

# A Vida e as Contribuições Científicas de Alan Turing

Ciclo de Seminários do PESC

**Luis Menasché Schechter**

Departamento de Ciência da Computação / UFRJ  
[luisms@dcc.ufrj.br](mailto:luisms@dcc.ufrj.br)

18 de março de 2015

## Nascimento e Infância

- ▶ Alan Mathison Turing nasceu em 23 de junho de 1912.
- ▶ Segundo e último filho de Julius Mathison Turing e Ethel Sara Turing (sobrenome de solteira Stoney)
- ▶ Seu irmão mais velho se chamava John.
- ▶ Seu pai era funcionário do Serviço Civil Indiano, servindo na região de Madras, onde conheceu a futura esposa, filha do engenheiro chefe da ferrovia de Madras.
- ▶ Turing foi concebido na Índia Britânica, mas nasceu em Paddington, Londres.
- ▶ Até a aposentadoria do seu pai do serviço na Índia em 1926, Alan e John Turing foram criados na Inglaterra por amigos dos pais (um coronel do Exército e sua esposa).

# Local de Nascimento



Warrington Crescent, 2, Londres W9, UK

# Turing Quando Criança



## Turing Quando Criança (2)



The young Turing

## Juventude

- ▶ Turing foi aceito como aluno na escola pública Sherborne School (uma espécie de Ensino Médio ou preparatório para a Universidade) em 1926.
- ▶ Durante seus anos na Sherborne School suas notas não eram boas e ele quase não conseguiu seu certificado de conclusão.
- ▶ Em Sherborne, conheceu Christopher Morcom, um estudante um ano mais velho.
- ▶ Morcom compartilhava o interesse de Turing por Matemática e pelas Ciências.
- ▶ O período de convívio com Morcom marcou o primeiro período em que Turing encontrou um interlocutor verdadeiro com quem pudesse conversar sobre seus interesses intelectuais.
- ▶ Em dezembro de 1929, ambos foram juntos a Cambridge realizar exames de admissão.
- ▶ Morcom ganhou uma bolsa em Cambridge e Turing não.

## Turing e Christopher Morcom em Sherborne



# Universidade

- ▶ Inesperadamente, Morcom faleceu em fevereiro de 1930.
- ▶ De certa forma, Turing parece ter se sentido responsável por realizar tudo aquilo que Morcom não mais poderia.
- ▶ Encontrando força e motivação nessa ideia, Turing conseguiu uma bolsa para o King's College em Cambridge.
- ▶ Turing começou seus estudos no King's College em outubro de 1931.
- ▶ Concluiu seus estudos em 1934, graduado-se com honras.
- ▶ A partir de 1935, obteve uma *Fellowship* no King's College.

## Turing na Época da Universidade



# Teoria da Computação

- ▶ Em 1928, David Hilbert propôs o chamado *Entscheidungsproblem*, que pergunta se existe um método mecânico (automático) para determinar se uma dada sentença lógica segue ou não de um conjunto de axiomas. Hilbert tinha convicção de que a resposta era positiva.
- ▶ Kurt Gödel, com seus dois *Teoremas da Incompletude* de 1931, forneceu fortes indícios de que a resposta seria negativa.
- ▶ Restava formalizar precisamente o que seria um “método mecânico” (ou um algoritmo).
- ▶ Alonzo Church forneceu uma modelagem baseada em funções matemáticas (o  $\lambda$ -Cálculo).
- ▶ Na mesma época (1935-1937), e de forma independente, Turing forneceu uma modelagem baseada em uma máquina com um pequeno conjunto de operações simples: a *Máquina de Turing*.

## Teoria da Computação (2)

- ▶ O trabalho de Turing foi publicado no artigo “On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem”, submetido em maio de 1936.
- ▶ Neste artigo, Turing apresenta quatro pontos fundamentais da Teoria da Computação:
  - 1) Turing formaliza um “procedimento mecânico” ou um algoritmo, como uma tarefa que pode ser executada por uma Máquina de Turing.
  - 2) Turing apresenta a *Máquina de Turing Universal*, uma Máquina de Turing capaz de simular o funcionamento de qualquer outra Máquina de Turing.
  - 3) Turing mostra que existem problemas que não são algorítmicamente solúveis, mostrando que o Problema da Parada é um destes problemas.
  - 4) Turing mostra (no apêndice) que o seu modelo de Máquinas de Turing é completamente equivalente ao modelo do  $\lambda$ -Cálculo.

# Alan Turing



## Alan Turing (2)



# O Que São Máquinas de Turing?

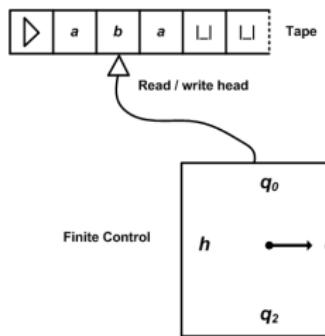
- ▶ Uma Máquina de Turing é um modelo computacional simples
- ▶ Tese de Church-Turing: tudo aquilo que é comumente considerado como “algorítmicamente computável” pode ser computado por uma Máquina de Turing
- ▶ Modelo matemático simples e preciso de computabilidade

# Qual a Utilidade Delas?

- ▶ Útil para
  - ▶ estudar os limites do que pode ser resolvido algorítmicamente
  - ▶ mostrar que existem (muitos) problemas sem solução algorítmica
  - ▶ estudar os requisitos de tempo e espaço (memória) necessários para resolver algorítmicamente um dado problema
  - ▶ construção de uma hierarquia de complexidade para os problemas
- ▶ Problemas Decidíveis X Indecidíveis
- ▶ Problemas Tratáveis X Intratáveis
- ▶ Teoria de Complexidade de Algoritmos
- ▶ Hierarquia de Classes de Problemas (P, NP, EXPTIME, etc)

# Máquina de Turing - Descrição Informal

- ▶ Componentes:
  - ▶ Fita infinita à direita dividida em casas
  - ▶ Cada casa pode estar em branco ou conter um símbolo do alfabeto da Máquina
  - ▶ Cabeça de leitura e escrita
    - ▶ Está sempre situada sobre uma das casas da fita
    - ▶ Pode se mover em ambas as direções na fita
    - ▶ Pode ler o símbolo contido na casa sobre a qual está
    - ▶ Pode escrever um símbolo na casa sobre a qual está



## Observação Importante:

A fita é infinita à direita, mas apenas uma quantidade finita de casas pode não estar em branco a qualquer momento da operação da Máquina de Turing

## Tese de Church-Turing

- ▶ Tese de Church-Turing: um problema é decidível se e somente se ele é decidível por uma Máquina de Turing
- ▶ Tese pode ser refutada pela descoberta de um modelo de computação mais poderoso do que as Máquinas de Turing
- ▶ Argumentos a favor da tese:
  - ▶ Máquinas de Turing “anabolizadas” não possuem maior poder computacional
  - ▶  $\lambda$ -Cálculo de Alonzo Church
  - ▶ Funções  $\mu$ -recursivas
  - ▶ Máquinas de Registradores
- ▶ A tese é comumente aceita atualmente
- ▶ Curiosidade: mesmo os algoritmos quânticos não refutam a Tese de Church-Turing

# Implementações de “Carne e Osso” de uma Máquina de Turing

<http://aturingmachine.com/>

<http://legoofdoom.blogspot.com>

## Doutorado

- ▶ De setembro de 1936 a julho de 1938, Turing realizou seu doutorado em Princeton, Nova Jersey, sob a orientação de Alonzo Church.
- ▶ Turing conheceu John von Neumann em Princeton.
- ▶ Durante este período, Turing também estudou criptologia.
- ▶ Turing construiu uma máquina de cifras baseada em um multiplicador binário construído utilizando-se relés eletromagnéticos.
- ▶ Neste período, a possibilidade de uma guerra contra a Alemanha já era bastante concreta.
- ▶ Após o final de seu doutorado, Turing retornou a Cambridge.

## Segunda Guerra Mundial e Criptanálise

- ▶ De volta a Cambridge, Turing tentou construir uma máquina para calcular a função Zeta de Riemann (seu objetivo era encontrar soluções fora da linha crítica).
- ▶ A partir de setembro de 1938, Turing começou a trabalhar em tempo parcial para a divisão do Governo Britânico responsável pela quebra de códigos.
- ▶ Em setembro de 1939, após o Reino Unido declarar guerra à Alemanha, Turing se apresentou em Bletchley Park, o centro das operações de criptanálise durante a guerra.
- ▶ A máquina Enigma era uma máquina desenvolvida pelos alemães para codificar suas instruções militares. A cifra implementada pela Enigma era considerada inquebrável inicialmente.

## Segunda Guerra Mundial e Criptanálise (2)

- ▶ Matemáticos poloneses conseguiram quebrar a cifra da máquina Enigma em um modo muito particular de operação.
- ▶ As ideias de Turing permitiram generalizar este método de maneira que qualquer mensagem cifrada com a Enigma pudesse ser decifrada.
- ▶ Turing projetou uma máquina para automatizar o processo de decifrar as mensagens: a máquina Bombe.
- ▶ Turing precisou desenvolver métodos estatísticos sofisticados para poder realizar esta tarefa.
- ▶ Próximo ao fim da guerra, o time de Bletchley Park desenvolveu a máquina Colossus, para decodificar a cifra Lorenz, uma cifra utilizada pelo alto comando alemão.

## Segunda Guerra Mundial e Criptanálise (3)

- ▶ Os modelos estatísticos de Turing também foram fundamentais para a quebra da Lorenz.
- ▶ O Colossus foi a primeira aplicação com uso em larga escala de circuitos eletrônicos digitais.
- ▶ Também neste período, Turing estava se dedicando à construção de uma máquina para a encriptação de voz.
- ▶ Ele desenvolveu um protótipo, chamado Delilah, mas ele não foi utilizado pelo governo.
- ▶ Turing recebeu a Ordem do Império Britânico (OBE) por sua contribuição durante a guerra.
- ▶ Essa contribuição permaneceu em segredo até depois de sua morte.

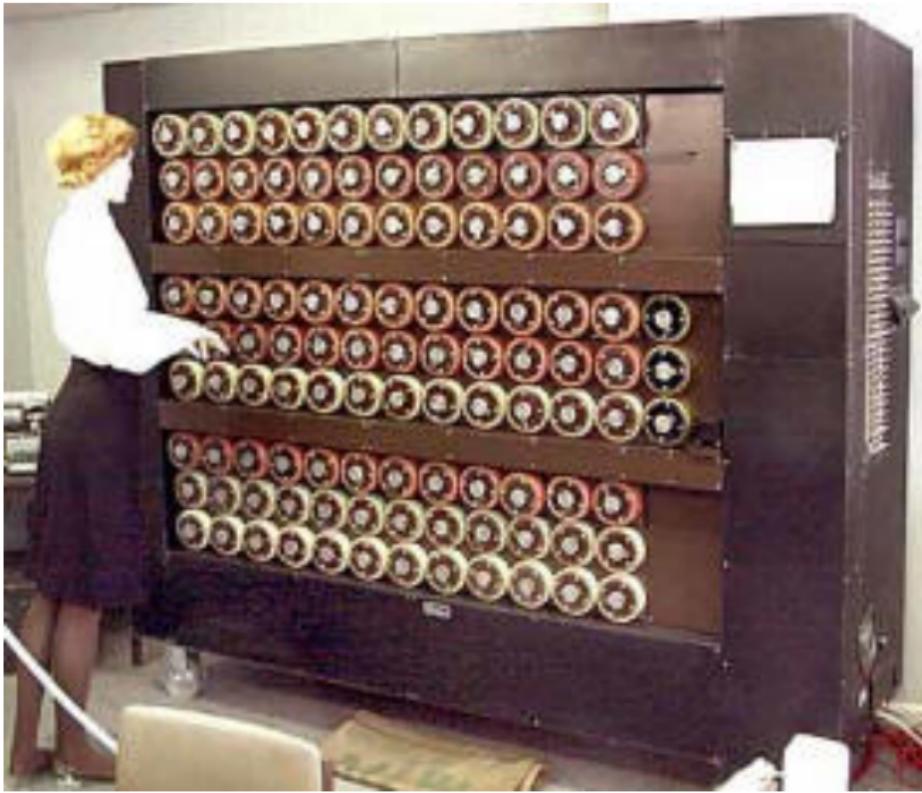
## Enigma



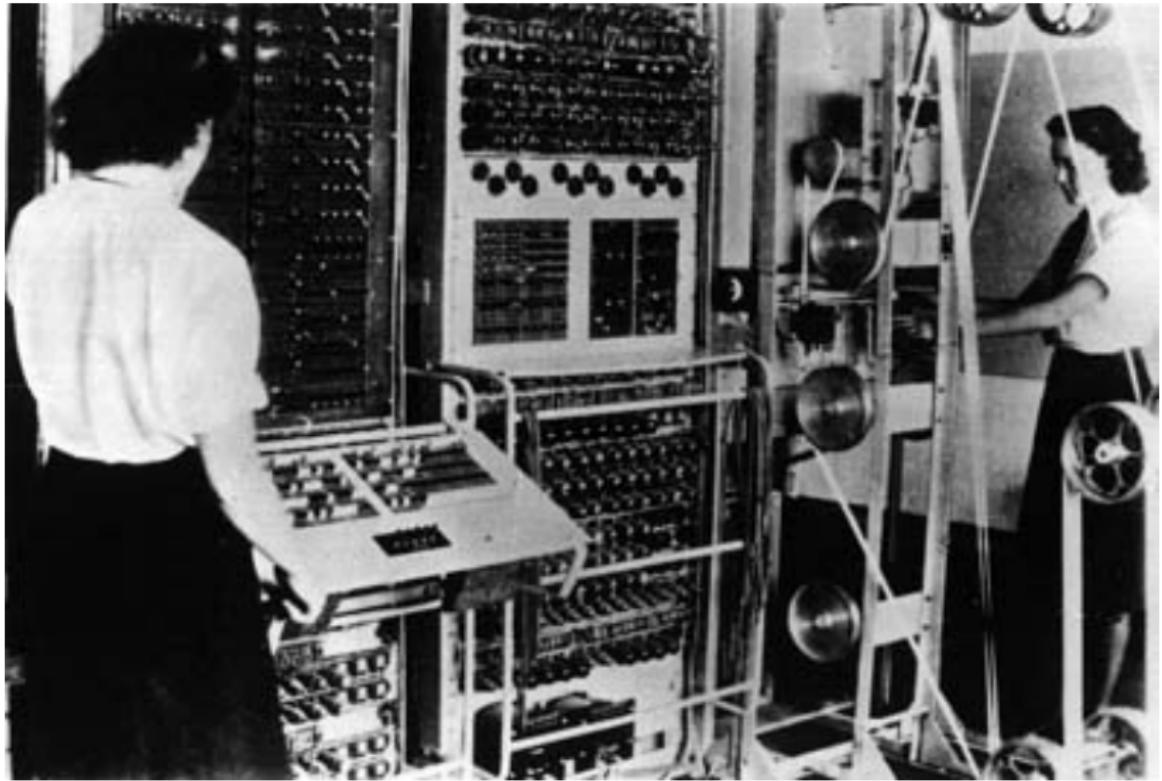
# Bletchley Park



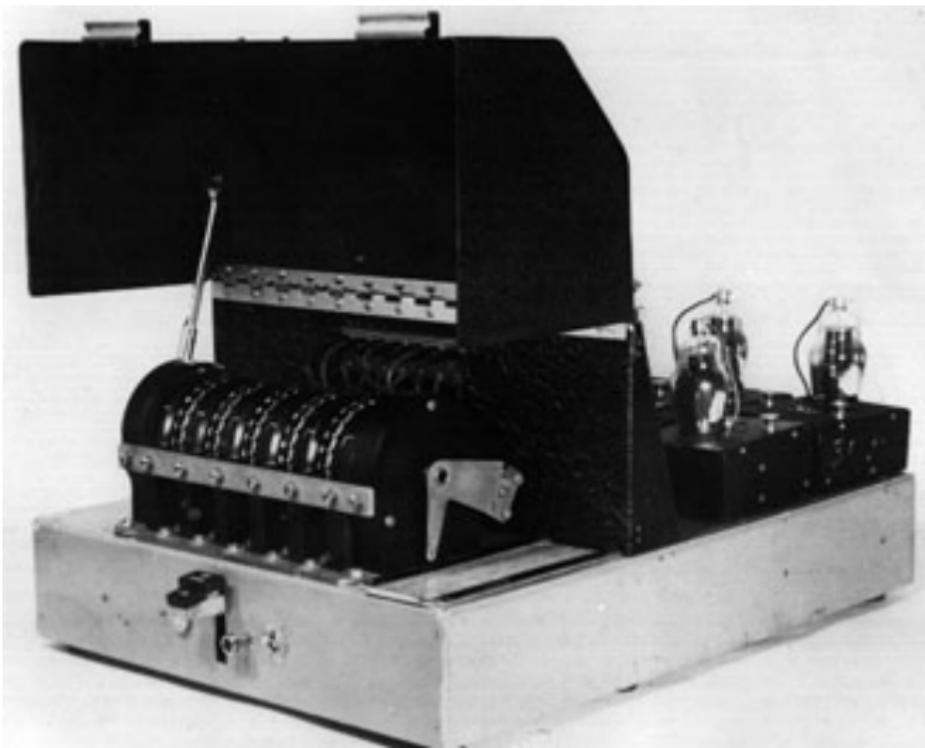
# Bombe



# Colossus



Delilah



## O Lado Atlético de Turing

- ▶ Durante seus anos como estudante universitário, Turing se dedicou à corrida, ao remo e à vela.
- ▶ Eventualmente, realizava o caminho de Bletchley Park a Londres (64 km) correndo.
- ▶ Em 1945, passou a participar do time de corrida do Clube Atlético Walton (um clube amador).
- ▶ Seu melhor tempo em distância de maratona (42 km) foi de 2 horas, 46 minutos e 3 segundos (obtido em 1947).
- ▶ Este tempo é apenas 11 minutos mais lento do que o tempo do medalhista de ouro da Olimpíada de 1948 em Londres.
- ▶ Em uma corrida em 1948, Turing foi mais rápido do que o vencedor da medalha de prata da Olimpíada de Londres.
- ▶ Turing participou da seletiva inglesa para a Olimpíada de 1948, ficando em quinto lugar.

# Clube Atlético Walton



# Turing Correndo



# Concretização da “Máquina de Turing Universal”

- ▶ Máquina de Turing = Algoritmo
- ▶ Máquina de Turing Universal (MTU) = Computador *Programável*
- ▶ MTU é uma máquina capaz de realizar *qualquer* tarefa algorítmica, desde que o conjunto correto de instruções seja armazenado nela.
- ▶ Ao final da 2a Guerra, Turing estava de posse de três ideias fundamentais:
  - 1) Seu próprio modelo de Máquina de Turing Universal de 1936.
  - 2) A velocidade e confiabilidade da tecnologia eletrônica (conforme visto no Colossus).
  - 3) A ineficiência de construir diferentes máquinas para diferentes propósitos.

## Concretização da “Máquina de Turing Universal” (2)

- ▶ Turing concluiu que era o momento apropriado para construir uma versão concreta de sua Máquina Universal, isto é, construir um computador *programável*, com *memória interna* onde tanto *instruções* quanto *conjuntos de dados* fossem armazenados de acordo com a *mesma representação* de tal forma que o computador fosse capaz de executar sobre *qualquer* conjunto de dados *qualquer* tarefa descrita corretamente pelas instruções.
- ▶ Nenhuma das máquinas desenvolvidas até o final da Guerra podem ser consideradas como “computadores” que atendem todos os requisitos acima.
- ▶ Algumas são máquinas de uso particular (como o Colossus, que tem como única função decifrar mensagens codificadas com a Lorenz).
- ▶ Outras são máquinas de uso geral, mas sem a capacidade de armazenamento interno das instruções.

## Concretização da “Máquina de Turing Universal” (3)

- ▶ Em 1945, John von Neumann, que conhecia o trabalho de Turing de 1936, publicou o “Report on the EDVAC”, descrevendo (de forma incompleta) o projeto para um computador com armazenamento interno de programas.
- ▶ A “competição” americana pelo desenvolvimento do computador foi positiva para Turing no primeiro momento.
- ▶ O National Physics Laboratory (NPL) contratou Turing para elaborar um projeto de um computador com armazenamento interno de programas.
- ▶ Em fevereiro de 1946, Turing apresentou ao NPL um relatório técnico detalhado do projeto para o ACE (Automatic Computing Engine).
- ▶ O ACE previa o uso de uma *linguagem de programação* rudimentar para a escrita dos programas.
- ▶ No relatório do ACE, Turing propôs a possibilidade de que usuários remotos utilizassem o ACE através de uma conexão telefônica.

## Concretização da “Máquina de Turing Universal” (4)

- ▶ Turing deu importância em seu projeto ao *tamanho* e à *velocidade de acesso* à memória interna do computador.
- ▶ O segredo das atividades de Turing durante a Guerra fez com que as pessoas considerassem que ele não tinha experiência suficiente para o projeto e que o projeto não era realmente factível.
- ▶ Sem conseguir construir o ACE, Turing retornou para Cambridge para um ano sabático.
- ▶ As Universidades de Cambridge e Manchester entraram na corrida pela construção do computador e colocaram seus projetos em funcionamento antes do ACE.
- ▶ Uma versão simplificada do ACE, o Pilot Model ACE, acabou sendo construída no início da década de 1950, depois da saída de Turing do NPL.

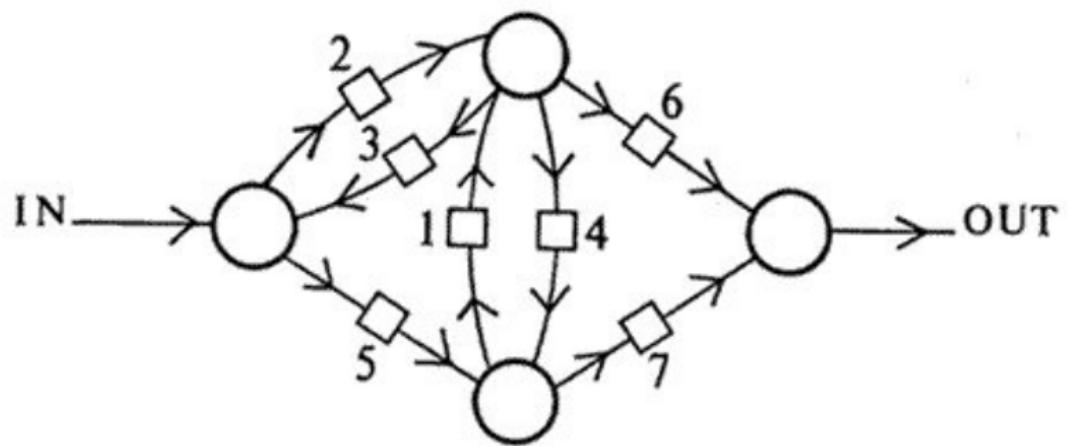
ACE



# Redes Neurais

- ▶ Em 1947, durante seu ano sabático em Cambridge, Turing se voltou para a questão de “cérebros artificiais”.
- ▶ Estes “cérebros” deveriam ser capazes de ser treinados para a realização de tarefas.
- ▶ Turing defendia a ideia de que um sistema mecânico suficientemente complexo poderia exibir habilidades de aprendizado.
- ▶ Esta pesquisa foi submetida para o NPL como um relatório interno e nunca foi publicada durante sua vida.
- ▶ Turing descreve estruturas muito semelhantes ao que hoje conhecemos como *redes neurais*.

# Diagrama de uma Rede Neural presente no Relatório de Turing



# Computação Científica

- ▶ No final de 1947, no artigo “Rounding-off Errors in Matrix Processes”, Turing inventou a decomposição LU de matrizes, que ele chamou de *decomposição triangular*.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & 0 & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ 0 & u_{22} & u_{23} \\ 0 & 0 & u_{33} \end{bmatrix}$$

- ▶ Útil para resolução de sistemas lineares, cálculo de inverso de matrizes e cálculo de determinantes.
- ▶ No artigo, Turing se preocupou com questões a respeito da complexidade dos cálculos propostos por ele (descritas em função do número de operações de adição e multiplicação necessárias em função do tamanho da matriz de entrada) e a respeito do condicionamento das matrizes, sugerindo abordagens para evitar o acúmulo de erros devido ao processamento de matrizes mal-condicionadas.

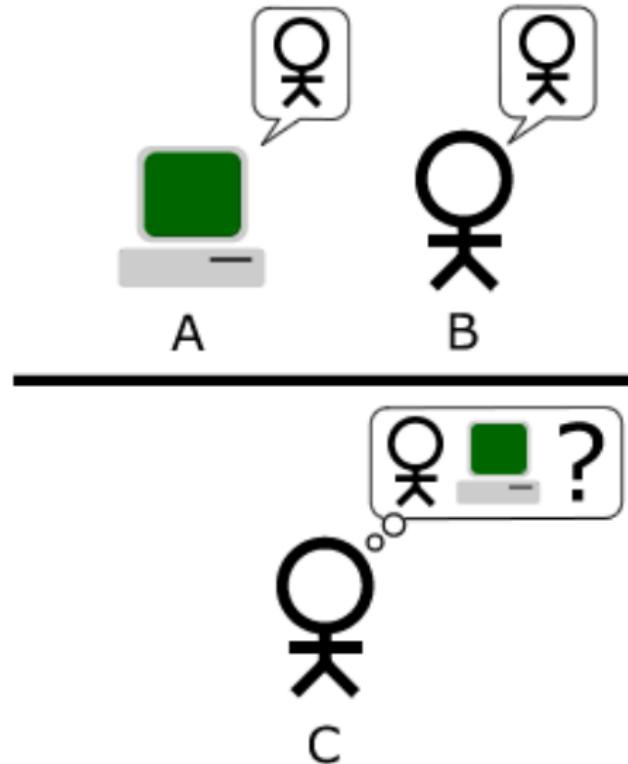
# Inteligência Artificial

- ▶ Em 1948, Turing demitiu-se do NPL e aceitou uma posição na Universidade de Manchester.
- ▶ Em Manchester, ele esteve em contato com a equipe que fabricou o computador Ferranti Mark 1, o primeiro computador de uso geral disponível comercialmente.
- ▶ Turing contribuiu na elaboração do manual de uso deste computador.
- ▶ Durante este período, Turing continuou refletindo a respeito dos “cérebros artificiais”, colocando a pergunta “Quando podemos considerar que um sistema artificial tem realmente inteligência?”.
- ▶ Turing discute essas ideias no artigo “Computing Machinery and Intelligence” de 1950.
- ▶ Neste artigo, ele propõe um possível teste (batizado por ele de “*Jogo da Imitação*”) que pode ser utilizado para responder a questão acima.

## Inteligência Artificial (2)

- ▶ Este teste, posteriormente, ficou conhecido como *Teste de Turing*.
- ▶ Vamos exemplificar o teste:
  - 1) Suponha que uma loja de comércio eletrônico utilize um serviço de atendimento online através de chat.
  - 2) Suponha que, em princípio, os clientes são atendidos por funcionários humanos, mas que, caso não haja funcionários disponíveis no momento, o cliente é então atendido por um software (chatter bot).
  - 3) Dizemos que este software utilizado no serviço de atendimento aos clientes passa no Teste de Turing se, em geral, após finalizarem seu atendimento, os clientes são incapazes de responder com segurança maior do que a de um palpite aleatório se foram atendidas por um humano ou pelo software.
- ▶ O teste CAPTCHA, presente em diversos sites, pode ser pensado como um Teste de Turing reverso.

## Teste de Turing



# Morfogênese e Sistemas Dinâmicos Não-Lineares

- ▶ Em 1951, Turing passou a buscar uma modelagem matemática de fenômenos bioquímicos.
- ▶ Turing estava interessado em entender a formação de padrões na natureza: listras em zebras, pintas em leopardos, desenhos em escamas e conchas...
- ▶ Turing também se interessou por um fenômeno curioso: o aparecimento espontâneo dos números da série de Fibonacci e da razão áurea em diversas estruturas biológicas.
- ▶ No artigo “The Chemical Basis of Morphogenesis”, submetido no final de 1951, Turing começa a desenvolver modelos matemáticos formais que poderiam descrever as reações bioquímicas responsáveis pela formação de padrões.
- ▶ Turing utiliza um sistema de *equações diferenciais parciais* (EDP's) não-lineares chamado *sistema de reação-difusão*.

## Morfogênese e Sistemas Dinâmicos Não-Lineares (2)

- ▶ O sistema de EDP's de Turing é um caso particular de sistema de reação-difusão chamado *sistema ativador-inibidor* ou *catalisador-inibidor*.
- ▶ Reações químicas isoladamente tem um efeito estabilizador ao longo do tempo
- ▶ Da mesma forma, processos de difusão isoladamente também tem um efeito estabilizador ao longo do tempo.
- ▶ Em seu artigo, Turing mostrou que, sob determinadas condições, reação e difusão em conjunto podem ter um efeito gerador de instabilidade em um sistema.
- ▶ Turing modelou sistemas bioquímicos com dois compostos químicos distintos (chamados *morfogenos*). Um dos morfogenos seria um ativador de crescimento ou de pigmentação, por exemplo, e o outro seria um inibidor.

## Morfogênese e Sistemas Dinâmicos Não-Lineares (3)

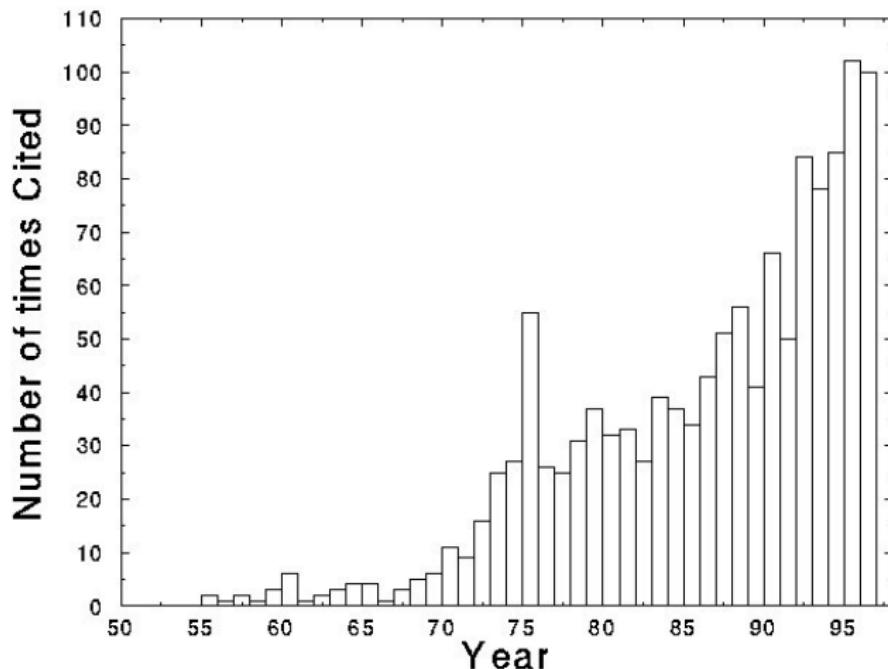
- ▶ Os padrões poderiam então surgir a partir do agrupamento espacialmente não-uniforme do ativador e do inibidor em uma superfície, resultado de uma perturbação inicial geradora de instabilidade no sistema reação-difusão.
- ▶ Padrões construídos de acordo com este modelo matemático passaram a ser conhecidos como *Padrões de Turing*.
- ▶ Uma das condições necessárias para que este modelo funcione é que a taxa de difusão do inibidor deve ser maior do que a taxa de difusão do ativador.

$$\begin{cases} \partial u(x, y, t) / \partial t = D_u \nabla^2 u(x, y) + f(u(x, y, t), v(x, y, t)) \\ \partial v(x, y, t) / \partial t = D_v \nabla^2 v(x, y) + g(u(x, y, t), v(x, y, t)) \end{cases}$$

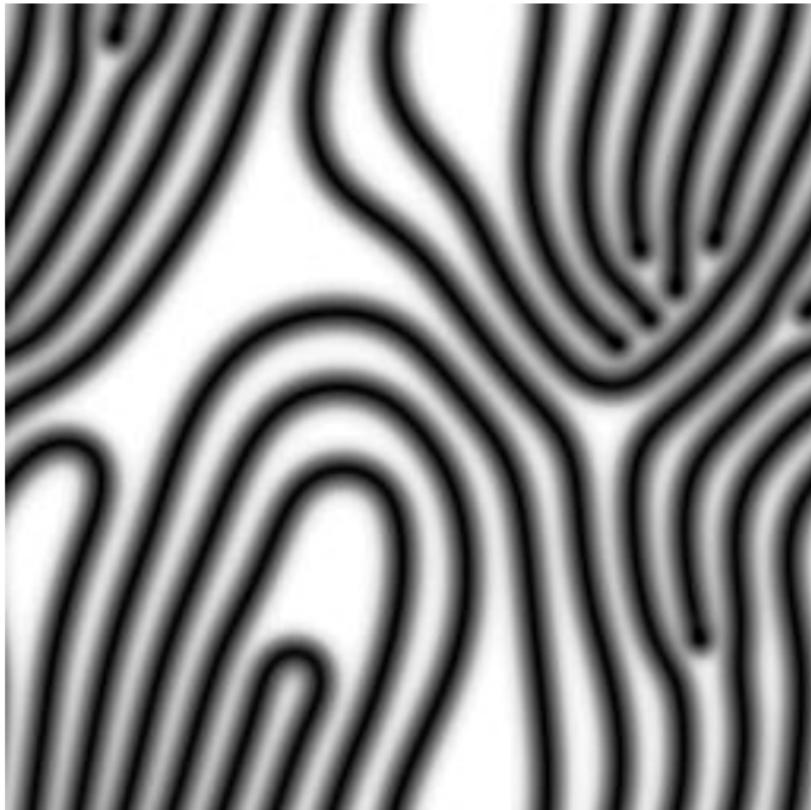
- ▶ Turing utilizou os recém-construídos computadores para realizar simulações numéricas dos sistemas dinâmicos não-lineares descritos por essas EDP's, tornando-se um pioneiro da Computação Científica.

# Evolução de Citações do Artigo de 1951

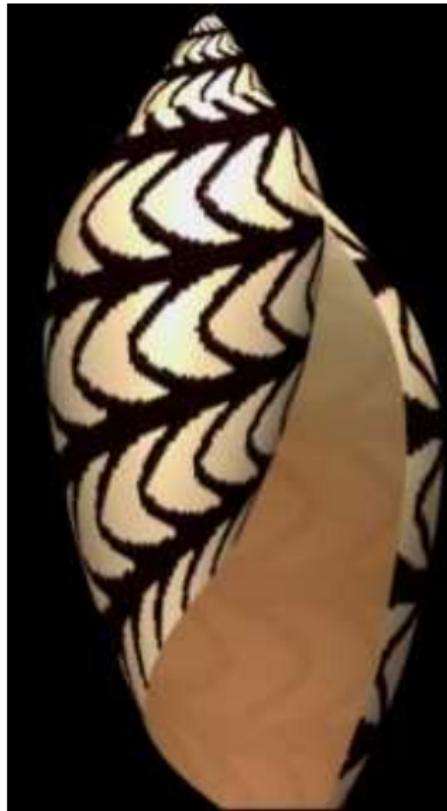
Citation Histogram for Turing's Article:



## Exemplo de Padrão



## Exemplo de Padrão (2)



## Fim da Vida

- ▶ Em 7 de fevereiro de 1952, Turing foi preso acusado de *atentado violento ao pudor*.
- ▶ A acusação foi feita quando Turing admitiu ter mantido relações sexuais com outro homem (nenhuma delas em público).
- ▶ Homossexualidade era crime na Inglaterra ainda na década de 50 (tendo sido descriminalizada apenas em 1967).
- ▶ Até este momento, Turing ainda era consultor dos serviços de Criptanálise do governo britânico.
- ▶ Após sua “confissão” de homossexualidade, Turing foi removido desse serviço e teve seus privilégios de acesso a informações sigilosas revogado.
- ▶ Turing foi condenado e teve a opção entre duas sentenças: prisão ou injeções hormonais ao longo de um ano.

## Fim da Vida(2)

- ▶ Turing optou pelas injeções, que causaram efeitos colaterais em seu corpo.
- ▶ Turing continuou trabalhando em Morfogênese e em simulações numéricas de sistemas dinâmicos não-lineares nos computadores ao longo de 1952 e 1953.
- ▶ Aparentemente sofrendo de depressão (possivelmente um efeito colateral das injeções), Turing suicidou-se com cianeto em 7 de junho de 1954, aos 41 anos.
- ▶ Em setembro de 2009, Gordon Brown, então Primeiro-Ministro do Reino Unido, ofereceu um pedido de desculpas público pelo tratamento discriminatório dado a Turing pelo governo britânico.
- ▶ No Natal de 2013, a Rainha Elizabeth II concedeu a Turing um perdão real, anulando postumamente sua condenação.

# Bibliografia sobre Alan Turing

- ▶ “Alan Turing: the Enigma”, de Andrew Hodges
- ▶ “Alan M. Turing”, de Sara Turing (mãe de Alan)
- ▶ “Alan Turing: Unlocking the Enigma”, de David Boyle
- ▶ “Turing: Pioneer of the Information Age”, de B. Jack Copeland
- ▶ “The Man Who Knew Too Much”, de David Leavitt
- ▶ “The Essential Turing: Seminal Writings”, editado por B. Jack Copeland
- ▶ “Alan Turing: His Work and Impact”, editado por S. Barry Cooper e J. van Leeuwen

## Filme “Breaking the Code”



- ▶ Traz Derek Jacobi no papel de Turing.
- ▶ Tele-filme produzido pela BBC e exibido em 1996.
- ▶ Adaptação para formato cinematográfico de uma peça de mesmo nome, também protagonizada por Derek Jacobi.
- ▶ A peça esteve em cartaz em Londres em 1986 e Nova York em 1987.
- ▶ O roteiro da peça e do tele-filme é baseado no livro de Andrew Hodges.

## Filme “Codebreaker”



- ▶ Traz Ed Stoppard (filho do dramaturgo Tom Stoppard) no papel de Turing.
- ▶ Lançado na TV do Reino Unido e em festivais a partir de 2011.
- ▶ Em seguida, foi lançado diretamente em DVD.
- ▶ Trata-se de um “docu-drama”, uma série de entrevistas entremeadas pela dramatização dos últimos anos da vida de Turing.

## Filme “O Jogo da Imitação”



- ▶ Traz Benedict Cumberbatch no papel de Turing.
- ▶ Lançado nos cinemas do Reino Unido e dos EUA em novembro de 2014.
- ▶ Lançado nos cinemas do Brasil em janeiro de 2015.
- ▶ O filme venceu o Oscar de melhor roteiro adaptado, com o roteiro de Graham Moore baseado no livro de Andrew Hodges.

# Página Web com Conteúdo sobre Turing

[www.dcc.ufrj.br/~luisms/turing](http://www.dcc.ufrj.br/~luisms/turing)

- ▶ Download destes slides
- ▶ Artigos escritos *por* Alan Turing
- ▶ Texto completo do pedido de desculpas público feito por Gordon Brown
- ▶ Links com implementações da Máquina de Turing
- ▶ Artigos e livros *sobre* Alan Turing
- ▶ Material sobre os filmes a respeito de Turing
- ▶ Diversos links de eventos do “Alan Turing Year”
- ▶ Diversos links com informações, textos, documentos e fotos relacionados a Turing
- ▶ Novas contribuições são sempre bem-vindas!

Obrigado pela Atenção!



# A Vida e as Contribuições Científicas de Alan Turing

Ciclo de Seminários do PESC

**Luis Menasché Schechter**

Departamento de Ciência da Computação / UFRJ  
[luisms@dcc.ufrj.br](mailto:luisms@dcc.ufrj.br)

18 de março de 2015