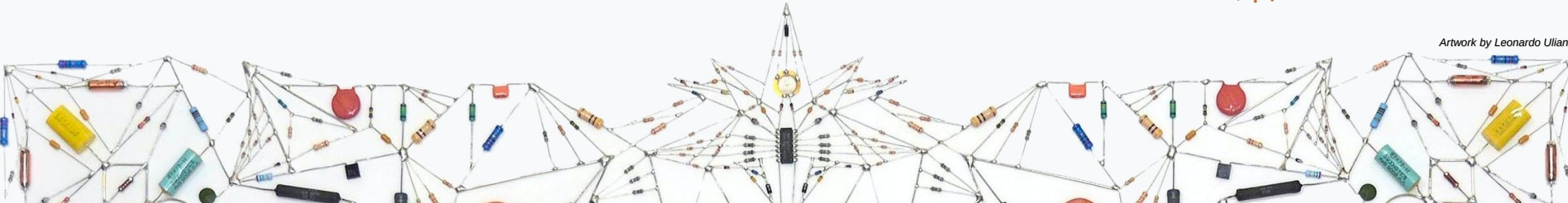


Termodinámica estocástica en circuitos electrónicos

Nahuel Freitas



Artwork by Leonardo Ulian



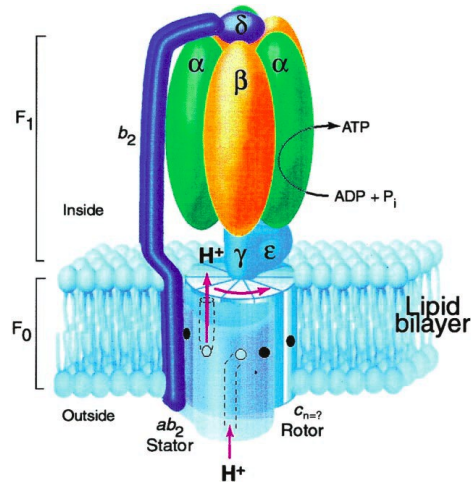
Resumen:

- **Termodinámica estocástica, que es y para que sirve**
- **Termodinámica del procesamiento de información**
- **Aplicaciones a circuitos electrónicos y nuevos esquemas de cómputo**
- **Otros proyectos pasados y futuros**

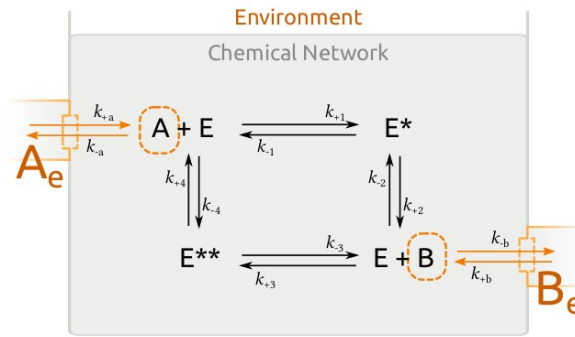
Termodinámica estocástica

Un formalismo **general** para el estudio de *procesos termodinámicos fuera del equilibrio* en la *micro/meso escala*.

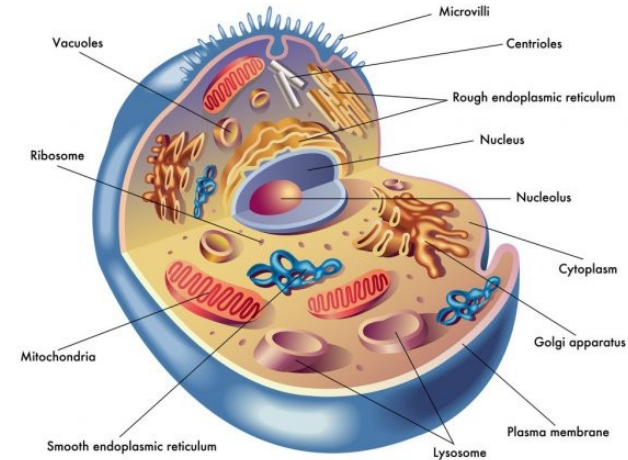
Aplicaciones en: **biología, química, circuitos electrónicos**, partículas coloidales, sistemas extensos (reacción-difusión, materia activa, ...), etc.



Motores moleculares



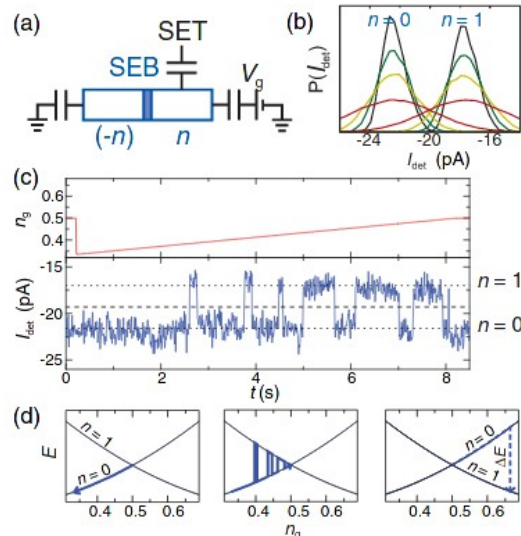
Redes de reacciones químicas: metabolismo, regulación genética, computación química, etc..



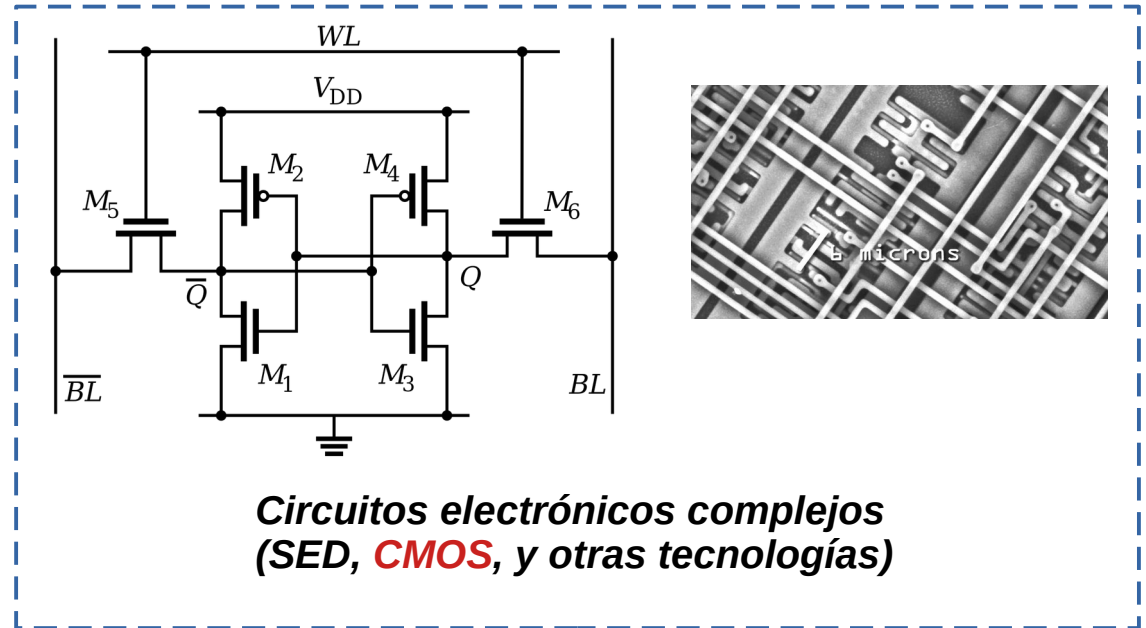
Termodinámica estocástica

Un formalismo **general** para el estudio de *procesos termodinámicos fuera del equilibrio* en la *micro/meso escala*.

Aplicaciones en: **biología, química, circuitos electrónicos**, partículas coloidales, sistemas extensos (reacción-difusión, materia activa, ...), etc.



Dispositivos de electrones únicos



Termodinámica estocástica

i) Un sistema con estados discretos $\{i\}$



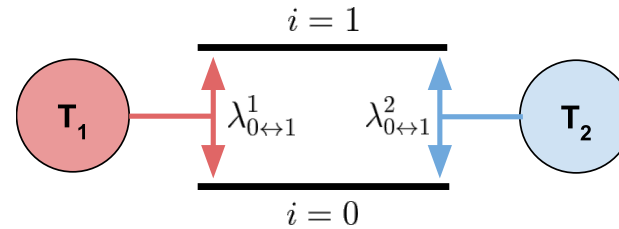
e_i
Energía

n_i
Número de
partículas

s_i
Entropía
(en caso de tener
estructura interna)

ii) Una dinámica estocástica:

$$d_t p_i = \sum_{\nu, j} \lambda_{ij}^{\nu} p_j$$



$\lambda_{ij}^{\nu}(t)dt$ probabilidad de observar la transición $j \rightarrow i$ inducida por el mecanismo ν en el intervalo $(t, t + dt)$

iii) Consistencia termodinámica:

Reversibilidad microscópica: $\lambda_{ij}^{\nu} \neq 0 \Rightarrow \lambda_{ji}^{\nu} \neq 0$

Balance detallado **local**:

$$\lambda_{ij}^{\nu} / \lambda_{ji}^{\nu} = e^{-(e_i - e_j - w_{ij}^{\nu}) / k_b T_{\nu}}$$



Trabajo no-conservativo

Termodinámica estocástica

$$E = \sum_i p_i e_i$$

Energía

$$S = -k_b \sum_i p_i \ln p_i$$

Entropía

$$F = E - TS$$

Energía Libre

Primera ley:

$$d_t E = \dot{W}_d + \dot{W}_{nc} + \dot{Q}$$

$$\dot{W}_d = \sum_i p_i \partial_t e_i$$

$$\dot{W}_{nc} = \sum_{\nu, i \neq j} \lambda_{ij}^\nu p_j w_{ji}^\nu$$

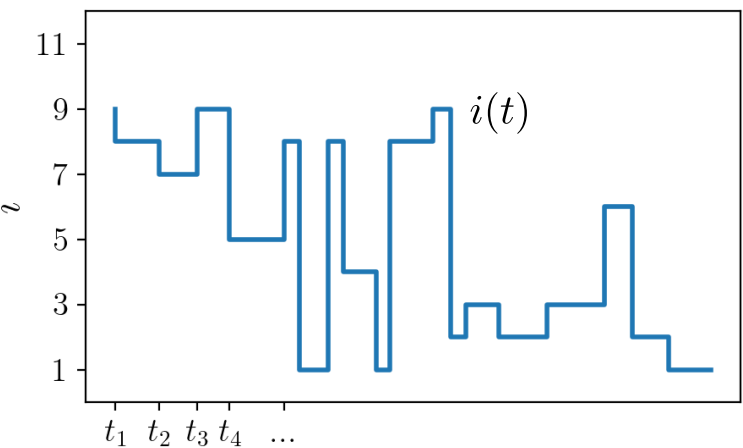
$$\dot{Q} = \sum_\nu \dot{Q}_\nu = \sum_{\nu, i} \lambda_{ij}^\nu p_j (e_i - e_j - w_{ij}^\nu)$$

Segunda ley:

$$\dot{\Sigma} = d_t S - \sum_\nu \dot{Q}_\nu / T_\nu = \frac{k_b}{2} \sum_{\nu, i, j} (\lambda_{ij}^\nu p_j - \lambda_{ji}^\nu p_i) \ln \frac{\lambda_{ij}^\nu p_j}{\lambda_{ji}^\nu p_i} \geq 0$$

$$\text{En condiciones isotérmicas: } T\dot{\Sigma} = -d_t F + \dot{W}_d + \dot{W}_{nc}$$

Termodinámica estocástica – Al nivel de trayectorias



Primera ley:

$$\Delta E = W_d + W_{nc} + Q$$

Segunda ley:

$$s(t) = -k_b \log(p(i(t), t))$$

Entropía en una trayectoria

$$\Sigma = \Delta s - \sum_{\nu} Q_{\nu}/T_{\nu} \not\geq 0$$

Producción total de entropía

$$\frac{\mathcal{P}[\mathcal{T}_t]}{\mathcal{P}^{\dagger}[\mathcal{T}_t^{\dagger}]} = e^{\Sigma/k_b}$$



$$\Sigma = k_b D(\mathcal{P}||\mathcal{P}^{\dagger})$$

Jarzynski '96

$$\left\langle e^{-\Sigma/k_b} \right\rangle = 1 \quad \Rightarrow \quad \langle \Sigma \rangle \geq 0$$

Crooks '98

$$\frac{P(W_d, W_{nc})}{P^{\dagger}(W_d, W_{nc})} = e^{(W_d+W_{nc})/k_b T}$$

Otros resultados nuevos y ya conocidos:

- “Relaciones de incerteza” termodinámicas (TUR)

- Límites de velocidad

$$\frac{|\langle j \rangle|^2}{\text{Var}(j)} \leq \frac{\dot{\Sigma}}{2k_b}$$

$$\langle \dot{\Sigma} \rangle \tau \geq k_b$$

Parrondo et al 2009 NJP 11 073008
 Roldán, Parrondo PRL 105, 150607

Barato, Seifert PRL 114, 158101
 Gingrich et. al. PRL 116, 120601
 Falasco et al 2020 NJP. 22 053046

Falasco, Espostio PRL. 125, 120604

Termodinámica del procesamiento de información

Published: 03 February 2015

Thermodynamics of information

Juan M. R. Parrondo, Jordan M. Horowitz & Takahiro Sagawa

Nature Physics 11, 131–139(2015) | Cite this article

6185 Accesses | 445 Citations | 49 Altmetric | Metrics

PAPER Thermodynamic and logical reversibilities revisited

Takahiro Sagawa¹

Published 26 March 2014 • © 2014 IOP Publishing Ltd and SISSA Medialab srl

Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, Volume 2014, March 2014

Citation Takahiro Sagawa J. Stat. Mech. (2014) P03025

Thermodynamics of Modularity: Structural Costs Beyond the Landauer Bound

Alexander B. Boyd, Dibyendu Mandal, and James P. Crutchfield
Phys. Rev. X 8, 031036 – Published 3 August 2018

PAPER • OPEN ACCESS

Thermodynamics of computing with circuits

David H Wolpert^{2,3,1} and Artemy Kolchinsky^{2,1}

Published 24 June 2020 • © 2020 The Author(s). Published by IOP Publishing Ltd on behalf of the Institute of Physics and Deutsche Physikalische Gesellschaft

New Journal of Physics, Volume 22, June 2020

Citation David H Wolpert and Artemy Kolchinsky 2020 New J. Phys. 22 063047

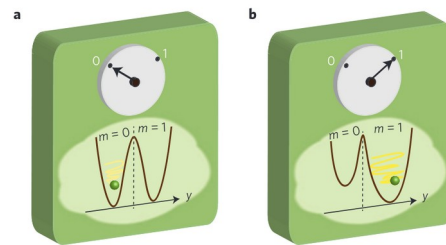
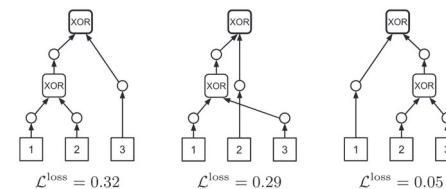
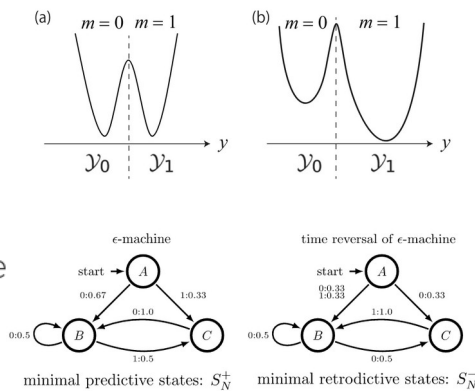


Figure 2 | Toy model of a memory. A Brownian particle in a double-well potential with position y can be stably trapped in either the left or right well, which represent the mesoscopic informational states $m=0$ and $m=1$ of a bit. The memory can either be symmetric (a) or asymmetric (b).



No es solamente un problema académico...

NEWS FEATURE • 12 SEPTEMBER 2018 • CORRECTION 13 SEPTEMBER 2018

nature

How to stop data centres from gobbling up the world's electricity

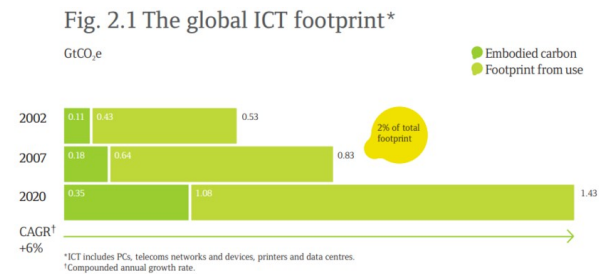
The energy-efficiency drive at the information factories that serve us Facebook, Google and Bitcoin.

Bitcoin consumes 'more electricity than Argentina'

By Cristina Criddle
Technology reporter

© 10 February

BBC

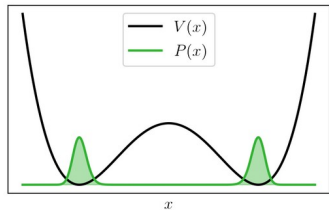
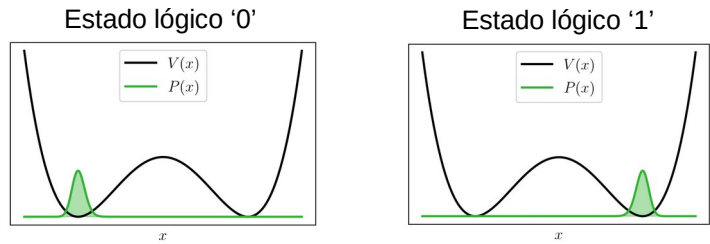


Fuente: "SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age"

Termodinámica del procesamiento de información – Límite de Landauer

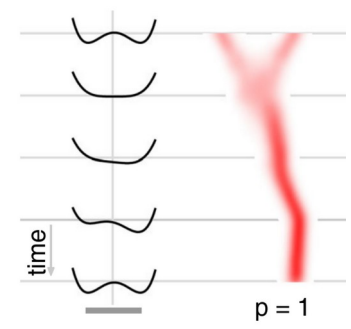
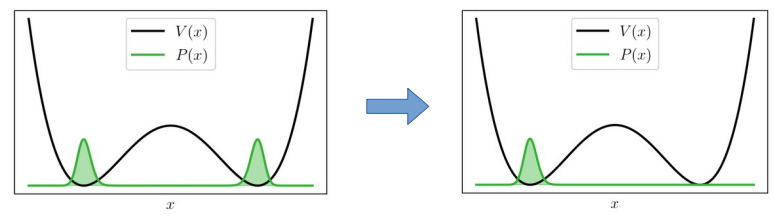
Un modelo sencillo de una memoria:

Un sistema con energía potencial $V(x)$ (bistable) en equilibrio a temperatura T



Equilibrio térmico

El problema de borrado:



Bechhoefer's Lab PRL (2014)

El principio de Landauer es simplemente una aplicación de la 2da ley a este tipo de sistemas:

$$T\dot{\Sigma} = -d_t F + \dot{W} \geq 0 \implies W \geq \Delta F = -T\Delta S = \underline{k_b T \log(2)}$$

Published: 07 March 2012

Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics

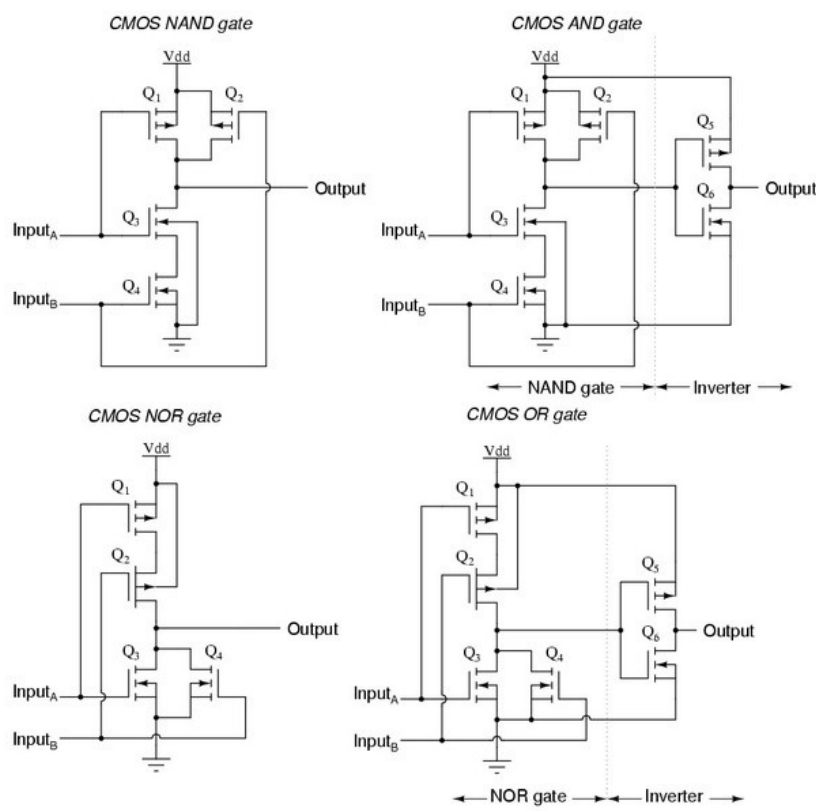
Antoine Bérut, Artak Arakelyan, Artyom Petrosyan, Sergio Ciliberto, Raoul Dillenschneider & Eric Lutz

Algunas preguntas: ¿Qué pasa en tiempo finito? ¿Qué pasa si la estructura de la memoria es mas compleja? ¿Qué pasa si el control del potencial es restringido?

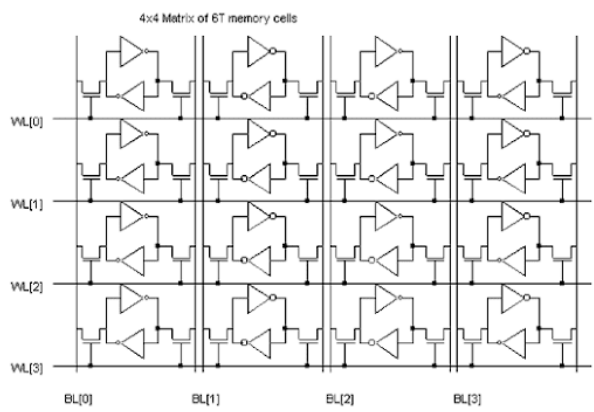
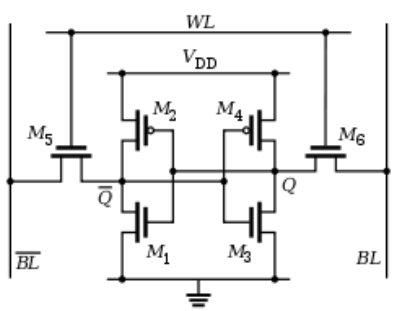
Un gran problema: Los sistemas (artificiales o naturales) que procesan información no la codifican en estados de equilibrio !!

¿Cómo se procesa información? Tecnología CMOS

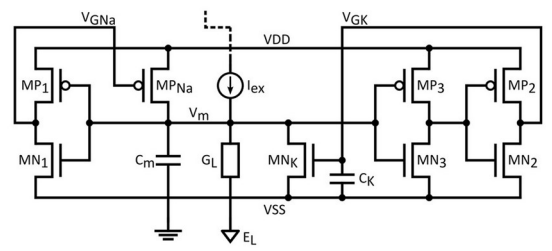
Compuertas lógicas:



Memorias:



Nueronas artificiales:



ORIGINAL RESEARCH ARTICLE
Front. Neurosci., 15 March 2017 | <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00123>



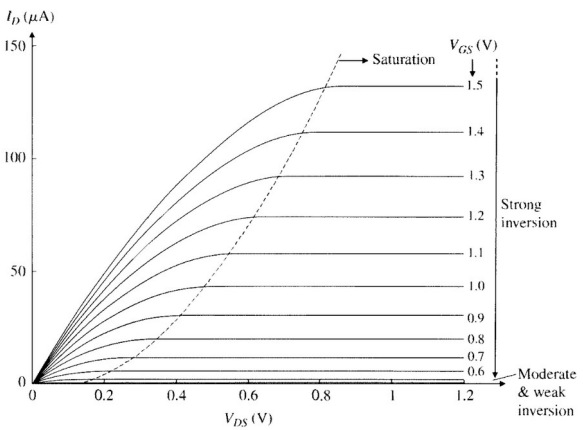
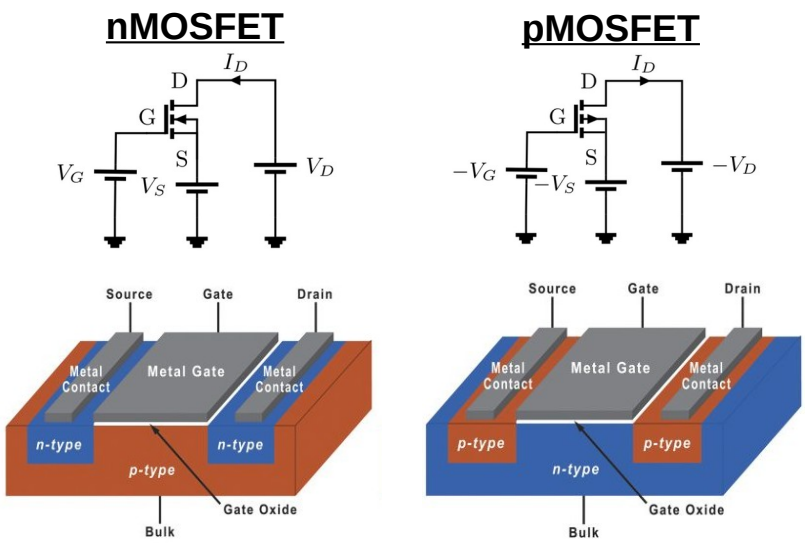
A 4-fJ/Spike Artificial Neuron in 65 nm CMOS Technology

Ilias Sourikopoulos¹, Sara Hedayat¹, Christophe Loyez^{1,2}, François Danneville^{1,3}, Virginie Hoelt^{1,2}, Eric Mercier^{1,4} and Alain Cappy^{1,2*}

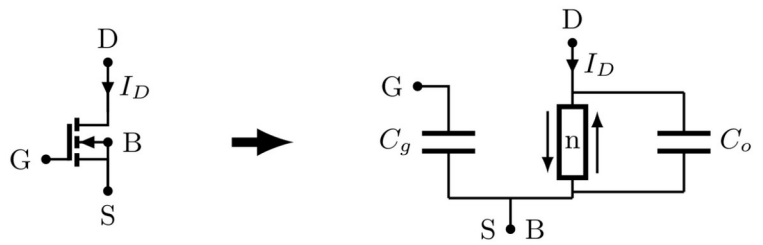
¹Centre National de la Recherche Scientifique, Université Lille, USR 3380 - IRCICA, Lille, France
²Centre National de la Recherche Scientifique, Université Lille, ISEN, Université Valenciennes, UMR 8520 - IEMN, Lille, France
³Université Grenoble Alpes, Grenoble, France
⁴CEA, LETI, MINATEC Campus, Grenoble, France

¿Qué puede aportar la física estadística?

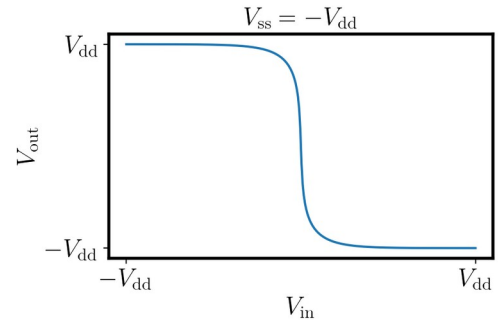
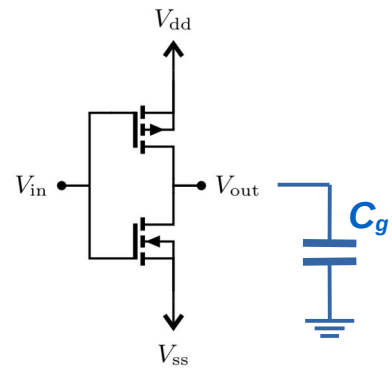
La tecnología **CMOS** en 2 minutos:



Modelo efectivo:



Compuerta NOT:



Disipación de energía:

$$\langle \dot{Q} \rangle = \langle \dot{Q} \rangle_{\text{dyn}} + \langle \dot{Q} \rangle_{\text{st}}$$

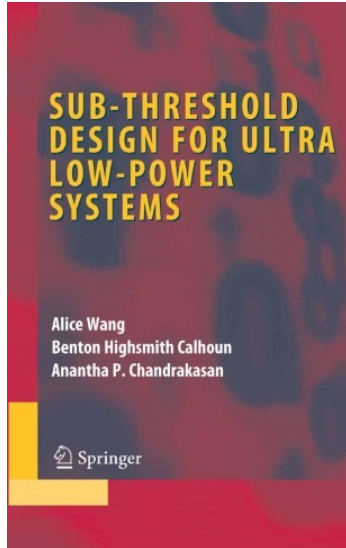
$$\langle \dot{Q} \rangle_{\text{dyn}} \propto f \cdot C_g \cdot V_{\text{dd}}^2$$

¿Qué puede aportar la física estadística?

$$\langle \dot{Q} \rangle_{\text{dyn}} \propto f \cdot C_g \cdot V_{\text{dd}}^2$$

Estrategias para reducir el consumo de energía:

- Reducir la frecuencia ✗
- Reducir el tamaño de los transistores ($C_g \downarrow$) ✓
- Reducir el voltaje de operación



- Voltajes V_{dd} del orden de $V_T = k_b T / q_e \simeq 26 \text{ mV}$
- Las fluctuaciones térmicas son de tipo **shot noise** (ecuaciones de **Fokker-Planck** o **Langevin** fallan)
- Y no pueden ser despreciadas: $\Delta V \simeq \sqrt{k_b T / C} \simeq 9 \text{ mV}$

Temp. Amb.



Procesos sub-7nm

$C \simeq 50 \text{ aF}$



En el régimen de bajo consumo de energía, una descripción precisa de las fluctuaciones térmicas en circuitos complejos es fundamental

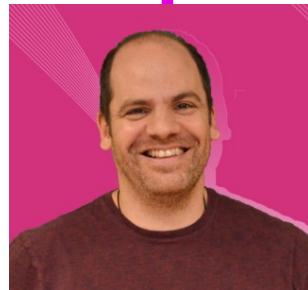
¿Qué puede aportar la física estadística?

Stochastic Thermodynamics of Non-Linear Electronic Circuits: A Realistic Framework for Computing around kT

Nahuel Freitas, Jean-Charles Delvenne, and Massimiliano Esposito



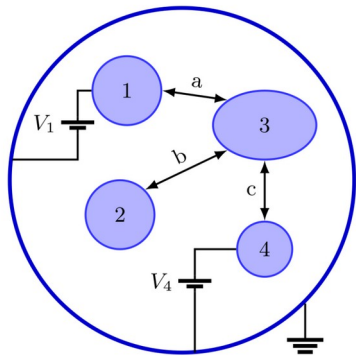
U.C. Louvain



[arXiv:2008.10578](https://arxiv.org/abs/2008.10578)

Formalismo básico:

Un sistema de conductores, fuentes, y canales (dispositivos)



Los estados del sistema son las diferentes **configuraciones de carga**:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_0 &= (q_1, \dots, q_{N_0})^T & \mathbf{q}_0 &= \mathbf{C}_0 \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_0 &= (V_1, \dots, V_{N_0})^T \end{aligned}$$

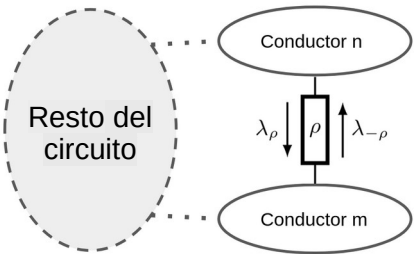
La energía **electrostática** esta dada por una **función cuadrática**:

$$E = \frac{1}{2} \mathbf{q}_0^T \mathbf{V}_0 = \frac{1}{2} \mathbf{V}_0^T \mathbf{C}_0 \mathbf{V}_0 = \frac{1}{2} \mathbf{q}_0^T \mathbf{C}_0^{-1} \mathbf{q}_0$$

Los conductores se pueden dividir en **libres y regulados**:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_0 &\longrightarrow \mathbf{q} \quad \mathbf{q}_r \\ \mathbf{V}_0 &\longrightarrow \mathbf{V} \quad \mathbf{V}_r \end{aligned} \quad \boxed{\begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{q}_r \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C}_m \\ \mathbf{C}_m^T & \mathbf{C}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{V}_r \end{bmatrix}$$

Modelado de los canales de conducción:



- Cada dispositivo es modelado en base a un **proceso de Poisson bidireccional**.
- Esto excluye dispositivos que no muestren **shot noise**

$$\begin{aligned} \text{Forward transition: } \mathbf{q} &\rightarrow \mathbf{q} + q_e \Delta_\rho & \longrightarrow & \lambda_\rho(\mathbf{q}, t) \\ \text{Reverse transition: } \mathbf{q} &\rightarrow \mathbf{q} + q_e \Delta_{-\rho} & \longrightarrow & \lambda_{-\rho}(\mathbf{q}, t) \end{aligned}$$

Condiciones de balance detallado (LDB):

$$\begin{aligned} \log \left(\frac{\lambda_\rho(\mathbf{q}, t)}{\lambda_{-\rho}(\mathbf{q} + q_e \Delta_\rho, t)} \right) &= -\beta_\rho \delta Q_\rho(\mathbf{q}) \\ \delta Q_\rho(\mathbf{q}) &= \Phi(\mathbf{q} + q_e \Delta_\rho) - \Phi(\mathbf{q}) + q_e \mathbf{V}_r^T \Delta_\rho^r \end{aligned}$$

Calor intercambiado con el entorno durante una transición

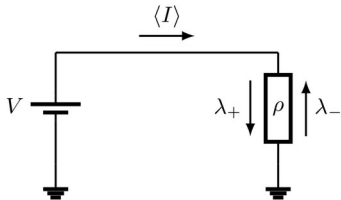
Trabajo no-conservativo

$$\Phi(\mathbf{q}) = E(\mathbf{q}) - \mathbf{V}_r^T \mathbf{C}_m^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{q}$$

Potencial electroestático en presencia de conductores regulados.

Formalismo básico:

El modelo bi-Poisson y la caracterización I-V:



Las **tasas de Poisson** quedan totalmente determinadas por la curva **I-V del dispositivo** y por las condiciones **LDB**:

$$\langle I \rangle = \langle q(\Delta t) / \Delta t \rangle = q_e (\tilde{\lambda}_+(V) - \tilde{\lambda}_-(V)) \quad \log \left(\frac{\tilde{\lambda}_+(V)}{\tilde{\lambda}_-(V)} \right) = \beta q_e V$$

Esto implica que las fluctuaciones de corriente son tipo **shot noise**:

$$\sigma_I^2(\Delta t) = \frac{q_e}{\Delta t} \langle I(\Delta t) \rangle \coth(\beta q_e V / 2)$$

'Charging effects' y regla del punto medio:

Regla del punto medio: para asegurar que se respeten las condiciones **LDB**, cuando un dispositivo es conectado a un circuito general, las tasas de Poisson a **voltage fijo** deben ser evaluadas al voltage **voltage promedio antes y después de una transición**:

$$\lambda_{\pm\rho}(q) = \tilde{\lambda}_{\pm} \left(\overline{\Delta V}_{nm}^{\pm\rho}(q) \right)$$

Equación Maestra:

$$d_t P(\mathbf{q}, t) = \sum_{\rho} \{ J_{-\rho}(\mathbf{q} + q_e \Delta_{\rho}, t) - J_{\rho}(\mathbf{q}, t) \} \quad J_{\rho}(\mathbf{q}, t) = \lambda_{\rho}(\mathbf{q}, t) P(\mathbf{q}, t)$$

Balance de Energía:

$$d_t \langle \Phi \rangle = \langle \dot{W}_{\Phi} \rangle + \sum_{\rho>0} \langle \dot{W}_{\rho}^r \rangle + \sum_{\rho>0} \langle \dot{Q}_{\rho} \rangle$$

Producción de entropía:

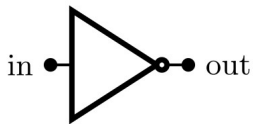
$$\langle \dot{\Sigma} \rangle \equiv d_t \langle S \rangle + \langle \dot{\Sigma}_e \rangle \geq 0$$

Teoremas de fluctuación:

$$\frac{P(\{W_{n_f}\}, W_{\Psi})}{P^{\dagger}(\{-W_{n_f}\}, -W_{\Psi})} = \exp((W_{\Psi} + \sum_{n_f} W_{n_f}) / (k_b T))$$

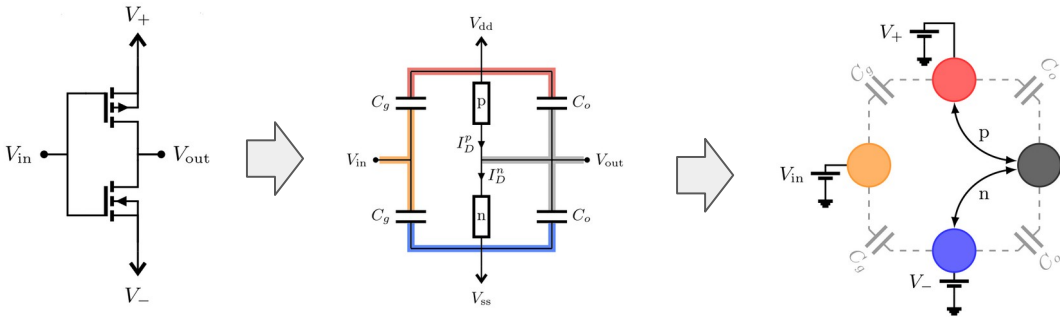
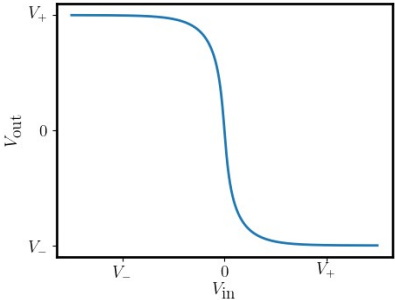
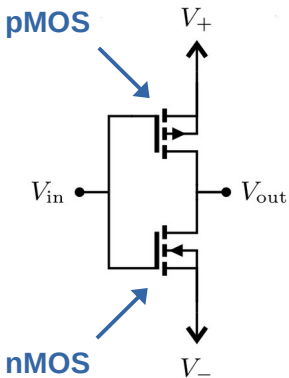
Aplicación 1: Inversor CMOS, o compuerta NOT

Compuerta NOT



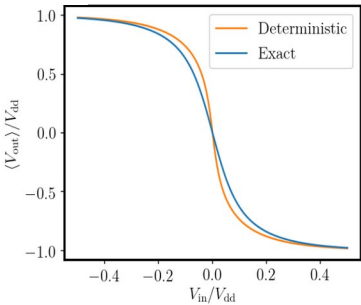
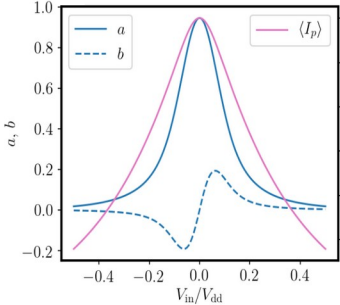
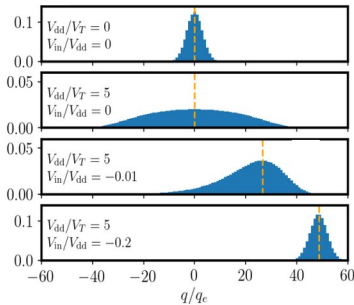
in	out
True	False
False	True

Implementación en tecnología CMOS



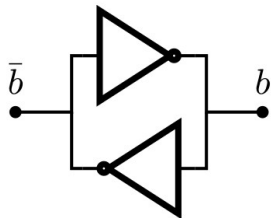
Construyendo la ecuación maestra y calculando el estado estacionario...

$$P_{st}(q) = \frac{\alpha_p + \alpha_n \gamma e^{-(q-q_e)/q_T}}{\alpha_n + \alpha_p \gamma e^{q/q_T}} P_{st}(q - q_e)$$



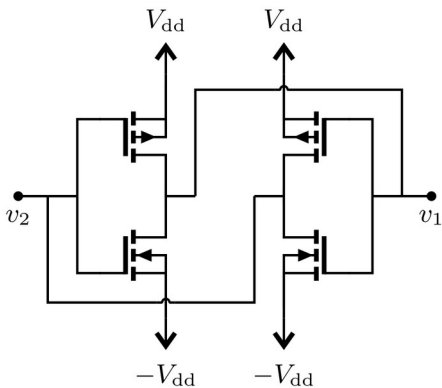
Aplicación 2: Una memoria

El núcleo de un bit SRAM



b	$\bar{b}$
True	False
False	True

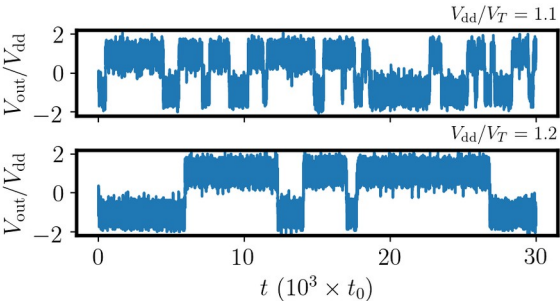
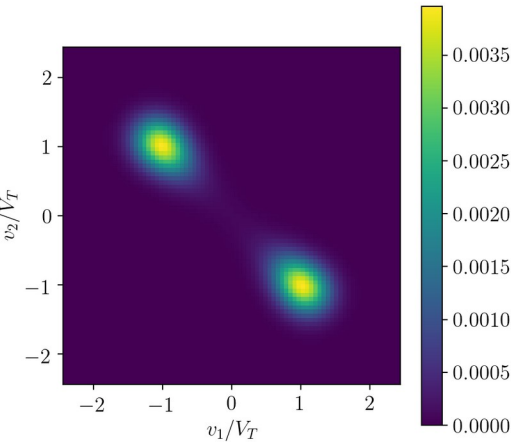
Implementación CMOS



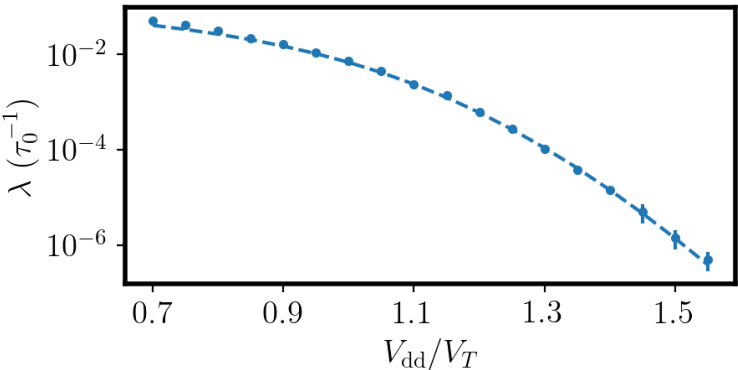
v_1	v_2
$+V_{dd}$	$-V_{dd}$
$-V_{dd}$	$+V_{dd}$

Los dos **estados lógicos estables** se corresponden con dos **estados estacionarios metastables fuera del equilibrio (NESSs)**

Estado estacionario y trayectorias

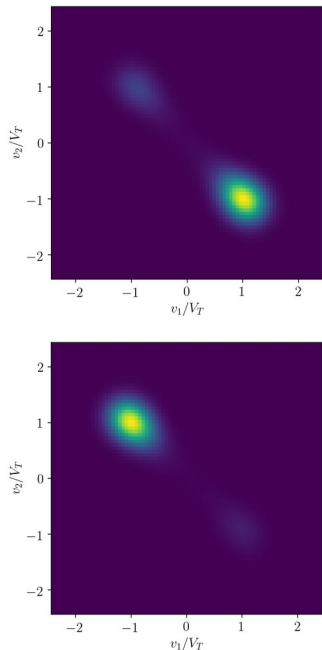
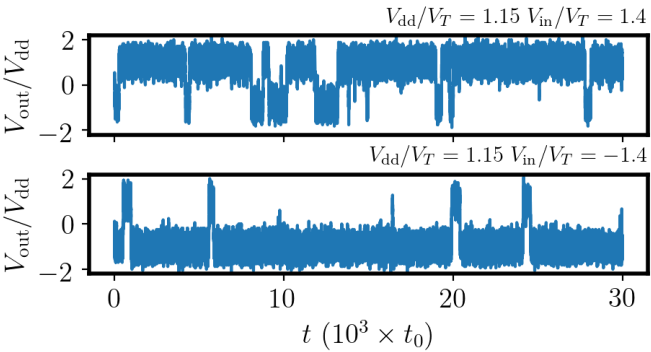
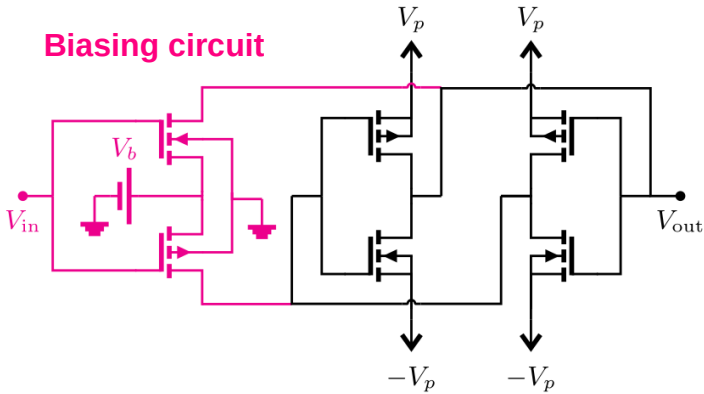


Para reducir la tasa de errores hay que aumentar el voltaje...



Aplicación 3: Una neurona estocástica, o bit probabilístico

¿Qué se puede hacer con una mala memoria?

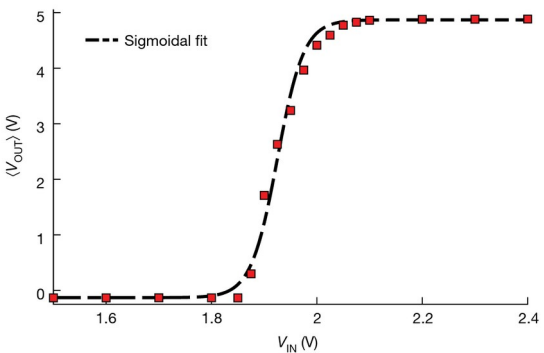
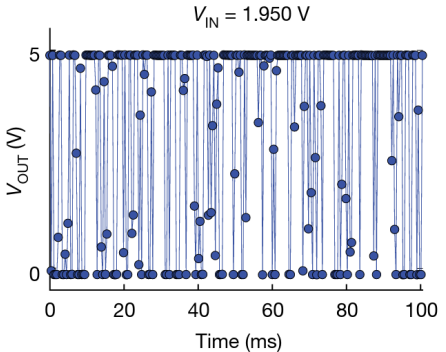
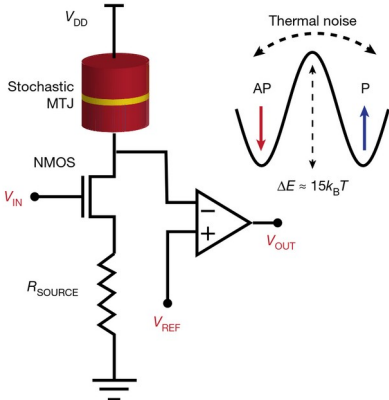


¿Para qué sirve?

Letter | Published: 18 September 2019

Integer factorization using stochastic magnetic tunnel junctions

William A. Borders, Ahmed Z. Pervaiz, Shunsuke Fukami, Kerem Y. Camsari, Hideo Ohno & Supriyo Datta



En principio se pueden construir

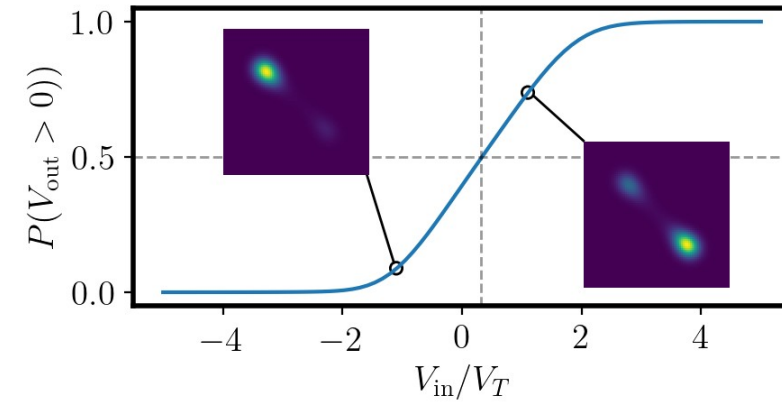
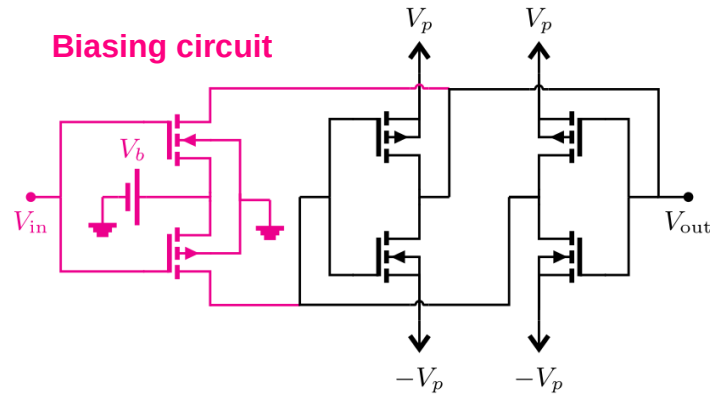
- “stochastic annealers” clásicos, o
- redes neuronales estocásticas,

en donde el ruido térmico es aprovechado como un recurso!!

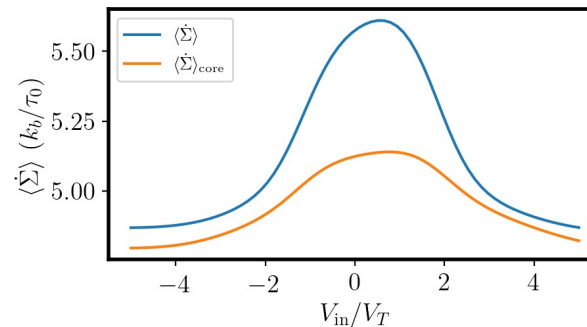
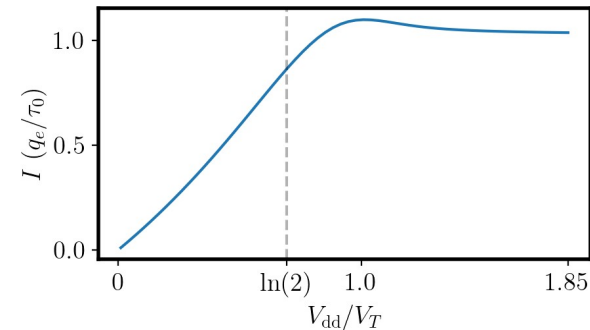
Aplicación 3: Una neurona estocástica, o bit probabilístico

¿Qué se puede hacer con una mala memoria?

Función de activación



Consumo de energía:



En procesos modernos de fabricación (7nm) se pueden alcanzar **valores de consumo tan bajos como 10 aJ por bit**.

Esto es mas de dos órdenes de magnitud menor que la mejor propuesta anterior.

Algunas conclusiones

Una descripción rigurosa del ruido térmico en circuitos electrónicos no-lineales es fundamental para:

- **Reducir el consumo energético** (y evaluarlo)
- **Estudiar la fiabilidad**
- **Nuevos esquemas de cómputo**

Fundamental Thermal Limits on Data Retention in Low-Voltage CMOS Latches and SRAM

Publisher: IEEE

[Cite This](#)

[PDF](#)

Elahe Rezaei ; Marco Donato ; William R. Patterson ; Alexander Zaslavsky ; R. Iris Bahar [All Authors](#)

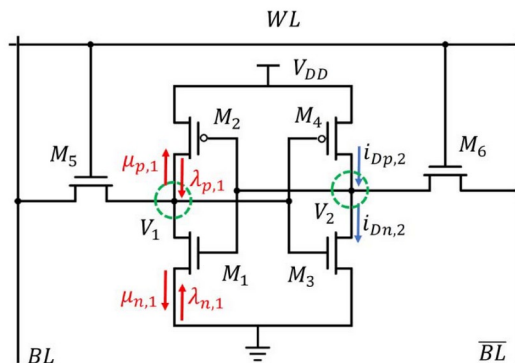
“If we start with $\Delta v(t) = V_{DD} = 180$ mV, we can try to capture a bit-flip error by simulating until $\Delta v(t) < 0$. However, the minimum $\Delta v(t)$ captured by continuously computing the numerical solution of (7), after a month of continuous simulation, was 118 mV, as shown in Fig. 3(a). Thus, reaching”

Pero una descripción exacta es en general muy demandante. Hay dos opciones principales.

- **Ecuaciones maestras**

$$d_t p_i = \sum_{\nu, j} \lambda_{ij}^{\nu} p_j$$

- **Simulaciones estocásticas**
(Por ejemplo, algoritmos tipo Gillespie)

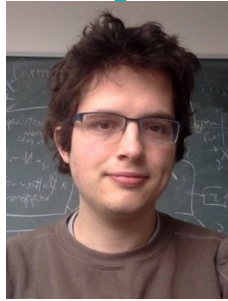


$$\begin{aligned}\mu_n &= \frac{I_0}{q} \exp\left(\frac{qBV_{ds}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_{gs}}{mkT}\right) \\ \lambda_n &= \mu_n \exp\left(\frac{-qV_{ds}}{kT}\right) \\ \mu_p &= \frac{I_0}{q} \exp\left(\frac{qBV_{sd}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_{sg}}{mkT}\right) \\ \lambda_p &= \mu_p \exp\left(\frac{-qV_{sd}}{kT}\right),\end{aligned}$$

Una alternativa:
Teoría de Grandes Desviaciones

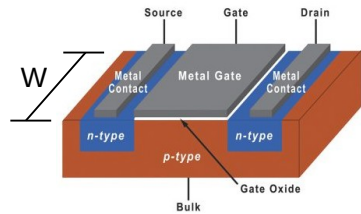
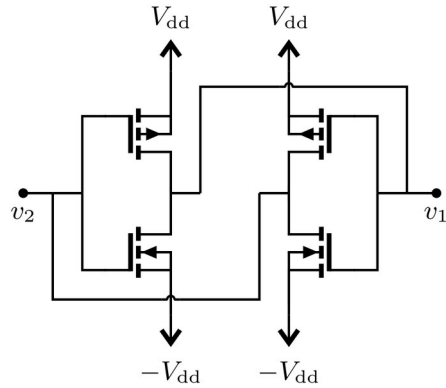
Reliability and entropy production in non-equilibrium electronic memories

Nahuel Freitas, Karel Proesmans, and Massimiliano Esposito



[arXiv:2103.01184](https://arxiv.org/abs/2103.01184)

Aprovechando el límite macroscópico:



$$d_t P(v_1, v_2, t) = PA|_{v_1-v_e, v_2} + PB|_{v_1+v_e, v_2} + PA^*|_{v_1, v_2-v_e} + PB^*|_{v_1, v_2+v_e} - P(A + B + A^* + B^*)|_{v_1, v_2}$$

$$v_e = q_e / C$$

Salto elemental en el voltage

$$A(v_1, v_2) = \lambda_+^p(v_1, v_2) + \lambda_-^n(v_1, v_2)$$

$$B(v_1, v_2) = \lambda_-^p(v_1, v_2) + \lambda_+^n(v_1, v_2)$$

Transistores 'grandes' $\rightarrow C \uparrow \rightarrow v_e \downarrow$ (Además $\lambda \uparrow$)

Una expansión a 2do orden en v_e lleva a una ecuación de **Fokker-Planck**:

$$d_t P(\mathbf{v}, t) = -\partial_{v_i} [\mu_i(\mathbf{v}) P(\mathbf{v}, t)] + v_e \partial_{v_i} \partial_{v_j} [D_{ij}(\mathbf{v}) P(\mathbf{v}, t)]$$

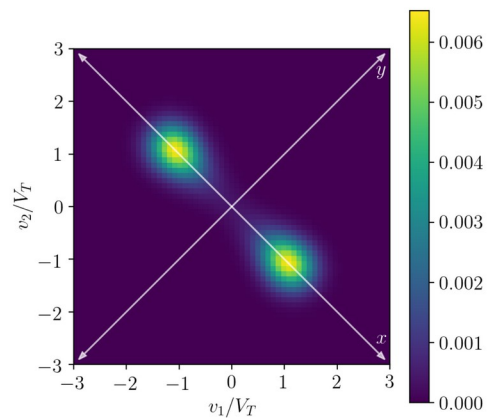
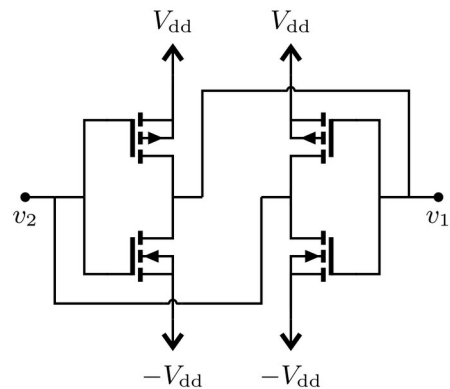
Pero esto solo es correcto para **pequeñas desviaciones** respecto del comportamiento determinista y, además, **rompe la consistencia termodinámica !!**

Principio de grandes desviaciones:

$$P(\mathbf{v}, t) \asymp e^{-f(\mathbf{v}, t)/v_e} \quad \text{en el límite} \quad v_e/V_T \rightarrow 0$$

$$d_t f = (1 - e^{\partial_{v_1} f}) a(v_1, v_2) + (1 - e^{-\partial_{v_1} f}) b(v_1, v_2) + (1 - e^{\partial_{v_2} f}) a(v_2, v_1) + (1 - e^{-\partial_{v_2} f}) b(v_2, v_1)$$

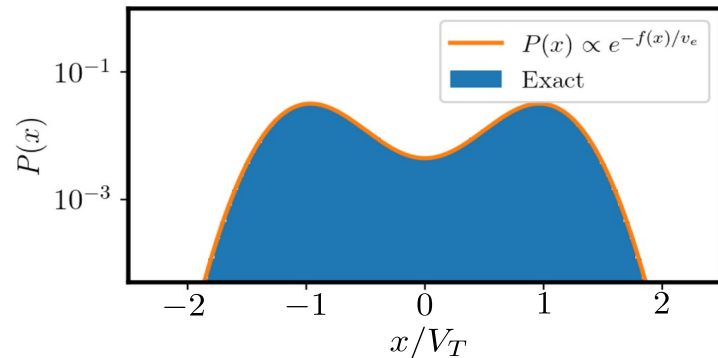
Aprovechando el límite macroscópico:



$$f(x, y) = g(x) + h(y)$$

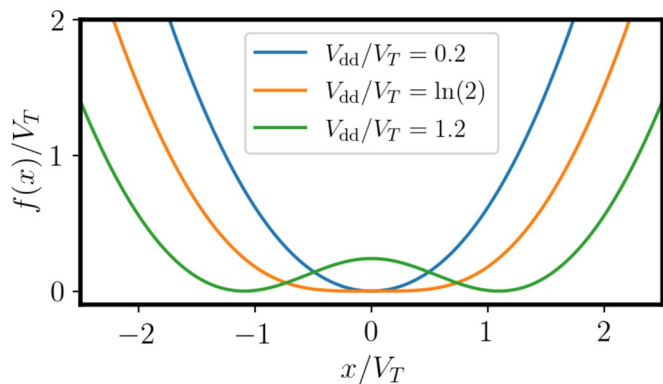
$$L(x, V_{dd}) = \text{Li}_2(-\exp((V_{dd} + x(1 + 2/n))/V_T))$$

$$g(x) = \frac{x^2 + 2V_{dd}x}{V_T} + \frac{2nV_T}{n+2} [L(x, V_{dd}) - L(x, -V_{dd})]$$

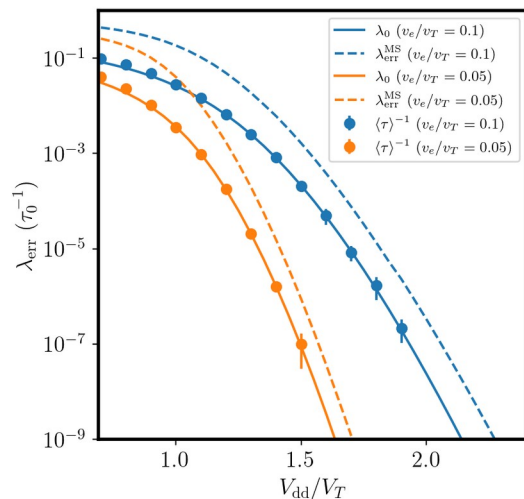
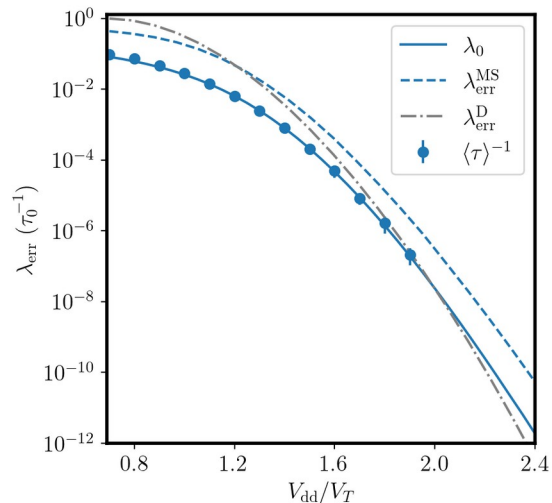


$$v_e/V_T = 0.1 !!$$

Fiabilidad en términos del consumo de energía

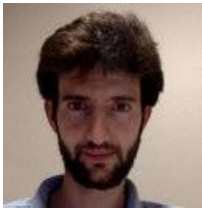


$$\lambda_{\text{err}} = 4 \sum_{v_2} B(0, v_2) P(-v_2/2) Q(v_2/2) \propto e^{-\frac{4}{n+2} \frac{V_{dd}^2}{k_b T/C}}$$



Otros proyectos y colaboradores

- Termodinámica en circuitos lineales (PRX 10, 031005 - PRB 102, 235422)
- Mecanismo Kibble-Zurek y fluctuaciones del trabajo en transiciones de fase cuánticas (PRL 124, 170603)
- Caracterización de demonios de Maxwell autónomos (PRE 103, 032118)
- ***Respuesta lineal y ensambles fuera del equilibrio en teoría de grandes desviaciones (pronto en arxiv)***
- ***TURs en circuitos y demonios de Maxwell en el límite macroscópico***
- Teoría de circuitos para redes de reacciones químicas



Gianmaria Falasco



Francesco Avanzini



Thomas Schmidt



Vasco Cavina



Ashwin Gopal



Sadeq S. Kadijani

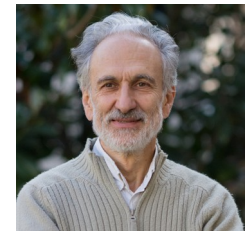
FQXi
“Information as fuel”
Project



Alexia Auffèves



Benjamin Huard

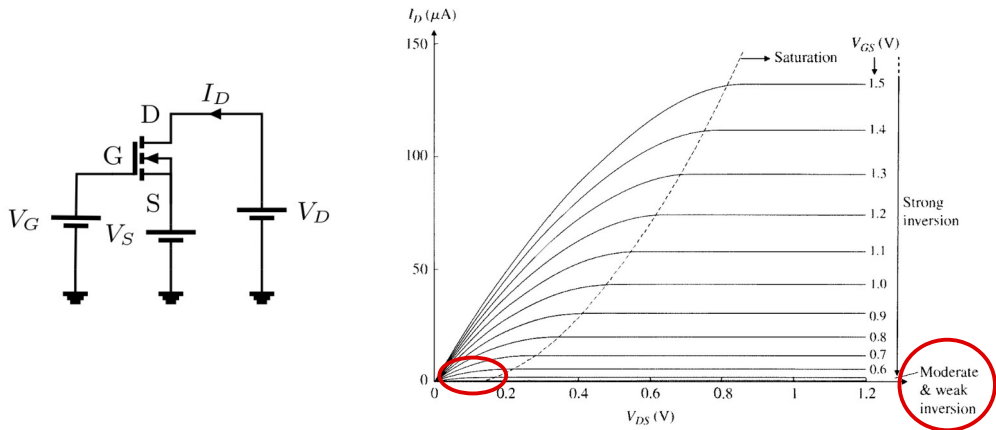
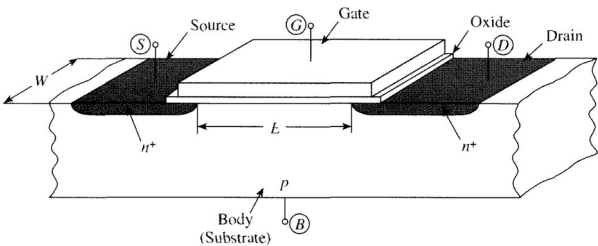


Sergio Ciliberto

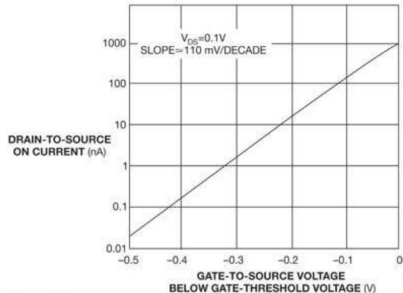
Muchas gracias :)



An important device: the MOS transistor

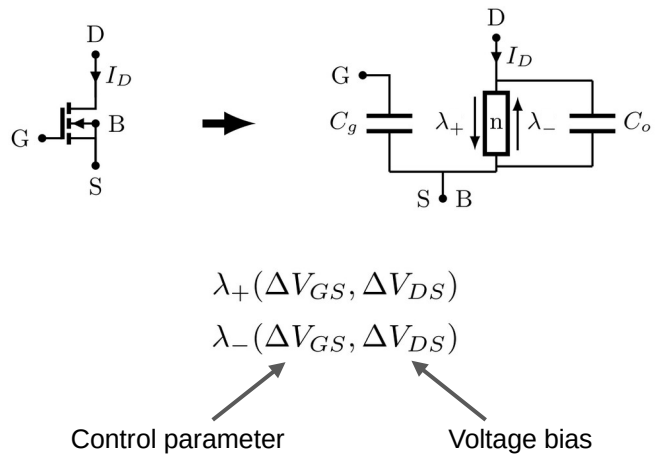


In **low-power applications**, MOS transistors are operated in the unsaturated, **subthreshold regime**.



Mesoscopic modeling of MOS transistor:

In typical configurations we can consider MOS transistors as **controlled two-terminal devices**:



In the subthreshold regime of operation:

$$\lambda_+ = (I_0/q_e) e^{(\Delta V_{GS} - V_{th})/(nV_T)}$$

$$\lambda_- = (I_0/q_e) e^{(\Delta V_{GS} - V_{th})/(nV_T)} e^{-(\Delta V_{DS})/V_T}$$

I_0, n, V_{th}
Phenomenological parameters

$V_T = (\beta q_e)^{-1} = k_b T / q_e$
Thermal voltage

*Figures from the Tsividis book.