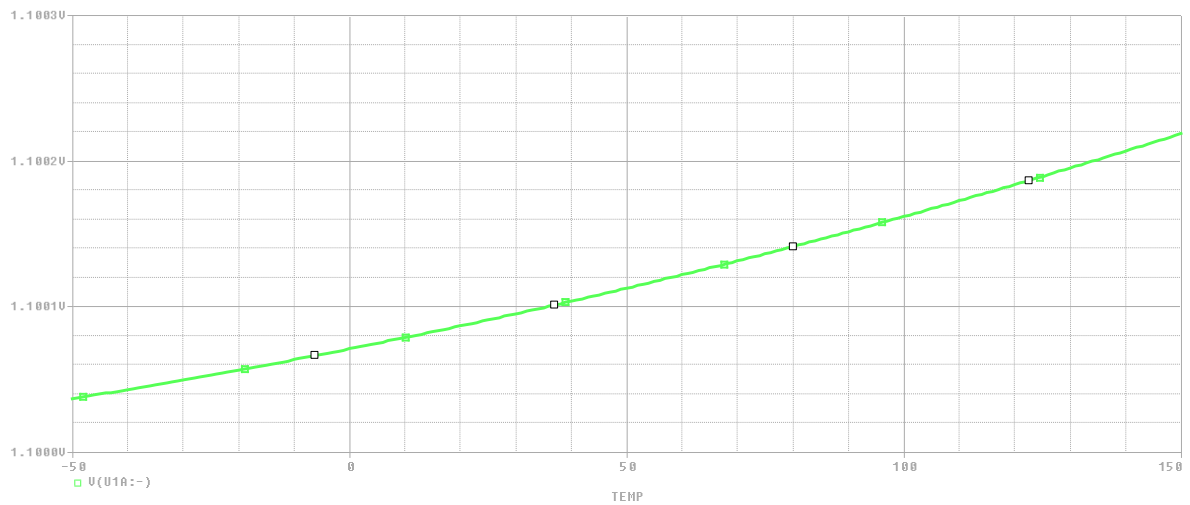
$$S_T = \left. \frac{\Delta V_{out}}{\Delta T} \right|_{V_{in}, I_L} \quad (3)$$

Para conseguir realizar la medida con el simulador realicemos un barrido de temperatura manteniendo la resistencia de carga R_L y manteniendo la tensión de entrada V_{in} en su valor nominal

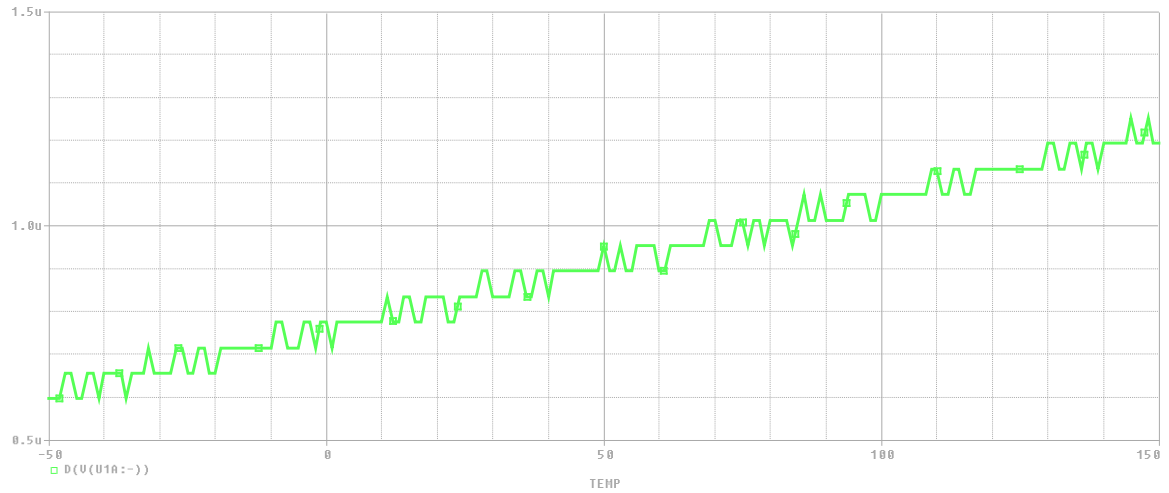
Hagamos, por ejemplo, un barrido térmico desde -50°C a $+50^{\circ}\text{C}$ a la tensión nominal de $V_{in} = 4\text{Volts}$.



El resultado muestra una dependencia con la temperatura de pendiente positiva:



Y la derivada nos dará el coeficiente de temperatura. Observemos que el coeficiente no es constante y hay que especificarlo a una temperatura concreta.



Por ejemplo, el coeficiente de temperatura a temperatura ambiente (27 °C) es $S_T = 0.83\mu V/^{\circ}C$.