Encontros Matemáticos apresenta

Computação Quântica

Pedro Maciel Xavier
pedromxavier@poli.ufrj.br
19 de novembro de 2019

IM-UFRJ

Parte I

Parte II

- Computação Quântica
  - Fenômenos Quânticos
  - Postulados
  - Trapped-ion
  - Algoritmos
  - Teletransporte Quântico
  - Teorema da não-clonagem
  - Fótons
  - Caminhadas Quânticas
- Computação Topológica
  - Nós
  - Ânions
- Computação Adiabática
  - Teorema Adiabático
  - Têmpera Quântica

Parte III

Computação

A Tese de Church-Turing

> *Toda função que seria naturalmente computável pode ser computada por uma Máquina de Turing*
>
> Alan Turing

Definição. (*Máquina de Turing*)
É um computador abstrato definido por $(Q, q_0, \Gamma, \square, \Sigma, \Omega, \delta)$, que possui uma fita e um cabeçote de leitura

- Q: Um conjunto não-vazio de estados.
- q_0: Estado inicial ($q_0 \in Q$)
- Γ: Alfabeto da fita.
- $\square$: Símbolo vazio.
- Σ: Alfabeto de entrada da máquina. ($\Sigma \subseteq \Gamma/\{\square\}$)
- Ω: Conjunto dos códigos de parada.
- δ: Função de Transição, $\delta : Q/\Omega \times \Gamma \to Q \times \Gamma \times \{\uparrow, \downarrow\}$

Alonzo Church

1903 - 1955

Alan Turing

1912 - 1954

A Tese de Church-Turing

> *Toda função que seria naturalmente computável pode ser computada por uma Máquina de Turing*
>
> Alan Turing

Definição. **(*Complexidade Assintótica*)**
Seja $f : X \subseteq \mathbb{R}_+ \to \mathbb{C}$ e $g : X \subseteq \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}_+$ dizemos que

$$f(x) = O(g(x)) \iff \exists M, x_0, \quad |f(x)| \leq M g(x) \ \ \forall x > x_0$$

Exemplo. (Ordenação de uma lista)

Dada uma lista de tamanho $N = 5$, fazemos o seguinte: Procuramos o menor elemento, removemos da lista e acrescentamos em uma nova lista, e assim sucessivamente.

5	2	3	1	4

Exemplo. (Ordenação de uma lista)

Dada uma lista de tamanho $N = 5$, fazemos o seguinte: Procuramos o menor elemento, removemos da lista e acrescentamos em uma nova lista, e assim sucessivamente.

5

5	2	3	1	4

1

Exemplo. (Ordenação de uma lista)

Dada uma lista de tamanho $N = 5$, fazemos o seguinte: Procuramos o menor elemento, removemos da lista e acrescentamos em uma nova lista, e assim sucessivamente.

$5 + 4$

5	2	3	4

1	2

Exemplo. (Ordenação de uma lista)

Dada uma lista de tamanho $N = 5$, fazemos o seguinte: Procuramos o menor elemento, removemos da lista e acrescentamos em uma nova lista, e assim sucessivamente.

$5 + 4 + 3$

5	3	4

1	2	3

Exemplo. (Ordenação de uma lista)

Dada uma lista de tamanho $N = 5$, fazemos o seguinte: Procuramos o menor elemento, removemos da lista e acrescentamos em uma nova lista, e assim sucessivamente.

$5 + 4 + 3 + 2$

5	4

1	2	3	4

Exemplo. (Ordenação de uma lista)

Dada uma lista de tamanho $N = 5$, fazemos o seguinte: Procuramos o menor elemento, removemos da lista e acrescentamos em uma nova lista, e assim sucessivamente.

$5 + 4 + 3 + 2 + 1 = 15$

$\boxed{5}$

$\boxed{1}\boxed{2}\boxed{3}\boxed{4}\boxed{5}$

Exemplo. (Ordenação de uma lista)

Dada uma lista de tamanho $N = 5$, fazemos o seguinte: Procuramos o menor elemento, removemos da lista e acrescentamos em uma nova lista, e assim sucessivamente.

$5 + 4 + 3 + 2 + 1 = 15$

$\boxed{5}$

$\boxed{1}\boxed{2}\boxed{3}\boxed{4}\boxed{5}$

Mas e se a lista tivesse n elementos?

Complexidade

Exemplo. (Ordenação de uma lista)
Dada uma lista de tamanho $N = 5$, fazemos o seguinte: Procuramos o menor elemento, removemos da lista e acrescentamos em uma nova lista, e assim sucessivamente.

$5 + 4 + 3 + 2 + 1 = 15$

$\boxed{5}$

$\boxed{1}\boxed{2}\boxed{3}\boxed{4}\boxed{5}$

Mas e se a lista tivesse n elementos?

$$T(n) = \frac{n(n+1)}{2} = \frac{n^2+n}{2} \qquad \text{(complexidade)}$$

Dizemos que este algoritmo tem complexidade $O(n^2)$.

Computação Digital

Álgebra Booleana

Definição. (*Álgebra Booleana*)
É uma estrutura algébrica $(\Omega, \vee, \wedge, \neg, 0, 1)$, com $0, 1 \in \Omega$, que satisfazem os Axiomas:

$$
\begin{array}{rrr}
a \vee (b \vee c) = (a \vee b) \vee c & a \wedge (b \wedge c) = (a \wedge b) \wedge c & \text{associatividade} \\
a \vee b = a \vee a & a \wedge b = b \wedge a & \text{comutatividade} \\
a \vee 0 = a & a \wedge 1 = a & \text{identidade} \\
a \vee \neg a = 1 & a \wedge \neg a = 0 & \text{complemento} \\
a \vee (b \wedge c) = (a \vee b) \wedge (a \vee c) & a \wedge (b \vee c) = (a \wedge b) \vee (a \wedge c) & \text{distributividade} \\
a \vee (a \wedge b) = a & a \wedge (a \vee b) = a & \text{absorção}
\end{array}
$$

Álgebra Booleana

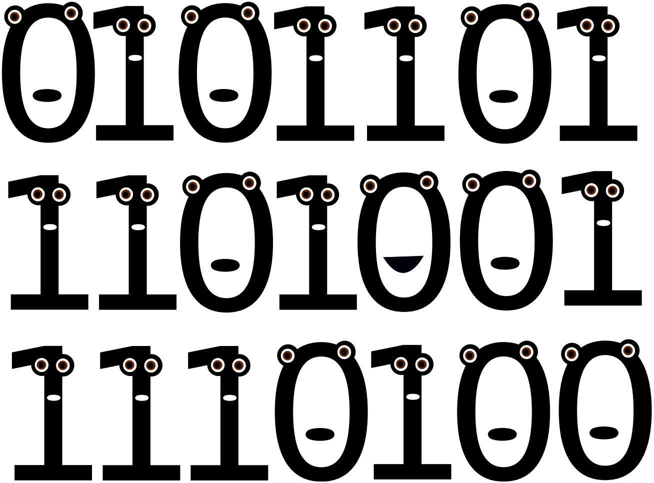
George Boole

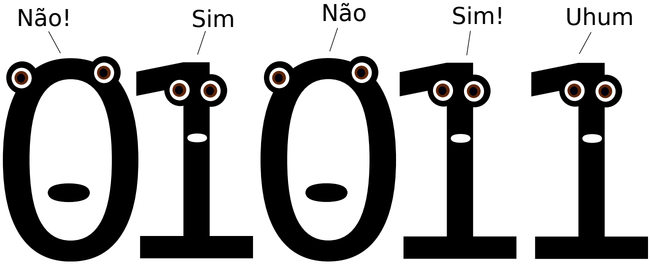
1815 - 1864

Augustus De Morgan

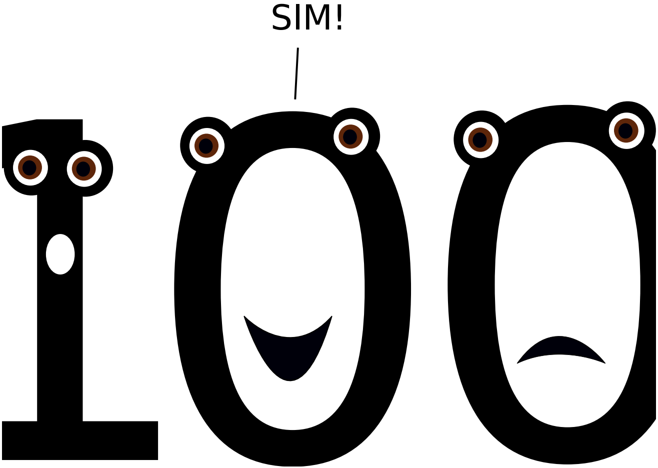
1806 - 1871

0100101100001010101010110101010111111011010111001111110010101010000101100000111000001010001011001001
1001000110111001101001010000101011011011101011011000110110101100010010011011000000011101111101010010
0111001110011100000011000101111110010000101001101001011100010011000101000011010010100011110111011001
0011000101010001000100110010111111010111010001110100011110000000111100010011010101100110000011001011
1011100000011100110001110110011101000101010010010000100111101101101011110111001111001110101000100011
1010000001011001000000001011010011001111011111100101100101010000000100010011011011100101001010011101010
1011011010010101010111110000011011111011001111101000101101001010011010000111010110101010110100001101
1000110000000101110000001001101110101000101011011010100101110110100011111110001111011101110011111110100
1001100000000000000001110111010010110000010000011101011001001011011111010011011010110110010111001010101
1100011100000010101110001110010001011101011101111111011001010000110010000111011000110001000101101111
0110100110000011000110100101100010011001110111111101111101111111111000110100011010000100100001010011
0001100000010100011111010111110101101001000010001010001101110110010011001011000000110110100110110100 1
0100100001111110101101101001011111010111011010100111010001011000110110101000111111010011100111000100
0001101101010110111000011111110000111100110100011011011100011111000001100111000100100111001000000011
0010111111001100110101001011010000110001011110110111000011010010011000000110101111111000110011100001
1101000000000101101101111000011000101110000110011000001000000111101011011100111000001111110111111 0110
1010001100010000111001101101100001110001011010011010111010001101111111100111001011101000000011000110 1
1001111101101010110010110101010000010101111000110001110000000110001110110010001001101101000100001000
0010111100110011000001101110100001011011111001010100111001001100101100001111100100000011111101100101
0111100100101100011000010011000010111111101101010100000111100100000000000100001001111111100000110010 0
1011111100111101110000000010110010110001010110111000101000001000011110111111001001110000111010000011
0111101000000110111010111111010010110000101101101001010111100110011001110101110111101100100011011010
0011101010000010011101101011100111110011000010010000101100000111101000110001111111010011000001101111
0100101110101111110000001001100010110010111101010100001101101101101100110011111000001101001011011110 1
0101001010111111001001011100100101111101110101000110010011011011100110000001000110100100011111001101 00
1010110011000011100000001000111101101101001100100100111100001100001110110100011110001110010010111001 1
0100001001101000000000100110100011110111011111011101010101110011111111011010111011001100001000010110 0
0110000011100010001101101110101001001011110010001011001110101100100001100010000110000001100010000100
0101100001100111101101100100100000000110011011111010101011101010001000011110001100101001110100010100 1
0011100111010010010001001000100110000101101011100011111001011011011011111111001111100010000101111001
0011100011111100100010000101111011010010011111011111100010100110010100010101110101000010010010010111 1
0101011110101100000010100111000000010000101100110001000000111000000110010001101101110010100110001011 00
0101100001110100110110100100110100000101010001001111011001000101100110111010010000011001001100111100
1000011011110111000000111111010100111000010100100111110111000000110100001001010101110111101001010101 10
0011000101000011100001110011100110001100000100011011101011001001100011011000100011000110101011101101
1110000010110111000010010010000000000111000110110110011011110001101110000000111110100110011011001110 1
1110111101001110001101000010111000011111010110010011001010000011011111111010010001011111111011011110 00
0010110111111110011110001011001001111000101010001001011110110010101010011110001001110110100010110100 0
1111100100001100110010011000000111111110011000000001010101000101101010100001000100111010110000001000 1
1001100101001111100010011100110010101011110111101001100001100101100111000110001011000110010010110011
1101101001101110000101010110110011011111011111011000110011011000011110100100010010101011000101101000 1
0001100100010111100001000101000101100101010111100011011000011011010100111101101011000101110010101011 1
1011011011000000110110101001111101010100111100010011011001100101011001111011011111100011111011000011 1
1011001111001101001101110011110111101011111111011010101100110110111011111100010011100001000101111010 10
1010001101001101010101011001111111110100101011110010101010110011000101011101111100001111011110110111
0101110110000001011101101101001110010011001000111000011010110010101011110000111011111111100000100110 1
0001110011101011011001010100101101101001101000011010101100111011111001010111010100000101111010001001
1110101010100010101010110101001011101110011010011110000110011111111101011011110000100111100000000111 10
1111100011100101001001101000100111100011110101010101101010011110011010101110100010100110011010111101
0001111101011110010010011010010100000111010011010010000000001000101101111010000010100001100100100101 0
1011111111010000111101100001110011111100000101000010000000011011010001001001111111101011100100110001 1


0101101
1101001
1110100


Não!
Sim
Não
Sim!
Uhum


Finalmente! É o meu grande dia!
Sim...


SIM!

A problem has been detected and Windows has been shut down to prevent damage to your computer.

The problem seems to be caused by the following file: SPCMDCON.SYS

PAGE_FAULT_IN_NONPAGED_AREA

If this is the first time you've seen this Stop error screen, restart your computer. If this screen appears again, follow these steps:

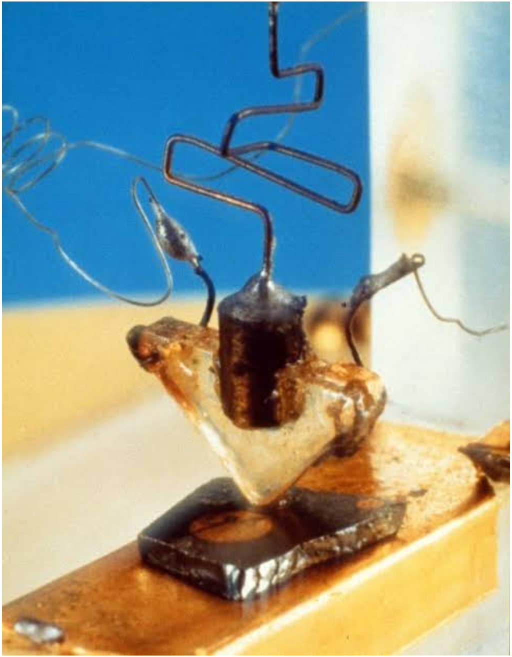
Check to make sure any new hardware or software is properly installed. If this is a new installation, ask your hardware or software manufacturer for any Windows updates you might need.

If problems continue, disable or remove any newly installed hardware or software. Disable BIOS memory options such as caching or shadowing. If you need to use Safe Mode to remove or disable components, restart your computer, press F8 to select Advanced Startup Options, and then select Safe Mode.

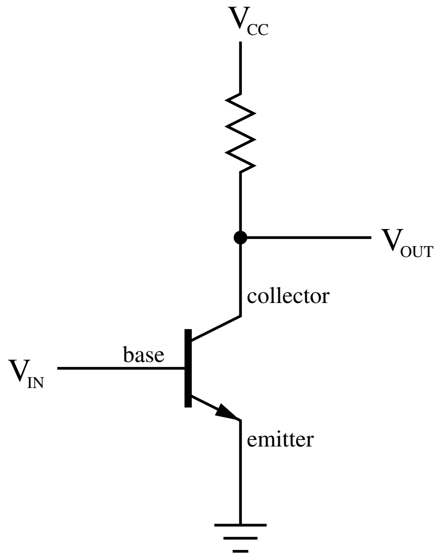
Technical information:

*** STOP: 0x00000050 (0xFD3094C2,0x00000001,0xFBFE7617,0x00000000)

*** SPCMDCON.SYS - Address FBFE7617 base at FBFE5000, DateStamp 3d6dd67c



Transistor



Portas Lógicas

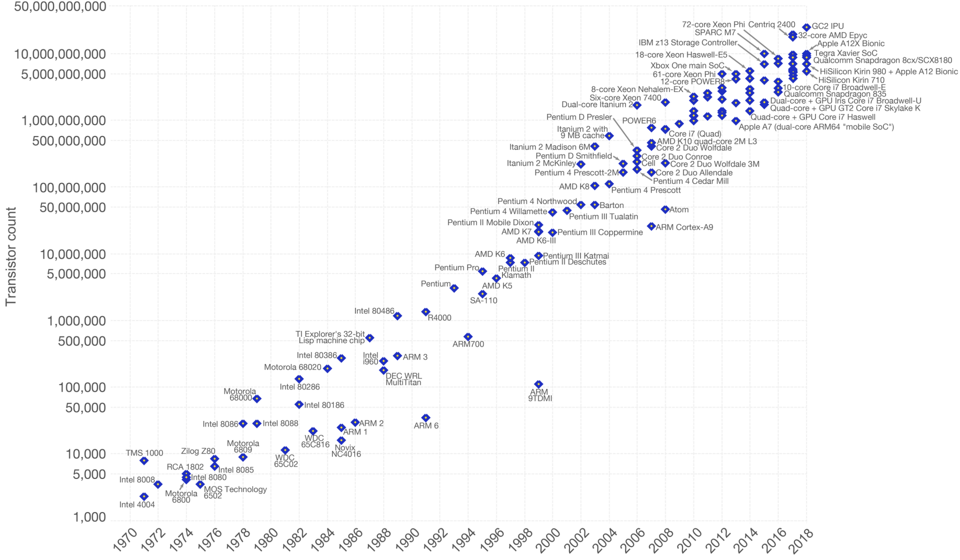
John Von Neuman

1903 - 1957

Moore’s Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2018)

Our World in Data

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are linked to Moore's law.



Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)
The data visualization is available at OurWorldinData.org. There you find more visualizations and research on this topic.

Lei de Moore

Gordon Moore

Intel, 1965

Computação Quântica

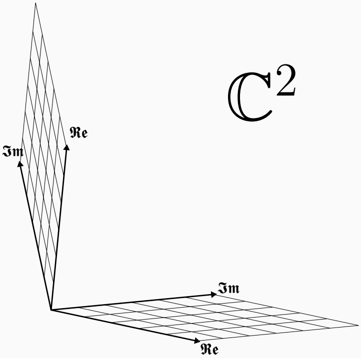
Richard Feynman

1918 - 1988

Postulado. (***Representação***)
Um sistema físico isolado está associado a um espaço de Hilbert $\mathcal{H}$ e é, num dado momento no tempo, completamente descrito por um vetor unitário em $\mathcal{H}$, o estado do sistema.

Postulado. (*Representação*)
Um sistema físico isolado está associado a um espaço de Hilbert $\mathcal{H}$ e é, num dado momento no tempo, completamente descrito por um vetor unitário em $\mathcal{H}$, o estado do sistema.

$$|\Psi\rangle \in \mathbb{C}^2 \qquad\qquad (\mathbf{x} \in \mathbb{C}^2)$$



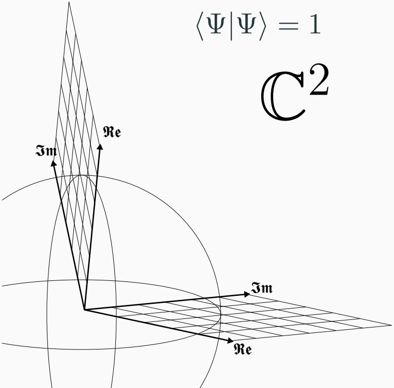
$$\mathbb{C}^2$$

Postulado. (*Representação*)
Um sistema físico isolado está associado a um espaço de Hilbert $\mathcal{H}$ e é, num dado momento no tempo, completamente descrito por um vetor unitário em $\mathcal{H}$, o estado do sistema.

$$|\Psi\rangle \in \mathbb{C}^2 \qquad (\mathbf{x} \in \mathbb{C}^2)$$

$$\langle\Psi|\Psi\rangle = 1 \qquad (\mathbf{x}^\dagger \mathbf{x} = 1)$$

$$\mathbb{C}^2$$



Postulado. (*Composição*)
Um sistema é descrito pela composição dos estados que o representam, que se dá através do *produto tensorial*.

$$|\Psi\rangle \otimes |\Phi\rangle \equiv |\Psi\Phi\rangle$$

Postulados

Definição. (***Produto de Kronecker***)
É um caso particular do *produto tensorial*, computado da seguinte forma:

$$\mathbf{x} \otimes \mathbf{y} \equiv \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \\ x_2 \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 y_1 \\ x_1 y_2 \\ x_2 y_1 \\ x_2 y_2 \end{bmatrix}$$

Ele é bilinear e associativo, mas não é comutativo :(

Definição. ***(Produto de Kronecker)***
Mas nem tudo está perdido. Tem outras propriedades legais também!
Produto misto:

$$U \otimes V \cdot |\Psi\rangle \otimes |\Phi\rangle = U|\Psi\rangle \otimes V|\Phi\rangle \quad \mathbf{A} \otimes \mathbf{B} \cdot \mathbf{x} \otimes \mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \otimes \mathbf{x} \cdot \mathbf{y}$$

Transposição:

$$(|\Psi\rangle \otimes |\Phi\rangle)^\dagger = \langle\Psi| \otimes \langle\Phi| \qquad (\mathbf{x} \otimes \mathbf{y})^\dagger = \mathbf{x}^\dagger \otimes \mathbf{y}^\dagger$$
$$|\Psi\Phi\rangle^\dagger = \langle\Phi\Psi|$$

Existem outras, mas essas duas são as mais interessantes para nós hoje.

Definição. (*Base Computacional*)
A *Base Computacional* é determinada pelos estados ortogonais $|0\rangle$ e $|1\rangle$, definidos por

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$
$$|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Chamaremos estes estados de *qubits*!

Definição. (***Base Computacional***)
Construimos vetores de *qubits* (registradores) através da composição:

$$|00\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle = \begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1\\0\\0\\0\end{bmatrix} \quad |01\rangle = |0\rangle \otimes |1\rangle = \begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\1\\0\\0\end{bmatrix}$$

$$|10\rangle = |1\rangle \otimes |0\rangle = \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\0\\1\\0\end{bmatrix} \quad |11\rangle = |1\rangle \otimes |1\rangle = \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\1\\0\\1\end{bmatrix}$$

Postulado. (*Evolução*)
A evolução de um sistema é descrita por um *Hamiltoniano* H, representado por uma matriz Hermitiana, isto é, $H = H^\dagger$. Assim temos, pela equação de Schrödinger:

$$H\left|\Psi\right\rangle = \mathrm{i}\hbar\frac{\mathrm{d}\left|\Psi\right\rangle}{\mathrm{dt}} \implies \frac{\mathrm{d}\left|\Psi\right\rangle}{\mathrm{dt}} = \frac{-\mathrm{i}}{\hbar}\mathrm{H}\left|\Psi\right\rangle$$

Sejam $|\Psi(t_k)\rangle$, $|\Psi(t_{k+1})\rangle$ os estados do sistema no tempo t_k e t_{k+1}, respectivamente. Segue que:

$$\left|\Psi(t_{k+1})\right\rangle = e^{\frac{-iH}{\hbar}(t_{k+1}-t_k)}\left|\Psi(t_k)\right\rangle$$

Postulados

Postulado. (***Evolução***)

1. Seja $U = e^{\frac{-iH}{\hbar}(t_{k+1} - t_k)}$ o operador de evolução.

Postulado. (*Evolução*)

1. Seja $U = e^{\frac{-iH}{\hbar}(t_{k+1}-t_k)}$ o operador de evolução.
2. Sabemos também que $U^\dagger = e^{\frac{iH^\dagger}{\hbar}(t_{k+1}-t_k)}$.

Postulados

Postulado. (*Evolução*)

1. Seja $U = e^{\frac{-iH}{\hbar}(t_{k+1}-t_k)}$ o operador de evolução.
2. Sabemos também que $U^\dagger = e^{\frac{iH^\dagger}{\hbar}(t_{k+1}-t_k)}$.
3. Como a matriz H é Hermitiana, temos que $U^\dagger U = I$.

Postulado. (*Evolução*)

1. Seja $U = e^{\frac{-iH}{\hbar}(t_{k+1}-t_k)}$ o operador de evolução.
2. Sabemos também que $U^\dagger = e^{\frac{iH^\dagger}{\hbar}(t_{k+1}-t_k)}$.
3. Como a matriz H é Hermitiana, temos que $U^\dagger U = I$.

Podemos então dizer que a evolução dos sistemas se dá por operadores unitários!

Postulado. (*Evolução*)

1. Seja $U = e^{\frac{-iH}{\hbar}(t_{k+1}-t_k)}$ o operador de evolução.
2. Sabemos também que $U^\dagger = e^{\frac{iH^\dagger}{\hbar}(t_{k+1}-t_k)}$.
3. Como a matriz H é Hermitiana, temos que $U^\dagger U = I$.

Podemos então dizer que a evolução dos sistemas se dá por operadores unitários!

Hora de conhecer alguns deles!

Matriz de Hadamard

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$H\left|0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right)$$

$$H\left|1\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right)$$

Porta de Hadamard

$$|0\rangle \; -\!\boxed{H}\!- \; \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$$|1\rangle \; -\!\boxed{H}\!- \; \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

Postulados

Matrizes de Pauli Também conhecidas como σ_1, σ_2 e σ_3, respectivamente.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \qquad Y = \begin{bmatrix} 0 & -\mathrm{i} \\ \mathrm{i} & 0 \end{bmatrix} \qquad Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Uma nota sobre reversibilidade
Para toda matriz unitária, como $U^\dagger U = UU^\dagger = I$, temos também que $U^\dagger = U^{-1}$.

Isso significa que todos os processos quânticos de computação serão **reversíveis**!

O Princípio de Landauer.

O princípio de Landauer estabelece que toda vez que um *bit* de informação é apagado, o sistema perde energia, que é liberada na forma de calor, com limite inferior

$$E > KT \log 2$$

Onde:

- E: Energia dissipada
- K: Constante de Boltzmann, $1.380^{-23} J/K$
- T: Temperatura ambiente, em *Kelvin*

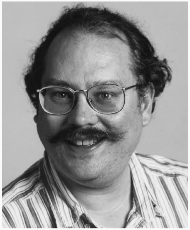
Postulado. (*Medida*)

Trapped-ion

Oi íon aprisionado

Lov Grover

Bell Labs



Peter Shor

MIT


SO, QUANTUM TELEPORTATION—
THE NAME IS MISLEADING. IT'S A PARTICLE STATISTICS THING.
SO IT'S NOT LIKE STAR TREK? THAT'S BORING.
OKAY, I'M SICK OF THIS. EVERY TIME THERE'S A PAPER ON QUANTUM TELEPORTATION, YOU REPORTERS WRITE THE SAME DISAPPOINTED STORY.
BUT—
TALK TO SOMEONE ELSE. I'M GOING TO THE BAHAMAS.
CLICK
TELEPORTER
QUANTUM
REGULAR
VRMMM

Teletransporte Quântico

Imagine o teletransporte como um operador
$\mathcal{T} : |\Psi\rangle \otimes |\xi\rangle \to |\xi\rangle \otimes |\Psi\rangle$

Teorema. ***(Não-Clonagem)***
Não é possível fazer uma cópia de um estado quântico qualquer.

Prova.
Vamos supor que existe um operador unitário U capaz de clonar um estado $|\Psi\rangle$ qualquer, isto é:

$$U(|\Psi\rangle \otimes |\xi\rangle) = |\Psi\rangle \otimes |\Psi\rangle = |\Psi\Psi\rangle$$

Como isso vale para qualquer estado, também é preciso que

$$U(|\Phi\rangle \otimes |\xi\rangle) = |\Phi\rangle \otimes |\Phi\rangle = |\Phi\Phi\rangle$$

Teorema da não-clonagem

Tomando o produto interno entre $|\Psi\Psi\rangle$ e $|\Phi\Phi\rangle$:

$$\begin{aligned}
\langle\Psi\Psi|\Phi\Phi\rangle &= \langle\xi\Psi|\, U^\dagger U \,|\Phi\xi\rangle \\
&= \langle\xi\Psi|\Phi\xi\rangle \\
(\langle\Psi| \otimes \langle\Psi|) \cdot (|\Phi\rangle \otimes |\Phi\rangle) &= (\langle\Psi| \otimes \langle\xi|) \cdot (|\Phi\rangle \otimes |\xi\rangle) \\
\langle\Psi|\Phi\rangle \otimes \langle\Psi|\Phi\rangle &= \langle\Psi|\Phi\rangle \otimes \langle\xi|\xi\rangle \\
\langle\Psi|\Phi\rangle^2 &= \langle\Psi|\Phi\rangle
\end{aligned}$$

Portanto:

$$\langle\Psi|\Phi\rangle = \begin{cases} 1 \text{ se } \ |\Psi\rangle = |\Phi\rangle \\ 0 \text{ se } \ |\Psi\rangle \perp |\Phi\rangle \end{cases}$$

$\blacksquare$

Fótons

$$\left|\quad\right\rangle = \frac{\left|\quad\right\rangle + \left|\quad\right\rangle}{\sqrt{2}}$$

Caminhadas Quânticas

$$\left| \qquad \right\rangle = \frac{\left| \qquad \right\rangle + \left| \qquad \right\rangle}{\sqrt{2}}$$

Computação Topológica

Nós

Nós

Ânions

Ânions

Computação Adiabática

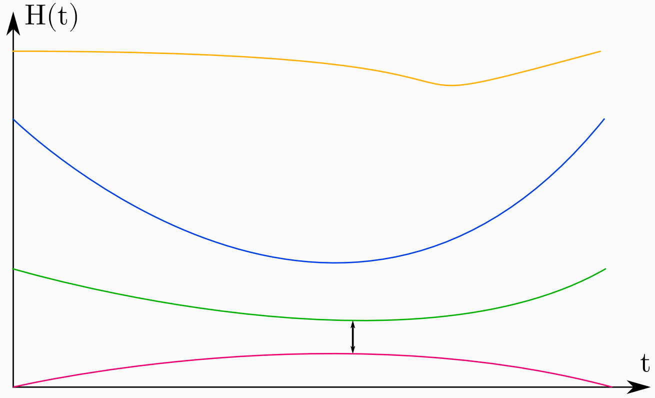
Equação de Pauli

$$\left[\frac{1}{2m}(\vec{\sigma}\cdot(\vec{p}-q\vec{A}))^2+q\phi\right]|\psi\rangle = \mathrm{i}\hbar\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}|\psi\rangle$$

Têmpera Quântica

$$
\begin{aligned}
H(t) = &- \frac{A(t)}{2} \sum_i h_i \cdot X \left| s_i \right\rangle \\
&+ \frac{B(t)}{2} \left(\sum_i h_i \cdot Z \left| s_i \right\rangle + \sum_{i<j} J_{i,j} \cdot Z \left| s_i \right\rangle \otimes Z \left| s_j \right\rangle \right)
\end{aligned}
$$

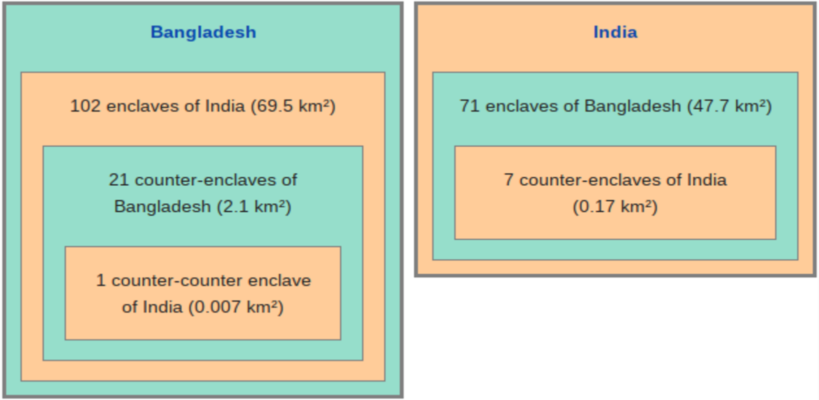
Têmpera Quântica

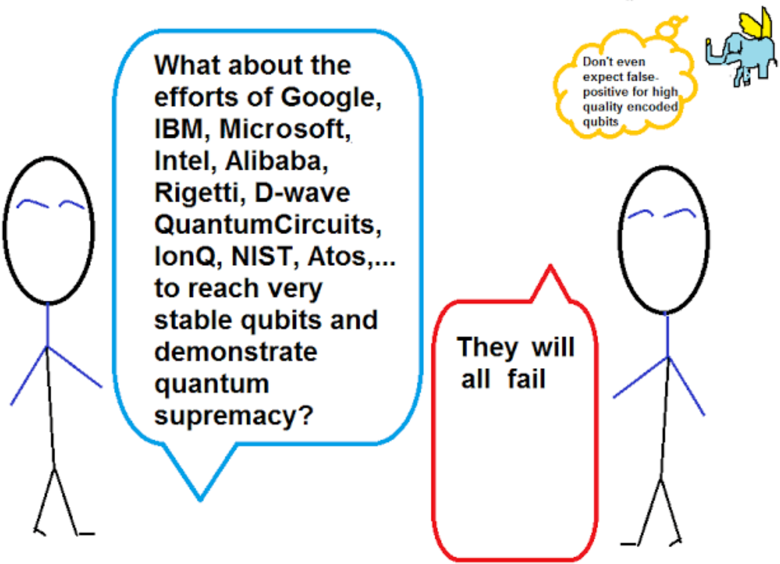


Fim?


Assam
Kurigram (district)
Jalpaiguri (district)
Cooch Behar
Cooch Behar (district)
Lalmonirhat (district)
Nilphamari (district)
Jalpaiguri (district)

Saltos Quânticos




What about the efforts of Google, IBM, Microsoft, Intel, Alibaba, Rigetti, D-wave QuantumCircuits, IonQ, NIST, Atos,... to reach very stable qubits and demonstrate quantum supremacy?
Don't even expect false-positive for high quality encoded qubits
They will all fail

Gil Kalai

Yale & Huji

Definição um tanto vaga. (Supremacia Quântica)
Atingir a supremacia quântica significa realizar uma tarefa em um computador quântico que não se possa concretizar no clássico.

Supremacia Quântica

Material

- The Quantum Algorithm Zoo
- Quanta Magazine

Obrigado

Bibliografia

Introduction to topological quantum computation with non-Abelian anyons, FIELD, B. & SIMULA, T., School of Physics and Astronomy, Monash University, Victoria 3800, Australia.

Reprograme o seu DNA na frequência do Sucesso