

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

WILSON ANTONIO SILVA JUNIOR

COMPUTADORES DE DNA: UMA NOVA TECNOLOGIA

São Paulo

2011

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

WILSON ANTONIO SILVA JUNIOR

COMPUTADORES DE DNA: UMA NOVA TECNOLOGIA

Monografia submetida como exigência parcial
para a obtenção do Grau de Tecnólogo em
Processamento de Dados.

Orientador: Prof. Valter Yogui

São Paulo

2011

AGRADECIMENTOS

Para a concretização deste trabalho segue meus agradecimentos às inúmeras pessoas que me transmitiram não só conhecimentos, mas também apoio e confiança, me ajudando a concluir mais esta etapa na minha vida.

Aos meus pais e a minha namorada, grande companheira, ao me apoiarem em todas as vezes que foi necessário.

Aos meus colegas de faculdade, muitos não só colegas, mas agora grandes amigos, por sempre me darem força.

Aos professores por todo o conhecimento transmitido ao longo das matérias cursadas. Especialmente ao professor e meu orientador Valter Yogui pelo auxílio na elaboração desse trabalho.

E a todos as pessoas que de alguma forma contribuíram para a finalização deste trabalho.

“O maior obstáculo de um homem é ele próprio!”

(Autor desconhecido)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	8
RESUMO	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo	12
1.2 Motivação	12
1.3 Metodologia para o trabalho	13
1.4 Estrutura do trabalho	13
2 OS COMPUTADORES DE DNA	14
2.1 O DNA	14
2.2 DNA na computação	15
2.3 Operações de manipulação de sequências de DNA	17
3 AVANÇOS E APLICAÇÕES NA COMPUTAÇÃO COM DNA	23
4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS COMPUTADORES DE DNA	26
4.1 Vantagens da computação com DNA	26
4.2 Desvantagens da computação com DNA	27
5 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da estrutura do DNA	14
Figura 2 - Sequência simples de DNA	17
Figura 3 - Sequência dupla de DNA	17
Figura 4 - Direção das sequências	17
Figura 5 - Operação de hibridização	18
Figura 6 - Operação de desnaturação	18
Figura 7 - Operação de PCR	19
Figura 8 - Operação de restrição	20
Figura 9 - Operação de ligação	21
Figura 10 - Operação de separação de sequência por afinidade	22
Figura 11 - Representação artística da máquina de Turing	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os computadores de DNA X Convencionais.....	29
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADN - *Ácido Desoxirribonucléico*

A - Adenina

C - Citosina

DES - *Data Encryption Standard*

DNA - *Deoxyribonucleic Acid*

G - Guanina

IBM - *International Business Machines*

MIPS - Milhões de instruções por segundo

NP - *Non-Deterministic Polynomial Time*

PCR - *Polymerase Chain Reaction*

RNA - *Ribonucleic Acid*

T - Timina

RESUMO

Neste estudo, sobre os computadores de DNA, motivado pelas promessas de uma nova tecnologia capaz de produzir nanocomputadores com capacidades de processamento equivalentes a de supercomputadores, armazenamento de informações em nível molecular e com a capacidade de se comunicarem e interagirem com organismos vivos, tem como principal objetivo a identificação das suas principais vantagens e desvantagens em relação aos computadores convencionais, cuja tecnologia predominante utiliza energia elétrica e processadores feitos de silício para funcionamento. Com este trabalho foram encontradas possíveis aplicações médicas, devido aos computadores de DNA, falarem a língua dos organismos vivos e a utilização nas soluções de problemas complexos como os NP-Completo de forma mais eficiente que os computadores convencionais.

Palavras Chaves: Computadores de DNA, Computação com DNA, DNA

ABSTRACT

In this study, about the DNA of computers, motivated by promises of a new technology able of produce nanocomputers with skill of process as than supercomputers, information storage in level molecular and with skill of communication and interaction with humans, it has by main advantage and disadvantage in relation than a conventional computer, in which the predominant technology used the electric energy e processors made of silicon for operation. With this work were found possible medical applications, due to computers of DNA speaks the language the humans and the use in the solutions of complex problems than the NP-full more efficient than the conventional computers.

Key words: DNA of Computers, computation with DNA, DNA.

1 INTRODUÇÃO

Em 1965, o cofundador da Intel Gordon Earl Moore, estabeleceu um conceito, atualmente conhecido como Lei de Moore. Tal conceito dizia que a capacidade de armazenamento e processamento dos computadores dobraria a cada 18 meses. Até o momento esta Lei foi válida, mas agora no que diz respeito á tecnologia de processadores de silício, que se aproxima do seu limite, começa ficar quase impossível manter ou diminuir o tamanho dos processadores aumentando sua capacidade de processamento. Com base neste problema cientistas buscam soluções em novas linhas de pesquisas, uma delas são os computadores de DNA.

O DNA é um ácido, sua sigla em inglês significa *Deoxyribonucleic Acid*, ou em português Ácido Desoxirribonucléico (ADN). Apelidado de código da vida este contém todas as informações necessárias para geração e reprodução de um ser vivo. Ele fica armazenado dentro do núcleo de cada célula, ocupando apenas 0,3% do seu núcleo. Desta afirmação já conseguimos imaginar a sua grande capacidade de armazenamento de dados em nível molecular.

Alan Turing, no ano de 1936, projetou uma máquina puramente conceitual, sem definir seu hardware, ou seja, os materiais necessários para a montagem da máquina, imaginando-a apenas como uma pessoa com um papel infinitamente longo, um lápis e um manual de instruções. Esta máquina, conhecida como “Máquina de Turing”, leria um símbolo, o modificaria conforme as regras descritas no manual de instruções e passaria ao próximo símbolo, aplicando as regras até que nenhuma regra se aplicasse mais. Apesar de a maioria das pessoas conhecerem este conceito aplicado apenas nos computadores tradicionais (aqueles com processadores feitos de silício), existem outras formas de aplicá-los, onde uma delas seria através dos computadores de DNA.

Ehud Shapiro, ao comparar a máquina de Turing com as máquinas biomoleculares no interior das células que processam DNA e *Ribonucleic Acid* (RNA), encontrou semelhanças incríveis, pois as mesmas processam informações armazenadas em sequências de símbolos de alfabeto fixo, avançando sequencialmente pelos códigos e modificando ou acrescentando símbolos de acordo com um conjunto de regras pré-definidas.

Leonard M. Adleman, da Universidade da Califórnia do Sul, em 1944, conseguiu utilizar as moléculas de DNA em um tubo de ensaio para resolver um problema incomodo para os computadores convencionais, um problema NP. Problemas NP são aqueles dos quais os algoritmos devem realizar vários testes, e identificar qual seria o resultado mais próximo da solução ideal. Este tipo de problema dependendo da complexidade e tolerância exige muito processamento. Ehud Shapiro e Yaakov Benenson também conseguiram avanços significativos nos últimos sete anos, na elaboração de computadores de DNA em tubos de ensaio.

Conforme as pesquisas avançam, surgem questões que buscam uma solução, uma delas é: *“Quais seriam as principais vantagens e desvantagens dos computadores de DNA em relação aos convencionais?”*.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como meta identificar e definir as principais vantagens e desvantagens dos computadores de DNA em relação aos computadores convencionais.

Idealmente, os objetivos específicos levantados para atingir o objetivo principal deste trabalho de pesquisa foram:

- 1) Conhecer os conceitos, as definições e aplicações dos Computadores de DNA;
- 2) Levantar os avanços mais recentes nas pesquisas dos Computadores de DNA;
- 3) Comparar-los com os convencionais traçando as principais diferenças e identificando suas vantagens e desvantagens.

1.2 Motivação

A motivação para a elaboração deste trabalho sobre os computadores de DNA veio da promessa de soluções que os computadores convencionais não são

capazes de oferecer, como o armazenamento e processamento de dados em nível molecular e interação e funcionamento dentro de organismos vivos.

1.3 Metodologia para o trabalho

Este trabalho será desenvolvido com o apoio literário de livros, artigos, teses, dissertações referentes ao tema e se possível à aplicação de estudos de caso.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em três partes onde as duas primeiras buscam conceituar e definir o que são os computadores de DNA, e a última apresentar uma base comparativa entre os computadores de DNA e a tecnologia atual. Segue abaixo, um melhor detalhamento das três partes do trabalho:

- Na primeira parte será abordada a parte conceitual dos computadores de DNA, um resumo de sua evolução na história.
- A segunda parte buscara abordar os últimos avanços das pesquisas no desenvolvimento dos computadores de DNA e suas aplicações.
- E a terceira e última parte, será o bloco principal do trabalho, onde será trabalhado o problema. Nele será traçado os pontos em comuns e as diferenças entre os computadores de DNA e os convencionais, deixando claras as principais vantagens e desvantagens entre eles.

2 OS COMPUTADORES DE DNA

2.1 O DNA

O DNA é a principal molécula da vida na Terra, ela está presente nas células de todos os seres vivos, sendo responsável pelo armazenamento das informações necessárias para sua formação e reprodução, sua sigla significa no inglês Deoxyribonucleic Acid, ou no português, pouco utilizado, Ácido Desoxirribonucléico (ADN) (RIBEIRO 2008).

Sua estrutura, representada pela figura 1, foi desvendada pelo americano James Watson e pelo britânico Francis Crick, em 1953, com base nos estudos de Maurice Wilkins e Rosalind Franklin. Com esta descoberta, os pesquisadores Watson, Crick e Wilkins ganharam o prêmio Nobel de Medicina em 1962. Rosalind Franklin já havia falecido na ocasião (CIÊNCIA VIVA 2011).

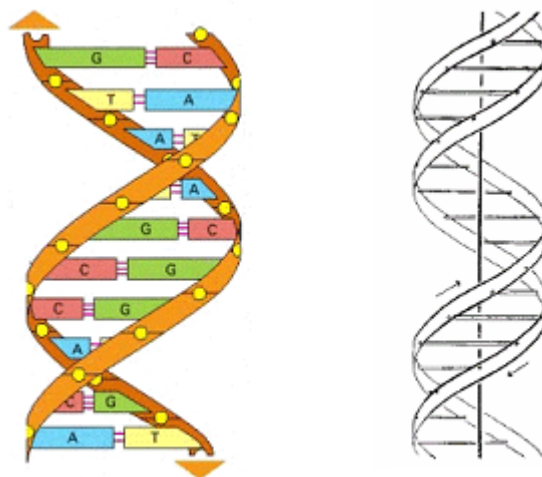


Figura 1: Representação da estrutura do DNA

Fonte: www.cienciaviva.org.br/arquivo/cdebate/004dna/index.html

A molécula de DNA é formada por moléculas menores chamadas de nucleotídeos. São quatro os tipos de nucleotídeos que compõem o DNA, eles são a Adenina, Citosina, Guanina e Timina, representadas por sua primeira letra {A, C, G, T}, formando o alfabeto do DNA e conseqüentemente dos computadores de DNA. Como representado na Figura 1, o DNA trata-se de uma fita dupla de nucleotídeos,

que se enrolam formando uma dupla hélice com sentido rotacional à direita. Basicamente a ligação entre duas fitas simples de DNA, formando a dupla hélice, ocorre seguindo uma única regra, a Adenina sempre se liga a Timina e Citosina sempre se liga a Guanina e vice-versa (CIÊNCIA VIVA 2011).

Igual aos computadores convencionais, elétricos de processadores de silício onde as informações são representadas por diferentes sequências de 0 e 1, no DNA as informações dos seres vivos são representadas por diferentes sequências de seu alfabeto {A, C, G, T}.

2.2 DNA na computação

Os computadores de DNA surgiram da necessidade de resolver determinados problemas combinatórios com mais eficiência que um computador convencional. E se mostrou bem sucedido no experimento realizado por Leonard Adleman, da University of Southern California, em 1994 e publicada na Revista Science. Este experimento trata-se da primeira utilização da computação com DNA de sucesso na história. Adleman utilizou de técnicas de manipulação e moléculas de DNA para solucionar uma pequena instância do caminho Hamiltoniano, que é conhecido como um problema da classe NP-Completo.

A abreviação NP significa “Polinomial Não Determinístico”, são classes de problemas de decisão que podem ser verificados em tempo polinomial, as soluções desse tipo de problema podem ser difíceis de serem encontradas, mas será fácil verificar o que satisfaz o problema. Os NP-Completo são os problemas mais complexos da classe NP. A vantagem dos computadores de DNA em relação aos computadores convencionais (elétricos de processadores de silício) na solução desse tipo de problema trata-se justamente dele poder testar as possibilidades simultaneamente enquanto o convencional tem que checar uma a uma.

Os computadores de DNA funcionam através da biologia molecular e não da tradicional tecnologia de processadores de silício. O DNA propriamente dito funciona como um software e as enzimas como o hardware. Por enquanto eles só foram utilizados em tubos de ensaio e lâminas de vidro. Diferente dos convencionais não

utilizam impulsos elétricos e sim reações químicas, por isso são muito mais econômicos (RIBEIRO 2008).

Cientistas da “University of Southern California” afirmam que um minúsculo vidro de DNA poderá resolver problemas que deixariam um supercomputador saturado. As moléculas de DNA ocupam apenas 0,3% do volume do núcleo da célula, capaz de armazenar 100 trilhões de vezes a mais de dados que a tecnologia atual.

Os computadores de DNA por enquanto não passam basicamente de fitas de DNA pré-selecionadas e identificadas em tubos de ensaio e um conjunto de operações biológicas de manipulação destas fitas. A computação com DNA requer a aplicação de um conjunto específico de operações biológicas a um conjunto de moléculas (ISAIA FILHO 2004).

Listadas abaixo as principais operações biológicas utilizadas na manipulação de sequências de DNA:

- Síntese de seqüências
- Hibridização de seqüências
- Desnaturação de sequências
- Polimerização em cadeia
- Restrição das sequências
- Ligaçãõ de sequências
- Separação de sequências por tamanho
- Separação de sequências por afinidade

No tópico seguinte serão detalhadas as principais operações de manipulação de sequências de DNA. Estudos mais aprofundados sobre o assunto podem ser obtidos em “Uma Metodologia para Computação com DNA” (ISAIA FILHO 2004) e “*Molecular Biology of the Cell*” (ALBERT 1994).

2.3 Operações de manipulação de sequências de DNA

O DNA trata-se de uma molécula formada por moléculas menores nomeadas de nucleotídeos. Estas moléculas menores são a adenina, citosina, guanina e timina, num total de quatro, representadas respectivamente pelas letras A, C, G, T.

Os computadores de DNA utilizam de pedaços de DNA para realizarem o processamento de informações. São dois os tipos de pedaços:

- O primeiro tipo denominado em sequência simples, representado na figura 2, que pode ser obtido em qualquer sequência e ser montado através de uma máquina denominada de sintetizador através da operação de síntese de sequências.

A C G T A C G T A C G T

Figura 2: Sequência simples de DNA

- O segundo tipo denominado de sequência dupla, figura 3, é obtido através da ligação de duas sequências simples. Esta ligação obedece as seguintes restrições: “A” pode unir-se somente a “T”, “T” pode unir-se somente a “A”, “C” pode unir-se somente a “G” e “G” pode unir-se somente a “C”. Esta restrição é conhecida por complementaridade de Watson-Crick.

A C G T A C G T A C G T
T G C A T G C A T G C A

Figura 3: Sequência dupla de DNA

As sequências de DNA possuem duas direções que são: 5' – 3' ou 3' – 5'. Essa direção se dá através da ligação de um nucleotídeo do grupo fosfato (5') com o grupo hidroxila (3') de outro nucleotídeo. Além da complementaridade de Watson-Crick, a ligação de sequências simples devem ter direções opostas (Figura 4).

3' – A C G T A C G T A C G T – 5'
5' – T G C A T G C A T G C A – 3'

Figura 4: Direção das sequências

Através de operações biológicas são feitas as manipulações das sequências de DNA, simples ou duplas. Segue abaixo o detalhamento das principais operações biológicas de manipulação utilizadas na computação com DNA:

- **Síntese de sequências:** Denominação para o processo de criação de fita simples de DNA.
- **Hibridização de sequências:** Geração de fita dupla através da união de duas fitas simples, uma sendo complementar da outra. Representado na figura 5.

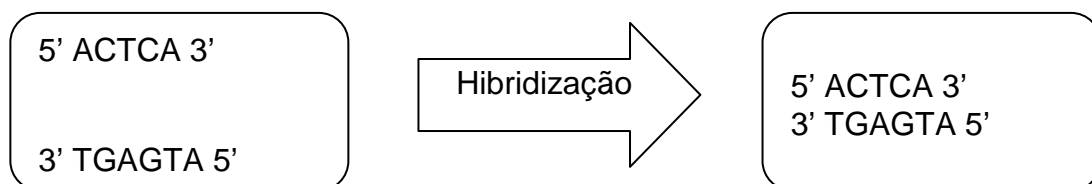


Figura 5: Operação de hibridização

- **Desnaturação de sequências:** Separação de uma fita dupla de DNA em duas fitas simples sem a quebra das sequências. Para isto basta aquecer a solução de DNA na temperatura ideal entre 85° a 95° Celsius. Representado na figura 6.

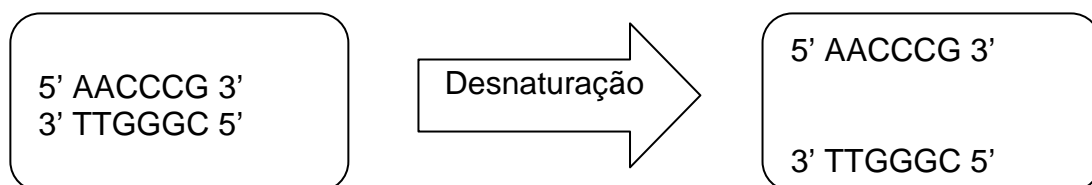


Figura 6: Operação de desnaturação

- **Polimerização em cadeia:** Operação conhecida como Polimerase ou PRC (do inglês Polymerase Chain Reaction), é utilizada para realização da duplicação de sequências de DNA. Através da enzima polimerase, adiciona nucleotídeos ausentes em uma sequência de DNA. Representado na figura 7.

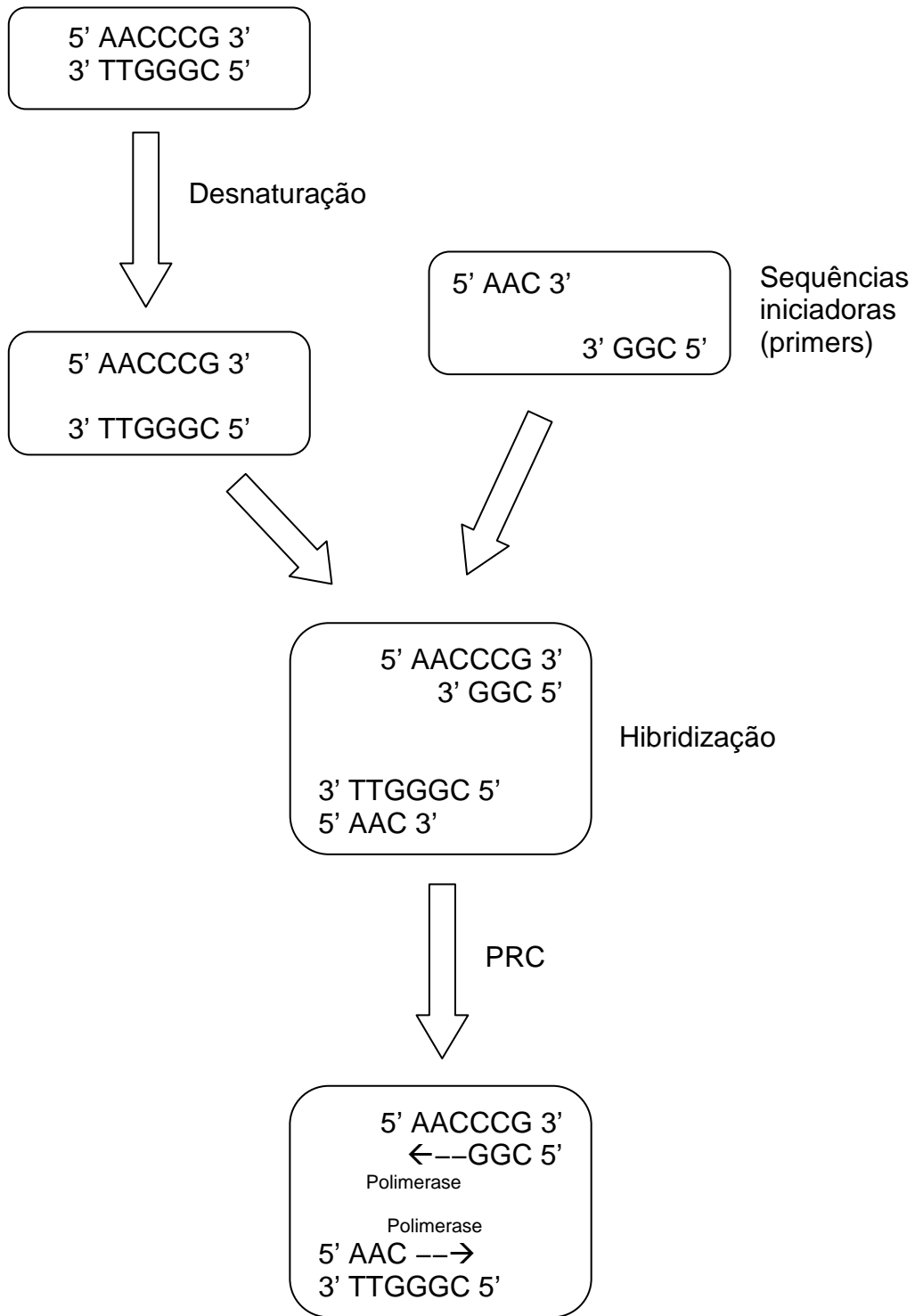


Figura 7: Operação de PCR

- **Restrição das sequências:** Reação utilizada para localizar e cortar sequências específicas de DNA. Representado na figura 8.

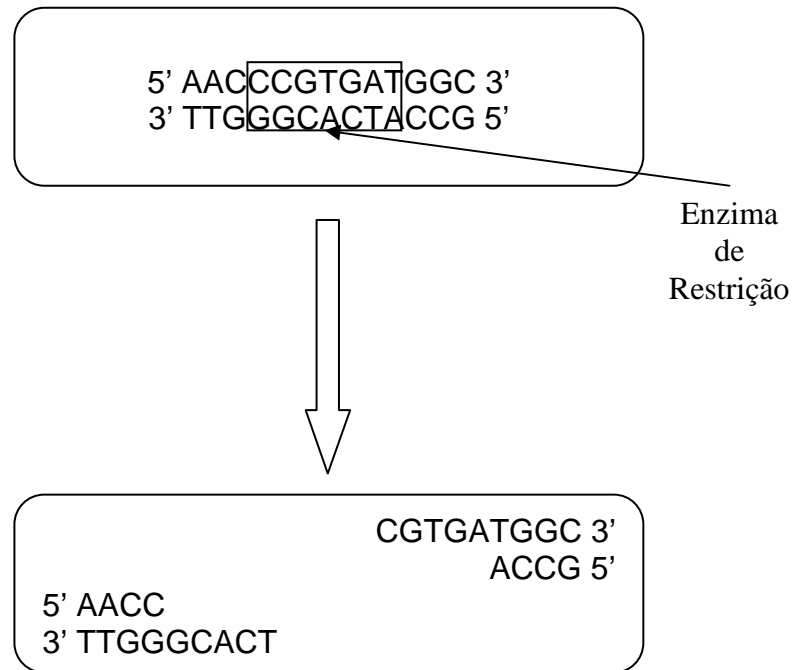


Figura 8: Operação de restrição

- **Ligação de sequências:** No processo de hibridização ocorrem casos de descontinuidade em uma das fitas. Nesta manipulação é utilizada a enzima ligase, o que permite obter uma fita dupla com suas sequências simples unificadas. Representado na figura 9.

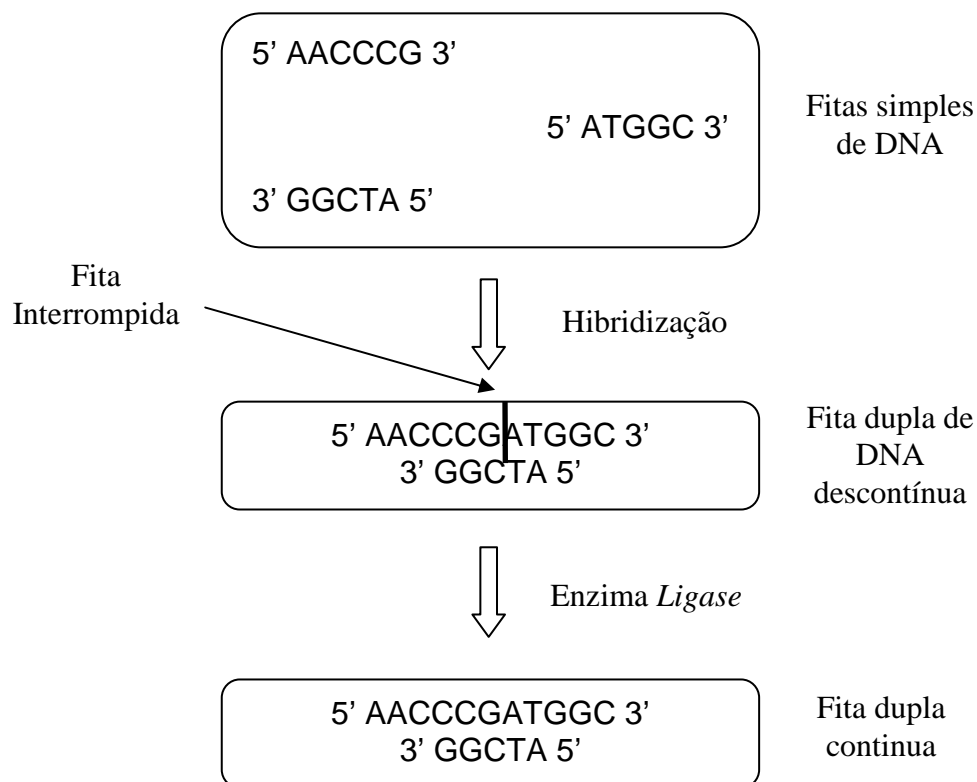


Figura 9: Operação de ligação

- Separação de seqüências por tamanho:** Realizado pelo processo de Eletroforese em gel é possível à separação de seqüências de DNA de uma solução pelo seu tamanho. A eletroforese trata-se do movimento ordenado das moléculas em uma solução, esse movimento se dá quando as moléculas de DNA que contém carga elétrica negativa são submetidas a um campo magnético, elas tendem a migrar para o pólo positivo. Numa solução aquosa a velocidade de migração das moléculas seria a mesma, mas no gel, geralmente agarose e poliacrilamida ou uma possível combinação dos dois, as moléculas de DNA tendem a se mover mais rápido, pois o gel trata-se de uma rede intensa de poros, o que retarda a passagem dos maiores.
- Separação de seqüências por afinidade:** Através da complementaridade de Watson-Crick podemos separar de uma solução, uma seqüência de DNA já conhecida. Para isto basta adicionar uma seqüência simples de DNA, que seja a complementar da seqüência que deseja separar, acrescida de um elemento magnético na solução desnaturada. Após isto basta esperar a

realização da hibridização da solução, realizada em temperatura ambiente, e aproximar um ímã na solução para atrair a sequência desejada. Representado na figura 10.

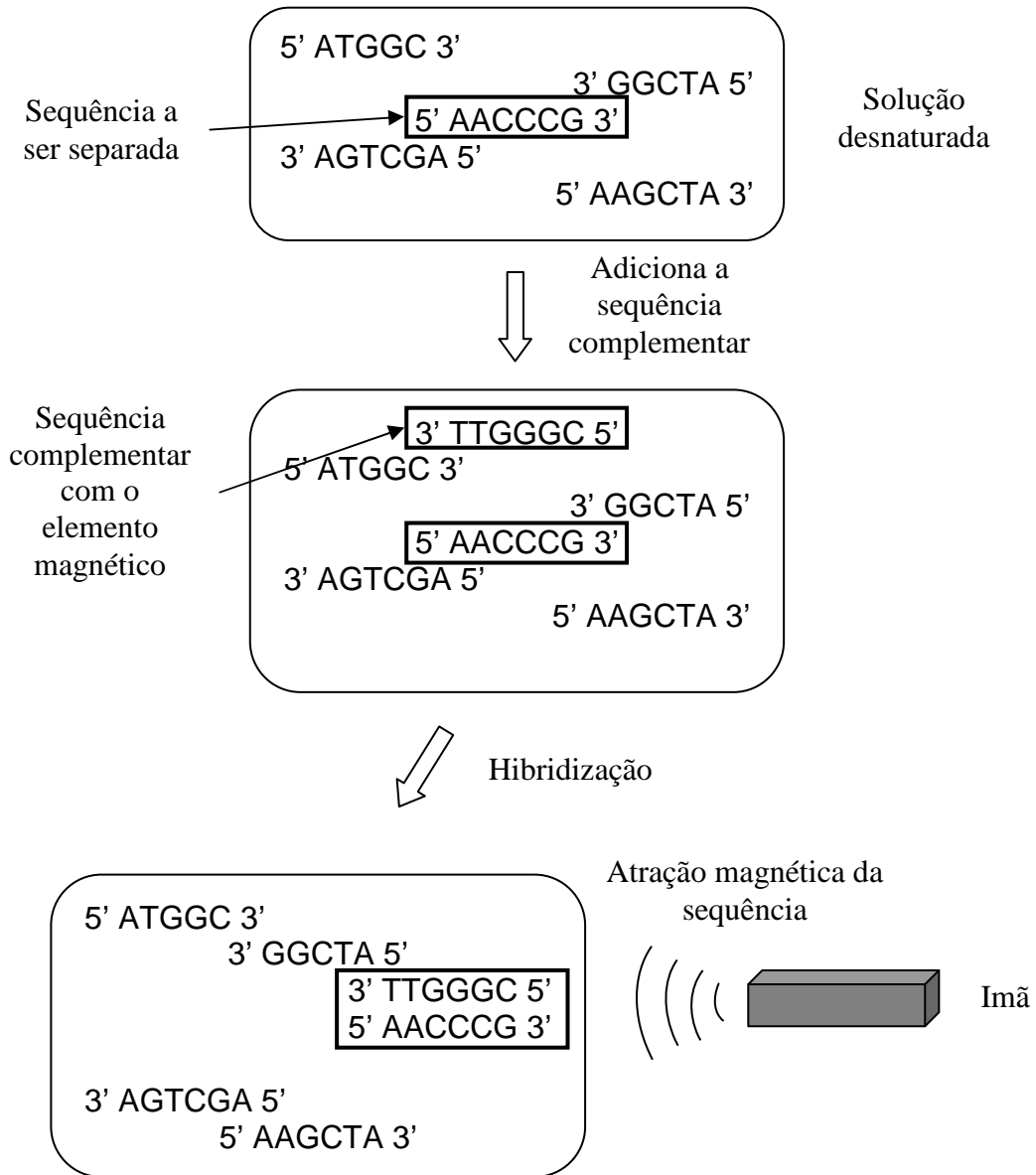


Figura 10: Operação de separação de sequência por afinidade

3 AVANÇOS E APLICAÇÕES NA COMPUTAÇÃO COM DNA

Pesquisas relatadas por Shapiro trançam relevantes semelhanças entre os computadores biomoleculares contidos nas células dos organismos vivos e a Máquina de Turing, conceito proposto por Allan Turing no início do século XX. A Máquina de Turing trata-se da primeira representação de uma máquina computacional. Allan Turing a descreve como uma fita infinitamente longa com um cabeçote podendo avançar ou recuar sobre fita, incluindo ou alterando símbolos conforme as regras estabelecidas até que nenhuma regra mais se aplique. Quando Allan Turing a propôs e momento algum ele citou com quais materiais e tecnologia está máquina deveria ser construída. As máquinas convencionais, elétricas de processadores de silício, as quais convivemos hoje tiveram que ser adaptadas por limitações tecnológicas distanciando-se da máquina de Turing.

A Máquina Universal de Turing, representada artisticamente na figura 11, pode, teoricamente, calcular qualquer número ou função de acordo com instruções apropriadas e tem como um propósito decidir se um problema é computável, ou seja, se ele pode ser resolvido a partir de elementos de seu domínio de definição. (CASTILHO 2001).

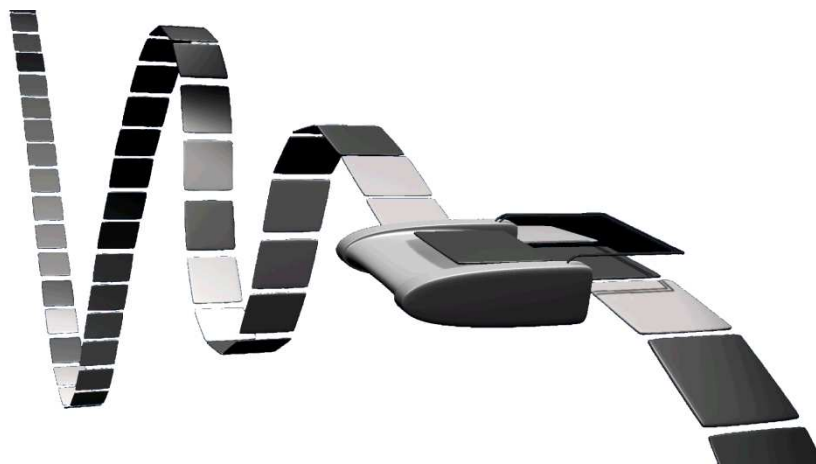


Figura 11: Representação artística da máquina de Turing
Fonte: <http://turing.izt.uam.mx>

Os Computadores de DNA não iram substituir os computadores atuais e sim complementaram nas áreas onde os atuais são inviáveis, exemplo, na solução de problemas NP, onde é necessário um alto nível de paralelismo de processamento, o

que é impossível para os computadores convencionais, outro exemplo, seria na área médica, pois os computadores de DNA falam a língua dos organismos vivos, por isso podem funcionar, compreender e se relacionar dentro de um organismo vivo, é nesta linha que segue as pesquisas de Shapiro e sua equipe (SHAPIRO & BENENSON 2006).

Shapiro, Benenson e uma equipe de cientistas conseguiram até agora criar um autômato biomolecular capaz de diagnosticar e tratar o câncer em um ambiente simulado em tubo de ensaio. Suas pesquisas agora seguem na tentativa de inserir e testar este autômato numa célula viva.

As enzimas podem ser usadas como hardware e as moléculas de DNA como softwares para a montagem de computadores moleculares, ou seja, computadores de DNA. Enzimas são proteínas com atividades catalíticas, atividades estas que funcionam como catalisadores, que aceleram em muito a velocidade de uma determinada reação sem participar dela como reagente ou produto, praticamente todas as reações que caracterizam o metabolismo celular são catalisadas por enzimas (RIBEIRO 2008).

Através desta tecnologia os computadores podem enfim chegar ao nível molecular, isto tem interessado cada vez mais os pesquisadores e cientistas, que tem conseguido avanços significativos. Segundo a revista SCIENCE, os nanocomputadores estão na lista de conquistas científicas mais importantes 2001 (RIBEIRO 2011).

Os computadores de DNA trarão avanços significativos na área da medicina, eles poderão funcionar dentro dos organismos vivos, funcionando em conjunto com a máquina-humana formando um novo sistema imunológico podendo combater até doenças como o câncer, que trata-se de mutações do próprio organismo. Imagine os computadores de DNA, evitando mutações do DNA num organismo vivo, desta forma podendo retardar até mesmo a velhice.

Segue abaixo outras áreas onde está sendo utilizada a computação com DNA (ISAIA FILHO 2004):

- **Na implementação de memórias associativas.** Operações biológicas podem ser aplicadas simultaneamente em todas as moléculas de DNA contidas em tubo de ensaio. Com base nesta característica Reif (1995) resolveu implementar memórias usando moléculas de DNA.

- **Criptografia.** Boneh (1995) propôs um algoritmo para quebrar o DES (*Data Encryption Standard*), que trata-se de um procedimento de encriptação de dados da IBM (*International Business Machines*), largamente utilizado. Segundo Boneh, o DES poderia ser quebrado em quatro meses pela computação com o DNA.

4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS COMPUTADORES DE DNA

Neste tópico serão listadas as principais vantagens e desvantagens existentes entre os computadores de DNA e os computadores atuais, aqueles cuja tecnologia predominante utiliza a energia elétrica e os processadores são feitos de silício.

4.1 Vantagens da computação com DNA

Abaixo seguem listadas as principais vantagens que a computação com DNA pode oferecer:

- **Velocidade de Processamento.** Os computadores de DNA conseguem ser mais rápidos que os convencionais, se for levada em consideração a quantidade de informação tratada em paralelo. Um computador de DNA é capaz de executar 10^{14} MIPS (Milhões de Instruções por Segundo), enquanto que um supercomputador consegue executar somente 10^9 MIPS (ROOB 1996). Com o uso dos computadores de DNA, Adleman conseguiu solucionar uma instância pequena de sete nodos do problema do caminho Hamiltoniano em semanas. No entanto, um computador convencional seria capaz de resolver esse problema em alguns milissegundos, mas no caso de uma instância maior levaria milhões de anos, enquanto nos computadores de DNA serão necessários apenas alguns meses.
- **Tamanho.** Os computadores de DNA estão em nível molecular, são os tão sonhados nanocomputadores, são muito menores do que um computador convencional poderá alcançar, devido ao limite imposto por sua tecnologia.
- **Capacidade de Armazenamento.** Devido aos computadores de DNA estarem em nível molecular a sua capacidade de armazenamento torna-se

imensamente superior a de um computador convencional. Dez trilhões de moléculas de DNA cabem em apenas um centímetro cúbico, sendo capaz de armazenar aproximadamente 10 terabytes de dados. Através do DNA, nosso organismo vivo é capaz de armazenar toda a nossa informação genética ocupando apenas 0,3% de espaço do núcleo de uma de nossas células.

- **Consumo de Energia.** Os computadores de DNA não necessitam de fontes externas de energia para funcionar, utilizam apenas de reações químicas, o que os torna mais econômicos que os computadores convencionais (RIBEIRO 2008).

4.2 Desvantagens da computação com DNA

Apesar das relevantes vantagens oferecidas pelos computadores de DNA, ainda existem vários obstáculos a serem superados, por esta nova tecnologia, abaixo seguem listados os principais:

- **Lentidão nas soluções de problemas simples.** Quando se trata de problemas simples, onde não necessita alto nível de paralelismo no processamento, a solução através da computação convencional é mais rápida. As reações biológicas na computação com DNA são executadas de forma rápida, porém as implementações são demoradas, o que não compensa para solucionar problemas simples, onde o processamento vai ser relativamente mais rápido em um computador convencional. Por exemplo, localizar uma sequência específica na solução, requer uma intervenção humana, que pode levar de 15 minutos a 3 horas (AMOS 1997).
- **Falta de profissionais e metodologia.** O que dificulta a evolução desta tecnologia é falta de profissionais com conhecimentos suficientes nas áreas de matemática e biologia, que são necessárias para a implementação e operação de computadores de DNA. A falta de metodologia definida

complementa o problema dificultando a comunicação entre especialistas de matemática e biólogos.

- **Inconfiabilidade.** Diferente dos computadores convencionais, os computadores com DNA podem sofrer mutações na estrutura, sendo isso da natureza do DNA. Outro problema de inconfiabilidade é que as moléculas de DNA podem sofrer deteriorações durante o processamento de algum problema, invalidando o resultado final (DEATON 1996).
- **Alto paralelismo, mas sem comunicação entre os processadores.** Diferente da computação convencional, a computação com DNA tem processadores independentes trabalhando em paralelo, sem se comunicarem, fica a cargo da intervenção humana unir as repostas dos processadores em resultado final. Já na computação convencional os processadores, em paralelo, trocam informações entre si, desta forma eles conseguem unir as repostas retornando o resultado final (DASSEN 1998).
- **Codificação padrão.** Por falta de estruturas de dados definidas, na computação com DNA não foi possível ainda à representação de números reais (ISAIA FILHO 2004).
- **Visualização dos resultados:** Os computadores de DNA não mostram os resultados em alto nível, exemplo, em um monitor. São necessárias antes várias operações biológicas para decifrá-los e visualizá-los, podendo levar horas, dias e até meses, dependendo da complexidade do problema, para visualizar um resultado (RIBEIRO 2008).

Na tabela 1 abaixo está sendo apresentado, para uma maior visualização das vantagens e desvantagens, um resumo comparativo entre as duas tecnologias, os computadores de DNA e os convencionais.

Comparações	DNA	Convencionais
Paralelismo	Alto nível de paralelismo. Podem ser executadas bilhões de operações simultaneamente.	Baixo, devido à arquitetura complexa. Pode alcançar somente algumas dezenas de processadores em paralelo.
Operações Individuais	A execução de operações individuais é lenta.	A execução de operações individuais é rápida.
Velocidade	Alta, se levar em consideração o paralelismo.	Baixa, o número de operações aplicadas simultaneamente é menor, proporcional ao número de processadores em paralelo.
Comunicação entre Processadores	Não existe forma de comunicação entre os processadores biológicos	Existe a troca de informações entre processadores via barramentos.
Armazenamento de dados	Grande capacidade, pois armazena informações em nível molecular.	Capacidade de memória pequena em relação ao computador de DNA.
Visualização de resultados	Em baixo nível, pois requer uma manipulação biológica antes.	Em alto nível, os resultados são visualizados basicamente em um monitor numa linguagem de fácil compreensão.
Consumo de Energia	Baixo, não existe fonte externa de energia. As operações se dão através de reações químicas.	Alto. Necessita de energia elétrica para seu funcionamento.
Tamanho	Molecular. Uma única lamina de vidro pode conter milhões de sequências de DNA, capazes de executar milhões de operações simultaneamente.	Grande em comparação com os computadores de DNA.
Representação de Dados	Não possui representação das estruturas de dados definido. Ex.: Representação de números reais	Estruturas de dados bem definidas.
Implementação de códigos	Difícil, pois para computar alguma informação, faz-se necessário uma considerável preparação dos dados de entrada.	Fácil em comparação com os computadores de DNA, não requer um laboratório para isto.

Confiabilidade	DNA é sensível a deteriorações químicas.	Dados eletrônicos são vulneráveis, mas fácil de recuperar.
Bibliografia para estudos	Pouco conhecida, ainda não existem muitos materiais para estudos.	Tecnologia já difundida existe um vasto material para o estudo.
Metodologia	Não existem metodologias de programação bem estabelecidas.	As metodologias de programação são eficientes e estabelecidas

Tabela 1: Comparativo entre os computadores de DNA X Convencionais.

5 CONCLUSÃO

Como pode se constatar ao longo deste trabalho os computadores de DNA prometem trazer grandes revoluções, sendo uma das principais na área médica, como por exemplo, uma nova forma de tratamento para o câncer, apresentada por Shapiro e Benenson, através de um autômato desenvolvido por eles capaz de identificar a presença de células cancerígenas e de liberar o medicamento apenas para as células doentes, sem prejudicar as células saudáveis. Este experimento encontra-se em estágio inicial, tendo sido testado apenas em tubos de ensaio e não em organismos vivos. Outra habilidade destas incríveis máquinas, os computadores de DNA, é a sua capacidade natural de trabalhar com altos níveis de paralelismo no processamento, tornando-as as mais indicadas e rápidas na resolução de problemas complexos como os NP-Completo. Temos também ainda a capacidade de armazenamento de informações em nível molecular, superior a tecnologia convencional, o baixíssimo consumo de energia em processamentos e o tamanho, podendo ser nanocomputadores. Apesar de tantas vantagens significativas, esta nova tecnologia terá grandes obstáculos pela frente impedindo a sua evolução, como por exemplo, a falta de profissionais qualificados tanto na área de biologia como na de matemática, o que seria necessário para implementação e manipulação de computadores de DNA, a falta de metodologias necessárias para a implementação dos computadores de DNA em soluções de problemas, a falta de representação de dados definida, como números reais, a intensa manipulação laboratorial necessária para funcionamento, extração e visualização de resultados.

Pesando vantagens e desvantagens apresentadas, pode ser dito que os computadores de DNA estão longe de serem tornarem uma tecnologia comum, que irão habitar a casa das pessoas, como ocorrem com os computadores convencionais, e dificilmente irão chegar nesse nível, a não ser na área médica na utilização de autômatos biológicos na interação com organismos vivos para tratamentos de determinadas doenças. O mas provável de ocorrer será a utilização destes para aplicações específicas, como na utilização de solução de problemas complexos difíceis de serem processados por computadores convencionais.

Neste trabalho não foi possível estudos mais profundos sobre o funcionamento dos computadores de DNA e sua utilização na resolução de problemas NP-Completo, fica a dica então para possíveis trabalhos futuros. Outro estudo interessante de ser abordado, em possíveis trabalhos futuros, seriam quais os possíveis problemas que os computadores de DNA podem trazer na área de segurança da informação, pois graças a sua capacidade de processamento elevada devido ao paralelismo, os mesmos podem quebrar criptografias como DES em tempo considerável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLEMAN, L. **On Constructing a Molecular Computer**. Department of Computer Science, University of Southern California, 1995.

ALBERTS, B. **Molecular Biology of the Cell**. New York: Garland Publishing, 1994.

AMOS, M. **DNA Computation**. PhD thesis. University of Warwick, UK, 1997.

BENENSON, Y.; PAZ-ELIZUR, T.; ADAR R.; KEINAN E.; LIVNEH Z. & SHAPIRO E. **Programmable and Autonomous Computing Machine Made of Biomolecules**. Nature, 2001.

BONEH, D.; DUNWORTH, C. & LIPTON, R. **Braking DES Using a Molecular Computer**. USA: Department of Computer Science, Princeton University, USA, 1995.

CASTILHO, Fernando M. B. M. & BARRETO, Jorge M. **Teoria da Computação**. Disponível em <<http://www.inf.ufsc.br/~l3c/artigos/53RA%20SBPC%20Turing.PDF>>, Acesso em: 30 ago. 2011.

CEUAMI. Turing Machine. Disponível em: <<http://turing.izt.uam.mx>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

CIÊNCIA VIVA. DNA: O nosso código secreto. Disponível em <<http://www.cienciaviva.org.br/arquivo/cdebate/004dna/index.html>>. Acesso em: 12 set. 2011.

DASSEN, J. **DNA Computing: Promises, problems and perspective**. IEEE Potentials, 1998.

DEATON, R. Genetic search of reliable encodings for DNA based computation. Disponível em: <www.csce.uark.edu/~rdeaton/dna/papers/gp-96.pdf>. Acesso em: 15 set. 2011

ISAIA FILHO, E. **Uma metodologia para a computação com DNA**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre (RS), 2004.

REIF, J. Parallel. **Molecular Computation**. In: ANNUAL ACM SYMPOSIUM ON PARALLEL ALGORITHMS AND ARCHITECTURES. Santa Barbara: ACM, 1995.

REVISTA SCIENCE. Artigo, Nanotechnology, Disponível em:
<<http://www.sciencemag.org/cgi/content/summary/294/5545/1293>>. Acesso em: 5 nov. 2011.

RIBEIRO, Diego P. de L. **Computação Biológica**, Monografia (graduação) – Faculdade de Jaguariúna. Jaguariúna (SP). Curso de Graduação em Ciência da Computação, 2008.

ROOB, D. & WAGNER, K. **On the power of DNA Computing**. Information and Computation, San Diego, 1996.

SHAPIRO, Ehud & BENENSON, Yaakov. Computadores de DNA ganham vida. Disponível em:
<http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/computadores_de_dna_ganham_vida_imprescindivel.html>. Acesso em: 24 ago. 2011.