

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ELETRICIDADE  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DERLONE ARAÚJO JARCELON SILVA**

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE PROCESSADORES:  
UMA BREVE HISTÓRIA DA MICRO A NANOTECNOLOGIA**

**SÃO LUÍS**

**2017**

**DERLONE ARAÚJO JARCELON SILVA**

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE PROCESSADORES:  
UMA BREVE HISTÓRIA DA MICRO A NANOTECNOLOGIA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Eletricidade.

Orientador: Prof. Dr. Denivaldo Lopes.

**SÃO LUÍS**

**2017**

Silva, Derlone Araújo Jarcelon.

Desenvolvimento e construção de processadores : uma breve história da micro a nanotecnologia / Derlone Araújo Jarcelon Silva. - 2017.

53 f.

Orientador(a): Denivaldo Lopes.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

1. Nanocélulas. 2. Nanoprocessadores. 3. Nanotubos de Carbono. 4. Transistores. I. Lopes, Denivaldo. II. Título.

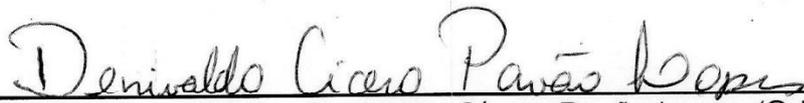
DERLONE ARAÚJO JARCELON SILVA

**DESENVOLVIMENTO E CONTRUÇÃO DE PROCESSADORES:  
UMA BREVE HISTÓRIA DA MICRO A NANOTECNOLOGIA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Eletricidade.

Aprovada em 21/07/2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Denivaldo Cícero Pavão Lopes (Orientador)

Universidade Federal do Maranhão



M.Sc. Nelson José Camelo

Universidade Federal do Maranhão



Dr. José de Ribamar Braga Pinheiro Junior

Universidade Federal do Maranhão

*“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas.”*

*Claude Lévi-Strauss*

## RESUMO

Desde o surgimento do primeiro transistor, em 1946, até a comercialização de circuitos integrados em escala nanométrica, como se vê hoje, a quantidade de aplicações da Eletrônica alcançou as mais diversas atividades da sociedade. Para que isso fosse possível, nas últimas décadas houve uma agressiva miniaturização dos dispositivos eletrônicos, especialmente dos transistores aqui citados, de modo a se alcançar um poder de processamento cada vez maior e mais eficiente. Entretanto, à medida que esse escalonamento alcança níveis quase que atômicos, a comunidade científica começa a encontrar limites fundamentais: correntes de fuga, superaquecimento, perda na qualidade de sinal, dentre outros. Os processadores, os quais são os principais componentes de qualquer dispositivo eletrônico, passaram por constantes modificações e rearranjos ao longo dos anos, de modo a tentar superar as barreiras encontradas pela constante miniaturização dos dispositivos eletrônicos. Como exemplo, tem-se a disposição de vários núcleos processadores trabalhando conjuntamente em um mesmo *chip*, de modo que a aplicação que está sendo executada possa ser dividida, e a frequência real de processamento ultrapasse a frequência de *clock* de um único processador. Embora, tenham funcionado eficientemente por vários anos, as diversas técnicas de desenvolvimento de processadores vêm passando por dificuldades para acompanhar os princípios da Lei de Moore. Isso resultou na busca, por parte da indústria da eletrônica, de possíveis substitutos para o tradicional transistor baseado unicamente em silício. Dentre os novos dispositivos nano tecnológicos, destacam-se as nanocélulas e os nanotubos de carbono, ambos voltados para aplicações de processamento de dados. A expectativa é que tais nanossistemas performem com maior eficiência e possam, em um futuro próximo, ser comercializados em larga escala.

**Palavras-chave:** Nanoprocessadores. Transistores. Unidade Central de Processamento. Nanocélulas. Nanotubos de Carbono. Microprocessadores.

## ABSTRACT

Since the invention of the first transistor, in 1946, to the commercialization of integrated circuits at the nanoscale, as we can see nowadays, the number of Electronics applications have reached a great number of activities in our society. To make this possible, in the last decades there has been an aggressive miniaturization of the electronic devices, ultimately transistors, in order to achieve an increasing and more efficient processing power. However, as this scaling gets close to atomic levels, the scientific community begins to find fundamental bounds: leakage currents, overheating, signal quality loss, among others. Processors, which are the main components of any electronic device, have been under constant modifications and rearrangements over the years in order to overcome the barriers encountered by the constant miniaturization of electronic devices. As an example, there is the possibility for multiple processor cores working together on the same *chip*, so that the application being executed can be split, and the actual processing frequency exceeds single processor's *clock* frequency. Although they have worked efficiently for several years, the many techniques utilized in processor's technologies have been struggling to keep up with the principles of Moore's Law. This fact has resulted in the electronics industry pursuing possible substitutes for the traditional silicon-based transistor. Among the new nano-technology devices, the most important are nanocells and carbon nanotubes, both of which are geared towards data processing applications. The expectation is that such nanosystems will perform more efficiently and may, soon, be commercialized on a large scale.

**Keywords:** Nanoprocessors. Transistors. Central Processing Unit. Nanocells. Carbon nanotubes. Microprocessors.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Funcionamento de uma Unidade Central de Processamento .....	18
Figura 2 - Processador Intel 4004 .....	20
Figura 3 - Wafer após o Processo de Fotolitografia .....	24
Figura 4 - Processo de Fotolitografia .....	24
Figura 5 - Fuga de Elétrons.....	27
Figura 6 - MEP da Molécula de Água (H <sub>2</sub> O).....	31
Figura 7 - Implementação de uma Porta Lógica AND em uma Molécula de Tri-fluor-benzeno .....	32
Figura 8 - Estrutura de uma Nanocélula.....	33
Figura 9 - Construção de um Circuito Integrado Composto por Nanocélulas .....	34
Figura 10 - Representação das Ligações Covalentes em um Nanotubo de Carbono .....	36
Figura 11 - Representação Esquemática e Gráfica do Funcionamento de um MOSFET .....	37
Figura 12 - Estrutura de um Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido.....	38
Figura 13 - Estrutura Geométrica de um Transistor 3T FinFET .....	40
Figura 14 - Comparação entre as Estruturas Geométricas do 3T FinFET e do GAA-FET .....	40
Figura 15 - Single-Walled Carbon Nanotubes com diferentes disposições geométricas dos átomos de carbono .....	42
Figura 16 - Estrutura de um FET com um CNT agindo como Channel e o Gráfico com as variações de corrente em função da tensão aplicada no Gate.....	44
Figura 17 - Esquema do transistor de 1 nanometro de comprimento de gate.....	45
Figura 18 - Produto Resultante do Processo Químico de Produção de CNTs.....	46

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Evolução dos Microprocessadores Produzidos pela Intel .....	21
Quadro 2 - Tabela Verdade para o Esquema da Figura 6 .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Possíveis Materiais de Alta Constante Dielétrica .....	39
---	----

## LISTA DE SIGLAS

CPU	Central Processing Unit
CI	Cicuito Integrado
CNT	Carbon Nanotube
ENIAC	Electronic Numerical Integrator and Computer
FET	Field Effect Transistor
GAA-FET	Gate-all-around Field Effect Transistor
Hz	Hertz
MEP	Molecular Electrostatic Potencial
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ROM	Read-Only Memory
UC	Unidade de Controle
UCP	Unidade Central de Processamento
ULA	Unidade de Lógica e Aritmética

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	Objetivos .....	15
1.2	Metodologia.....	15
1.3	Estrutura do Trabalho.....	16
<b>2</b>	<b>A ATUAL TECNOLOGIA DE MICROPROCESSAMENTO E AS SUAS LIMITAÇÕES .....</b>	<b>17</b>
2.1	Microprocessadores .....	17
2.1.1	Unidade de Lógica e Aritmética.....	19
2.1.2	Unidade de Controle.....	19
2.1.3	Registradores .....	19
2.1.4	Relógio ( <i>Clock</i> ).....	19
2.2	Evolução dos Microprocessadores.....	20
2.3	Tecnologia de Multinúcleos .....	21
2.4	Processo de Miniaturização em Microprocessadores .....	23
2.5	Principais Limites Físicos dos Processadores Atuais.....	25
2.5.1	Superaquecimento em Processadores.....	26
2.5.2	Tunelamento Quântico de Elétrons .....	26
<b>3</b>	<b>DISPOSITIVOS NANOELETRÔNICOS .....</b>	<b>29</b>
3.1	Nanocélulas.....	29
3.1.1	Potencial Eletroestático Molecular .....	30
3.1.2	Estrutura de uma Nanocélula .....	33
3.2	Nanotubos de Carbono .....	35
3.2.1	Descoberta dos Nanotubos de Carbono .....	35
3.2.2	Estrutura química dos Nanotubos de Carbono.....	36
3.2.3	Evolução dos Transistores de Efeito de Campo.....	37
3.2.4	Propriedades Elétricas dos Nanotubos de Carbono.....	41
3.2.5	Aplicação de CNTs em Transistores de Efeito de Campo.....	43
3.2.6	Limitações à implementação de CNTs em Circuitos Integrados .....	45
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço dos estudos na área de eletrônica alcançou patamares assustadores nas últimas décadas. A sociedade, através de suas necessidades, impulsionou a comunidade científica, de modo que a evolução da tecnologia alcançou o alto nível que se tem hoje, e que não para de se aprimorar.

Paralelamente ao avanço da tecnologia, nota-se uma melhoria em vários outros aspectos importantes para uma sociedade, tais como: desenvolvimento econômico e social, aumento da expectativa de vida, melhora nos índices de desenvolvimento humano, desenvolvimento dos meios de produção, dentre muitos outros. Dessa forma, é inquestionável que, embora estejamos em um patamar tecnológico altíssimo, é necessário mais estudo voltado a isso e, conseqüentemente, mais desenvolvimento e evolução.

Como exemplo de uma das descobertas cruciais na eletrônica diminuta, ocorrida há não muito tempo atrás, cita-se a válvula a vácuo, a qual foi responsável pelo grande desenvolvimento do rádio, televisão, computador e telefone. Porém, por se tratar de um dispositivo grande, e de consumo de energia elevado, logo viria a ser substituído.

Seguindo essa linha de raciocínio, faz-se necessário frisar mais uma vez que são as necessidades da sociedade que impulsionam o desenvolvimento de determinada tecnologia. Desse modo, foi durante a Segunda Guerra Mundial que a utilização das válvulas eletrônicas aqui citadas alcançou seu patamar máximo, em prol de atender às demandas das forças armadas. Após o final da guerra, houve uma busca acirrada para desenvolver dispositivos menores e mais confiáveis que as válvulas, foi aí que se deu o surgimento do transistor.

O transistor foi inventado em 1947 por John Bardeen, Walter H. Brattain e William Shockley. Em 1956, os três receberam o prêmio Nobel de Física por suas pesquisas com os semicondutores e pela descoberta do transistor. A forma e o tamanho do transistor eram bastante diferentes do arranjo enorme das válvulas à vácuo. Com a invenção dos transistores para aplicações digitais, a maioria dos fabricantes de computadores iniciaram a substituição das dispendiosas e quentes válvulas eletrônicas pelos novos dispositivos, estes bem mais baratos e com pouquíssima dissipação de calor. (1)

Com o passar dos anos mais dispositivos revolucionários foram aparecendo. O circuito integrado (CI), por exemplo, foi inventado por Jack Kilby em 1958. No início dos anos 70 apareceram as calculadoras eletrônicas portáteis, revolucionando assim a arte de calcular. Finalmente, em 1971, foi desenvolvido o primeiro microprocessador, pela *Intel Corporation*.

O desenvolvimento de transistores cada vez menores e mais eficientes foi o principal responsável pelo aumento da capacidade de processamento e pela diminuição do tamanho dos processadores. A Lei de Moore estabelece que a complexidade dos circuitos integrados, e, conseqüentemente, a performance computacional é dobrada a cada dezoito meses, e da mesma forma, a quantidade de transistores em um único *chip* também dobra durante o mesmo período. (2)

Embora avanços impressionantes venham sendo obtidos na microeletrônica, os processadores atuais, fabricados com precisas técnicas de miniaturização, vêm apresentando problemas na diminuição do seu tamanho para a escala nanométrica, e conseqüentemente na melhoria significativa de desempenho. Como exemplo, cabe aqui citar os materiais condutores, como o silício, principal componente utilizado na fabricação de microprocessadores, os quais podem perder algumas de suas propriedades quando se aproximam de estruturas muito pequenas, em um tamanho próximo à escala atômica. Um outro exemplo é a grande dissipação de calor em microprocessadores, que aumenta ainda mais à medida que se diminui a dimensão desses dispositivos<sup>3</sup>, e os impedem de funcionarem em frequências muito altas.

Ao longo dos anos, a comunidade científica, juntamente com a indústria da eletrônica, encontrou algumas soluções temporárias para tais barreiras. Como exemplo, tem-se a divisão do *chip* do processador em vários núcleos, de modo que haja uma divisão de tarefas, alcançando assim uma velocidade de processamento maior, sem necessariamente haver aumento da frequência de *clock*. Embora algumas técnicas venham sendo aplicadas com sucesso, alguns autores acreditam que apenas com a mudança no material base dos transistores (o silício) é que será possível dar continuidade ao processo de miniaturização e melhora de performance que se observou nas últimas décadas. (3)

Os microprocessadores atuais são resultado de uma miniaturização, a qual seria a diminuição de componentes até a escala micrométrica. Já a nova perspectiva que vem sendo amplamente estudada e desenvolvida pela comunidade científica

parte “de baixo para cima”, pois primeiro são desenvolvidos os dispositivos em escala molecular (nanoclículas, nanofios, nanotubos de carbono, etc.), para só então, através da ordenada e estratégica aglomeração dos mesmos, obter-se estruturas mais complexas, como nanotransistores, nanomemórias, e, finalmente, os nanoprocessadores.

## 1.1 Objetivos

Primeiramente estuda-se a evolução da tecnologia dos microprocessadores, levando em consideração o seu componente mais importante, o transistor. Em seguida, mostra-se onde se chegou, no que diz respeito à tecnologia de processamento, e, principalmente, quais as principais limitações apresentadas por estes dispositivos, juntamente com as barreiras físicas que dificultam o avanço tecnológico dos mesmos. A finalidade é organizar um conjunto de informações que permitam entender o funcionamento básico de um nanoprocessador, de modo que se entenda o que levou a indústria da eletrônica a considerar a nanotecnologia como principal solução para as barreiras de performance de dispositivos eletrônicos. Além disso, faz-se um estudo dos principais nano dispositivos aceitos pelos pesquisadores como substitutos do silício, ressaltando-se as características que os levaram a ser considerados como tal.

## 1.2 Metodologia

Neste trabalho de conclusão de curso, um estudo bibliográfico dos tópicos a serem estudados é feito. Por tratar-se de assuntos recentes, a principal fonte de pesquisa são artigos científicos, encontrados nas mais conceituadas bibliotecas acadêmicas disponíveis *online*. Dessa forma, faz-se uma pesquisa descritiva, de modo a entender os principais conceitos envolvendo tecnologia de nanoprocessadores.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Primeiramente faz-se um estudo sobre a evolução dos nanoprocessadores, as principais barreiras físicas com relação à essa tecnologia, bem como as principais soluções aceitas pela comunidade científica para superar tais barreiras. Em seguida, no capítulo 2, é abordado de maneira ampla os principais aspectos dos nanoprocessadores atuais, desde o seu embasamento histórico até as tecnologias empregadas atualmente. Em sequência estuda-se os principais componentes de um processador, o funcionamento dos mesmos, e como se dá integração desses dispositivos em um mesmo *chip*. Em seguida mostra-se como se deu a evolução dos principais processadores comercializados, e os principais fatores que levaram ao alcance de um maior poder de processamento. Estda-se também as principais barreiras físicas que impedem que a velocidade de operações em processadores consiga alcançar os princípios estabelecidos pela Lei de Moore. Por fim, no capítulo 3, são descritos os principais nano sistemas – nanocélulas e nanotubos de carbono – que buscam superar as limitações encontradas pela tecnologia de miniaturização dos componentes dos processadores atuais.

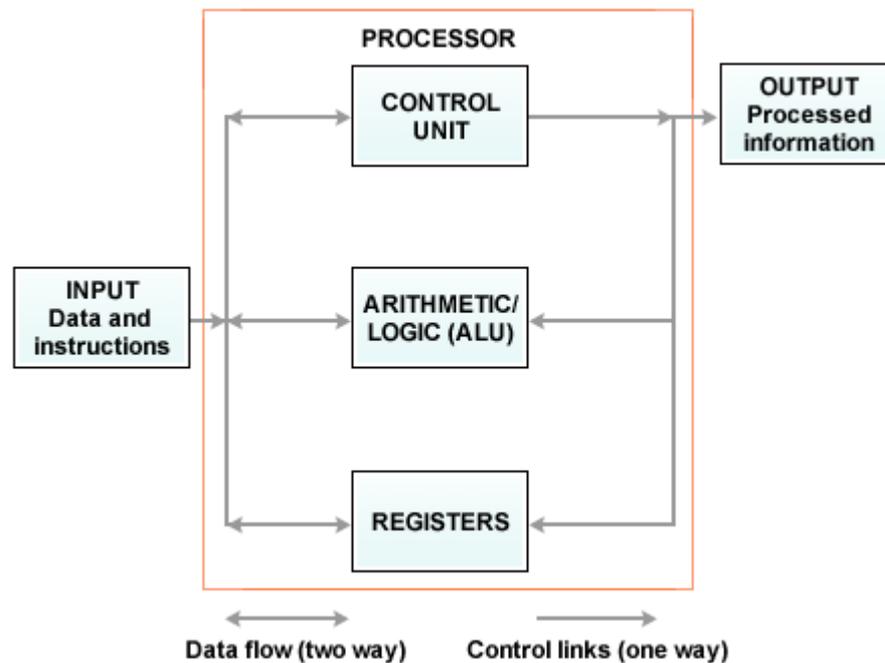
## 2 A ATUAL TECNOLOGIA DE MICROPROCESSAMENTO E AS SUAS LIMITAÇÕES

Desde que a primeira máquina baseada na tecnologia de transistores foi desenvolvida, computadores vêm sendo usados em uma variedade cada vez maior de aplicações. Tais aplicações variam desde grandiosos sistemas, como os utilizados em bancos para manter os dados de contas de todos os clientes, até sistemas muito pequenos que podem, por exemplo, ser usados dentro de um escritório para resolução de problemas matemáticos particulares relacionados à engenharia. O avanço na tecnologia dos microprocessadores, dessa forma, significa que se torna capaz de obter-se capacidades altíssimas de processamento em um simples circuito integrado e, conseqüentemente, a quantidade de aplicações para tal tecnologia torna-se praticamente ilimitada.

### 2.1 Microprocessadores

O principal componente a ser observado, quando se analisa o desempenho de um computador, é a Unidade Central de Processamento (UCP). A UCP, também chamada de *Central Processing Unit* (CPU), gerencia todos os recursos disponíveis do sistema. De maneira geral, esse dispositivo realiza cálculos simples, como somas e comparações, porém em uma velocidade extremamente alta. O diagrama de funcionamento de uma CPU, também chamada de microprocessador, ou simplesmente processador, pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama de Funcionamento de uma Unidade Central de Processamento. (4)



As atividades realizadas pela CPU podem ser divididas em duas grandes categorias funcionais:

- **Função de processamento:** Realiza as atividades relacionadas com a efetiva execução de uma operação. O dispositivo principal desta área de atividades de uma CPU é a Unidade de Lógica e Aritmética (ULA). Os demais componentes relacionados com a função de processamento são os registradores, que servem para armazenar dados usados pela ULA. O barramento interno da CPU é o responsável por interligar estes componentes. (5)

- **Função de controle:** é exercida pelos componentes da CPU que se encarregam das atividades de busca, interpretação e controle da execução das instruções, bem como do controle da ação dos demais componentes do sistema de computação. A área de controle é projetada para entender o que fazer, como fazer, e comandar quem vai fazer no momento adequado. Os dispositivos que compõe essa estrutura de controle são: unidade de controle, decodificador, registrador de instrução, contador de instrução, relógio ou *clock*, e os registradores de endereço de memória ou de dados de memória. (5)

### 2.1.1 Unidade de Lógica e Aritmética

A ULA é um aglomerado de circuitos lógicos que, de maneira integrada, realiza operações matemáticas com os dados que lhes são fornecidos. Inicialmente, a tecnologia utilizada nas ULAs foi baseada nos relés e, posteriormente nas válvulas<sup>5</sup>. Com o surgimento dos transistores, os circuitos da Unidade de Lógica e Aritmética passaram a ser implementados com a tecnologia de semicondutores.

### 2.1.2 Unidade de Controle

A Unidade de Controle (UC), além de controlar a ação da ULA, possui a lógica necessária para realizar a movimentação de dados e instruções que entram ou saem da CPU, através de sinais de controle emitidos em instantes programados. De maneira geral, a UC recebe instruções da unidade de entrada e saída, as converte em um formato que pode ser entendido pela ULA, e controla qual etapa do programa está sendo executado.

### 2.1.3 Registradores

Um registrador é um local interno à CPU onde os dados que foram buscados na memória são armazenados de maneira temporária e posteriormente serão transferidos para a ULA. De maneira semelhante, após serem processados na ULA, os dados voltam a ser armazenados nos registradores para que, posteriormente, sejam transferidos para a memória. Dessa forma, os registradores podem ser vistos como memórias auxiliares da Unidade de Lógica e Aritmética. (6)

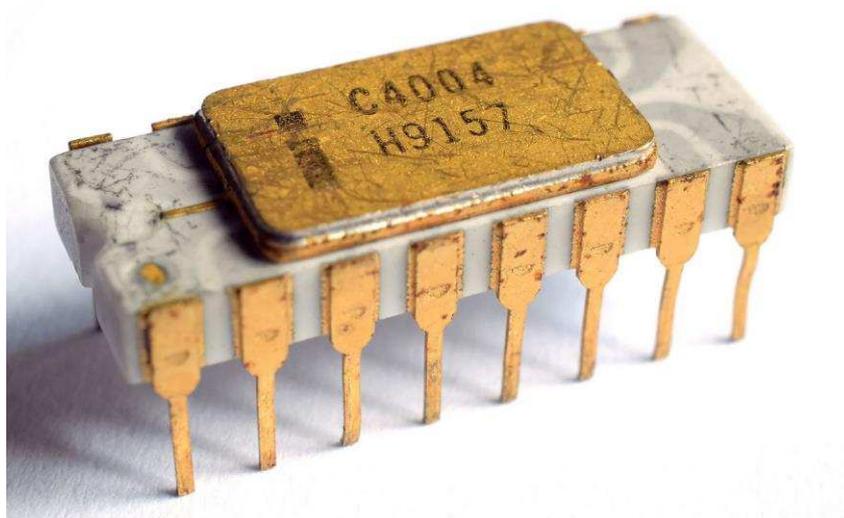
### 2.1.4 Relógio (*Clock*)

O *clock* é o dispositivo que atua na sincronização das atividades do processador. Em cada “pulso de *clock*” os dispositivos executam suas tarefas, param e vão para o próximo ciclo de *clock*. A medição do relógio é feita em *Hertz* (Hz), que é a quantidade de ciclos por segundo e é a unidade padrão de medida de frequência.

## 2.2 Evolução dos Microprocessadores

O que torna o microprocessador um dispositivo tão interessante é, indubitavelmente, a sua capacidade de ser programável. Por exemplo, o 4004, o qual é mostrado na Figura 2, que foi o primeiro microprocessador produzido pela Intel, chamou a atenção dos cientistas da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), os quais, como consequência, utilizaram-no na espaçonave *Jupiter 10*. A Intel soube perceber que o circuito 4004 era uma atraente novidade, pois era um circuito que podia ser usado em várias funções diferentes, de acordo com as instruções que estivessem gravadas na memória de leitura (ROM). Na verdade, o 4004 era um autêntico computador, o qual tinha mais capacidade de cálculo que o famoso computador ENIAC de 1946. Este, por sua vez, ocupava um salão de enormes dimensões. Entretanto, a companhia percebeu que havia demanda por um microprocessador mais potente. Como resultado, em 1972 a Intel lançou seu novo microprocessador de 8 bits, projetado por *Faggin*, que, para mostrar sua evolução em relação ao 4004, foi batizado de 8008. O 8008 tinha alguns problemas de interfaceamento com as memórias e, em 1974, a Intel lançou o 8080, ligeiramente melhor que o 8008. (7)

Figura 2 - Processador Intel 4004. (2)



Desde o lançamento do primeiro microprocessador, pela Intel, foram surgindo diversos outros fabricantes. Tal fato impulsionou a corrida em busca da fabricação de

dispositivos cada vez menores e com maior capacidade de processamento. O Quadro 1, a seguir, apresenta a evolução dos principais microprocessadores produzidos pela Intel, desde o lançamento do 4004 (em 1971) até o lançamento do Pentium II (introduzido em 1997).

Quadro 1 - Evolução dos Microprocessadores Produzidos pela Intel

Processador	Data	Frequência	Número de Transistores	Largura do Barramento
4004	1971	108KHz	2.300	4 bits
8008	1972	108KHz	3.500	8 bits
8080	1974	2MHz	6.000	8 bits
8088	1979	8MHz	29.000	16 bits
80386DX	1985	33MHz	275.000	32 bits
Pentium	1993	200MHz	3.100.000	64 bits
Pentium II	1997	300MHz	7.500.000	64 bits
Pentium III	2001	1400MHz	28.100.000	64 bits
Pentium 4	2006	3,8GHz	169.000.000	64 bits

O Quadro 1 apresenta alguns dos principais microprocessadores da Intel. Como pode-se perceber, ao longo dos anos a tecnologia permitiu um número cada vez maior de transistores por *chip*, e tal fato foi responsável pela maior velocidade e capacidade de processamento (seguindo, até então, os padrões estabelecidos pela Lei de Moore).

### 2.3 Tecnologia de Multinúcleos

O constante processo de miniaturização dos CIs, juntamente com o aumento da frequência de operação dos processadores, fez com que surgissem algumas barreiras físicas, especialmente o superaquecimento dos dispositivos. A principal, e mais utilizada atualmente, solução para esse problema foi a utilização de vários núcleos de processamento ao mesmo tempo (nos processadores *Dual Core*, *Quad Core* e *Multi Core*, por exemplo). Enquanto nos processadores de um só núcleo as funções de multitarefa não podem ultrapassar a capacidade da CPU sem que haja queda de desempenho, nos *chips* com mais de um núcleo o sistema operacional trata cada um desses núcleos como sendo processadores separados, de modo a

trabalharem simultaneamente, possibilitando que as instruções sejam processadas paralelamente.

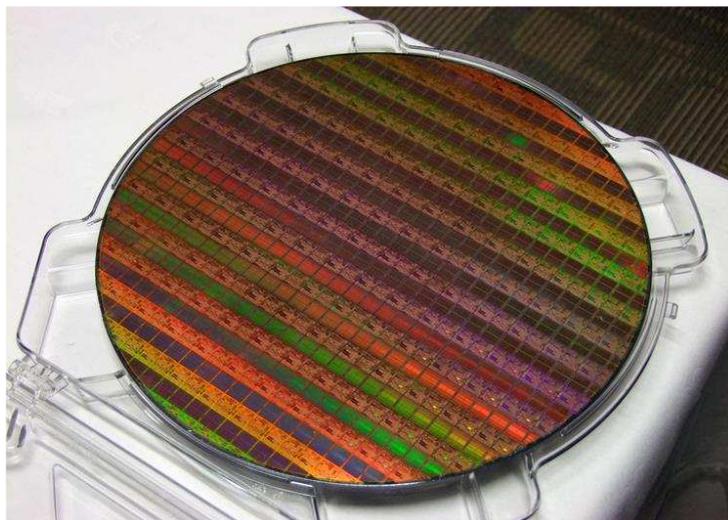
No caso das arquiteturas com mais de um núcleo, a eficiência e melhor desempenho podem ser percebidos ou não, dependendo do sistema operacional e, principalmente, da aplicação. É provável que um usuário comum perceba a diferença ao mudar para um processador de dois núcleos. No entanto, à medida em que o número de núcleos aumenta, fica mais difícil perceber melhorias no desempenho, se as aplicações não forem devidamente adaptadas para explorar e expor mais o paralelismo de *threads* (divisão do processo principal de um programa). Considerando a evolução na tecnologia de fabricação de circuitos integrados, não demorará muito tempo para que um número bem maior de *cores* por *chip* esteja disponível. Exemplo é o processador *UltraSparc T2*, desenvolvido pela *Sun*, que possui oito *cores*, sendo que cada um é capaz de executar até oito *threads*. Outro exemplo é o processador *Vega 2*, da *Azul Systems*, que possui 48. (8)

Embora a implementação de vários núcleos em um mesmo *chip* tenha permitido maior capacidade de processamento, há algumas limitações apresentadas por tal tecnologia. A primeira diz respeito à compatibilidade entre o *software* que está sendo executado e o processador que está o processando – de nada adianta um processador com múltiplos núcleos se o programa “roda” sem a divisão da execução em múltiplos *threads*. Como há uma vasta quantidade de dispositivos alvo de uma mesma aplicação – como, por exemplo, a utilização de um mesmo aplicativo em várias versões de celulares da *Samsung* – percebe-se que os desenvolvedores de softwares preferem um aplicativo que alcance o maior número de usuários possível do que um que seja compatível apenas com a última geração de processadores. Outra questão é a que diz respeito à complexidade do algoritmo dos softwares que funcionam em um número específico de *threads*, dificultando ainda mais o trabalho dos desenvolvedores. Vale lembrar que, mesmo que o sistema operacional de um computador seja capaz de dividir a execução de uma aplicação em várias partes, não se obtêm os mesmos resultados que um programa desenvolvido especificamente funcionar sob essa perspectiva. E por último tem-se a limitação térmica, pois, em regra, ao se adicionar mais *cores* com *clocks* de alta frequência, se espera que haja uma maior dissipação de calor do que se houvesse apenas um *core* funcionando por vez.

## 2.4 Processo de Miniaturização em Microprocessadores

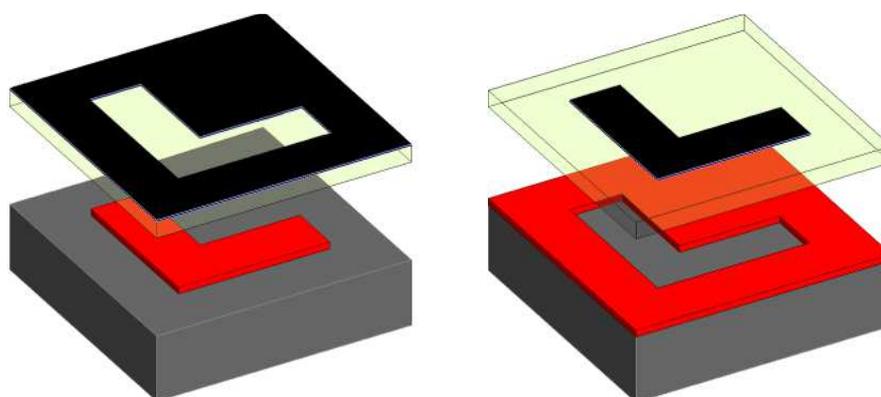
Desde a invenção do primeiro circuito integrado até a obtenção da tecnologia atual de microprocessamento, há um escalonamento “de cima para baixo” dos *chips* utilizados nesses circuitos. Atualmente, na construção dos CIs, os quais podem possuir centenas de milhões de transistores por unidade, faz-se necessário o uso de uma técnica de miniaturização chamada de fotolitografia, em que há a transferência de padrões de uma “máscara” óptica à lâmina de silício propriamente dita.

A fabricação de processadores acontece em modernos centros tecnológicos altamente especializados. Para se descrever o processo de maneira bem genérica, uma determinada quantidade de cristal de silício é colocada em uma espécie de haste, a qual é, posteriormente, inserida em silício fundido, e depois submetida à pressão e temperatura extremamente altas. A haste é então retirada e girada ao mesmo tempo. Uma vez concluída essa etapa, o cilindro é "fatiado", isto é, cortado em várias partes. No passo seguinte, a superfície do *wafer* (nome que se dá às finíssimas lâminas de silício obtidas) passa por um processo de oxidação, onde a aplicação de gases - especialmente oxigênio - e a temperatura elevada formam uma camada de dióxido de silício. Na próxima etapa, os *wafers* passam por um processo em que recebem uma camada de material fotossensível, isto é, que reage à luz. Nessa etapa, cada um dos blocos que comporão os *chips* dos processadores recebe luz ultravioleta em certos pontos e em determinadas intensidades, de modo que se formam pequenos blocos, cada um representando um futuro processador. A parte fotossensível dos *chips* que foi exposta à luz é removida pelo processo de “revelação”, em que o *wafer* é inserido em um fluido que reagirá com as regiões afetadas pela luz, removendo-as. O processo é repetido diversas vezes, até que se obtenha a configuração desejada. (9)

Figura 3 - *Wafer* após o Processo de Fotolitografia. (2)

Como dito anteriormente, no processo de fotolitografia há a transferência de padrões geométricos desde uma “máscara” óptica até a lâmina de silício propriamente dita. O resultado dessa transferência pode ser visualizado na Figura 3. Os padrões na máscara óptica (que deve ser fabricada previamente) contêm a geometria das diversas regiões que formam os dispositivos e interconexões elétricas existentes nos circuitos integrados. A Figura 4, a seguir, ilustra um processo simples de fotolitografia, em que a parte representada pela cor vermelha trata-se do circuito resultante após o processo de exposição à luz ultravioleta.

Figura 4 - Processo de Fotolitografia. (10)



Graças às pesquisas em nanotecnologia, é possível deixar os transistores dos *chips* cada vez menores. O processador *Intel 486*, por exemplo, tem cerca de 1 milhão de transistores, sendo que cada um deles conta com praticamente 1 micrômetros de

tamanho. Embora pareça muito pequeno, esse dispositivo apresenta um tamanho gigantesco, se comparado aos processadores atuais. Como exemplo, os processadores da linha Intel Core 2 Duo contam com cerca de 291 milhões de transistores. Esses *chips* utilizam tecnologia de fabricação de 0,065 micrômetros (ou 65 nanômetros), sendo que os mais recentes dessa linha são fabricados com 0,045 micrômetros (45 nanômetros). Finalmente, pesquisas sobre miniaturização de *chips* indicam que será possível levar esse processo até a casa dos 10 nanômetros (ou um valor não muito menor que isso). Depois disso, a indústria chegará a um limite físico onde os transistores provavelmente serão formados por poucos átomos e não poderão mais ser diminuídos. (9)

Atualmente os processadores mais modernos fabricados em larga escala (como o *Intel Core i7-6950X Extreme Edition*, da Intel) são construídos com utilização de tecnologia de fotolitografia na escala de 14 nanômetros. Isso não quer dizer que os transistores que compõem o circuito integrado têm o tamanho de 14 nanômetros, mas que a dimensão mínima de qualquer das partes que os compõem possuem essa dimensão. Dessa forma, nesse trabalho, sempre que se falar em “tamanho” dos dispositivos que compõem um processador, refere-se à tecnologia de fotolitografia utilizadas nos mesmos.

## 2.5 Principais Limites Físicos dos Processadores Atuais

Alguns fatores possuem grande influência na redução da escala de dispositivos eletrônicos semicondutores, tornando, conseqüentemente, essa técnica limitada. Como exemplo, tem-se o problema de tunelamento de elétrons que ocorre em distâncias muito curtas; a dissipação de calor demasiada, que ocorre com operações em frequência muito alta; e a dopagem do material pode tornar-se não uniforme ou sofrer falhas. Um jeito de resolver esses problemas seria encontrar um material mais apropriado para a fabricação desses dispositivos, mas isso só resolveria o problema de maneira marginal, uma vez que o silício é o material que apresenta maior compatibilidade com a tecnologia de fotolitografia utilizada na redução desses dispositivos. (11)

### 2.5.1 Superaquecimento em Processadores

A maioria dos dispositivos eletrônicos comercializados hoje, cujos *chips* são majoritariamente feitos de silício, possuem um tamanho de cerca de 25 nanômetros, correspondendo a um tamanho original de 65nm que passou por um processo de “compactação” do silício. O *Pentium XE*, que possui 376 milhões de transistores perfeitamente interconectados, possui uma área de apenas 1,37 centímetros quadrados. Certamente, os microprocessadores são uma das invenções mais fascinantes já feita pelo homem. Entretanto, eles consomem uma potência em torno de 130 *watts* - operando com uma tensão de cerca de 1,55 volts e correntes em torno de 80 amperes. Tudo isso faz com que os computadores atuais trabalhem dissipando muito calor e consumindo muita energia, mesmo com o microprocessador representando uma parcela insignificante do seu peso e tamanho total. (3)

Mesmo que as escalas desses dispositivos pudessem ser diminuídas ainda mais, endereçados e interconectados, os problemas de remoção de calor só aumentariam, uma vez que a corrente elétrica que passa através desses dispositivos não pode ser minimizada proporcionalmente, pois a relação sinal/perda não pode ser negligenciada sem que haja perda da qualidade do sinal elétrico (e conseqüentemente do conteúdo da informação). À medida que o tamanho dos dispositivos diminui, correntes elétricas, carregando informação, criam perturbações cada vez maiores, afetando a performance dos mesmos. Dessa forma, qualquer iniciativa científica que busque desenvolvimento tecnológico nesse aspecto precisaria mudar a maneira como a informação é codificada nos circuitos computacionais. (13)

### 2.5.2 Tunelamento Quântico de Elétrons

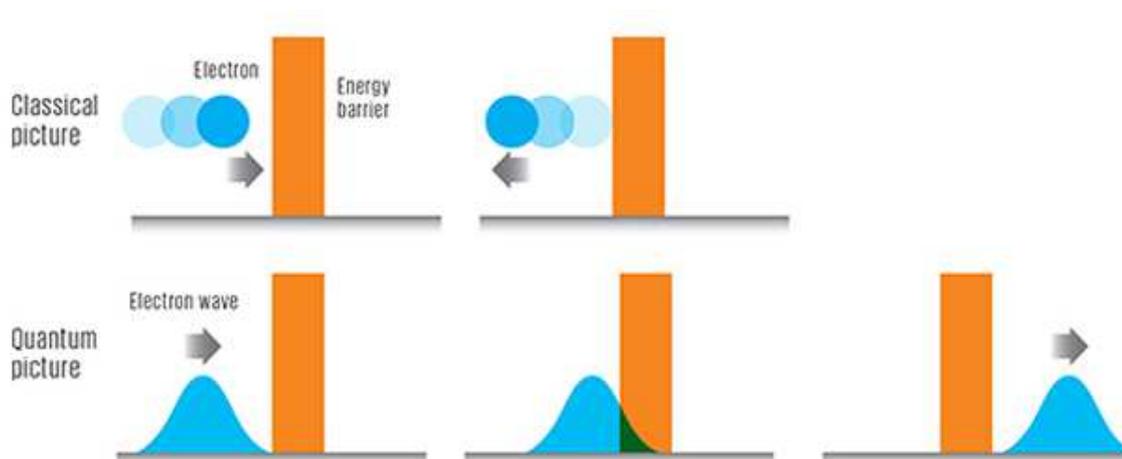
O fenômeno do tunelamento quântico pode ser entendido como a possibilidade de partículas poderem atravessar barreiras, mesmo quando a energia cinética dessas partículas não são maiores que a energia potencial necessária para atravessar tais barreiras. (14)

A fração de elétrons que conseguem atravessar uma determinada barreira pode ser determinada pelo Coeficiente de Transmissão ( $T$ ), observado na eq. (1). Como se pode observar, devido à forma exponencial da equação abaixo, o valor de  $T$  é extremamente sensível à massa ( $m$ ) da partícula e a largura ( $L$ ) da barreira. (14)

$$T = e^{-2bL}, \quad b = \sqrt{\frac{8\pi^2m(Ub-E)}{h^2}} \quad (1)$$

Os transistores de efeito de campo (FET), ao terem suas dimensões diminuídas ao extremo, como se observa atualmente, podem apresentar fuga de elétrons quando do seu chaveamento para a posição *off*. Um transistor padrão possui quatro partes: a fonte, o dreno, o canal que conecta os dois, e a base, que controla a corrente entre a fonte e o dreno. Quando a base, na sua condição de chave, atua no modo *on*, cria-se um canal de condutância, o que permite que elétrons fluam da fonte para o dreno. Quando a base atua como chaveamento na posição *off*, o canal deveria perder sua condutância, de modo a cessar completamente a passagem de elétrons. Porém, a medida que os cientistas diminuíram a distância do canal entre a fonte e o dreno, o controle da base sobre a corrente no transistor fica cada vez mais fraca.

Figura 5 - Fuga de Elétrons. (13)



Como se pode observar na Figura 5, a barreira que impede a passagem da corrente pode não ser forte o suficiente para impedir esse transporte de elétrons por completo. Como explicado anteriormente, à medida que as dimensões desses dispositivos se tornam extremamente pequenas, torna-se inevitável a fuga de elétrons, o que não é compatível com o bom desempenho dos transistores que compõem os processadores.

Pelo exposto, percebe-se que as limitações aqui apresentadas não se tratam de questões apenas envolvendo a técnica utilizada na construção de nanoprocessoadores. O processo de miniaturização dos componentes dos *chips* já vem sendo utilizado há décadas, e é algo que a indústria da eletrônica domina, quando se refere a produção em larga escala. Porém, à medida que o material que está sendo utilizado apresenta comportamento físico e elétrico contrário ao que se espera, faz-se necessário buscar novas soluções. Dessa forma, alguns nano dispositivos, tais como os nanotubos de carbono e as nanocélulas, vêm se tornando, cada vez mais, o principal tópico de pesquisa da indústria da eletrônica.

### 3 DISPOSITIVOS NANOELETRÔNICOS

Diante das limitações apresentadas pelos dispositivos aqui citados, faz-se necessário se expandir o campo de estudos em busca de futuras soluções para as barreiras enfrentadas. Desse modo, alguns dispositivos nano escalares vêm sendo foco de estudo das comunidades científicas ao longo dos últimos anos. Diante das limitações no processo de escalonamento “de cima para baixo” (como o processo de fotolitografia aqui explanado), estudiosos da área têm buscado uma concepção que representa exatamente o oposto: a composição “de baixo para cima”, pela qual parte-se, a princípio, de desenvolver os menores componentes possíveis, para só então, a partir da aglomeração ordenada e estratégica dos mesmos, formar-se dispositivos nano eletrônicos maiores, como, por exemplo, os nano transistores.

#### 3.1 Nanocélulas

A expectativa ao redor das pesquisas que vêm sendo realizadas no ramo da eletrônica molecular é bastante alta. É esperado que, nos próximos anos, tais avanços venham a resultar no design, fabricação, e demonstração de circuitos eletrônicos ultradensos, integrados na escala molecular. Na verdade, o desenvolvimento de dispositivos computacionais nano eletrônicos já não é mais uma novidade. Mesmo com os desafios enfrentados pela comunidade científica, é esperado que, em um futuro próximo, já tenhamos protótipos funcionais de circuitos integrados compostos por dispositivos na escala molecular. (15)

O problema de miniaturização de dispositivos eletrônicos, que ocorre por causa de limitações físicas, causado pela aglomeração de muitos componentes em *chips* cada vez menores, se resolvido, pode levar a uma capacidade superior de processamento. A utilização de simples moléculas para assumir o papel de dispositivos eletrônicos pode permitir a fabricação de componentes ainda menores. A incorporação de moléculas em circuitos funciona a partir da associação de características elétricas com reações químicas. Através dessa perspectiva, poderiam ser criados sensores do tamanho de moléculas simples. Dessa maneira, circuitos poderiam ser formulados com a utilização de técnicas biológicas, da mesma forma como as proteínas, por exemplo, são produzidas em seres vivos. Embora a produção dessas moléculas seja possível, o posicionamento e interconexão das mesmas é algo

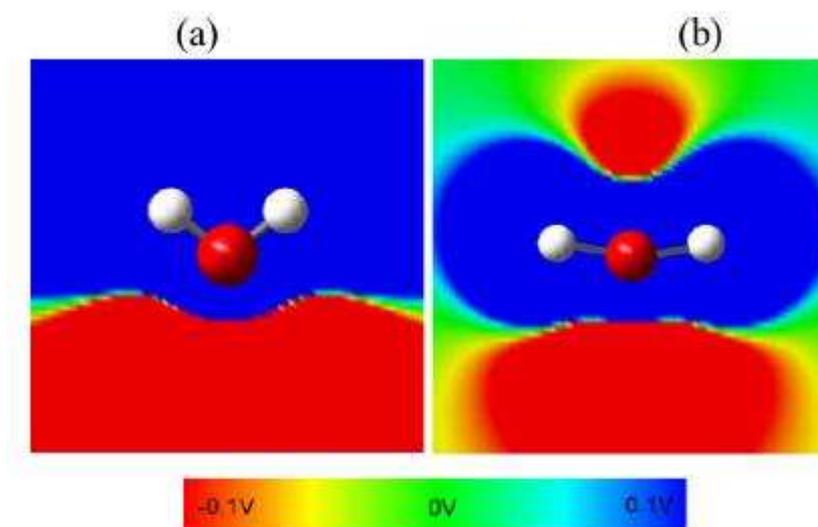
que precisa ser desenvolvido com maior precisão. Entretanto, algumas técnicas químicas, como auto composição e a deposição química, oferecem fortes esperanças para resolver esse problema. (13)

### 3.1.1 Potencial Eletroestático Molecular

A dissipação de calor é uma das principais questões a serem solucionadas pelas tecnologias atualmente em estudo. Nessa perspectiva, o principal problema está na maneira como os sinais elétricos são codificados e transmitidos nos circuitos eletrônicos atuais. Os sinais armazenados são codificados através de cargas elétricas, essas, por sua vez, são mantidas por uma fonte de energia externa. Já o transporte desses sinais codificados requer uma variação de corrente, para que eles possam ser transmitidos para todos os dispositivos que necessitam desse sinal (de acordo com a tarefa que esteja sendo executada). A excitação dessa corrente, para que a mesma atinja estados vibracionais, é o que gera a grande dissipação de calor observada nesses dispositivos. Vale lembrar que, a principal barreira para o aumento de frequência dos *clocks* dos processadores atuais ocorre justamente pelo excesso de dissipação de calor, já que haverá mais ciclos por segundo. Quanto maior a corrente, maior será a produção de calor gerada por elas. De maneira análoga, quanto menor a espessura do condutor por onde passa essa corrente elevada, maior será o efeito *Jaule* provocado. (16)

Há alguns cenários possíveis com vistas a diminuir a dissipação de calor elevada nesses dispositivos. Um deles inclui a forma como as informações são codificadas, não diretamente nos elétrons, mas através de outros modos de energia. Duas hipóteses possíveis são propostas: uma é o uso do Potencial Eletroestático Molecular, ou *Molecular Electrostatic Potencial* (MEP), para codificar, detectar e processar informação, o outro é o uso de estados vibracionais, este para transportar informação. O MEP é o potencial elétrico (V) induzido em qualquer ponto (r) ao redor da molécula pelos elétrons e pelo núcleo da mesma. (13)

Como exemplo, na Figura 6, a seguir, tem-se a representação do potencial molecular da água. No seu estado natural, regiões próximas ao átomo de oxigênio tomam tendência negativa e as regiões ao redor do átomo de hidrogênio apresentam aspecto positivo, devido à forte diferença eletronegativa desses átomos. (17)

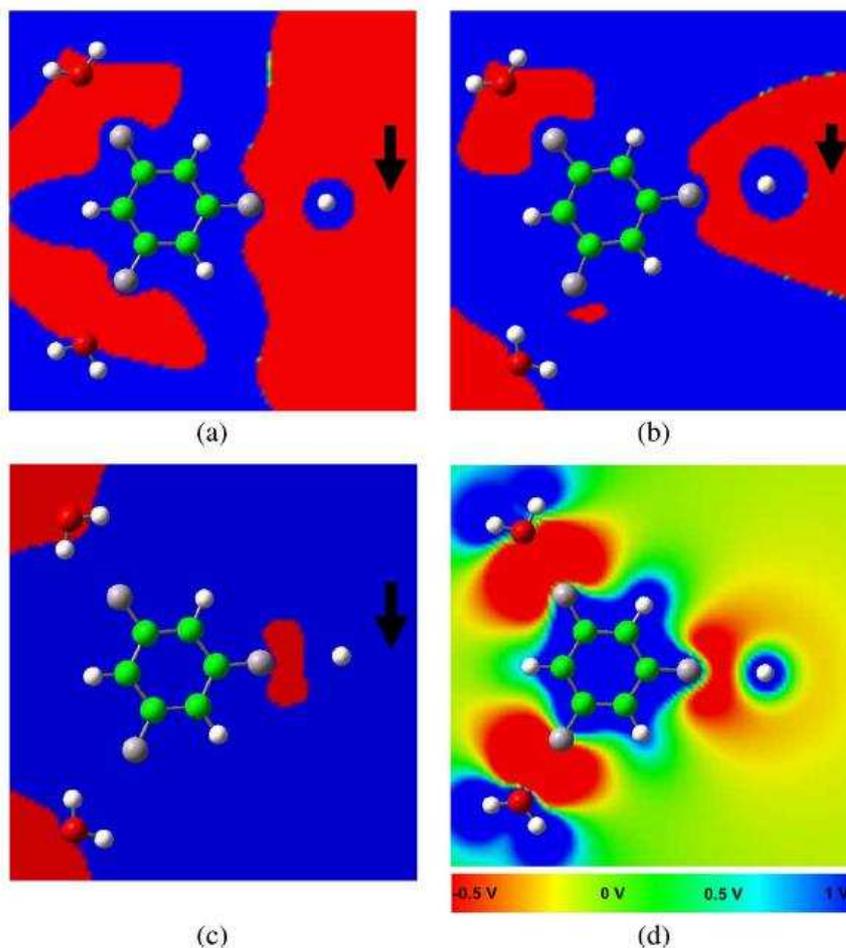
Figura 6 - MEP da Molécula de Água (H<sub>2</sub>O). (3)

A Figura 6 (a) mostra o MEP para a molécula de água em estado não excitado, distinguindo as regiões de potencial positivo (azul), das regiões de potencial negativo (vermelho). Já na Figura 6 (b), percebe-se uma excitação eletronegativa diferente, pois o posicionamento dos átomos de hidrogênio apresenta outra angulação, formando assim outra região vermelha (negativa) na região logo acima da molécula (MEP). Dessa forma, conclui-se que qualquer molécula ou qualquer átomo pode ser utilizado como um dispositivo de memória. No caso da água, o procedimento seria ler o potencial no lado do hidrogênio, e verificar se o mesmo era positivo ou negativo. (3)

Fazer com que uma molécula funcione como uma porta lógica também é possível. (18) Um exemplo simples, utilizando a molécula de tri-fluor-bezeno é demonstrado na Figura 7. A molécula de tri-fluor-bezeno é excitada nesse caso pelo MEP de duas moléculas de água, localizadas estrategicamente, cuja orientação apresenta quatro possíveis entradas. As moléculas de água são utilizadas exclusivamente como fontes aplicadas às entradas. Assim, pela natureza bipolar da água, o oxigênio (negativo) pode ser utilizado como uma entrada “zero”, e o hidrogênio (positivo) como uma entrada “um”, para a porta lógica molecular. A saída do circuito do exemplo mostrado a seguir é representada pela região ao redor do átomo isolado de hidrogênio (do lado direito). Dessa forma, a Figura 7 (a) mostra a saída resultante de duas entradas 00, a qual é 0 (região ao redor do átomo isolado de H completamente negativa). A Figura 7 (b) mostra as entradas 01, o que é equivalente à 10, resultando também em uma saída de valor 0. Finalmente, a Figura

7 (c) mostra a entrada 11, que resulta em uma saída 1. O teste mostra que a molécula de tri-fluor-bezено funciona como uma porta lógica *AND*. A tabela da verdade para a análise em questão é mostrada no Quadro 2.

Figura 7 - Implementação de uma Porta Lógica *AND* em uma Molécula de Tri-fluor-benzeno. (3)



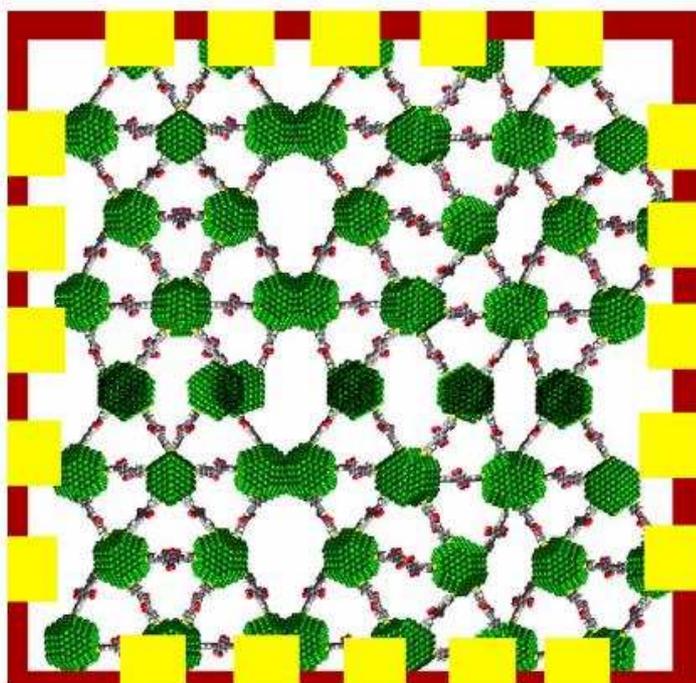
Quadro 2 - Tabela Verdade para o Esquema da Figura 6

V1	V2	V0
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

### 3.1.2 Estrutura de uma Nanocélula

Uma nanocélula pode ser definida como um arranjo de moléculas designadas para formar um dispositivo programável. A Figura 8 mostra a estrutura de uma nanocélula preparada litograficamente. Os contatos amarelos são posicionados externamente, e a separação entre eles é limitada pela distância mínima alcançável pela tecnologia de litografia (a qual tornaria possível espaçamentos de algo em torno de 14 nanômetros, hoje em dia). A figura não está em escala, uma vez que os contatos amarelos aparentam estar muito mais próximo do que eles realmente estariam em uma nanocélula real. As interconexões entre os agrupamentos são formadas por ligações metálicas e possuem um tamanho de cerca de 2nm, e os agrupamentos (em verde) possuem diâmetro de tamanho similar ao comprimento dessas interconexões. As moléculas e suas interconexões não formam estruturas necessariamente bem definidas; entretanto, essas ligações metálicas que servem de interconexão podem ser usadas para programar o comportamento das moléculas. (20)

Figura 8 - Estrutura de uma Nanocélula. (19)

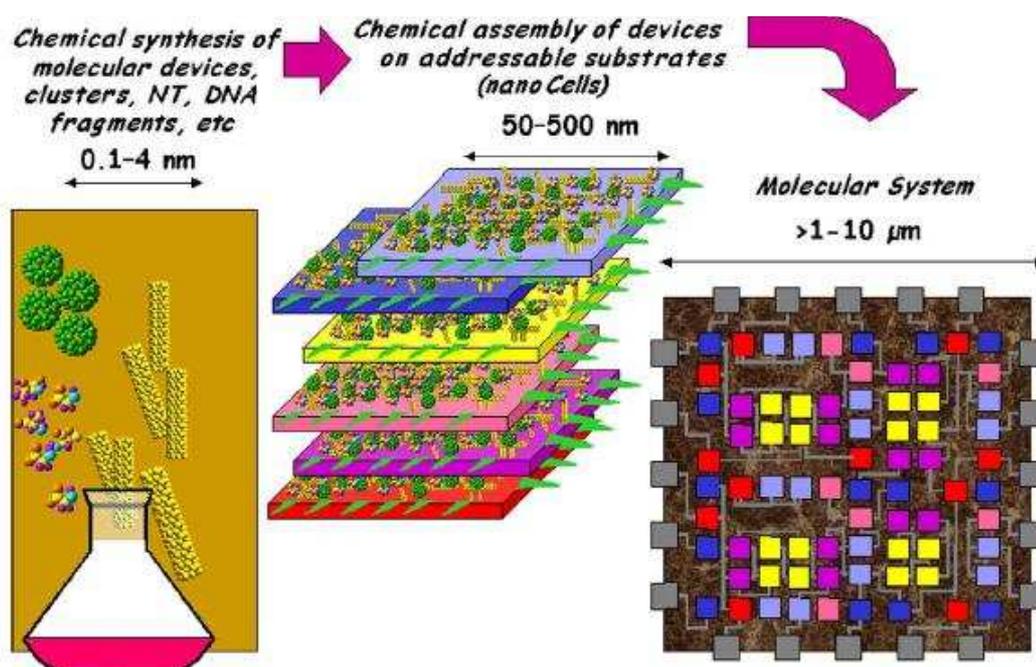


Em geral, o padrão de distribuição molecular dentro de uma nanocélula é único; dessa forma, não há como construir duas células com distribuição geográfica

similar das moléculas, mesmo quando fabricadas para realizar a mesma tarefa. Escolher as moléculas corretas, e o melhor arranjo para a nanocélula, aumenta consideravelmente o resultado obtido após programa-las para determinada função. Eventualmente, técnicas de deposição química, e de síntese molecular, tendem a desenvolver-se, de modo que a fabricação de nanocélulas tornar-se-á mais precisa, quanto à distribuição dos componentes da mesma. (20)

Uma aproximação de como seria a fabricação de *chips* feitos de nanocélulas é mostrada na Figura 9. A junção das moléculas é feita por técnicas de síntese química, e os *chips* semicondutores (onde as moléculas são posicionadas) são desenvolvidos por técnicas de litografia padrão. Dessa forma, técnicas de associação química são usadas para compor a nanocélula, as quais podem ser manipuladas para resultar em um circuito molecular funcional.

Figura 9 - Construção de um Circuito Integrado Composto por Nanocélulas. (19)



Por fim, faz-se necessário destacar que o desenvolvimento de circuitos baseados em nano células ainda está em um estágio relativamente inicial de pesquisas. O grande diferencial é que, diferente da tecnologia utilizada em

microprocessadores, onde os componentes são levados a escalas de tamanho cada vez menores, na tecnologia utilizada na composição de nano células busca-se uma estrutura composta a partir de componentes nanométricos, de modo que a associação dos mesmos resulte em um circuito ainda mais integrado e com poder de processamento melhorado.

## 3.2 Nanotubos de Carbono

### 3.2.1 Descoberta dos Nanotubos de Carbono

A história da descoberta dos nanotubos de carbono, ou *carbon nanotubes* (CNT), começou em 1985, quando os físicos Harry Kroto (*University of Sussex*, Inglaterra) e Richard Smalley (*Rice University*, EUA) iniciaram os estudos sobre a vaporização de grafite para explicar processos que podem ocorrer na superfície de estrelas. Para isso, eles utilizaram reatores de arco voltaico, em que uma descarga elétrica é feita entre dois eletrodos de grafite, colocados a poucos milímetros um do outro. Estudando estruturas de carbono formadas pela evaporação do grafite, eles descobriram que a maior parte dos elementos formados era constituída por uma esfera oca composta de exatamente 60 átomos de carbono interligados entre si, hoje conhecidos como C<sub>60</sub>. (20)

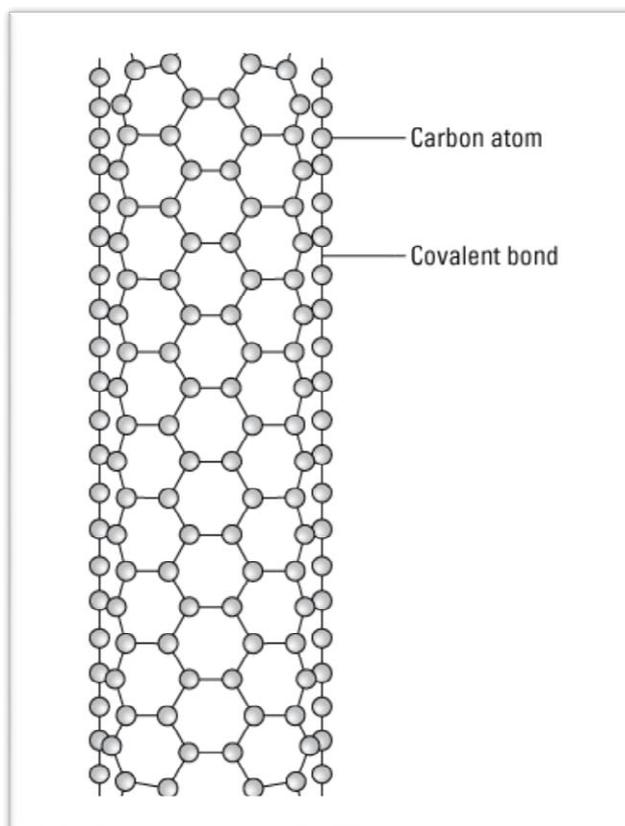
Em 1991, o físico japonês *Eiji Iijima*, pesquisador chefe da NEC, em *Tsukuba*, no Japão, estava certo de que poderia encontrar muitas estruturas novas de carbono observando o depósito proveniente da evaporação de grafite em reatores de arco voltaico. Para caracterizar os produtos da evaporação, ele utilizava um microscópio eletrônico de transmissão de alta resolução. Com muita paciência, e após muitas tentativas, ele finalmente descobriu um depósito de material diferente na superfície de um dos eletrodos. Ele observou a formação de estruturas de átomos de carbono em forma de tubos com diâmetros de cerca de 4 bilionésimos de metros, isto é, 4 nanômetros (4 nm). Por ter dimensões nanométricas, esses tubos são hoje conhecidos como nanotubos de carbono. (20)

### 3.2.2 Estrutura química dos Nanotubos de Carbono

De todos os elementos químicos conhecidos, apenas seis, os chamados gases naturais, são encontrados na natureza na forma de átomos isolados. Os demais encontram-se sempre ligados uns com os outros, de diversas maneiras, nas mais diversas combinações. Para alcançar a estabilidade, os elementos químicos devem sempre possuir oito elétrons na sua última camada eletrônica, também chamada de camada de valência. (21)

O carbono possui quatro elétrons na sua camada de valência, os quais, para atingirem a estabilidade química (como a dos gases naturais), precisam de quatro ligações, podendo estas serem covalentes (compartilham-se os elétrons) ou iônicas (perda ou ganho de elétrons). Nos CNTs (*Carbon Nanotubes*) as ligações covalentes ocorrem entre os próprios átomos de carbono (duas ligações simples e uma ligação dupla), os quais se conectam através de ligações realizadas por interpenetração de orbitais no mesmo eixo de ligação (as chamadas ligações “ $\sigma$ ”), de modo que a estrutura da ligação apresenta um formato hexagonal. (22).

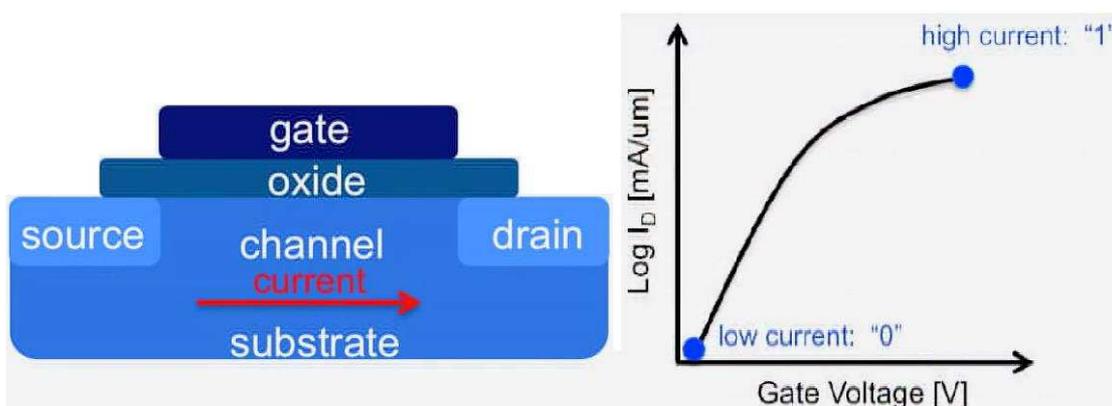
Figura 10 - Representação das Ligações Covalentes em um Nanotubo de Carbono. (20)



### 3.2.3 Evolução dos Transistores de Efeito de Campo

Para que se possa chegar no motivo que levou a comunidade científica à considerar a utilização dos CNTs como componente base dos futuros processadores, deve-se primeiro fazer uma análise do funcionamento do principal componente envolvido – os transistores de efeito de campo. Quando se fala em lógica digital, o principal e componente responsável por esse funcionamento é o MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). A Figura 11 ilustra a composição básica de um MOSFET. Os circuitos lógicos funcionam sob dois estados, o primeiro é o estado “1”, no qual há uma corrente através do *channel*, e o segundo é o estado “0”, onde a corrente entre *source* e *drain* é nula. O controle da corrente se dá pela aplicação de uma tensão no *gate*, a qual deverá ultrapassar a tensão de corte para que se forme um canal condutor e, conseqüentemente haja passagem de corrente entre *source* e *drain*.

Figura 11 - Representação Esquemática e Gráfica do Funcionamento de um MOSFET. (23)



Ao longo das últimas décadas houve uma constante diminuição das dimensões dos componentes dos transistores, obedecendo até então os princípios da Lei de Moore. Para uma melhoria de desempenho, um aumento da velocidade de operação lógica é necessário, sendo este proporcional à corrente de dreno do transistor ( $I_{DS}$ ) (24), apresentada na eq. (2). (25)

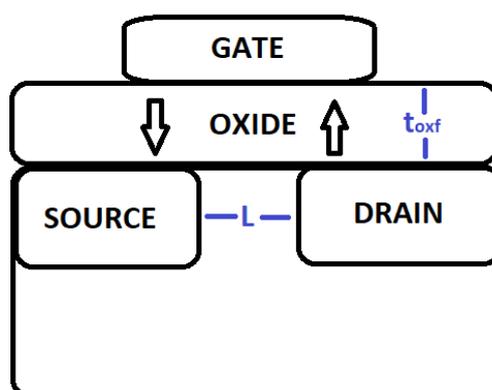
$$I_{DS} = \frac{W}{2L} \mu_n C_{oxf} (V_{GF} - V_T)^2 \quad (2)$$

Uma das saídas encontradas pela comunidade científica em busca de continuar a evolução no poder de processamento dos transistores foi a mudança do óxido (elemento entre o *gate* e o *channel*, na Figura 11), de modo a aumentar o valor de  $C_{oxf}$ , que pode ser observado na Equação 1. A capacitância do óxido de *gate* pode ser descrita pela eq. (3) a seguir:

$$C_{oxf} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (3)$$

Com isso pode-se concluir que a melhora no desempenho do transistor (ou seja, maior corrente de condução) pode ser alcançada se diminuirmos a espessura do óxido de *gate* ( $t_{oxf}$ ), ou se reduzirmos o comprimento do canal  $L$  (Figura 12). Além disso, a redução da dimensão dos transistores leva a uma redução da capacitância, que também eleva a velocidade de operação do dispositivo. Com isso, uma maior integração de dispositivos por *chip* pode ser alcançada e, conseqüentemente, maior menor custo de produção. (26)

Figura 12 - Estrutura de um Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido



Contudo, o escalamento do dielétrico de *gate* do óxido de silício tem se tornado uma possibilidade inviável, em vista da elevada corrente de fuga que aparece atravessando o óxido de *gate* em direção ao canal. Simulações numéricas predizem que o limite para o oxinitreto é de 1,6 nm de espessura para operação de alto desempenho e de 2,2 nm para operações de baixa potência de operação. (27)

Como alternativa, o dielétrico  $\text{SiO}_2$  vem sendo substituído por outro material que possa ser fisicamente mais espesso, porém eletricamente equivalente, através de um óxido de *gate* com maior permissividade dielétrica. Essa foi a primeira alternativa encontrada pela indústria de semicondutores para permitir uma maior

espessura do óxido entre o *gate* e o *channel*. A Tabela 1 apresenta os possíveis substitutos do óxido de silício.

Tabela 1 - Possíveis Materiais de Alta Constante Dielétrica. (28)

Material	$\epsilon$	Energia [eV]
SiO <sub>2</sub>	3,9	8,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9-11	6,2 - 8,8
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11-13	---
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	26	4,5
TiO <sub>2</sub>	80	3,5
HfO <sub>2</sub>	15-26	5,6 - 5,9
ZrO <sub>2</sub>	14-25	5,5 - 5,8

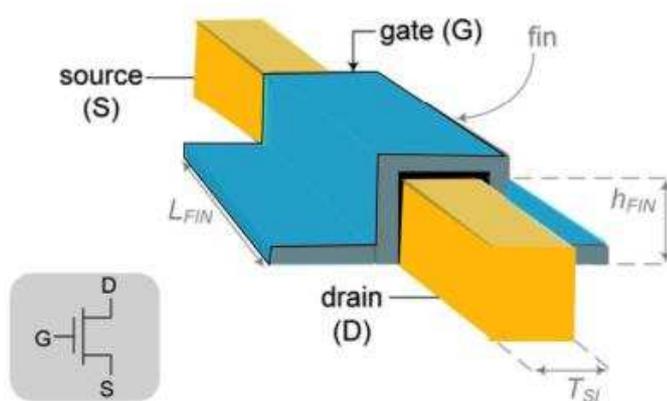
Embora a mudança do material óxido utilizado nos transistores tenha permitido se alcançar os padrões de velocidade de processamento estabelecidos pela Lei de Morre, a constante miniaturização dos dispositivos eletrônicos fez com que o problema anterior – corrente de fuga – voltasse à tona. A próxima alternativa viria a ser a mudança na geometria dos transistores.

Para que se possa controlar os efeitos do canal curto, os transistores MOSFET planares (cuja geometria é mostrada na Figura 11) requerem alta dopagem de canal, o que reflete na degradação da mobilidade e aumento da corrente de fuga. Para superar esses obstáculos, MOSFETs de múltiplas portas são uma das tecnologias mais promissoras, porque permitem um maior controle dos efeitos de canal curto, menor corrente de fuga e maior rendimento nos processos de alta densidade. Estas vantagens permitem menor consumo de energia e melhor desempenho dos dispositivos. (29)

Como exemplo de uma nova concepção na geometria dos transistores MOSFET tem-se o *Fin Field-Effect Transistor* (FinFET), mostrado na Figura 13. FinFets são transistores não planares cuja principal característica é o canal condutor ser envolto por uma fina estrutura de silício, chamada de “*fin*”, que forma o corpo do dispositivo. (30) A Intel informa que tanto a corrente defuga quanto o consumo de energia são reduzidos com a utilização de transistores FinFET de três terminais. (31)

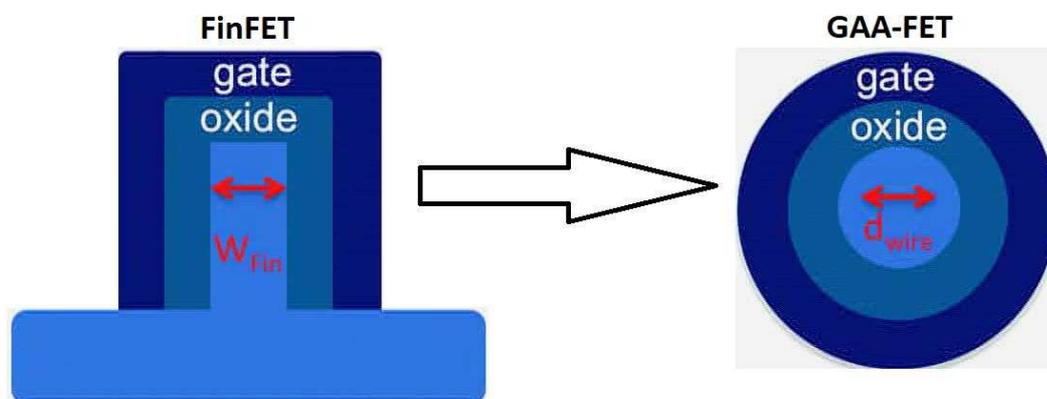
Dessa manz'eira é possível elevar em até 37% a velocidade de processamento, ou reduzir o consumo de energia em mais de 50%, comparado ao transistor planar. (32)

Figura 13 - Estrutura Geométrica de um Transistor 3T FinFET. (33)



Seguindo a tendência de se aperfeiçoar a geometria dos transistores em busca de melhor desempenho, foi que surgiu os transistores *Gate-all-around Field Effect Transistor* (GAA-FET), os quais são semelhantes em conceito aos FinFETs, exceto que o material do *gate* rodeia a região do canal em todos os lados (Figura 14). Com o *gate* envolvendo completamente o canal entre *source* e *drain*, há um maior controle e isolamento, dificultando a ocorrência de corrente de fuga (*current leakage*). Dessa forma, há a possibilidade de uma diminuição mais acentuada do diâmetro do canal ( $d_{wire}$ ), tornando possível, ainda mais, a miniaturização dos dispositivos, e dando continuidade aos princípios da Lei de Moore. (27)

Figura 14 - Comparação entre as Estruturas Geométricas do 3T FinFET e do GAA-FET. (27)



Como se pode observar na Figura 14, a estrutura circular dos transistores GAA-FET foi o que levou a comunidade científica a considerar os nanotubos de carbono como possível substituto da estrutura de silício.

### 3.2.4 Propriedades Elétricas dos Nanotubos de Carbono

As propriedades elétricas, magnéticas, ópticas e mecânicas fazem dos nanotubos de carbono nanoestruturas fascinantes e atrativas para muitas aplicações, principalmente, no campo da nanotecnologia. O CNT tem sido utilizado como fonte de elétrons para *displays* de telas planas, pontas (*tips*) para microscópios de sonda, estocagem de gás, suporte para catalisadores, na obtenção de membranas para filtração molecular, aditivos para polímeros, resistores quânticos, sensores, condutores balísticos, e estão sendo cotados para a próxima geração de dispositivos de eletrônica diminuta. (33)

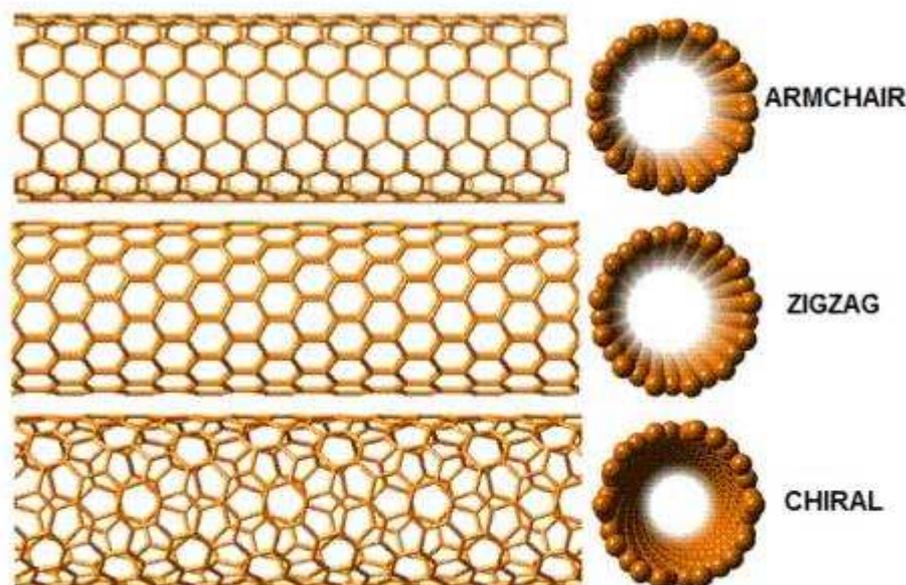
Devido à demanda de dispositivos eletrônicos que apresentam menor dissipação de energia e menor tamanho, os quais são utilizados na construção de aparelhos eletrônicos, como celulares e computadores, espera-se, para os próximos anos, que sejam necessários transistores com comprimento de *gate* abaixo de 7 nanômetros, para seguir a linha inversamente proporcional entre o tamanho dos transistores e a velocidade de processamento dos dispositivos operacionais. (34)

Para a construção de transistores lógicos, variações significativas nas propriedades eletrônicas do material são necessárias para a obtenção da corrente 0 (corrente *off*) e 1 (corrente *on*). Relações consideravelmente grande entre a intensidade dessas correntes,  $I_{on}/I_{off} > 10^3$ , são requeridas para a construção de transistores lógicos. (35) Essa relação é maior nos nanotubos semicondutores de carbono quando comparada ao grafeno (outro componente de carbono amplamente estudado pela comunidade científica), por isso, os nanotubos de carbono são materiais com maior potencial para a construção de transistores lógicos. (36)

O CNT composto por apenas uma parede de carbono (SWCN – *Single-Walled Carbon Nanotube*) é um nanossistema unidimensional (devido à sua grande razão de comprimento/diâmetro) que pode mostrar-se com propriedades de metal ou de semicondutor, a depender do arranjo dos átomos de carbono e do diâmetro do CNT. Tanto a característica de condutor como a de semicondutor, que o CNT pode assumir, podem ser de grande interesse para futuras aplicações em nanoeletrônica. (37) O

ângulo entre os vetores de disposição do carbono, denominado ângulo quiral, denota o ângulo de inclinação dos hexágonos em relação ao eixo do nanotubo, especificando a simetria espiral. (37) A classificação e estrutura de três diferentes tipos de CNTs podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15 - *Single-Walled Carbon Nanotubes* com diferentes disposições geométricas dos átomos de carbono. (38)



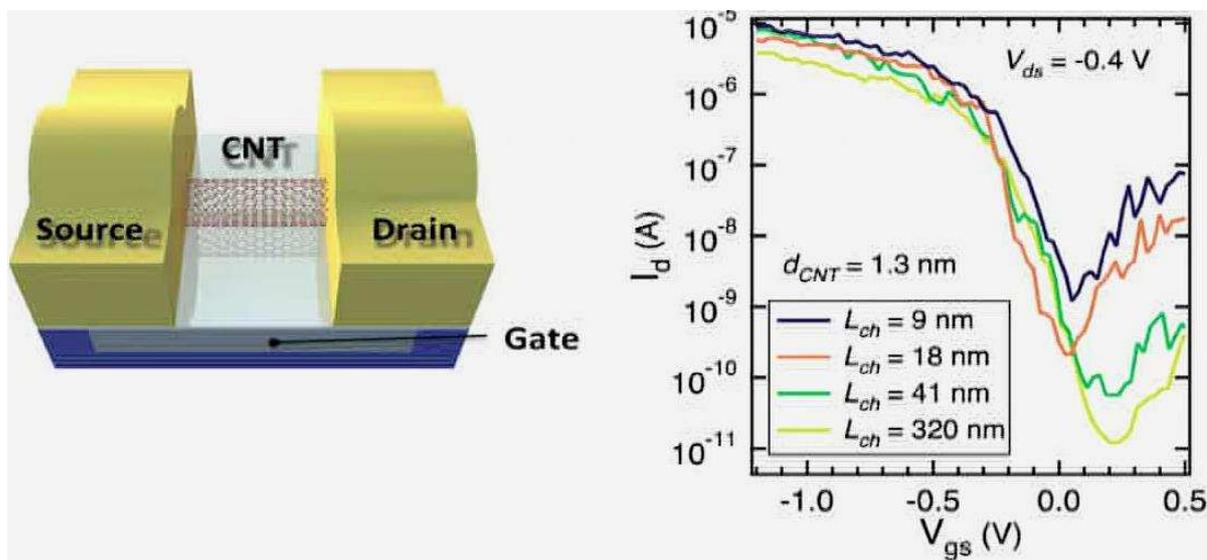
Os CNTs metálicos, também chamados de nanotubos perfeitos, são aqueles livres de defeitos, contendo apenas hexágonos e átomos de carbono, com diâmetro que varia de 0,4nm até dezenas de nanômetros. Nos CNTs perfeitos o movimento eletrônico é quantizado, onde um regime de condutância balística tem sido observado, tendo o processo de espalhamento inelástico negligenciado. (39) Os nanotubos se comportam como fios quânticos, onde os elétrons se movem pelos nanofios elasticamente, com uma probabilidade de transmissão eletrônica ao longo do tubo igual a 1. (40) No regime de transporte balístico (os elétrons passam pelo condutor sem nenhuma resistência ou obstrução, não sofrendo espalhamento) a condutância é independente do comprimento do fio, uma vez que a região de espalhamento é menor que o livre caminho médio eletrônico. Nesse regime, não há dissipação de energia no condutor, sendo que toda energia é dissipada nos contatos elétricos que conectam o condutor balístico a elementos macroscópicos. (41)

Como dito anteriormente, as propriedades elétricas dos CNTs podem ser alteradas, de acordo com a disposição dos átomos de carbono e com a estrutura do nano sistema. Na construção do transistor de efeito de campo, um nanotubo de carbono é conectado a eletrodos metálicos. Como é sabido, a junção metal-semicondutor pode resultar em uma relação de diferença de potencial elétrico de *bias* (diferença de potencial elétrico entre o coletor e o emissor), e em uma intensidade da corrente elétrica, com caráter tanto ôhmico (em que há uma relação linear entre a intensidade da corrente elétrica e a diferença de potencial elétrico) quanto retificador (conduzindo corrente elétrica na polarização direta e não conduzindo na polarização reversa devido á existência de uma barreira *Schottky*). (42) O caráter ôhmico ou retificador do contato metal-nanotubo é determinado, por exemplo, pelo tipo de metal utilizado na junção. Para a construção de transistores de efeito de campo de alto desempenho, é desejável que o contato tenha caráter ôhmico ao invés de retificador. (43)

### 3.2.5 Aplicação de CNTs em Transistores de Efeito de Campo

Experimentos mostram que nanotubos de carbono podem ser utilizados como o canal entre o dreno e a fonte de um transistor de efeito de campo, mesmo apresentando um comprimento extremamente baixo – 9 nanômetros. Tal comprimento de *channel*, seguindo a linha de evolução observada até então, só seria possível com transistores de silício nos próximos 5 a 8 anos. (41) No experimento em questão foram observados dois resultados principais: nenhuma degradação ou diminuição dos padrões de funcionamento, quando se diminuiu o *channel* para o comprimento de 9nm; e houve melhora na performance (medida em densidade de corrente, a qual foi três vezes maior) em comparação com os transistores cuja base de construção é o silício. A estrutura do transistor aqui descrito, juntamente com o gráfico que representa sua performance podem ser observados na Figura 16.

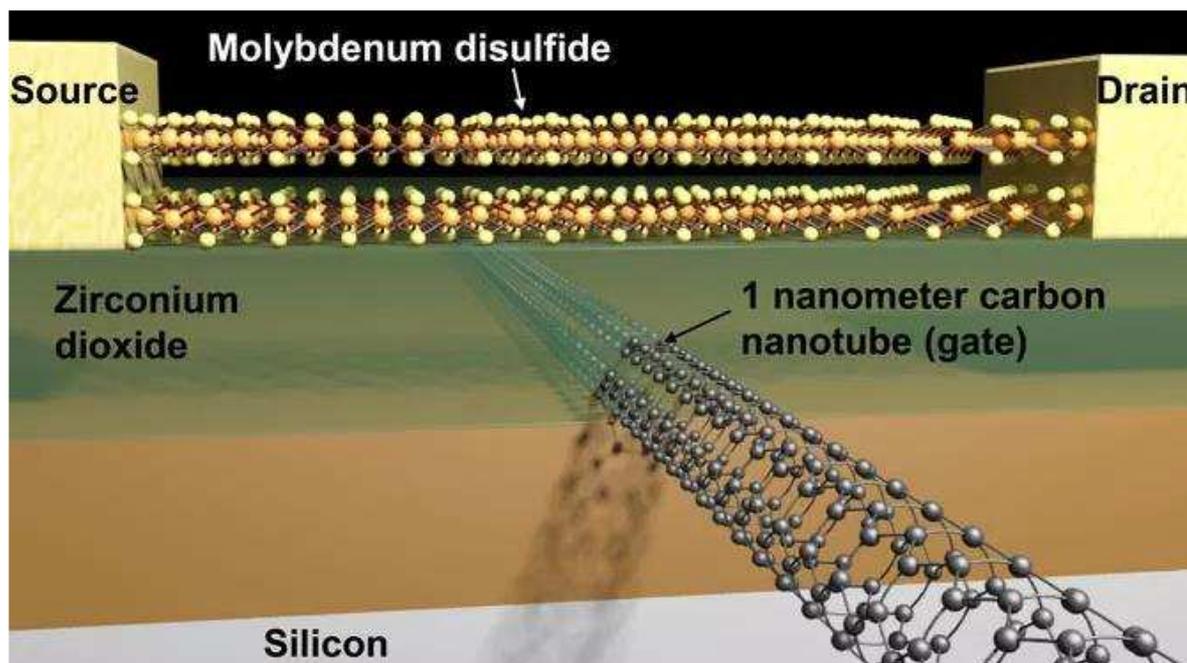
Figura 16 - Estrutura de um FET com um CNT agindo como *Channel* e o Gráfico com as variações de corrente em função da tensão aplicada no *Gate*. (44)



Os resultados obtidos com o transistor da Figura 16 são resultantes das propriedades dos nanotubos condutores aqui citadas. Por tratar-se de um dispositivo unidimensional, o movimento de elétrons nos CNTs ocorre em apenas uma direção, fazendo com que a ocorrência de espalhamento (observada em condutores e semicondutores de silício) seja quase inexistente. (45)

Engenheiros da Universidade de Wisconsin-Madison (EUA), anunciaram a criação, pela primeira vez, em setembro de 2016, de transistores feitos de nanotubos de carbono com comprimento de *gate* de 1 nanômetros. O time de estudiosos liderados pelo professor Ali Javey conseguiu aplicar nas peças de nanotubo de carbono uma corrente elétrica que é 1,9 vezes maior que aquela possível nos transistores de silício. Para alcançar uma solução de alta pureza, de modo a obter um ambiente altamente favorável às condições de condução necessárias, a equipe usou uma solução de polímeros para organizar os nanotubos. (46) Além disso, os nanotubos precisaram ser alinhados em ordem correta e com espaçamento preciso dentro da *wafér*. Ainda segundo os pesquisadores, os transistores de nanotubos de carbono podem apresentar desempenho até cinco vezes superior ou usar cinco vezes menos energia que os de silício. A Figura 17, a seguir, ilustra de maneira simplificada o experimento realizado pelos cientistas.

Figura 17 - Esquema do transistor de 1 nanometros de comprimento de *gate*. (47)



O dissulfeto de molibdênio funciona como sendo o semiconductor do nanossistema, enquanto o nanotubo de carbono serve de *gate*, para controlar o fluxo de corrente entre emissor e coletor. (46)

O projeto realizado pelos pesquisadores da Universidade de Berkeley ainda está no seu estágio inicial. Os pesquisadores ainda precisam desenvolver um dispositivo com comprovada eficiência de aplicação e, principalmente, com viabilidade de produção em grande escala. Entretanto, tal experimento serve para mostrar que as expectativas em torno dos nanotubos de carbono se confirmaram, de modo que estes se apresentam como fortes candidatos a substitutos dos sistemas baseados em tecnologia de silício.

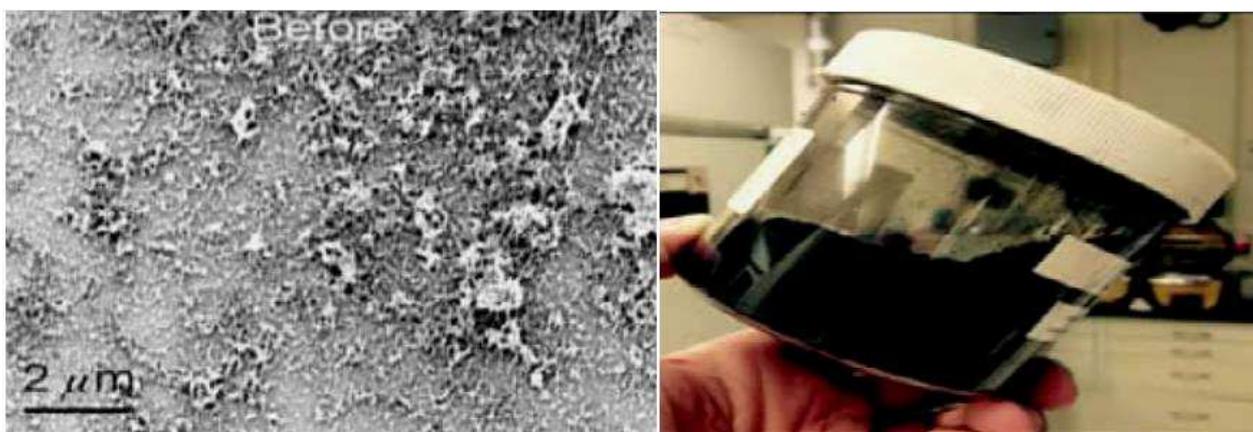
### 3.2.6 Limitações à implementação de CNTs em Circuitos Integrados

A tecnologia utilizada hoje para a produção de *chips* com bilhões de transistores inseridos parte de uma perspectiva “*top-down*” (processo de fotolitografia), a qual tornou possível que esses dispositivos nanométricos fossem perfeitamente dispostos e organizados em uma minúscula área, de modo que pudessem apresentar a performance que se vê atualmente. Embora os nanotubos de carbono performem com maior eficiência que os dispositivos baseados em silício, há

ainda a necessidade de uma tecnologia que possa produzir um circuito integrado utilizando CNTs.

No processo de produção de nanotubos de carbono, o produto final é uma “poeira” da qual se espera que os cientistas possam retirar os nanotubos e organizá-los de modo a produzir uma malha formada por esses dispositivos (Figura 18). Trata-se de uma perspectiva chamada de “*bottom-up*”, da qual parte-se dos menores componentes de um transistor e espera-se que se atinja um circuito integrado por completo.

Figura 18 - Produto Resultante do Processo Químico de Produção de CNTs<sup>23</sup>



Além das questões aqui citadas, algumas barreiras fundamentais precisam ser resolvidas. Por exemplo, os atuais métodos de produção de nanotubos já apresentam técnicas que possam separar os CNTs condutores dos semicondutores. Porém ainda não há um procedimento químico que rearranje esses nanotubos de maneira ordenada e funcional em um único *chip*. Além disso, embora o entendimento acerca do funcionamento dos nanotubos esteja em constante evolução, ainda há aspectos físicos em seus estágios iniciais de compreensão. (47)

Pelo exposto, é bastante claro que os nanotubos de carbono apresentam características bastante atraentes no que se refere às suas propriedades físicas e elétricas. Juntamente com outros dispositivos nano eletrônicos, a principal questão envolvendo os CNTs ainda está em como se dará a construção de circuitos operacionais completos. Entretanto, devido ao enorme investimento por parte da comunidade científica e da indústria da eletrônica, é bastante provável que tais técnicas devam aparecer em um futuro bem próximo.

## 4 CONCLUSÃO

Nesse trabalho, foi feita uma análise dos principais fundamentos associados à tecnologia de construção de processadores, das limitações encontradas durante este processo, e das principais evidências científicas que tornam a nanotecnologia a principal aliada à evolução dos dispositivos eletrônicos comercializados atualmente. O objetivo principal foi o de demonstrar o que tornou possível o contínuo processo de miniaturização destes dispositivos e o aumento no poder de processamento dos mesmos, bem como o de apontar os principais nano sistemas que poderão dar continuidade à essa constante evolução. Com base nisso, primeiramente, foram mostrados os conceitos dos principais componentes de um nanoprocessador – unidade lógica e aritmética, unidade de controle, registradores, e o *clock* -, situando o leitor dos princípios básicos que regem o funcionamento destes componentes.

Em seguida, foi exposto como se deu o processo de evolução dos processadores, desde a invenção do primeiro circuito integrado (CI) baseado na tecnologia de transistores, até se chegar nos *chips* altamente compactos que se tem hoje. Nesse ponto, torna-se evidente que a principal característica que possibilitou se chegar aos níveis de poder operacional recentes foi o escalonamento dos transistores para dimensões cada vez menores. Tal processo de miniaturização – chamado de fotolitografia – parte de uma perspectiva “de cima para baixo” (*top-down*), a qual é bastante aceita e aperfeiçoada pela indústria desses dispositivos, e que fez do silício (Si) o principal componente na construção de transistores. Tais técnicas vêm propiciando o alcance dos princípios estabelecidos pela Lei de Moore, a qual, de maneira geral, associa o número de transistores de um *chip* com o poder de processamento do mesmo.

Embora essa constante miniaturização tenha permitido se chegar aos robustos nanoprocessadores comercializados atualmente, algumas barreiras tornaram-se cada vez mais evidentes. A primeira a ser estudada foi a dissipação demasiada de calor nos circuitos integrados de alta performance, ocasionada pela grande concentração de componentes em espaços cada vez menores, juntamente com o contínuo aumento na velocidade de operação (frequência de *clock*) desses dispositivos. A segunda diz respeito ao tunelamento quântico de elétrons no interior dos transistores, resultando em um mal funcionamento da função de “chave” realizada

pelos mesmos. Concluiu-se assim que tais barreiras são fundamentais, uma vez que tratam-se das propriedades físicas e elétricas do principal componente base dos processadores, o silício.

Também foi explicado como funciona a tecnologia de multinúcleos, uma saída encontrada para que houvesse melhora de performance sem necessariamente haver encolhimento acentuado dos componentes. Tal técnica vem mostrando ser muito vantajosa, pois mesmo com o avanço constante na tecnologia de fotolitografia (e conseqüente aumento de velocidade de processamento), a divisão de uma operação nos vários núcleos de um processador se tornou uma característica inerente aos nanoprocessadores atuais.

Por fim, foram apresentados os dispositivos nanoeletrônicos mais estudados pela comunidade científica em prol de conseguir dar continuidade à Lei de Moore: as nanocélulas e os nanotubos de carbono. O principal aspecto que foi observado quando se fala em nanocélulas e CNTs é que a partida inicial, na formação de circuitos integrados, agora é tomada “de baixo para cima” (*bottom-up*), ou seja não há mais um processo de miniaturização, mas sim uma construção de dispositivos eletrônicos funcionais através de dispositivos em escala nanométrica.

No que se refere às nanocélulas, a principal vantagem está na forma como se dá o armazenamento e a transmissão de informação nas moléculas que a compõe. Ficou evidente que o potencial eletroestático molecular (MEP) é uma característica promissora, por meio do qual pode-se realizar operações lógicas, e fugir dos empecilhos causados pelas correntes elétricas que geram calor demasiado aos dispositivos atuais. Entretanto, como foi explicado, a fabricação de um circuito integrado composto exclusivamente de nanocélulas ainda está em seus estágios iniciais. Para se ter *chips* produzidos em larga escala, serão necessários métodos de fabricação que atendam aos princípios de tolerância e falha necessários a qualquer circuito funcional.

Os nanotubos de carbono são a principal esperança da indústria da eletrônica em superar as barreiras à frente dos dispositivos baseados em silício (Si). Como foi estudado, a depender da geometria dos CNTs, pode-se conseguir um aspecto tanto condutor (transporte balístico) como de semiconductor nesses nano dispositivos. Também foi visto que tais técnicas de composição de nanotubos já foram aperfeiçoadas pelos pesquisadores, de modo que haja uma perfeita separação dos

CNTs de acordo com suas propriedades elétricas. Além disso, foi demonstrado que os transistores cuja composição era baseada em nanotubos apresentavam performance consideravelmente mais elevada.

Por fim, cabe destacar que o principal desafio com relação aos nano dispositivos aqui citados diz respeito em como se dará o ordenamento dos mesmos, ou seja, como serão construídos circuitos integrados, partindo agora “de baixo para cima”. Como foi explicado, essa é a principal barreira a ser ultrapassada, e o maior foco de pesquisa da indústria da eletrônica atualmente.

A tecnologia utilizada tanto na construção de transistores, quanto no ordenamento interno de nanoprocessadores, evoluiu constantemente nas últimas décadas. Tal fato foi o principal responsável para que se chegasse ao barateamento e difusão dos dispositivos de processamento de dados que se vê atualmente. Pelo exposto, conclui-se que, mesmo diante das barreiras físicas aqui expostas, a comunidade científica conseguiu atender aos princípios da Lei de Moore. Além disso, maior poder de processamento significa maiores chances de encontrar saídas para as limitações atuais, tais como as pesquisas em dispositivos em escalas de tamanho cada vez menores.

## REFERÊNCIAS

- (1) BENCHIMOL, Augusto. **Uma breve história da eletrônica**. Rio de Janeiro: Interciência, 1995.
- (2) Intel. 2016. **65-Nanometer Process Technology Extends Benefits of Moore's Law**. Intel. Disponível em: <[www.intel.com/technology/silicon/si08042.htm](http://www.intel.com/technology/silicon/si08042.htm)>. Acesso em: 10 dez. 2016.
- (3) JORGE, M; YUEFEI, M; TARIGOPULA, V. 2006. **The Nanocell: A Chemically Assembled Molecular Electronic Circuit**. IEEE Sensors Journal, 2013. Vol 6, 6.
- (4) BBC. 2017. **Computin Studies: The Processor**. BBC. United Kingdom. Disponível em <[http://www.bbc.co.uk/bitesize/standard/computing/computer\\_systems/low\\_level\\_machines/revision/5/](http://www.bbc.co.uk/bitesize/standard/computing/computer_systems/low_level_machines/revision/5/)>. Acesso em: 10 jan. 2017.
- (5) MONTEIRO, M. **Introdução à Organização de Computadores**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- (6) HALSAL, F; LISTER, P. F. 1980. **Microprocessor Fundamentals**. Pitman, 1980.
- (7) EWALDO, L; MEHL, M. **Do Transistor ao Microprocessador**. Disponível em: <[http://stoa.usp.br/kblane/files/827/4714/historia\\_transistor.pdf](http://stoa.usp.br/kblane/files/827/4714/historia_transistor.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2017.
- (8) PILA, Maurício; SANTOS, Rafael; CAVALHEIRO, Gerson. **Introdução à Programação para Arquiteturas Multicore**. Disponível em: <<http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/erad/2009/005.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2017.
- (9) ALECRIM, Emerson. **Processadores: fabricação, miniaturização e encapsulamento**. Disponível em: <<http://www.infowester.com/processadores2.php>>. Acesso em: 10 mar. 2017.
- (10) **Revisão de Processos Básicos de Microeletrônica**. Disponível em: <[http://gnmd.webgrupos.com.br/arquivo\\_disciplinas\\_download/1-2-Revisao-Microeletronica-2a-Aula-2.pdf](http://gnmd.webgrupos.com.br/arquivo_disciplinas_download/1-2-Revisao-Microeletronica-2a-Aula-2.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2017.
- (11) ZHIRNOV, V. V.; CAVIN, R. K. and HUTCHBY, J. A. **Limits to binary logic switch scalling – A Gedanken Model**. IEEE, vol. 91, no. 11, pp. 1934–1939, 2003.

- (12) TOUR, J. M.; KOZAKI, M. and SEMINARIO J. M. **Use of molecular electrostatic potential for molecular scale computation**. U.S., Patent 6 259 277, 2001.
- (13) DONATO, David. **The Potencial Barrier – Tunneling**. Disponível em: <[http://physics.gmu.edu/~dmaria/590%20Web%20Page/public\\_html/qm\\_topics/potential/barrier/STUDY-GUIDE.htm](http://physics.gmu.edu/~dmaria/590%20Web%20Page/public_html/qm_topics/potential/barrier/STUDY-GUIDE.htm)>. Acesso em: 25 mai. 2017.
- (14) SEWAY, A; RAYMOND, W and JEWETT, W. **Princípios de Física – Óptica e Física Moderna**. vol. 4, 2009.
- (15) KWOK, K. S. and ELLENBOGEM, J. C. **Moletronics: Future Electronics**. *Materials Today* 5, p. 28–37, 2002.
- (16) SEMINARIO, J. M.; YAN, L. and MA, Y. **Scenarios for molecular-level signal processing**. *IEEE*, vol. 93, no. 10, p. 1753–1764, 2005.
- (17) POLITZER, P. and TRUHLAR, D. G. **Chemical Applications of Atomic and Molecular Electrostatic Potentials**. New York: Plenum, 1981.
- (18) SEMINARIO, M. and CORDOVA, L. E. **Toward multiple-valued configurable random molecular logic units**. *IEEE Nanotechnol. Conf.*, 2001, vol. 1.
- (19) HUSBAND, C. P.; HUSBAND, S. M. and DANIELS, J. S. **Logic and memory with nanocell circuits**. *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 50, n. 9, p. 1865–1875, 2003.
- (20) CABRAL, Fernando; LAGO, Alexandre. **Iji Iijima e os nanotubos de carbono**. Disponível em: <<http://harbra.com.br/HARBRAnews/vernews.php?id=65>>. Acesso em: 02 mai. 2017.
- (21) Ligações Químicas: **Estabilidade dos Gases Nobres**. Disponível em: <<http://www.soq.com.br/conteudos/ef/ligacoesquimicas/>>. Acesso em: 01 mai. 2017.
- (22) MICHA, Renato. **Características dos Compostos de Carbono**. Disponível em: <<http://educacao.globo.com/quimica/assunto/quimica-organica/caracteristicas-dos-compostos-de-carbono.html>>. Acesso em: 01 mai. 2017.
- (23) TULEVSKI, George. **Carbon Nanotubes Overview**. IBM T. J. Watson Research Center. Disponível em: < [https://www.youtube.com/watch?v=V1HN0w\\_aJgg&t=369s](https://www.youtube.com/watch?v=V1HN0w_aJgg&t=369s) >. Acesso em: 28 mai. 2017.

- (24) MCKELVEY, J. P. **Solid State and Semiconductor Physics**. Harper & Row Publishers, p. 302-304, 1996.
- (25) COLINGE, J. P. **Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI**. 3<sup>a</sup> Ed. New York: Springer, 2004.
- (26) RODRIGUES, M. **Estudo de Transistores SOI de Múltiplas portas com Óxidos de Portas de Alta Constante Dielétrica e Eletrodo de Porta Metálico**. Tese (Doutorado). São Paulo, 2010.
- (27) PETRY, J. **Microstructural and electrical characterization of thin dielectric with high-k values**. Tese (Doutorado). KUL, Bélgica, 2005.
- (28) LEE, S. I. **Recent Progress in high-k dielectric films for ULSIs**. Proceeding of the International Conference on Solid State Devices and Materials SSDM, p. 8, 2001.
- (29) KING, T. J. **Fin-FETs for Nanoscale CMOS Digital Integrated Circuits**. In: Int. Conf. on Computer Aided Design. p. 207-210. 2005.
- (30) HUANG, X. **Sub 50-nm Fin-FET: PMOS**. International Electron Devices Meeting Technical Digest, p. 67. 1999
- (31) CARTWRIGHT, J. **Intel enters the third dimension**. Nature – Publicação Online. 2011.
- (32) JAMES, D. **Intel to present 22-nm Tri-gate Technology at VLSI Symposium**. Disponível em: <[http://download.intel.com/newsroom/kits/22nm/pdfs/22nm-details\\_presentation.pdf](http://download.intel.com/newsroom/kits/22nm/pdfs/22nm-details_presentation.pdf)>. Acesso em: 21 mai. 2017
- (33) HUCZKO, A. **Shythesis of aligned carbon nanotubes**. Appl. Phys. A, v.74, p. 617-238, 2002.
- (34) IEONG, M. et al. **Silicon device scaling to the sub-10-nm regime**. Science, American Association for the Advancement of Science, v. 306, n. 5704, p. 2057-2060, 2004.
- (35) KIM, K. et al. **A role for graphene in silicone-based semiconductor devices**. Nature, Nature Publishing Group, v. 479, n. 7373, p. 338-344, 2011.
- (36) BACHTOLD, A. et al. **Logic Circuits with carbon nanotubes transistors**. Science, American Association for Advancement of Science, v. 294, n. 5545, p. 1317-1320, 2001.

- (37) KIRCH, Alexandre. **Propriedades Eletrônicas em Nanossistemas Baseados em Nanotubos de Carbono e Grafeno**. Universidade de São Paulo, Instituto de Física. Dissertação de Mestrado. São Paulo, 2014.
- (38) MENDES, Vivia. **Propriedades eletrônicas e Estruturais de Nanoestruturas de Carbono Funcionalizadas para Aplicação em Sensores**. Tese (doutorado). Santa Maria-RS, Brasil, 2012.
- (39) JAVEY, Z. et al. **New phenomena in the nanoscape of single-walled carbon nanotubes**. **Oxford Handbook of Nanoscience and Technology**. v. 2, p. 438-440, 2011.
- (40) WHITE, C. T. and TODOROV, T. N. **Carbon nanotubes as long ballistic conductors**. Disponível em: <<http://www.nature.com/nature/journal/v393/n6682/abs/393240a0.html>>. Acesso em: 25 mai. 2017.
- (41) FRANK, S; PONCHARAL, P. and WANG L. **Carbon Nanotube Quantum Resistors**. Disponível em: <[http://www.nanoscience.gatech.edu/paper/1998/98\\_sci\\_1.pdf](http://www.nanoscience.gatech.edu/paper/1998/98_sci_1.pdf)>. Acesso em: 20 mai. 2017.
- (42) SZE, S.; NG, K. K. **Metal-semiconductor contacts Physics of Semiconductor Devices**, Wiley online Library, p. 134-196, 2006.
- (43) TUNG, R. T. The Physics and Chemistry of Schottky barrier height. **Applied Physics Reviews**, AIP Publishing, v. 1, n. 1, p. 304, 2014.
- (44) Franklin et al. Nanoscience – **Carbon Nanobutes**. Lett. 2012, v. 12, p. 758-762.
- (45) TULEVSKI, A. **Carbon Nanotube Complementary Wrap-Gate Transistors**. Nano Lett, 2013, p. 2490-2495.
- (46) Berkeley Lab. **Smallest Transistor Ever**. Disponível em: <<http://newscenter.lbl.gov/2016/10/06/smallest-transistor-1-nm-gate/>>. Acesso em: 25 mai. 2017.
- (47) AVOURIS, P.; MARTEL, R. and DERYCKE, V. **Carbon Nanotube Transistors and Logic Circuits**. Physica B Condensed Matter, 2014.