

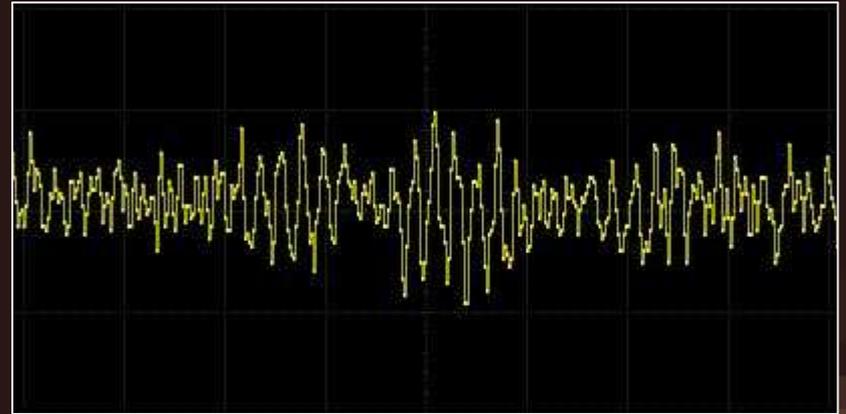
Ruido Térmico

Joaquín Scala
Iván Tiviroli
Felipe Cabrera

Motivación

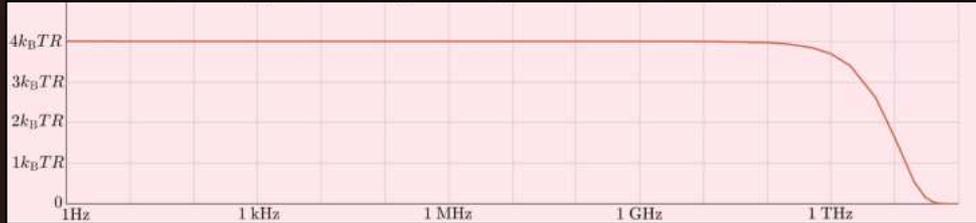
Vemos y medimos ruido en todas las prácticas de laboratorio, nos da a pensar...

- ¿Qué es realmente?
- ¿De qué variables depende?
- ¿Cómo nos afecta?



Ruido de Johnson-Nyquist

(-) Ruido Blanco (espectro uniforme)

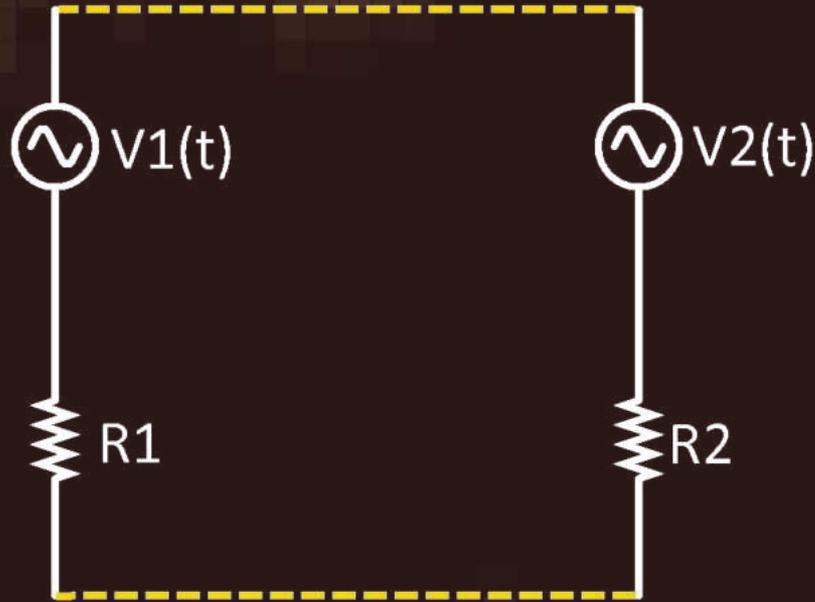


(-) Presente en todos los materiales resistivos

(-) No depende de fuentes externas

(-) Distribución Gaussiana

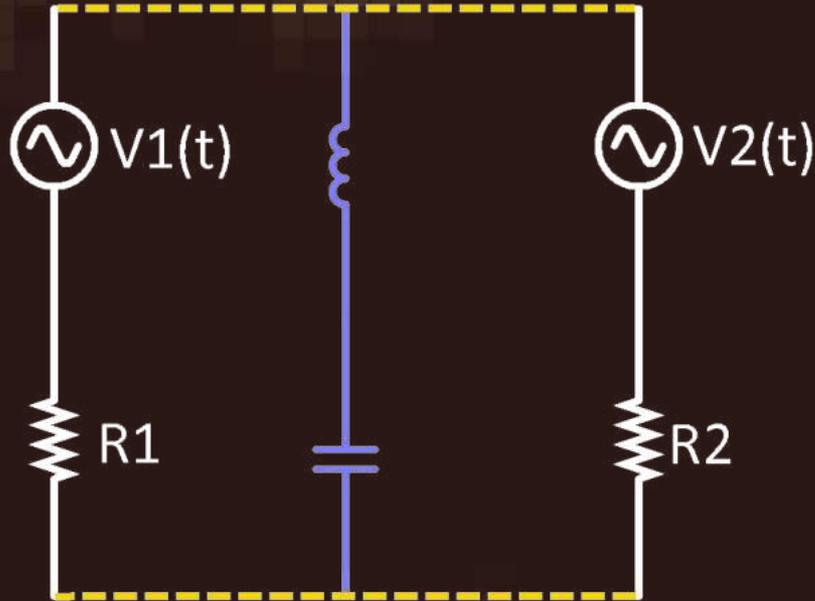
Experimento de Nyquist (1928)



Equilibrio térmico a $T \Rightarrow \langle P_{\text{TOTAL}} \rangle = 0$

$$\begin{aligned} \langle P_1 \rangle &= \langle P_2 \rangle \\ \langle V_2^2 \rangle R_1 &= \langle V_1^2 \rangle R_2 \end{aligned}$$

Experimento de Nyquist



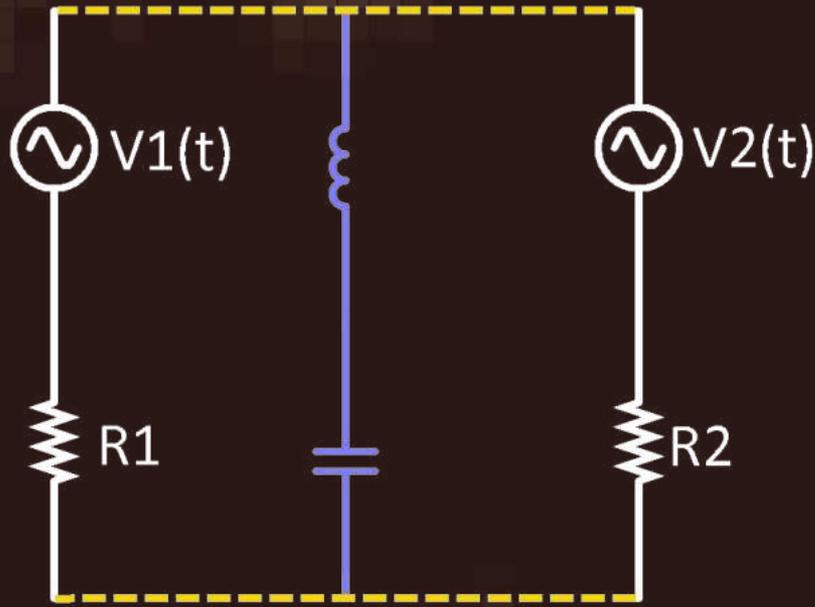
Equilibrio térmico a $T \Rightarrow \langle P_{\text{TOTAL}} \rangle = 0$

$$\begin{aligned}\langle P_1 \rangle &= \langle P_2 \rangle \\ \langle V_2^2 \rangle R_1 &= \langle V_1^2 \rangle R_2\end{aligned}$$

¡El espectro del ruido deber ser el mismo para ambas resistencias!

$S_R(f)$: densidad espectral

Experimento de Nyquist



Equilibrio térmico a $T \Rightarrow \langle P_{\text{TOTAL}} \rangle = 0$

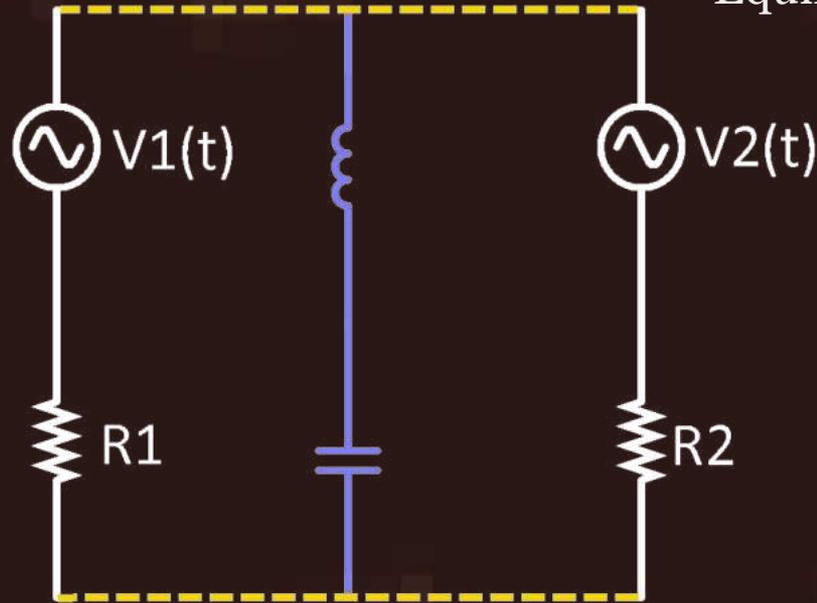
$$\begin{aligned}\langle P_1 \rangle &= \langle P_2 \rangle \\ \langle V_2^2 \rangle R_1 &= \langle V_1^2 \rangle R_2\end{aligned}$$

Como debe valer para cualquier frecuencia:

$$\begin{aligned}S_{R2}(f) R_1 &= S_{R1}(f) R_2 \\ \frac{S_{R2}(f)}{R_2} &= \frac{S_{R1}(f)}{R_1}\end{aligned}$$

$$\Rightarrow S_R(f) \propto \alpha(T) R$$

Experimento de Nyquist



Equilibrio térmico a T:

Para cualquier grado de libertad:

$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} k_B T$$

Energía en el capacitor:

$$\langle E_C \rangle = \frac{1}{2} C \langle V_C^2 \rangle = \frac{1}{2} k_B T$$

En un RC, es fácil ver que se cumple si:

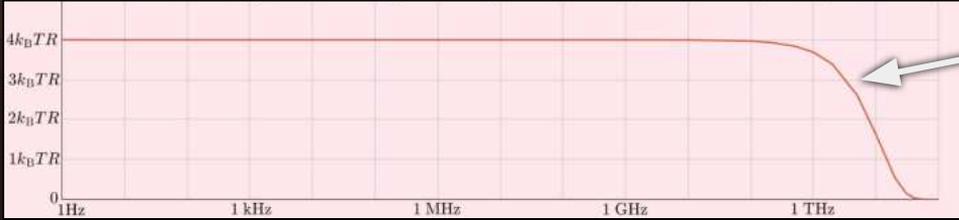
$$S_R(f) = 4k_B T R$$

Ruido de Johnson-Nyquist

$$\langle V^2 \rangle = \frac{1}{\tau} \int_{\tau} V^2(t) dt \approx \int_{\Delta f} S(f) df = 4k_B T R \Delta f$$



Ruido de Johnson-Nyquist



Empiezan a dominar efectos cuánticos

$$hf \gg k_B T$$

Temperatura baja o frecuencia alta

Expresión completa:

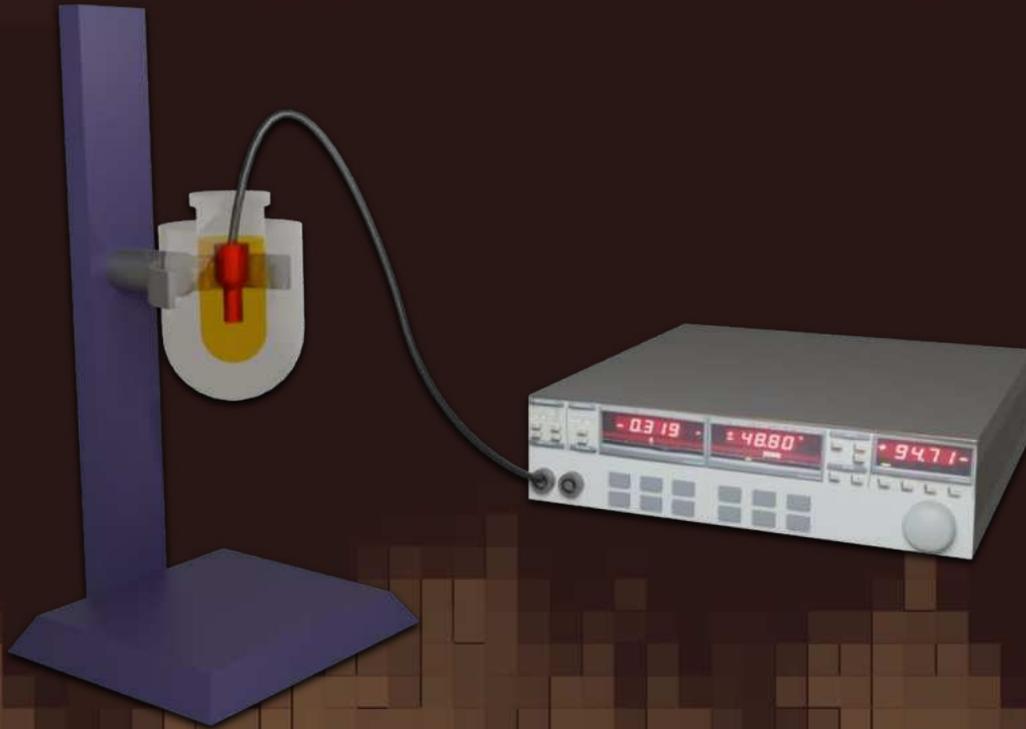
$$S_V(f) = 4R \left(\frac{hf}{2} + \frac{hf}{e^{hf/k_B T} - 1} \right)$$

En el límite $T \rightarrow 0$:

$$S_V(f) \rightarrow 2Rhf$$

¡Hay fluctuaciones a temperatura 0!

Armado Experimental



Objetivos:

- Caracterizar el espectro (dependencia con la frecuencia)
- Medir la dependencia con la Resistencia y Temperatura
- Hallar la constante de Boltzmann (k_B) asociada

Armado Experimental

Mediciones: Queremos medir $\langle V^2 \rangle$



- El voltaje se distribuye igualitariamente entre X e Y.

$$\langle V^2 \rangle = \langle X^2 \rangle + \langle Y^2 \rangle$$

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(X_i - \bar{X}^0 \right)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i)^2 = \langle X^2 \rangle$$

- Entonces podemos medir:

$$\langle V^2 \rangle = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2$$

Resultados

Barrido de frecuencias

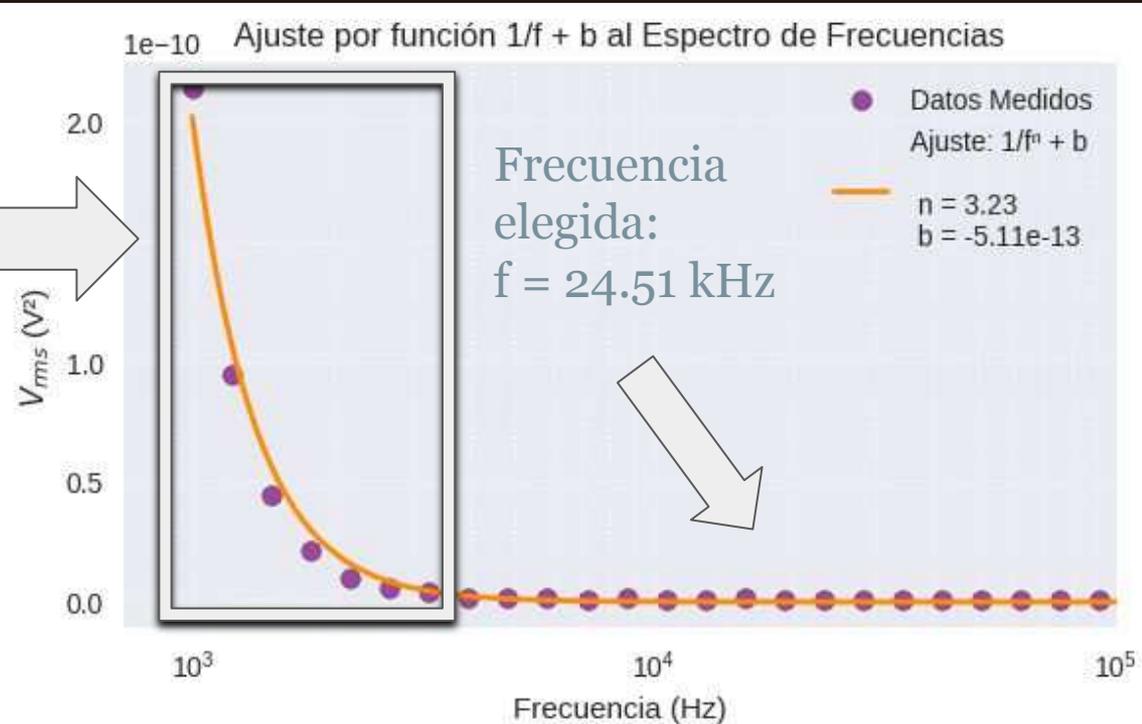
Región donde predomina el ruido $1/f$

- Ruido rosa
- Ruido Browniano

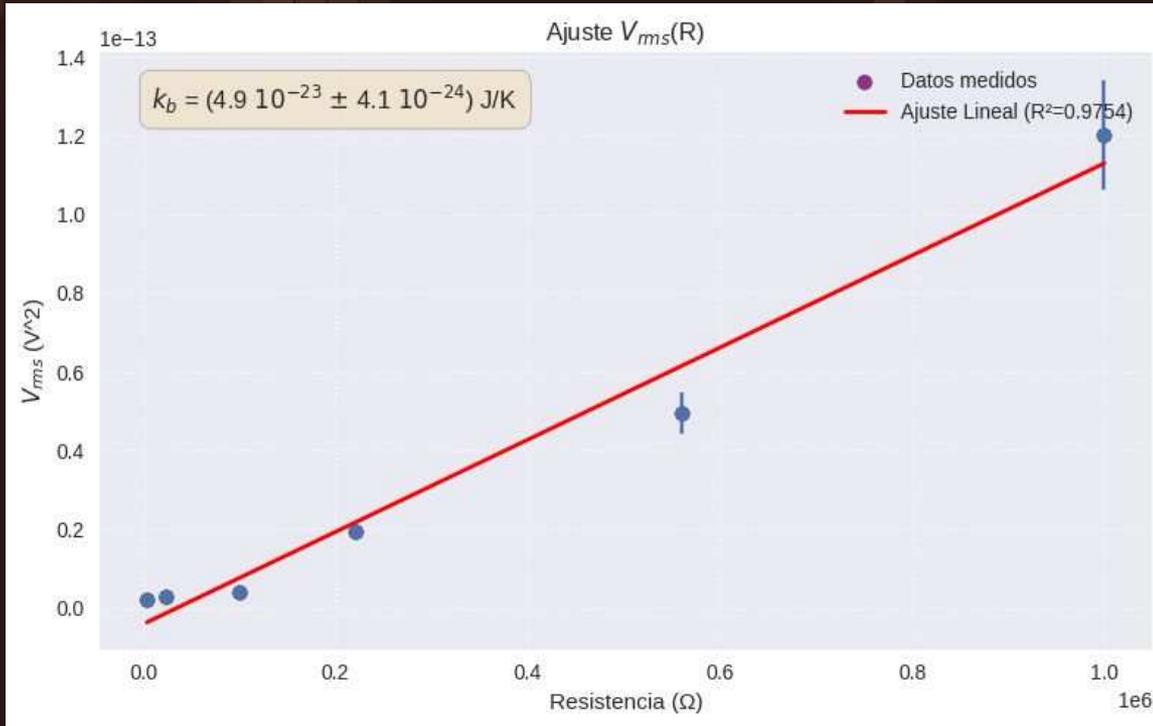
Time constant elegida

$\tau = 3 \text{ ms}$

Pendiente = -24 dB/oct

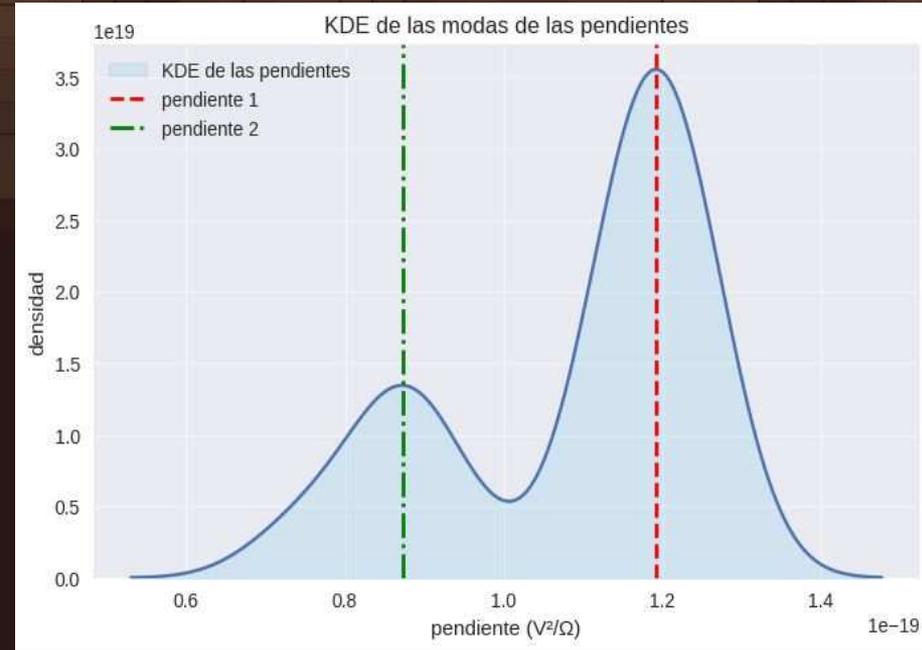
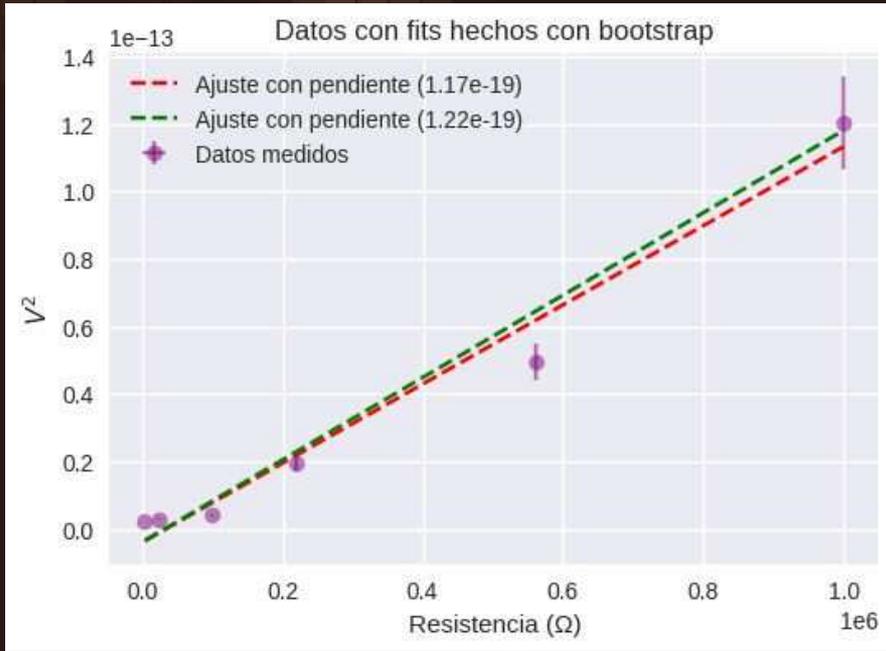


Variando resistencias



- Valor tabulado de k :
 $k_b = 1.38 \cdot 10^{-23} \pm 5.10 \cdot 10^{-28} \text{ (J/K)}$
- Valor calculado:
 $k_b = 4.9 \cdot 10^{-23} \pm 4.1 \cdot 10^{-24} \text{ (J/K)}$

Bootstrapping



Valor tabulado:

$$k_b = 1.38 \cdot 10^{-23} \pm 5.10 \cdot 10^{-28} \text{ (J/K)}$$

$$k_1 = 5.3 \cdot 10^{-23} \pm 3.2 \cdot 10^{-23} \text{ (J/K)}$$

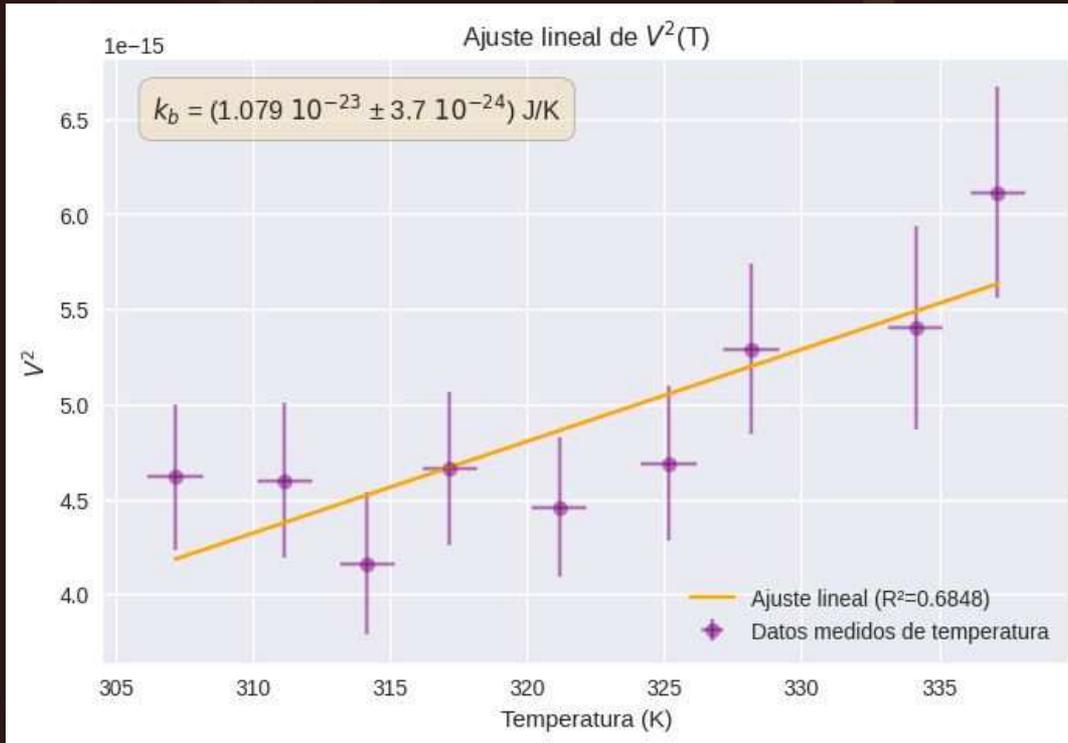
$$k_2 = 5.1 \cdot 10^{-23} \pm 5.4 \cdot 10^{-23} \text{ (J/K)}$$



Presenta diferencias significativas con k_b

No presenta diferencias significativas con k_b

Variando temperatura



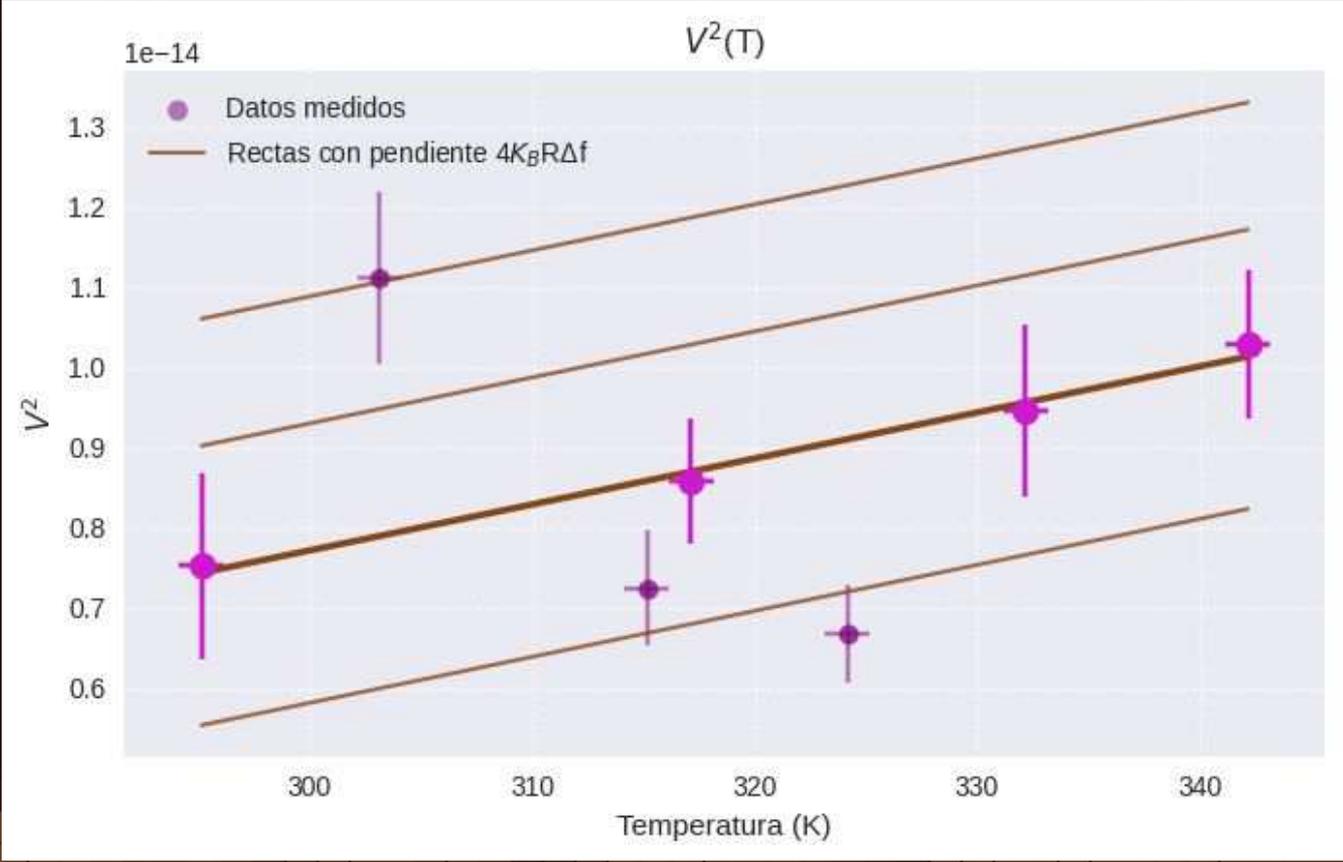
Valor tabulado de k :

$$k_b = 1.38 \cdot 10^{-23} \pm 5.10 \cdot 10^{-28} \text{ (J/K)}$$

Valor calculado:

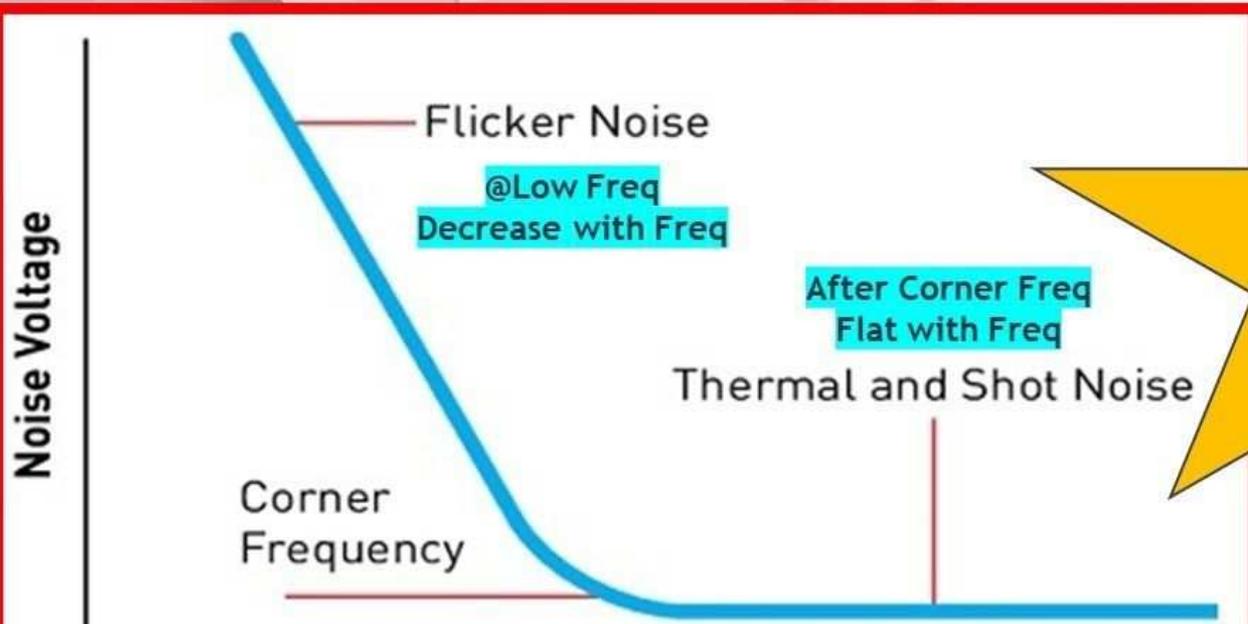
$$k_b = 1.08 \cdot 10^{-23} \pm 3.70 \cdot 10^{-24} \text{ (J/K)}$$

Proyección de la recta esperada



Conclusiones

Noise in Communication System. Part 3. Thermal/Johnson-Nyquist/White Noise, Shot Noise & Flicker Noise



How Noise Voltage Changes with Freq



Technologies Discussion Channel



"so every single particle has 3 times the energy of a fucking big ass capacitor"

I smiled. That moment captured the absurdity and beauty of thermal physics all at once.