

COMPUTADORES CLÁSSICOS E QUÂNTICOS: ESTUDOS, IMPLEMENTAÇÕES E IMPACTOS SOCIAIS

Gabriel R. Zsigmond

INICIAÇÃO CIENTÍFICA



ESCOLA SUPERIOR DE PROPAGANDA E MARKETING

Sistemas de Informação em Comunicação e Gestão

Brasil

30 de setembro de 2020

Gabriel R. Zsigmond

Relatório Parcial

COMPUTADORES CLÁSSICOS E QUÂNTICOS:

ESTUDOS, IMPLEMENTAÇÕES E IMPACTOS SOCIAIS

Projeto de Iniciação Científica para a Escola
Superior de Propaganda e Marketing.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Sandmann

Brasil

30 de setembro de 2020

COMPUTADORES CLÁSSICOS E QUÂNTICOS:

ESTUDOS, IMPLEMENTAÇÕES E IMPACTOS SOCIAIS

Gabriel R. Zsigmond

Resumo

O presente projeto, “Computadores Clássicos e Quânticos: Estudos, Implementação, Simuladores e Impactos Sociais”, estuda a história do computador e sua evolução. A mais recente inovação na área é a computação quântica, que certamente, inaugura a próxima geração de computadores. A computação quântica muda a arquitetura da computação, permitindo que os novos computadores sejam exponencialmente mais eficientes quando comparados aos mais modernos da atualidade. O projeto se propõe a entender e prototipar um computador tradicional de 8 bits em hardware, usando apenas portas lógicas simples, a fim de ilustrar, de forma clara, o funcionamento de um computador tradicional. E, busca entender e estimar as consequências sociais que os avanços da tecnologia e o desenvolvimento da computação quântica pode gerar. Entende-se que para essa análise, se faz necessário, inicialmente, uma ampla revisão bibliográfica, a fim de comparar esses dois tipos de computadores. Para ilustrar esta, será desenvolvida uma aplicação web que simula um computador tradicional e um computador quântico executando o mesmo algoritmo. É esperado que ao final do projeto, esse estudo traga um amplo e aprofundado conhecimento da área, além de, uma contribuição em relação ao impacto social do uso computação da quântica.

Sumário

1 Introdução	6
1.1 Definição dos objetivos e da sua relevância	6
1.2 Organização do texto	10
2 Metodologia empregada	13
3 Computação Clássica	14
3.1 História	14
3.2 Implementações	16
3.3 Assembly	18
3.4 Notação Númerica	20
3.4.1 Números binários	20
3.4.2 Números decimais	22
3.4.3 Números hexadecimais	22
3.4.4 Bits	23
4 Computação Quântica	25
4.1 História	25
4.2 Qubits	26
4.3 Implementações	27
4.4 Dificuldades	28
4.5 Impactos	29
5 Computador	30
5.1 Módulos	31
5.1.1 Clock	31
5.1.2 Registradores	32
5.1.3 Unidade Logica Aritmética (ULA)	35
5.1.4 Memoria (RAM)	36
5.1.5 Contador	37
5.1.6 Registrador de Output	38
5.2 Considerações Finais	39

6 Simulador	40
7 Criptografia na computação	41
7.1 Conceitos básicos de criptografia	42
7.1.1 Criptografia simétrica	42
7.1.2 Criptografia assimétrica	43
7.1.3 Funções de hash	44
7.2 Criando chave publica e privada RSA – Rivest Shamir Adleman	44
7.3 Criptografia aplicada computação clássica	47
7.4 Criptografia aplicada computação quântica	47
8 Próximos passos	48
8.1 Cronograma	48
8.2 Ajustes e correções possíveis no projeto	50
9 Impactos sociais	51
9.1 Criptografia & Privacidade	51
9.1.1 Criptografia	51
9.1.2 Negócios privados	52
9.1.3 Transações	52
9.1.4 Política	53
9.2 Otimização	54
9.2.1 Busca de melhores caminhos – logística em tempo-hábil	54
9.2.2 Machine Learning	55
9.2.3 Robótica – tomar SEMPRE a melhor decisão	55
9.2.4 Vale pena enfrentar uma decisão computacional?	56
9.3 Considerações finais - incompleto	56
10 Conclusões	57
10.1 Perspectivas	57
11 Apêndice A – Sistema Operacional	58

Lista de Tabelas

1	Registradores ASM 24 bit	16
2	Instruções ASM 24 bit	18
3	Passo a passo para gerar par de chaves	46
4	Como criptografar e decifrar	47
5	Cronograma original	48
6	Cronograma atualizado	49

Lista de Figuras

1	Desenho esquemático Máquina de Turing	7
2	Desenho esquemático do ENIAC/US Center for Military History — Adele Goldstine	8
3	Diagrama arquitetura Von Neumann	15
4	Conversão de 1101111010110110 para decimal e hexadecimal	24
5	A quantidade ilimitada de estados em que um qubit pode estar em um determinado momento é tradicionalmente representada em uma esfera onde Norte = 1 e Sul = 0. autodesk.com	26
6	Protótipo a ser implementado, imagem do site eater.net	30
7	Esquema do Clock	32
8	Modulo do clock implementado em breadboard	32
9	Esquema do Registrador A	33
10	Esquema do Registrador B	34
11	Esquema do Registrador IR	34
12	Modulo dos registradores implementado em breadboard (em andamento)	35
13	Esquema da ULA	36
14	Esquema da MAR	37
15	Esquema da RAM	37
16	Esquema do Contador	38
17	Esquema do Registrador Output	39
18	Ilustração da posição das chaves	43
19	Processo de boot	58

1 Introdução

1.1 Definição dos objetivos e da sua relevância

A palavra “computador” é usada desde o século XVII, tendo a sua primeira referência escrita datada de 1613. No entanto, por muito tempo “computador” não tinha o mesmo significado que tem hoje, sendo utilizado, até a década de 1940, para se referir à profissão de alguém que calcula, segundo o dicionário Michaelis: “Aquele ou aquilo que calcula baseado em valores digitais; calculador, calculista” [Itda. – Michaels \(2019\)](#).

Tendo em vista o antigo significado atribuído à palavra “computador”, pode-se questionar sobre como uma palavra antes atribuída às pessoas, passa a se referir a máquinas. Isso tem a ver, em ordem cronológica, com o estudo de Alan Turing (Reino Unido, 1912-1954) – um matemático, lógico, criptógrafo e herói de guerra – que tinha como objetivo compreender aquilo que podia ou não ser calculado, resultando no modelo mais poderoso de computador – a Máquina da Turing, – também conhecida como “Maquina Universal”. Ao termos o termo “Máquina de Turing” logo vem à nossa mente a figura de um computador, mas engana-se quem pensa isso – a Máquina de Turing nada mais é que uma fórmula matemática, ou um conceito abrangente, que fundamenta o pensamento computacional. Esse trabalho, publicado em 1937, trouxe muitas contribuições para o desenvolvimento da computação, e observamos isso na influência dele em computadores e celulares que você, leitor, pode estar usando para ler esse trabalho.

A Máquina de Turing é o ponto de início desse trabalho, dada a sua importância e contribuição para a computação – tanto em sua constituição como em seu funcionamento.

O modelo matemático da Máquina de Turing foi desenvolvido a partir de três principais componentes: fita infinita; cabeçote; e a máquina de estado finito; – sendo similar a um autômato finito¹, porém com uma memória ilimitada e irrestrita,

¹Um sub-tópico da Ciência da computação teórica, também chamado máquina de estados finita determinística — é uma máquina de estados finita que aceita ou rejeita cadeias de símbolos gerando um único ramo de computação para cada cadeia de entrada.

ilustrada na figura 1 abaixo.

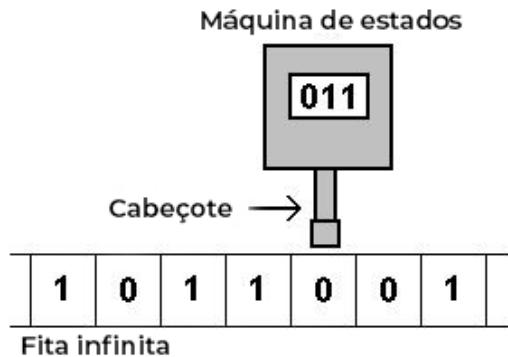


Figura 1: Desenho esquemático Máquina de Turing

Neste modelo, a fita infinita é dividida em células, cada uma contendo um símbolo de um alfabeto finito. O cabeçote é responsável por se deslocar para a direita ou para a esquerda e efetuar a leitura ou escrita em uma célula. Este processo é ilustrado pelo Prof. Dr. Fabio Gagliardi Cozman (2000) da seguinte forma:

1. Inicialmente a fita contém somente a cadeia de entrada (dados originários do programa), disposta no “meio”² da fita, com o cabeçote posicionado no início da cadeia, tendo o resto das células da fita vazias;
2. Para armazenar algo, a máquina escreve na fita;
3. O cabeçote pode ser movido livremente para a esquerda ou direita, afim de ler ou escrever valores em qualquer célula;
4. As saídas “aceita” e “rejeita” são obtidas ao entrar nos estados de aceitação e rejeição;
5. Se não entrar em um estado de aceitação ou rejeição, continuará sua computação para sempre, em “loop infinito”.

²Meio é algo abstrato nesse sentido, pois não existe meio de um valor infinito

Assim, a partir desse funcionamento, o modelo computacional de Turing possibilitou três operações fundamentais básicas: a leitura, a escrita e a movimentação.

Após aproximadamente uma década, em 1946, esse conceito foi implementado pela primeira vez, no primeiro computador digital eletrônico de grande escala, criado pelos cientistas norte-americanos, John Presper Eckert e John W. Mauchly, da Electronic Control Company. Chamado de ENIAC (Electrical Numerical Integrator and Calculator), essa máquina foi mais um marco da evolução da tecnologia. Em 1956, ao final dos seus 10 anos de operação, e com constantes aprimoramentos, o ENIAC continha 20.000 tubos de vácuo, 7.200 diodos de cristal, 1.500 relés, 70.000 resistores, 10.000 capacitores e aproximadamente 5.000.000 juntas soldadas à mão. Ele pesava mais de 27 toneladas, tinha aproximadamente 2,4m × 0,9m × 30m, consumia 150 kW de eletricidade e ocupava 167 m² [Wazlawick \(2016\)](#), tendo a sua disposição ilustrada na figura 2 abaixo.

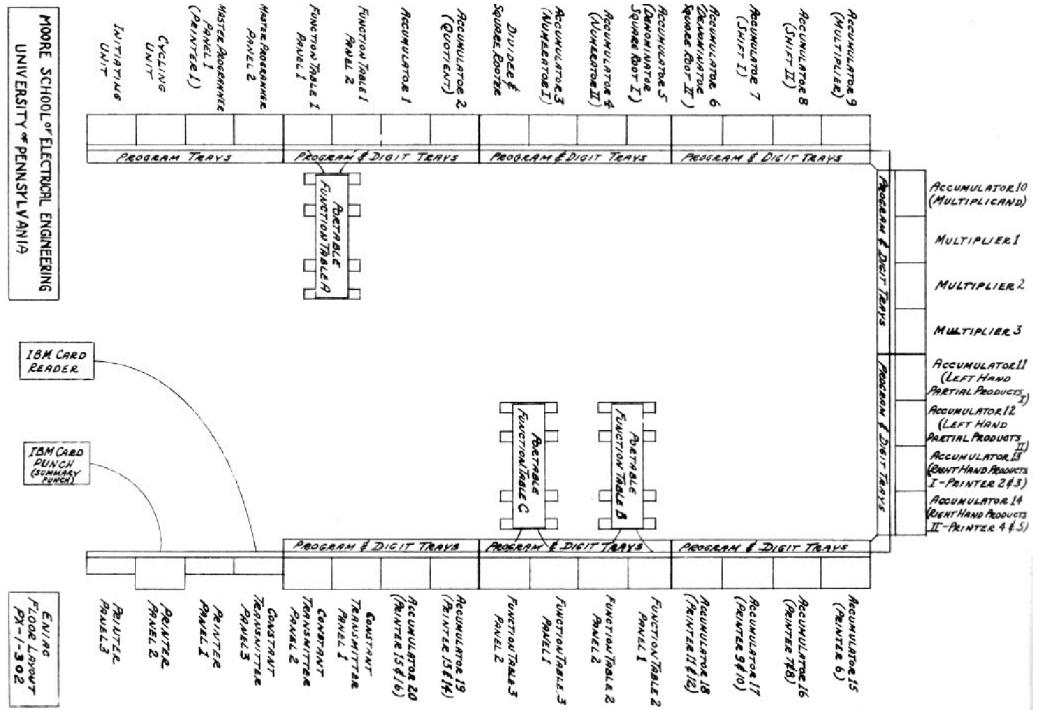


Figura 2: Desenho esquemático do ENIAC/US Center for Military History — Adele Goldstine

A partir do ENIAC, as possibilidades tecnológicas tomaram uma nova proporção e em 1969, apenas 13 anos após o desligamento do primeiro computador digital eletrônico, surge o computador de bordo da Apollo 11 — na missão que levou o homem à Lua. O Apollo Guidance Computer, uma revolução no mundo computacional, era bem menor do que o seu antecessor e tinha 32.768 bits³ de RAM, o suficiente para armazenar apenas um texto não formatado, com cerca de 2.000 palavras.

Ponto de interesse: O que contrasta o Iphone XS com 4gb de RAM lançado em 2018 ao Apollo Guidance Computer de 1969 é que o equipamento mais novo tem cerca de 1 milhão de vezes mais memória do que aquele que estava no Apollo 11 [Santana \(2019\)](#).

Durante o século XX, além do aumento do poder computacional dos dispositivos, outro fator impactante foi a refatoração de seus tamanhos. Assim, com tecnologias wearables⁴, os computadores se tornam ativamente presentes no cotidiano.

Levando em consideração o rápido avanço e desenvolvimento computacional, entende-se que os computadores trazem benefícios à sociedade, seja facilitando a comunicação e o compartilhamento de conhecimentos, assim como em vários outros aspectos. No entanto, a agilidade dessas **transformações da tecnologia da computação**, gera grandes expectativas e incertezas sobre o que ainda está por vir, tanto nas questões de mudanças tecnológicas quanto no impacto que trará para a sociedade, principalmente no que se refere à segurança das informações.

Tendo em vista a incerteza que acompanha o futuro da computação e de seus próximos avanços, a presente pesquisa se propõe a estudar os conceitos da computação clássica e da computação quântica (aposta da próxima evolução na área da computação), além do estudo dos princípios de criptografia⁵. Com base nesses conceitos será prototipado um computador clássico de 8 bits em hardware usando apenas portas lógicas simples, de forma a possibilitar uma ilustração clara

³Para uma explicação elaborada sobre bits refira-se ao capítulo 3 página 20

⁴A tecnologia em questão não somente pode ser usada como uma peça de roupa ou um acessório, como também tem que possuir características que a conectem a outros aparelhos ou à internet.

⁵Criptografia é um sistema de algoritmos matemáticos que codificam dados para que só o destinatário possa ler.

do funcionamento. Junto a isso será desenvolvida uma aplicação web que ilustra o funcionamento de um processador quântico, um paralelo do protótipo de computador clássico para o computador quântico. Ao final, conceitos de criptografia serão utilizados para exemplificar possíveis mudanças sociais que os próximos avanços tecnológicos podem gerar. A seguir, é apresentado onde cada um desses temas são abordados ao longo do texto.

1.2 Organização do texto

Essa seção apresenta como está organizado o fluxo de informações dentro deste projeto. Cada capítulo busca se aprofundar no seu específico tema, mantendo a fluidez de ideias e linha de organização do projeto. São os capítulos:

- Introdução (Capítulo 1): Apresenta a história da computação e as abordagens atuais para sanar seus desafios. É nesse capítulo que a introdução ao projeto é feita, contemplando os aspectos históricos e técnicas iniciais da discussão: computadores clássicos e computadores quânticos. Apesar de ter uma abordagem, introduz os temas dos demais capítulos;
- Metodologia (Capítulo 2): Para a melhor compreensão do tema em discussão, esse capítulo adentrará as metodologias a serem implementadas ao decorrer do projeto, sendo elas: Project Based Learning (PBL) e revisão bibliográfica. Essas instigam o estudo didático através da leitura de pesquisas, livros e artigos, bem como o protagonismo do fazer através da implementação de projetos.
- Computador Clássico (Capítulo 3): Compreender a direção em que a tecnologia da computação está caminhando requer um entendimento aprofundado dos avanços que já foram realizados. Assim, neste capítulo será explorado a história do computador partindo do estudo de 1936 de Alan Turing e se desenvolvendo até a finalização de uma implementação de um simulador web simples.
- Computador Quântico (Capítulo 4): Com o pressuposto de que a Computação Quântica inaugura toda uma nova geração de computadores, o capítulo

4 apresenta uma trajetória detalhada dessa jornada percorrendo sua história, arquitetura, algumas implementações, dificuldades e impactos no mundo real.

- Computador (Capítulo 5): Construir um computador é por si só um grande desafio. A fim, de melhorar os conhecimentos e também praticar a metodologia PBL, conforme apresentado no capítulo de metodologia. Neste capítulo é apresentado um computador funcional que está sendo construindo neste projeto. É um computador de 8bits que possui todos as principais partes de um computador contemporâneo clássico.
- Simulador (Capítulo 6): Para o computador quântico, fazer uma protótipo como o do capítulo 5 é inviável (já que ainda é objeto de pesquisa). Sendo assim, para melhor compreender a implementação de conceitos altamente abstratos, física quântica, para a computação, nesse capítulo, é apresentado um simulador quântico tem como propósito principal facilitar a compreensão através de uma ferramenta didática e interativa.
- Criptografia (Capítulo 7): Com a possibilidade funcional do computador quântico, novos desafios aparecem e dentre eles, diversos na área de criptografia. Neste capítulo são apresentados os desafios impostos a uma área de ampla aplicabilidade industrial e comercial na sociedade que pode sucumbir com a inovação quântica. Logo, é neste capítulo que são apresentados e ilustrados o funcionamento da área, assim bem como, quais os desafios impostos pela inovação quântica.
- Próximos passos (Capítulo 8): A partir dos levantamentos apresentados pelo presente projeto, novos questionamentos serão levantados. Porém esses transbordam o escopo do atual projeto. Dessa forma, o espaço é reservado para apresentar tais questionamentos e brevemente explicar sua relevância.
- Impactos Sociais (Capítulo 9): Além da área específica de criptográfica, a computação quântica há de impactar dado forma como a sociedade hoje se organiza, pois, dentre sua aplicabilidade está a possibilidade de otimização

em tempo hábil de diversos problemas computacionais, que geram impactos diretos na forma como produtos, mercadorias e serviços são prestados. Neste capítulo tais vislumbramentos e perspectivas serão exercitados.

2 Metodologia empregada

Para a realização da presente pesquisa de iniciação científica, foi indispensável a realização de uma revisão bibliográfica, afim de recuperar e aprofundar o conhecimento científico já produzido, assim bem como, se inteirar do estado da arte na área. Segundo Telma Cristiane Sasso de Lima, o conhecimento da realidade não é apenas a simples transposição dessa realidade para o pensamento, mas sim a reflexão crítica, que se dá a partir de um conhecimento acumulado que irá gerar uma síntese, o concreto pensado [Mioto \(2007\)](#). E também a utilização do processo científico para a elaboração e efetivação do projeto em si. Ambas metodologias citadas acima são cruciais para o desenvolvimento do relatório final na área de pesquisa em computação, já que em grande parte dos estudos, a utilização do processo científico é frequentemente utilizada para um maior entendimento da obra e para que a construção do projeto possa se tornar mais facilmente executável.

Assim, para o desenvolvimento da entrega do protótipo — computador de 8-bits — e para o simulador do computador quântico web, a principal metodologia utilizada será Project Based Learnig (PBL). De acordo com David Van Andel, o PBL envolve os alunos em um processo rigoroso de investigação, onde eles fazem perguntas, encontram recursos e aplicam informações para resolver problemas do mundo real [Andel \(2019\)](#). Entende-se que esta é a melhor metodologia para desenvolver um protótipo físico de um computador e programar um site.

Nos dois capítulos a seguir, 3 e 4, respectivamente Computação Clássica e Computação Quântica são apresentadas em uma curta revisão bibliográfica

3 Computação Clássica

Dispositivos têm sido usados para auxiliar na computação por milhares de anos. Neste capítulo é apresentado uma breve recuperação da história da área partindo da década de 1930 com estudos teóricos, passando pelas primeiras implementações, até os computadores mais recentes da atualidade.

3.1 História

Como já mencionado anteriormente, Alan Turing – matemático inglês, cientista da computação, lógico, criptoanalista, filósofo e biólogo teórico – publicou o artigo “On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungs-problem” [Turing \(1936\)](#) em 12 de novembro de 1937, artigo que viria a constituir a teoria básica da computabilidade, que se faz presente até hoje.

O mecanismo abstrato descrito no artigo de Turing fornece os conceitos fundamentais de computadores que outros engenheiros conceberam posteriormente. Na sua essência, uma Máquina de Turing é um dispositivo que manipula símbolos em uma tira de fita de acordo com uma tabela de regras, funcionamento que possibilitou a formalização dos conceitos de “algoritmo” e “computação”. Ainda, apesar da simplicidade da Máquina de Turing, ela pode ser adaptada para simular a lógica de qualquer algoritmo de computador.

Apesar de hoje se ter a compreensão das contribuições de Alan Turing para a base da computação, os computadores clássicos são atualmente descritos como tendo a chamada arquitetura Von Neumann. No entanto acredita-se que o idealizador dessa arquitetura partiu dos modelos matemáticos desenvolvidos por Turing [Herken \(1988\)](#), que incluía o conceito de programa armazenado, originado a partir da construção da Máquina de Turing. Conceito, também encontrado no projeto EDVAC [Neumann \(1945\)](#) de Von Neumann, que possibilita o armazenamento de instruções e dados na mesma memória, permitindo a manipulação de programas como dados, que se constitui como característica do computador clássico.

Assim, pode-se considerar Turing como pai do computador, já que suas publicações antecedem a arquitetura Von Neumann. Ademais, tem-se que Turing foi o

primeiro a explorar a idéia de uma máquina de uso geral por meio de sua noção de máquina universal – que constitui a base do computador clássico ao possibilitar o funcionamento da CPU em conjunto com a memória RAM. Ainda, tendo em vista as contribuições do matemático para a construção de uma classe importante de dispositivos de computação: o Bombe – um dispositivo eletromecânico usado pelos criptologistas britânicos para ajudar a decifrar as mensagens secretas criptografadas pela máquina alemã Enigma durante a Segunda Guerra Mundial – e posteriormente o seu design do ACE (Automatic Computing Engine), fica evidente as contribuições de Alan Turing para a invenção do computador moderno. A partir da fala de Turing abaixo, pode-se identificar o ACE como um tipo de realização física da máquina universal.

“Some years ago I was researching on what might now be described as an investigation of the theoretical possibilities and limitations of digital computing machines. [...] Machines such as the ACE may be regarded as practical versions of this same type of machine.” [Turing et al. \(1986\)](#)

Por fim, entende-se que baseado na teoria da máquina de Turing, o físico e matemático John Von Neumann desenvolveu uma arquitetura que consiste em uma única memória compartilhada para programas e dados; um único acesso à memória; uma unidade aritmética e uma unidade de controle de programa - ilustrado no diagrama abaixo.

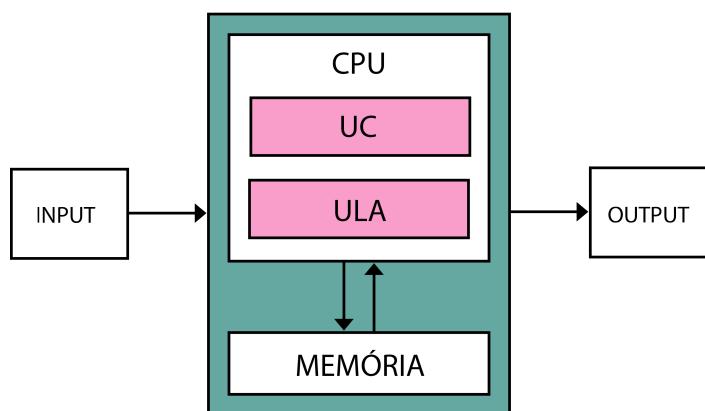


Figura 3: Diagrama arquitetura Von Neumann

3.2 Implementações

Na arquitetura Von Neumann, mencionada acima, o cabeçote passa a ser uma CPU (Central Processing Unit), a fita se transforma em memória RAM e as operações são construídas e executadas em circuitos formados por portas lógicas chamadas de ULA (unidade lógica e aritmética) [Sandmann \(2019\)](#).

Atualmente, a maioria dos computadores modernos são construídos sobre a práxis da arquitetura Von Neumann. A fim de simular um processador moderno de forma didática, foi elaborado o emulador [ASM 24bits](#) que permite a sua programação utilizando um Assembly⁶ de 20 instruções. Similar à arquitetura Von Neumann esse emulador é composto por memória e CPU, na qual a última possui dois registradores descritos abaixo:

Registradores	
Nome	Descrição
Accumulator (ACC)	Registrador mais usado para armazenar dados extraídos da memória. Está em diferentes números em diferentes microprocessadores.
Instruction Register (IR)	Registro que contém a instrução que está sendo executada no momento.

Tabela 1: Registradores ASM 24 bit

Dentro da CPU, está a unidade lógica aritmética (ULA), um circuito digital usado para realizar operações aritméticas e lógicas. Ela representa o bloco de construção fundamental da unidade central de processamento (CPU). No caso do ASM 24bits, a sua ULA possui 20 instruções, sendo elas:

⁶Uma linguagem assembly é uma linguagem de programação de baixo nível projetada para um tipo específico de processador. Ele pode ser produzido compilando o código-fonte de uma linguagem de programação de alto nível (como C / C ++), mas também pode ser escrito do zero.

ULA	
Mnemônico	Descrição
nop	Slot de memória vazio
jmp	Salto incondicional. Recebe uma variável como parâmetro e executará o código a partir da linha abaixo.
jz	Salta se o valor do acumulador (AC) é 0. Recebe uma variável como parâmetro e executa o código a partir da linha abaixo se o valor do AC for zero. Se o valor de AC NÃO for zero, a próxima linha será executada.
jnz	Salta se o valor do acumulador (AC) NÃO é 0. Recebe uma variável como parâmetro e executa o código a partir da linha abaixo se o valor do AC não for zero. Se o valor de AC for zero, a próxima linha será executada.
lv	Carrega uma constante diretamente no acumulador. Recebe uma constante em notação hexadecimal 0x00F2 por exemplo.
add	Adiciona uma constante ao valor do acumulador. Recebe uma constante em notação hexadecimal 0x00FA por exemplo.
addm	Recebe uma variável como parâmetro e adiciona o valor da variável ao valor do acumulador.
sub	Subtrai uma constante do valor do acumulador. Recebe uma constante em notação hexadecimal 0x00FA por exemplo.
subm	Recebe uma variável como parâmetro e subtrai o valor da variável do valor do acumulador.
mul	Multiplica uma constante do valor do acumulador. Recebe uma constante em notação hexadecimal 0x00FA por exemplo.

mulm	Recebe uma variável como parâmetro e multiplica o valor da variável pelo valor do acumulador.
div	Divide o valor do acumulador por uma constante. Recebe uma constante em notação hexadecimal como parâmetro, 0x00FA por exemplo.
divm	Recebe uma variável como parâmetro e divide o valor do acumulador pelo valor da variável.
load	Recebe uma variável como parâmetro e carrega o valor da variável para o acumulador.
stor	Armazena o valor atual do acumulador em uma variável.
sc	Chamada de função.
rc	Retorno de função, irá pular para a linha abaixo da chamada de função mantendo o valor atual no acumulador.
end	Irá parar a execução do programa.
in	Solicita ao usuário uma entrada (o número inserido deve ser em hexadecimal) e carrega a entrada no acumulador.
out	Alerta o usuário com o valor atual do acumulador.

Tabela 2: Instruções ASM 24 bit

Utilizando-se dessas instruções é possível construir uma sequência de códigos, criando programas, essa é a linguagem de mais baixo nível que se pode codificar, linguagem Assembly.

3.3 Assembly

É a partir das instruções pertencentes à ULA que se compõe uma Linguagem Assembly, essencial para o funcionamento de qualquer computador clássico e utilizada na criação do ASM 24bits (mencionado acima). A linguagem Assembly, frequentemente abreviada como “asm”, é uma linguagem de programação de baixo

nível em que há uma correspondência muito forte entre as instruções da linguagem e as instruções do código de máquina⁷, sendo altamente dependente do hardware que está sendo utilizado. Dessa forma, a asm é indispensável durante a primeira etapa do ‘boot’, já que o hardware ainda não está configurado para o sistema operacional.

Assim, ao ligar qualquer computador clássico da atualidade, ele passará por algumas etapas importantes antes de poder ser utilizado por seu usuário final. Ao reiniciarmos um computador ele deverá carregar o sistema operacional, conceito explicado mais adiante, de qualquer variante (Mac, Windows, Linux, etc.), a partir de algum dispositivo de armazenamento permanente que está atualmente conectado ao computador: seja um cd, um disco rígido, um USB, etc. O ambiente pré-SO oferece poucos serviços de alto nível. Neste estágio, mesmo um sistema de arquivos simples, que possa ler e gravar arquivos lógicos em um disco, seria um luxo. Felizmente, temos disponível o Basic Input/Output Software (BIOS), uma coleção de rotinas de software que são carregadas inicialmente de um chip para a memória e inicializadas quando o computador é ligado. O BIOS fornece detecção automática e controle básico dos dispositivos essenciais do seu computador, como tela, teclado e discos rígidos. Depois que este conclui alguns testes de baixo nível do hardware, principalmente se a memória instalada está funcionando corretamente ou não, ele deve iniciar o sistema operacional já armazenado em um de seus dispositivos. No entanto, precisamos lembrar que o BIOS não pode simplesmente carregar um arquivo que represente seu sistema operacional a partir de um disco, pois o ele não tem noção de um sistema de arquivos. Este deve ler setores específicos de dados (geralmente 512 bytes de tamanho) de localizações físicas específicas dos dispositivos de disco, para carregar do sistema operacional.

⁷Na programação de computadores, o código de máquina, que consiste em instruções em linguagem de máquina, é uma linguagem de programação de baixo nível usada para controlar diretamente uma CPU. Cada instrução faz com que a CPU execute uma tarefa muito específica, como uma carga, um armazenamento, um salto ou uma operação ALU em uma ou mais unidades de dados nos registros ou memória da CPU.

3.4 Notação Númerica

É a partir desses conceitos abordados que se constitui a estrutura básica da computação clássica, que dependem da física clássica para operar. Estes são os computadores tradicionais que usamos em nosso dia-a-dia – sejam eles Apple, Samsung, Dell ou qualquer outro –, também classificados como computadores binários, pois processam as instruções a partir de números binários, compostos apenas pelos símbolos “1” e “0”, ligado e desligado, respectivamente. Assim, julga-se importante e de larga relevância ao tema compreender essa representação numérica. Isso é o que diferencia o computador clássico do quântico, pois no quântico há o conceito de qubit (veja na página 26).

3.4.1 Números binários

Números binários ou números em base 2 são compostos por apenas dois dígitos, {0, 1}. Dessa forma, seu funcionamento é similar ao sistema decimal, ou base 10, que são compostos por dez dígitos, {0; 9}. No sistema decimal, é simples contar até nove, porém não existe um símbolo ou dígito para representar o número dez, sendo então representado por dois dígitos, “10”, sendo uma simples lógica de posicionamento. Mais uma vez, após o número “99”, é necessário utilizar da mesma regra para representar o número cem, “100”. Já em base 2, o número zero é representado pelo símbolo “0”, e o número um por “1”. O mesmo dilema é enfrentado ao chegar no próximo valor: dois. E então é usada a mesma lógica de posicionamento, em base dois. Desta forma, o número dois é representado por “10”, o três por “11”, quatro por “100” e assim por diante. Portanto, números binários podem se tornar longos e compostos por muitos dígitos que levam o nome de bits [Ram \(2000\)](#). É com base nos bits⁸ ligados e desligados que o computador baseia a sua linguagem. Para transformá-lo em base dez é preciso avaliar o valor de cada bit de acordo com a sua posição.

Exemplo: número binário 1011:

⁸A menor unidade de informação que pode ser armazenada ou transmitida na comunicação de dados.

$$\begin{aligned}
 1011(b) &= 1 * 2^3 + 0 * 2^2 + 1 * 2^1 + 1 * 2^0 \\
 &= 8 + 0 + 2 + 1 = 11(\text{decimal})
 \end{aligned}$$

O peso de cada bit de um número binário depende da sua posição relativa ao número completo, sempre partindo da direita para a esquerda.

- O peso do primeiro bit é $bit * 2^0$
- O peso do segundo bit é $bit * 2^1$
- O peso do terceiro bit é $bit * 2^2$
- O peso do quarto bit é $bit * 2^3$

A fórmula ilustrada acima, pode ser exemplificada em uma fórmula genérica:

$$= nth \text{ bit} * 2^{n-1}$$

É possível notar que a regra para números binários, se repete para números em base 10.

Exemplo: número decimal 4392:

- O peso do primeiro bit é $2 * 10^0$
- O peso do segundo bit é $9 * 10^1$
- O peso do terceiro bit é $3 * 10^2$
- O peso do quarto bit é $4 * 10^3$

$$\begin{aligned}
 4392 &= 4 * 10^3 + 3 * 10^2 + 9 * 10^1 + 2 * 10^0 \\
 &= nth \text{ bit} * 10^{n-1}
 \end{aligned}$$

Essa regra se mantém verdadeira para qualquer base numérica.

$$= nth \text{ bit} * (base)^{n-1}$$

3.4.2 Números decimais

Apesar dos computadores funcionarem a partir de números binários, ao se referir a eles é comum se usar notação hexadecimal. No entanto, pode-se questionar o porquê desse uso, já que é mais natural que optemos por usar os números em base 10, uma vez que culturalmente estamos mais acostumados a eles. Georges Ifrah em seu livro, “The Universal History of Numbers” [Ifrah \(2000\)](#) aponta que:

“Traços da origem antropomórfica dos sistemas de contagem podem ser encontrados em muitas línguas. Na língua Ali (África Central), por exemplo, “cinco” e “dez” são respectivamente moro e mbouna: moro é na verdade a palavra para “mão” e mbouna é uma contração de moro (“cinco”) e bouna, que significa “dois” (portanto, “dez” = “duas mãos”).

Portanto, é muito provável que as palavras indo-européias, semíticas e mongóis para os dez primeiros números derivem de expressões relacionadas à contagem dos dedos.”

Nesse sentido, Ifrah explica que:

“[...] a mão torna os dois aspectos complementares dos inteiros inteiramente intuitivos. Ele serve como um instrumento que permite o movimento natural entre a numeração cardinal e ordinal. Se você precisa mostrar que um conjunto contém três, quatro, sete ou dez elementos, você levanta ou dobra simultaneamente três, quatro, sete ou dez dedos, usando sua mão como mapeamento cardinal. Se quiser contar as mesmas coisas, sobre ou levante três, quatro, sete ou dez dedos em sucessão, usando a mão como ferramenta de contagem ordinal.”

3.4.3 Números hexadecimais

Partindo dessa explicação, surge a ideia de números sendo representados a partir de 10 símbolos distintos: {0; 9}. Assim, o número decimal tem uma base de dez (ou seja, dez símbolos de dígitos distintos), já o número hexadecimal tem uma base de 16, por tanto, sendo necessário criar seis novos símbolos numéricos para possibilitar a contagem de 0 a 15 com apenas um símbolo. A maneira mais simples é usando algumas letras, como: 0,1,2, ... 8,9, a, b, c, d, e, f, em que, por exemplo, o símbolo ‘d’, representaria uma contagem de 13.

Para distinguir entre hexadecimal e outros sistemas numéricos, costumamos usar o prefixo “*0x*”, que é especialmente importante para indicar dígitos hexadecimais que podem não conter nenhum dos dígitos da letra, por exemplo: *0x50* não é igual (*decimal*)50 – *0x50* é realmente (*decimal*)80.

A questão é que um computador representa um número como uma sequência de bits, uma vez que fundamentalmente seu circuito pode distinguir apenas entre dois estados elétricos: 0 e 1 – fazendo referência ao motivo pelo qual usamos base 10, é como se o computador tivesse um total de apenas dois dedos. Portanto, para representar um número maior que 1, o computador pode agrupar uma série de bits, assim como podemos contar para além de 9 agrupando dois ou mais símbolos, por exemplo, 456, 23, etc.

3.4.4 Bits

Para facilitar a conversa sobre o tamanho dos números com os quais estamos lidando foram adotadas nomenclaturas para séries de bits de certos comprimentos. As instruções na maioria dos computadores lidam com um mínimo de valores de 8 bits, que são denominados bytes. Outros agrupamentos são “short”, “int” e “long”, que geralmente representam valores de 16 bits, 32 bits e 64 bits, respectivamente. Também tem-se o termo “word”, que é usado para descrever o tamanho da unidade máxima de processamento do modo atual da CPU: portanto, no modo real de 16 bits, a “word” se refere a um valor de 16 bits, já no modo protegido de 32 bits, uma “word” se refere a um valor de 32 bits e assim por diante.

Desse modo, pelo fato de as sequências de bits serem compridas é mais fácil convertê-las para notação hexadecimal do que para o sistema decimal natural, ilustrado na imagem abaixo. Assim, é possível quebrar a conversão em segmentos menores de 4 bits do número binário, em vez de tentar somar todos os bits componentes em um total geral, o que seria muito mais difícil para cadeias de bits maiores, como para: 16, 32, 64, etc.

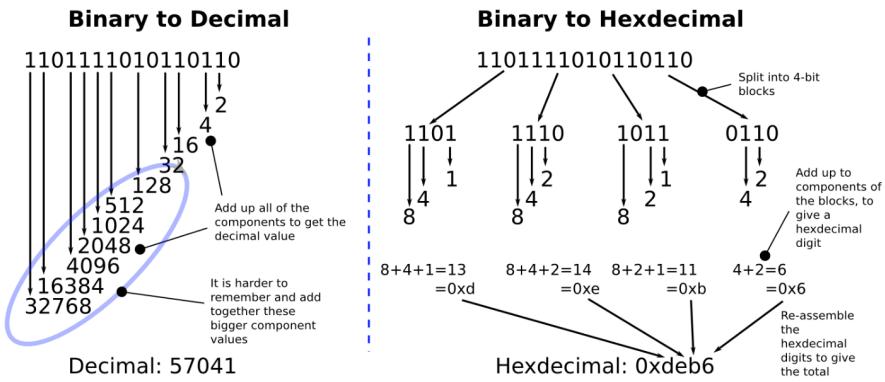


Figura 4: Conversão de 1101111010110110 para decimal e hexadecimal

Na computação clássica, atualmente, se utiliza bits que são representados por 0 e 1, ou seja, apenas dois estados são possíveis. Toda o arcabouço de lógica e aritmética se baseando nessa abordagem, logo, toda a arquitetura de computação também.

Ao final do capítulo, em complementação ao estudo, a caminho encontrado para tornar toda essa arquitetura de computação mais utilizável foi a criada de sistemas de softwares supervisores do hardware, esses são os sistemas operacionais. Neste trabalho, um início de estudo e aprofundamento de sistemas operacionais foi começado, porém, por não ser o foco principal do estudo pode ser continuado num projeto futuro. O material desenvolvido pode ser encontrado no Apêndice A, página 58.

4 Computação Quântica

A computação quântica é uma abordagem inovadora quando se trata de processamento de dados na computação. Neste capítulo é apresentado uma breve recuperação da história da área, assim bem como seus conceitos basilares e até mesmo os previstos impactos que acompanharão a funcionalidade desta inovação. Ainda, estudos adicionais estão sendo feitos a fim de complementar o capítulo para a entrega do relatório final.

4.1 História

Como proposto pelo cronograma desse estudo⁹, o presente capítulo, a ser desenvolvido no decorrer do segundo semestre, adentrará o desenvolvimento da Computação Quântica assim como a descrição de sua arquitetura – tema de extrema atualidade. O capítulo partirá do estudo de Alexander Holevo, publicado em 1973, que obteve como resultado o conhecido "teorema de Holevo"¹⁰ – marco da computação quântica –, perpassando pela sua história até os dias atuais. Assim, poderemos compreender as implicações dos avanços em relação aos computadores quânticos, que como mencionado pelo artigo “Google claims its quantum computer can do the impossible in 200 seconds” Riley (2019) já consegue resolver um problema, que levaria 10.000 anos para ser solucionado pelo supercomputador (clássico) mais rápido do mundo, em 200 segundos.

A Computação Quântica apresenta um novo horizonte de possibilidades no âmbito da computação. Acredita-se que os computadores quânticos sejam capazes de resolver certos problemas computacionais, como a factoração de inteiros – que é a base da criptografia RSA assunto aprofundado no capítulo 7 –, substancialmente mais rápido do que os computadores clássicos.

A abordagem da computação quântica em relação à computação clássica se refere a como os dados são representados. Enquanto na computação clássica

⁹página 49 tabela 6

¹⁰um importante teorema limitativo na computação quântica, um campo interdisciplinar da física e da ciência da computação. Às vezes chamado de limite de Holevo, uma vez que estabelece um limite superior para a quantidade de informação que pode ser conhecida sobre um estado quântico.

cada bit é um estado possível entre “0” e “1”, já na computação quântica essa representação é probabilística, onde o dado pode estar em ambos estados ao mesmo tempo. Esse comportamento permite uma nova forma de nomear o bit, o **qubit**.

4.2 Qubits

Na mecânica quântica, uma partícula pode assumir dois estados ao mesmo tempo, o que é chamado de superposição. Ao aplicar este conceito à computação, temos uma partícula como um bit¹¹ quântico, qubit (um bit quântico, unidade básica de informação em um computador quântico) que poderia retornar três posições: ligado (1), desligado (0), ou uma superposição de ambos, 1 e 0. Assim, um qubit pode comportar dois valores de uma vez; dois qubits quatro valores; e assim por diante. Isso significa que uma quantidade pequena de átomos pode comportar valores muito maiores do que os transístores de um computador binário, sendo mais eficiente. Um exemplo disto, seria o computador quântico da Google, que segundo WHYTE Whyte (2019), realizou um cálculo de um problema em 200 segundos, que poderia demorar cerca de 10.000 anos para ser resolvido pelo melhor supercomputador existente, alcançando assim, a supremacia quântica.

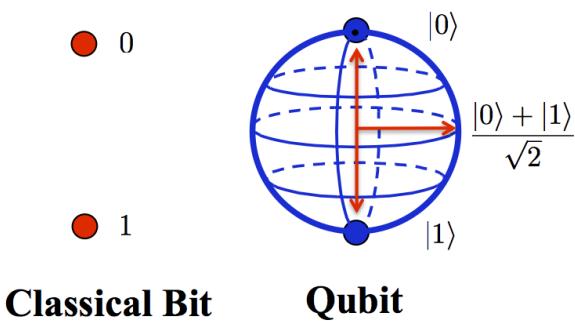


Figura 5: A quantidade ilimitada de estados em que um qubit pode estar em um determinado momento é tradicionalmente representada em uma esfera onde Norte = 1 e Sul = 0. autodesk.com

¹¹melhor explicado na página 20

4.3 Implementações

Desde a década de 2000 as grandes empresas da computação vem se enfrentando na corrida por atingir a melhor arquitetura quântica funcional. Entre elas, destaca-se as duas grandes referencias no mercado da tecnologia: Google e IBM. Em 2019 a Google anunciou que havia atingido supremacia quântica como visto através do artigo: “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor”, [Arute \(2019\)](#) coloca toda a sociedade às portas de um novo mundo, pois com esse poder computacional, problemas de otimização, que até então jamais seriam solucionados em tempo hábil, agora, estariam resolvidos em períodos mínimos de tempo.

Já a IBM, vem traçando a sua trajetória quântica desde 2016, lançando em maio de 2016 o IBM Q Experience, que continha um processador quântico de cinco qubit e um simulador de correspondência. Essa arquitetura, possibilitou que os usuários só interagissem por meio do compositor quântico, com um conjunto limitado de interações de dois qubit e um guia do usuário que assumiu experiência em álgebra linear. Em 2018 essa experiência teve significantes avanços, como exposto por Yuhao Wang em seu artigo “16-qubit IBM universal quantum computer can be fully entangled”, “Os dispositivos backend atuais, da IBM incluem dois processadores com 5 qubits supercondutores sendo eles o ibmqx2 e o ibmqx4, um processador de 16 qubit, ibmqx5 e um processador de 20 qubit QS1_1.” [Wang \(2018\)](#), um grande avanço em apenas 4 anos. Atualmente, a empresa já vislumbra horizontes que pareciam muito distantes, anunciando que em 2023 terá um computador e David Nield – jornalista que escreve sobre ciência e tecnologia há mais de 20 anos tendo artigos publicados na Wired, Popular Science, The Guardian e Gizmodo – acredita que “Com o IBM Quantum Condor planejado para 2023 - executando 1121 qubits, para ser exato - devemos começar a ver os computadores quânticos começarem a lidar com um número substancial de cálculos genuínos do mundo real, em vez de ficarem restritos a experimentos de laboratório.” [Nield \(2020\)](#)

4.4 Dificuldades

Apesar do avanços trazidos anteriormente, existem quatro principais dificuldades que impossibilitam o desenvolvimento e a escala de computadores quânticos no cenário atual: a qualidade do Qubit; implementação de algoritmos de correção de erros; o controle dos Qubits; e a grande quantidade de fios presentes na arquitetura. Em relação à qualidade dos Qubits, a comunidade de estudiosos da computação quântica ainda não conseguiu chegar a um Qubit capaz de gerar instruções úteis em grande escala. Atualmente os poucos qubits nos computadores quânticos baseados em nuvem não são bons o suficiente para sistemas de grande escala, gerando erros ao executar operações entre dois qubits a uma taxa muito maior do que o necessário para se calcular com eficácia. Assim, após um certo número de instruções ou operações, os qubits atuais produzem uma resposta errada quando executamos cálculos, tendo a possibilidade do resultado obtido ser indistinguível do ruído. Uma vez que os qubits não são bons o suficiente para a escala em que precisamos que eles operem, precisamos implementar algoritmos de correção de erros que verifiquem e corrijam os erros de qubit aleatórios à medida que ocorrem. Esses são conjuntos de instruções complexos que utilizam muitos qubits físicos para estender efetivamente o tempo de vida das informações no sistema. A correção de erros ainda não foi comprovada em escala para a computação quântica, mas é uma área prioritária de pesquisa, a qual é considerada pré-requisito para um sistema quântico comercial em escala real. Controle de Qubit: Para implementar algoritmos complexos, incluindo esquemas de correção de erros, é necessário provar a possibilidade controlar vários qubits. Esse controle deve ter baixa latência - da ordem de 10 de nanosegundos e deve vir de circuitos de controle de feedback adaptativo baseados em CMOS¹². Este é um argumento semelhante ao apresentado no artigo do IEEE Spectrum , “The Case Against Quantum Computing”. No entanto, embora seja assustador, existem motivos para acreditar que não é impossível. Por fim, precisamos abordar o “fan-out” - ou como aumentar o nú-

¹²abreviação de "Complementary Metal Oxide Semiconductor". O CMOS é uma pequena área de memória volátil, alimentada por uma bateria, que é usada para gravar as configurações do Setup da placa mãe.

mero de qubits em um chip quântico. Hoje, exigimos vários fios de controle, ou vários lasers, para criar cada qubit. É difícil acreditar a viabilidade de construir um chip de um milhão de qubit com muitos milhões de fios conectando-se à placa de circuito ou saindo da câmara de medição criogênica. Na verdade, a indústria de semicondutores reconheceu esse problema em meados da década de 1960 e o chamou de Regra de Rent.

Além das dificuldades de implementações e apesar das diversas iniciativas, o maior problema repousa em como se provar que a computação quântica foi alcançada, pois para isso, um problema que poderia ser resolvido em 50 bilhões de anos de fato precisa ser solucionado.

4.5 Impacts

Avançando alguns anos para o futuro, nos situando em um tempo na qual os problemas apresentados anteriormente já foram e resolvidos, tendo um computador quântico funcional, é possível podemos imaginar os impactos que acompanharão essa nova tecnologia. Com a capacidade de “multitarefas” da computação quântica, diversos problemas computacionais cuja complexidade é NP poderão ser resolvidos em tempo hábil, o quê poderá se tornar um problema para áreas que fazem uso desta característica como artifício de trabalho, como a criptografia, temática abordada no capítulo 7. Além da criptografia, há diversas outras frentes de trabalho que serão impactadas pela computação quântica e que poderão impactar outras soluções que são empregadas em problemas do cotidiano, dos quais a sociedade faz uso e que tal inovação poderá pôr por terra toda a engenhosidade da solução, aprofundado pelo capítulo 9, que trata sobre a temática de forma mais ampla.

5 Computador

Esta pesquisa se propõe a construir um computador clássico (ilustrado a baixo), de forma que se possa por em prática a teoria estudada, possibilitando uma maior compreensão sobre a temática. Tendo em vista a metodologia de Project based learning – em que se incentiva a aprendizagem a partir da aplicação de conhecimentos e de habilidades através da experiência. Assim, o presente capítulo se debruça em detalhar o processo prático da construção do computador, sendo possível implementar as teorias, anteriormente vistas, na prática. Desta maneira, qualquer pessoa interessada, será capaz de construir seu próprio dispositivo, vivenciando o processo de Project based learning.

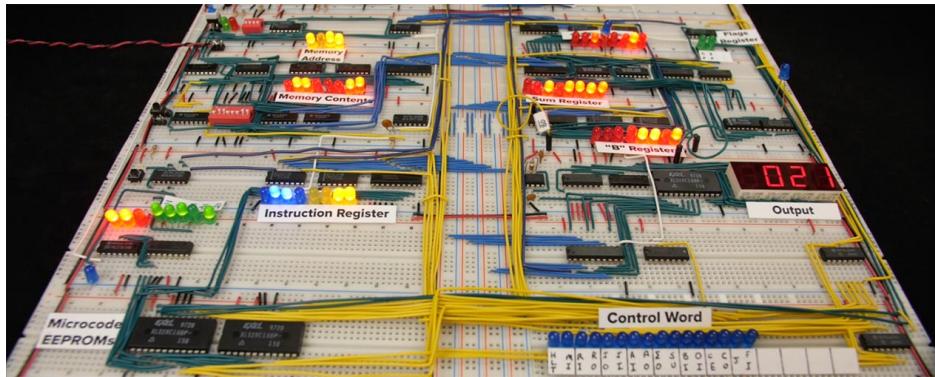


Figura 6: Protótipo a ser implementado, imagem do site eater.net

A implementação deste computador já foi iniciada, porém, há sérias desconfianças de que o prazo ainda restante seja adequado para sua finalização, maiores detalhes sobre o tema são apresentados no cronograma 6. Apesar de todos os esforços, ainda que com prazos apertados, para o cumprimento dessa construção, ainda, tem-se que a implementação física dos modelos contribui para a academia, uma vez que professores poderão usufruir dos mesmos como ferramenta didática, agregando para a compreensão da teoria ao aproxima-la da prática.

O projeto do computador aqui referenciado pode ser dividido em diversas partes, pois como qualquer computador clássico convencional, cada parte específica

contribui a sua maneira para a operacionalidade de todo o sistema. Essas partes são separados em módulos, os quais são ilustrados na figura 6, sendo que esses módulos formam a ULA (Unidade Lógica Aritmética) e a UC (Unidade de Controle) – conforme descrito na arquitetura Von Neumann (capítulo 3):

Conforme pode ser observado na figura 6, os módulos são organizados como: Clock, Registradores, Unidade Logica Aritmética, Memoria RAM, Contador e Registrador de Output.

A seguir, cada seção traz a funcionalidade e atual implementação de cada uma das partes, módulos, do computador.

5.1 Módulos

Para facilitar a compreensão e também o desenvolvimento do computador, este capítulo será dividido em alguns subcapítulos, cada qual abordando uma parte do computador.

5.1.1 Clock

O clock do computador é uma parte essencial para o seu funcionamento. Este tem a função de sincronizar todas as operações. A ação mais rápida que o computador consegue executar é equivalente a uma vibração do seu clock. No módulo desenvolvido, três clocks se fazem presentes. Assim o computador pode operar em três modos distintos, sendo eles, controlado por um potenciômetro – vibrando em uma frequência constante –, controlado pelo operador – a cada click no botão o modulo emite uma vibração –, e sempre ligado – assim passando o mais rápido possível por cada operação.

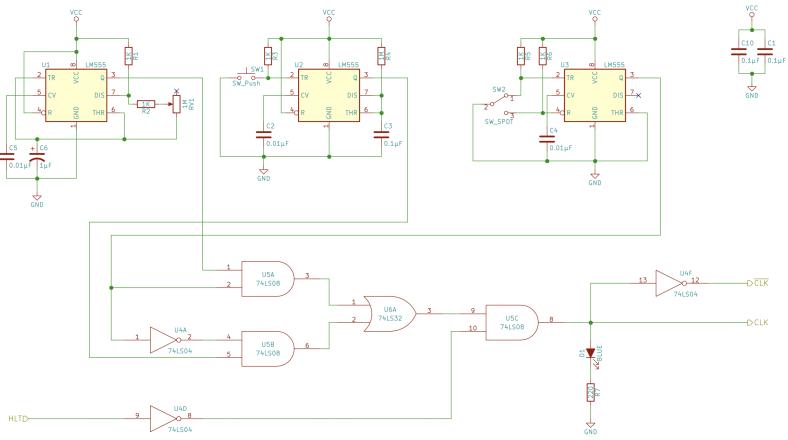


Figura 7: Esquema do Clock

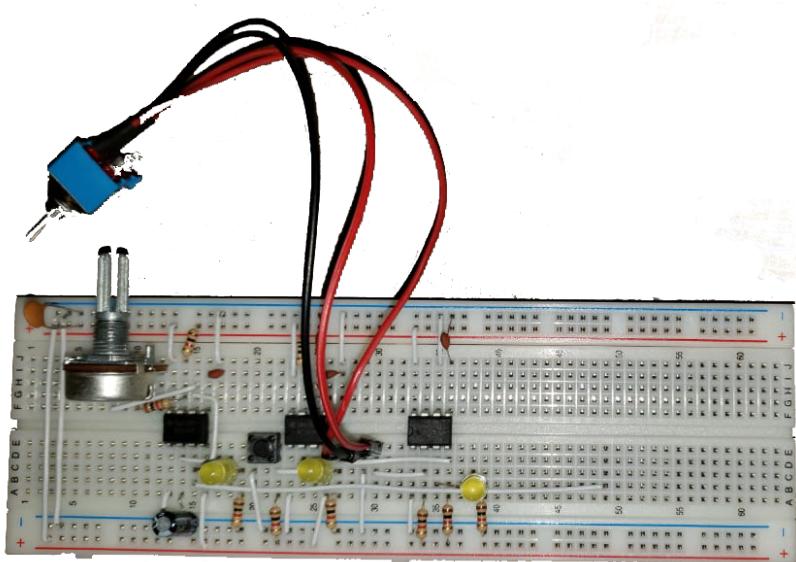


Figura 8: Modulo do clock implementado em breadboard

5.1.2 Registradores

Assim, como o clock é essencial para o funcionamento do computador, os registradores também são, estes são como variáveis, mas em hardware. A maioria das CPUs possuem vários registradores que armazenam pequenas quantidades

de dados. Em nossa CPU de breadboard, estão sendo desenvolvidos três registradores de 8 bits: A, B e IR. Os registradores A e B são para uso geral – armazenamento de dados (de forma numérica). Já o IR (instruction register), apesar de funcionar da mesma forma, é usado para armazenar a instrução atual que está sendo executada, ou seja a instrução que foi chamada através da vibração mais recente do clock.

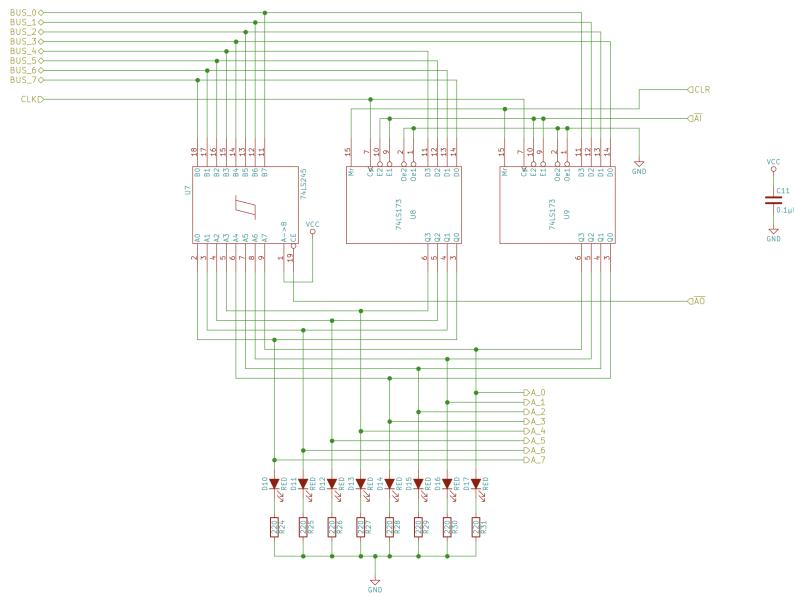


Figura 9: Esquema do Registrador A

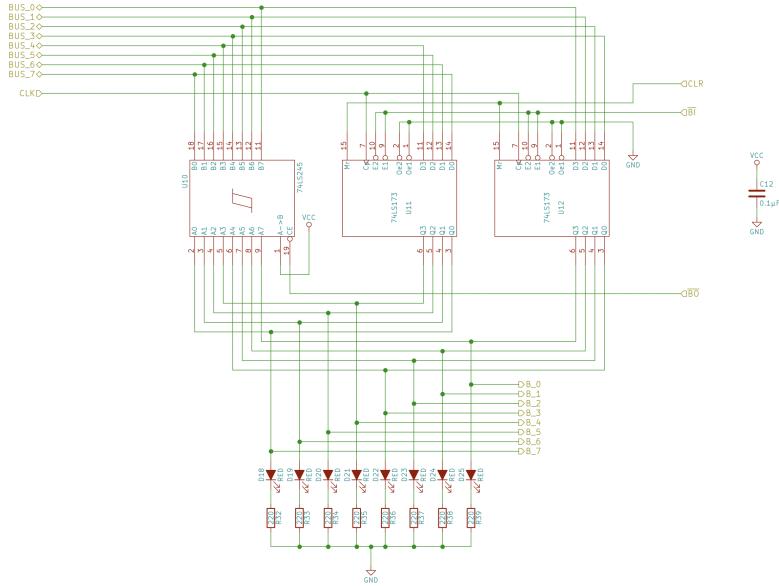


Figura 10: Esquema do Registrador B

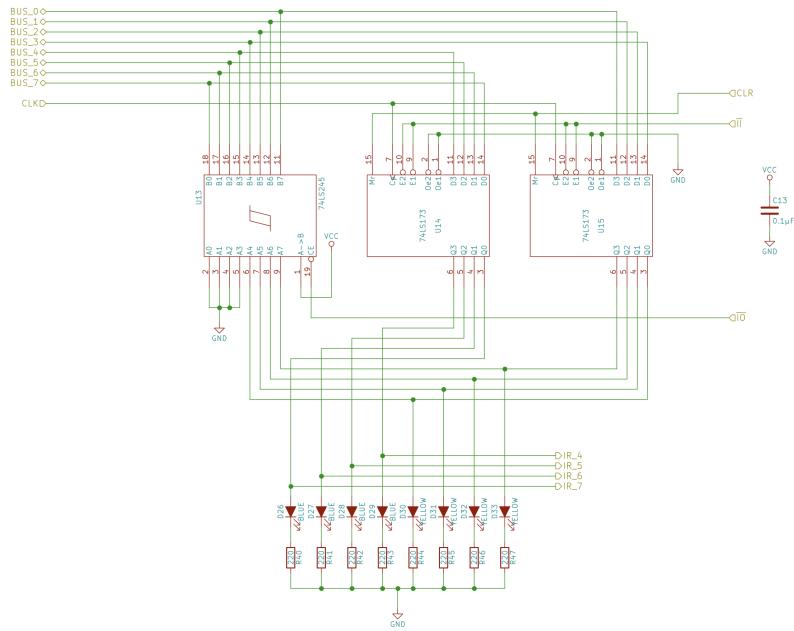


Figura 11: Esquema do Registrador IR

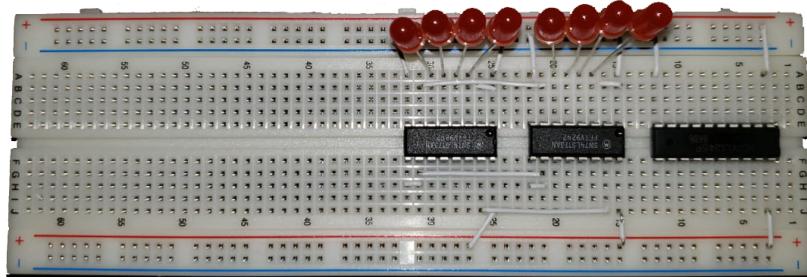


Figura 12: Modulo dos registradores implementado em breadboard (em andamento)

5.1.3 Unidade Logica Aritmética (ULA)

Para o funcionamento de um computador, é preciso que dados sejam manipulados, assim chegamos ao modulo de lógica aritmética, conhecida como unidade lógica aritmética (ULA) de uma CPU, esta geralmente é capaz de executar várias operações aritméticas, bit a bit e de comparação em números binários. Em nossa CPU de breadboard, a ULA pode apenas adicionar e subtrair, a final essa implementação é apenas para fins acadêmicos e não tem a necessidade de ser performática em termos de eficiência computacional. Ele é conectada aos registradores A e B sendo capaz de gerar a soma de $A + B$ ou a diferença de $A - B$.

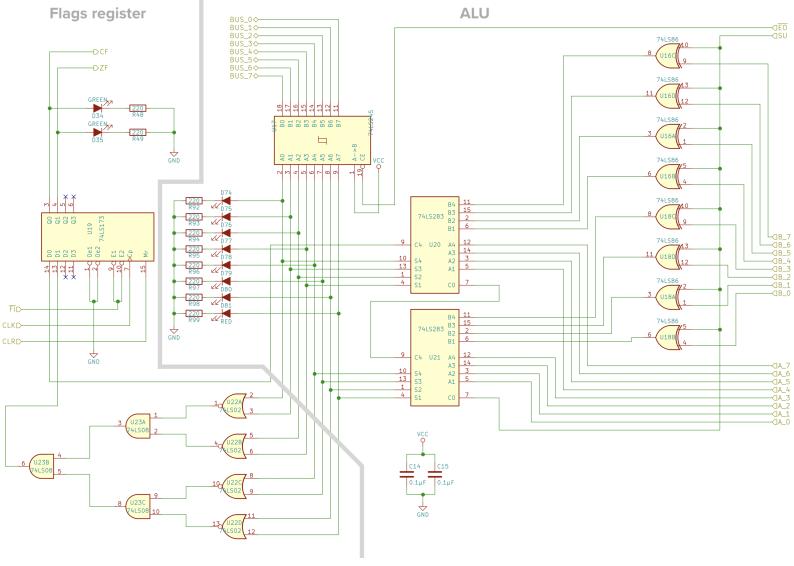


Figura 13: Esquema da ULA

5.1.4 Memoria (RAM)

Computadores em geral tem 2 memórias, o HD ou SSD e a memoria RAM, o HD (Hard Drive) e SSD (Solid State Drive) tem com objetivo armazenar dados de forma permanente, armazenam os dados em um espaço físico onde seu acesso é mais lento, porem, mesmo com o computador desligado os dados são guardados serão confiáveis após o computador ser religado. Já a memória de acesso aleatório, RAM, é uma memoria eletrônica e armazena dados apenas se o computador estiver ligado, porem consegue acessa-los de forma significativamente mais rápida. Um dos objetivos principais dessa memoria é armazenar o programa que o computador está executando no exato momento, bem como todos os dados que o programa precisa. Para o computador de breadboard que esta sendo desenvolvido, a memoria RAM utiliza endereços de 4 bits, o que significa que ele terá apenas 16 bytes de RAM, limitando o tamanho e a complexidade dos programas que poderão ser executados.

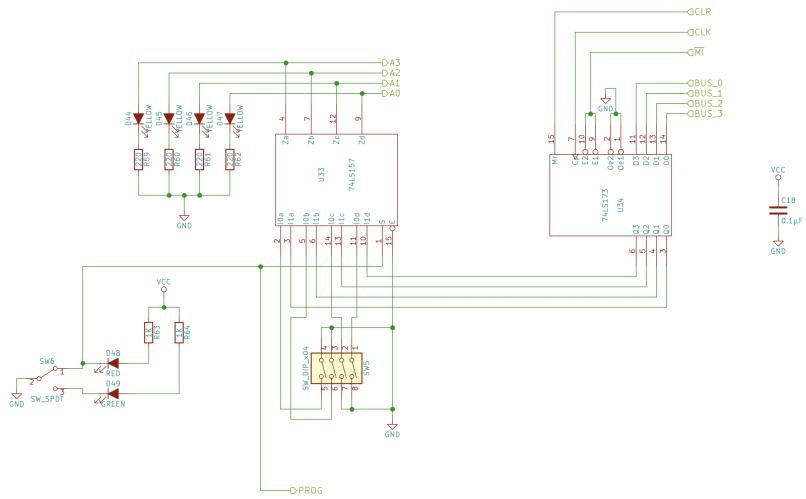


Figura 14: Esquema da MAR

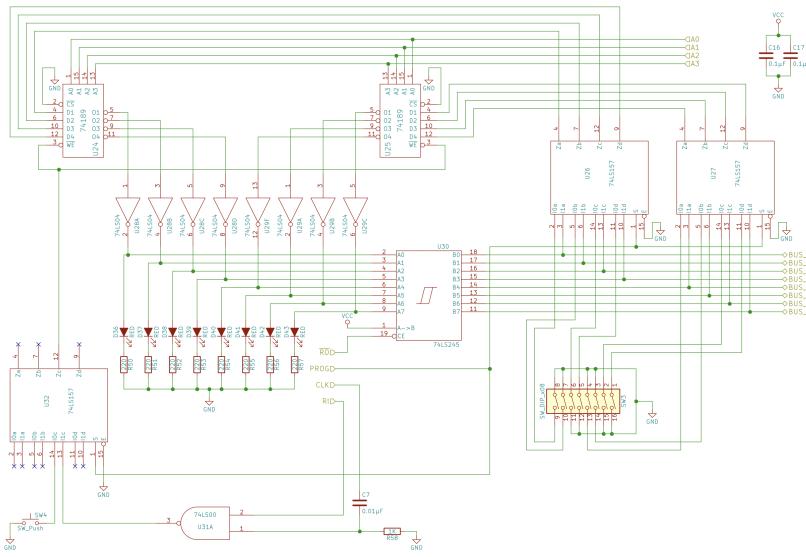


Figura 15: Esquema da RAM

5.1.5 Contador

O contador do programa (Program counter) conta em binário para acompanhar a instrução que o computador está executando no momento.

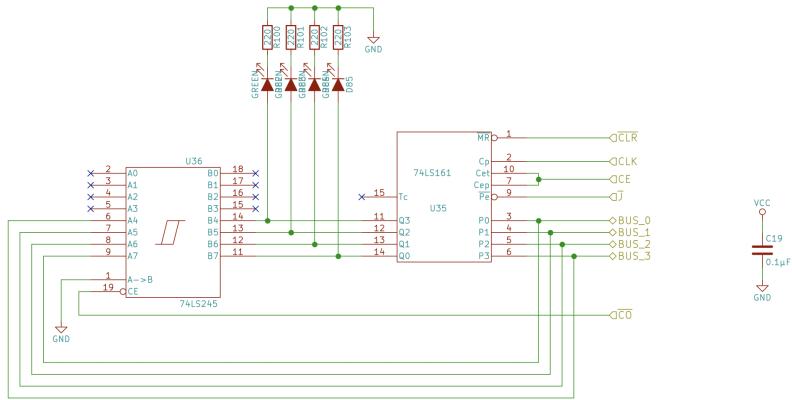


Figura 16: Esquema do Contador

5.1.6 Registrador de Output

O registrador de saída é um registrador especial para esse computador pois como não temos acesso a um monitor, este possibilita a leitura de dados de forma fácil e comum para seu usuário. Este é semelhante a qualquer outro registrador como os registradores A, B e IR, porém, em vez de exibir seu conteúdo em binário através de 8 LEDs, este exibe seu conteúdo de forma decimal em um display de 7 segmentos. Assim é um dos módulos mais difíceis a ser desenvolvido pois requer uma lógica complexa mas entrega grande satisfação.

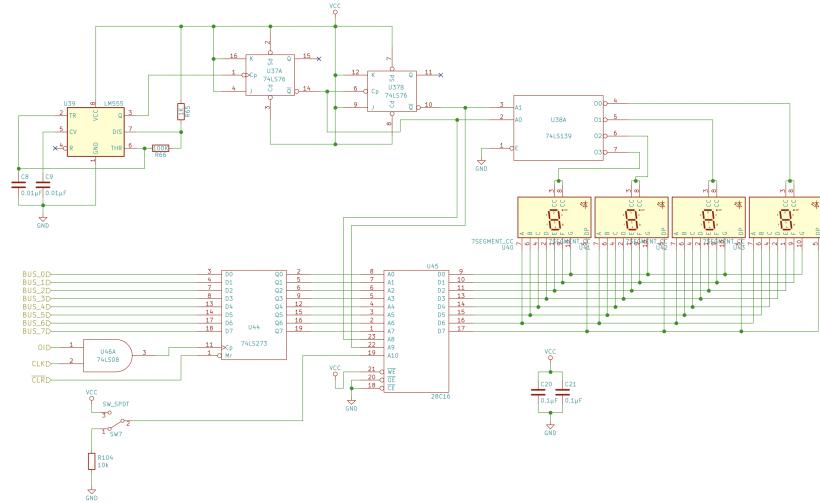


Figura 17: Esquema do Registrador Output

5.2 Considerações Finais

Como poder ser observado ao longo do capítulo a implementação do computador é um ponto forte a respeito da compreensão do funcionamento do computador clássico. As subseções apresentadas dão conta do panorama da complexidade, porém, explicam bem o funcionamento de cada módulo, assim bem como a fase de execução de tais.

Apesar do grande avanço na implementação deste computador, muitas partes ainda estão pendentes, conforme já citado no início do capítulo. Todo o esforço empregado até aqui poderá ser utilizado numa possível extensão, caso o tempo de projeto não seja o suficiente. É ressaltado a importância prática de fazer um projeto como esse.

6 Simulador

A partir dos conceitos estudados sobre computação quântica, o atual capítulo irá acompanhar a elaboração de uma aplicação web que simula os principais conceitos da física quântica aplicada à computação. Ao final espera-se que o simulador seja publicado na internet, de forma permanente e gratuita, com a intenção de agregar na área do estudo, possibilitando uma melhor compreensão por ser uma ferramenta visual e intuitiva.

7 Criptografia na computação

Dentre as mudanças e impactos possíveis para a computação, a computação quântica possivelmente irá impactar diretamente a área de criptografia. Isso porque, os métodos criptográficos até então existentes podem ser quebrados através de estratégias de força bruta (que são algoritmos que buscam solução por tentativa e erro). Portanto, se o computador quântico pode executar diversas tarefas de forma exponencial, então, tais métodos criptográficos atuais se tornam obsoletos, o que gera um impacto direto na sociedade digital.

Todas as transações bancárias, correspondência civil e militar, diagnósticos médicos, votos em democracias, todas as formas de interação social que demandam alguma política de privacidade (por menor que sejam) serão afetadas. Portanto a computação quântica pode acirrar mais ainda o paradigma das questões privadas e sociais.

Esse capítulo apresenta uma introdução à área de criptografia, a fim de exemplificar em que premissas toda área repousa, por isso, será apresentada a estratégia de criptografia utilizando chaves pública-privada.

Conforme definido por Bruce Schneier “*The art and science of keeping messages secure is cryptography [...].*” [Schneier and Sutherland \(1995\)](#) Embora a criptografia seja considerada fundamental em nossas vidas digitais, ela não está especificamente relacionada à computação. A criptografia existe há milênios.

Na segurança cibernética, há uma série de preocupações quando se trata de dados. Isso inclui confidencialidade, integridade, disponibilidade e não repúdio.

A confidencialidade significa que nossos dados não podem ser acessados / lidos por usuários não autorizados.

A integridade do dado diz respeito à originalidade com a qual os dados chegam a nós, estando 100% intactos, sem terem sido modificados – seja por um ato malicioso, perda de dados ou por algum outro fator.

A disponibilidade se refere à acessibilidade dos dados quando necessário.

Examinaremos as várias formas de criptografia digital e como elas podem nos ajudar a alcançar os três objetivos listados acima. Quando falamos de criptografia digital, geralmente nos referimos aos conceitos abaixo, que serão especificados.

1. Criptografia simétrica
2. Criptografia assimétrica
3. Funções de hash

Temos receio que os computadores quânticos sejam capazes de decifrar certos códigos usados para enviar mensagens seguras. Esses códigos criptografam dados usando funções matemáticas de “trapdoor” que funcionam facilmente em uma direção, mas não em outra. Isso facilita a criptografia de dados, mas a decodificação é extremamente difícil sem a ajuda de uma chave especial.

Esse sistema de criptografia não são inquebráveis e sua segurança se baseia na enorme quantidade de tempo que um computador clássico levaria para fazer o trabalho. Os métodos modernos de criptografia são projetados para que a decodificação demore tanto tempo que se tornem praticamente inquebráveis.

A chegada dos computadores quânticos mudou esse pensamento. Essas máquinas são muito mais poderosas que os computadores clássicos, tornando possível o rompimento desses códigos com facilidade, já que realizam contas matemáticas de forma mais eficiente e significativamente mais rápida que os computadores clássicos.

7.1 Conceitos básicos de criptografia

Antes de mergulharmos no conceito de criptografia, precisamos saber o que exatamente ela significa. Criptografar uma mensagem significa torná-la ilegível para partes não autorizadas usando uma cifra (o método específico para fazer isso). Descriptografar a mensagem significa reverter o processo e tornar os dados legíveis, decifrando-os mais uma vez.

7.1.1 Criptografia simétrica

Para criptografar e descriptografar corretamente nossos dados, precisamos de uma chave (que determina a saída da nossa cifra). Na criptografia simétrica, a chave usada para criptografar e decifrar os dados é a mesma, o que pode constituir

em um problema de segurança. De forma a compreender este problema, pode-se refletir sobre como enviar dados com segurança em um ambiente hostil como a Internet. Nesse caso, se a mesma chave for usada para criptografar e decifrar dados, primeiro precisaríamos enviar a chave de descriptografia para estabelecer uma conexão segura. Porém, isso significa que estaríamos enviando a chave por uma conexão insegura, e assim ela poderia ser interceptada e usada por terceiros, se constituindo em um grande problema de segurança.

7.1.2 Criptografia assimétrica

A criptografia assimétrica surge para resolver o problema da simétrica, possibilitando uma forma segura de compartilhamento de dados.

Para exemplificar esse novo formato, usaremos um cadeado que possui três estados – A (bloqueado), B (desbloqueado) e C (bloqueado) – E duas chaves distintas – A primeira pode girar apenas no sentido horário (de A a B a C) e a segunda pode girar apenas no sentido anti-horário (de C a B a A).

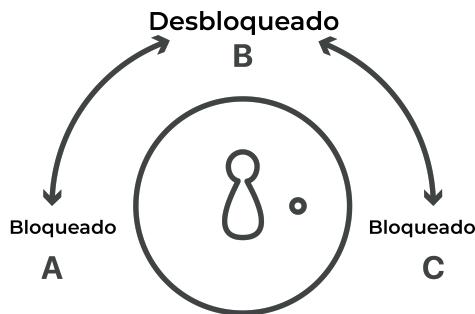


Figura 18: Ilustração da posição das chaves

Ao criptografar uma mensagem, o usuário pega a primeira chave e guarda para si mesmo. Essa chave é sua chave “privada” - porque apenas ele a possui.

A segunda chave é sua chave “pública”: Pode ser distribuída para qualquer pessoa. Assim, o usuário tem sua chave privada que pode mudar de A para B para C. E todo os outros tem sua chave pública que pode mudar de C para B para A.

Colocando isso em prática, imagine que você queira enviar um documento privado para o usuário. Você coloca o documento na caixa e usa uma cópia da chave pública dele para bloqueá-lo. Lembre-se de que a chave pública dele gira apenas no sentido anti-horário, e você a coloca na posição A. Agora a caixa está bloqueada. A única chave que pode passar de A para B é a chave privada, a que ele guardou para si.

7.1.3 Funções de hash

Uma função de hash, diferentemente da criptografia simétrica / assimétrica, é uma função unidirecional. Você pode criar um hash a partir de alguns dados, mas não há como reverter o processo. Portanto não sendo considerado uma maneira útil de armazenar dados, mas sim para verificar a integridade dos mesmos. Uma função de hash recebe alguns dados como entrada e gera uma string aparentemente aleatória (mas nem tanto) que sempre terá o mesmo comprimento. Uma função de hash ideal cria valores exclusivos para diferentes entradas. A mesma entrada exata sempre produzirá exatamente o mesmo hash - e é por isso que podemos usá-la para verificar a integridade dos dados.

7.2 Criando chave publica e privada RSA – Rivest Shamir Adleman

De forma a aprofundar o conceito de criptografia assimétrica, foi criado um [programa em linguagem C](#) que utiliza o algoritmo RSA¹³. O programa tem como objetivo apresentar de forma didática e visual o processo da execução do algoritmo RSA, gerando um par de chaves – pública e privada – e realizando o processo de criptografar e decifrar uma mensagem. A tabela 3 a baixo ilustra esse processo.

RSA – Cryptosystem

¹³Principal algoritmo de criptografia usado até os dias atuais, criado por Ron Rivest, Adi Shamir e Leonard Adleman em 1977.

Descrição	matemática
Escolher dois números primos	$p = 2$ $q = 7$
Produto dos números escolhidos	$n = 14$
função Phi	$\Phi(n) = (p - 1)(q - 1)$ $\Phi(14) = (7 - 1)(2 - 1)$ $\Phi(14) = (6)(1)$ $\Phi(14) = 6$ <i>Coprimos de 14 : 1, 3, 5, 9, 11, 13</i>
Escolher o numero e ‘encryption’	<i>Coprimos de 14 : 1, 3, 5, 9, 11, 13</i> <ul style="list-style-type: none"> • $1 < e < \Phi(n)$ • coprimo de : n e $\Phi(n)$ <i>Coprimos de 6 : 1, 5</i> <i>Menor que 6 e coprimo de 14 e de 6 : 5</i> $e = 5$
Chave publica	(5, 14)

Escolher o numero d 'decryption'	$d * 5(mod6) = 1$
• $d * e(mod\Phi(n)) = 1$	$5 * d = 5, 10, 15, 20, 25 \dots 55$
	$5 * 1(mod6) = 5$
	$5 * 2(mod6) = 4$
	$5 * 3(mod6) = 3$
	$5 * 4(mod6) = 2$
	$5 * 5(mod6) = 1$
	$5 * 6(mod6) = 0$
	...
	$5 * 11(mod6) = 1$
Chave privada	(11, 14)

Tabela 3: Passo a passo para gerar par de chaves

RSA – Cryptosystem	
Descrição	matemática

Criptografar	
Chave publica: (5, 14)	$2^5 \pmod{14}$
mensagem: "B"	$32 \pmod{14}$
$A \rightarrow 1$	$4 \pmod{14}$
$B \rightarrow 2$	Mensagem criptografada: $4 \rightarrow D$
$C \rightarrow 3$	
$D \rightarrow 4$	
Decifrar	
Chave privada: (11, 14)	$4^{11} \pmod{14}$
mensagem: "D"	$4194304 \pmod{14}$
$A \rightarrow 1$	$2 \pmod{14}$
$B \rightarrow 2$	Mensagem original: $2 \rightarrow B$
$C \rightarrow 3$	
$D \rightarrow 4$	

Tabela 4: Como criptografar e decifrar

7.3 Criptografia aplicada computação clássica

7.4 Criptografia aplicada computação quântica

8 Próximos passos

8.1 Cronograma

Etapas	2020											2021	
	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev
Clássica													
Quântico													
Protótipo													
Entrega Parcial													
Comparação													
Web App													
Impacto Social													
Entrega Final													

Tabela 5: Cronograma original

Acima está uma réplica do cronograma originalmente proposto para este projeto. Na tabela a seguir está mesmo cronograma porém com algumas alterações pontuais:

Justificativa de cada alteração:

1. **O projeto não começou em fevereiro de 2020** pois foi aprovado com ressalvas pela banca, assim esse mês foi dedicado ao aprimoramento da proposta.
2. **O projeto foi separado em duas grandes partes** 2020.1 foi voltado a computação clássica, e o plano é que 2020.2 será focada em computação quântica. Essa mudança relevante se dá pelo entendimento de que uma pesquisa de apenas dois meses no ramo da computação se tornaria algo raso e os

principais conceitos não seriam abordados com a devida intensidade.

3. **O não desenvolvimento do protótipo** ocorreu pelo atraso na compra dos materiais.
4. **A inclusão do Sistema Operacional e Simulador 24bits** foi uma forma de manter a metodologia “*Project Based Learning*” para o aprendizado na área de computação clássica sem ter os materiais desejados em mãos.

Etapas	2020											2021	
	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev
Clássica													
Quântico													
Protótipo													
Entrega Parcial													
Comparação													
Códigos													
Sistema Operacional													
Simulador 24bits													
Criptografia didática													
Impacto Social													
Entrega Final													

Tabela 6: Cronograma atualizado

8.2 Ajustes e correções possíveis no projeto

Devido a pandemia e principalmente ao atraso não previsto de quatro meses da compra dos materiais para o desenvolvimento do protótipo, este, que estava no cronograma de 2020.1 ainda não foi finalizado, apesar de já iniciado. Ainda, há preocupações com relação a essa finalização, devido ao grande esforço ainda necessário. Além disso, um estudo já foi feito sobre computação quântica, ainda não em definitivo, já que se trata de um relatório parcial, conforme evidenciado pelo Capítulo 5. Há preocupações, também, com relação ao prazo para a implementação do simulador de computação quântica, dado que ainda precisa ser melhor estudado.

9 Impactos sociais

O avanço da computação quântica seguramente afetará o mundo atual de diversas formas. Entre elas, impactando temáticas como: privacidade; política; otimização de logística e melhor tomada de decisão por máquina.

O principal motivo é resultado do desempenho mais ágil que computadores quânticos têm quando são comparados aos mais modernos da atualidade – clássicos – podem facilmente fazer o que parece ser uma tarefa impossível para computadores clássicos. Eles conseguem resolver e quebrar algoritmos de criptografia que protegem os dados de um usuário e a infraestrutura da Internet, além de otimizar melhores caminhos para logística e sempre tomarem a melhor decisão.

Em outubro de 2019, o Google revelou sua bem-sucedida experiência “Quantum Supremacy”, alegando que um problema particularmente difícil havia sido resolvido em 200 segundos [Gibney \(2019\)](#).

9.1 Criptografia & Privacidade

A criptografia atual é baseada em matemática e decodificação, sendo essa é uma tarefa bastante complicada para computadores clássicos. No entanto, os computadores quânticos a executam com grande facilidade. O algoritmo de fatoração de Shor¹⁴ é de particular importância para essa temática, pois significa que a criptografia de chave pública pode ser facilmente quebrada. Tendo em vista a “falha” na criptografia, o tema de privacidade vem à tona, sendo abordado no atual capítulo como esse fenômeno se comporta em três situações: negócios privados, transações e política.

9.1.1 Criptografia

Muitos criptosistemas são construídos usando problemas matemáticos mais difíceis do que um computador clássico é capaz de resolver. No entanto, um com-

¹⁴Um algoritmo de computador quântico de tempo polinomial para fatoração de número inteiro. Informalmente, resolve o seguinte problema: Dado um número inteiro, encontre seus fatores primos. Foi inventado em 1994 pelo matemático americano Peter Shor

putador quântico tem a capacidade computacional de encontrar soluções para os algoritmos criptográficos em uso hoje. Problemas criptográficos que usam fatoração são excelentes exemplos de problemas que podem ser resolvidos com um computador quântico, porque tanto a entrada quanto a saída são, cada uma, um único número. Observe que os números usados na chave são enormes, portanto, uma quantidade significativa de qubits é necessária para calcular o resultado. A capacidade de um computador quântico de resolver algoritmos criptográficos é um problema extremamente sério, e já existem empresas – como a Microsoft por exemplo – que já estão trabalhando em protocolos de criptografia segura quântica para substituir aqueles que serão vulneráveis a ataques quânticos.

9.1.2 Negócios privados

Empresas modernas de forma geral armazenam e gerenciam a maioria de suas informações pessoais e confidenciais de forma online, em uma nuvem com conexão ininterrupta à web. Assim, é quase impossível conduzir tais informações de forma a evitar que os dados caiam nas mãos de terceiros. Por esse motivo a criptografia está sendo incorporada aos planos de segurança de dados em nuvem de empresas, mantendo seus dados privados e seguros, independentemente de sua localização.

De acordo com o estudo “Data Breach” da IBM em 2018, o custo para cobrir uma violação de dados média é de US \$ 3,86 milhões. Estima-se que este custo deve aumentar 6,4% em 2019, com a probabilidade de uma violação recorrente nos próximos dois anos, chegando a aumentar 27,9%. Essa estatística por si só é suficiente para as empresas considerarem maneiras de otimizar suas medidas de segurança, que garantam a proteção ideal dos dados de suas empresas.

9.1.3 Transações

No modelo atual, as transações acontecem de forma criptografada. A melhor maneira de essa temática é através da internet. Qualquer endereço que comece com “<https://>” é criptografado, o que significa que ninguém, a não ser quem acessa a página e o servidor tem acesso aos conteúdos transacionados. Com alguns ní-

veis de abstração, esse processo também ocorre com transações bancárias, em que apenas o dono da conta consegue visualizar o saldo presente na conta e fazer operações. Já no modelo futuro, quando os computadores quânticos tiverem a estabilidade que os computadores clássicos tem hoje, todos esses dados e acessos serão públicos. Este é um pensamento assustador, porém muito realista.

Um dos métodos mais eficazes para proteger dados é por meio de criptografia. Assim como se tranca as portas de espaços importantes em empresas para impedir uma invasão, é preciso fazer o mesmo com os dados por meio de criptografia. Em vez de trancar uma porta física, a criptografia coloca algoritmos baseados em algoritmos matemáticos para protegê-los de hackers.

9.1.4 Política

Com o avanço da computação quântica, uma realidade de perda de privacidade se aproxima rapidamente. Isso afetará involuntariamente a política interna e externa de muitos países.

No escopo interno, as implicações da perda da privacidade das comunicações são preocupações importantes para os direitos humanos, por exemplo, em países onde regimes políticos opressores encontram interesse em manter a ficção de que todos os sujeitos concordam com seus pontos de vista. Com esses avanços, será possível usar medidas de vigilância secretas para monitorar dissidentes e rastrear as atividades de pessoas consideradas suspeitas que poderia sufocar a dissidência política, um objetivo que tem sido aspirado muitas vezes historicamente, mas nunca antes alcançado. Assim, é claramente uma tentação para os governos realizar esse tipo de vigilância. O problema potencial não está isolado dos regimes opressores, mas provavelmente aparecerá de uma forma diferente (ilegal) nas democracias tradicionais, onde os cidadãos tradicionalmente atribuem um alto valor à privacidade. As implicações são amplas e para as democracias menos seguras são consideravelmente mais sinistras.

No escopo externo, há a questão da desigualdade de conhecimento – informações sigilosas poderão ser acessadas por outros países – e portanto, será possível aumentar o poder de barganha em meio as negociações de comércio e relações

internacionais.

9.2 Otimização

A computação quântica permite a otimização em diversas áreas. Essas incluem busca de melhores caminhos – logística em tempo-hábil, melhor tomada de decisão de forma não empírica, robótica – tomar SEMPRE a melhor decisão e vale pena enfrentar uma decisão computacional?

9.2.1 Busca de melhores caminhos – logística em tempo-hábil

O problema de encontrar o caminho mais curto entre dois pontos em um gráfico ponderado é antigo. A questão de quais algoritmos clássicos podem ser acelerados pela computação quântica é, obviamente, muito interessante. No momento, existem apenas algumas técnicas gerais conhecidas no campo da computação quântica e a descoberta de novos problemas, passíveis de acelerações quânticas, é uma alta prioridade. Uma dessas técnicas gerais de soluções de problemas por meio da computação quântica foi considerada no Trabalho de Heiligman [Heiligman \(2003\)](#).

No caso clássico, o trabalho total para o algoritmo é $\max(O(kn^2), O(n^2)) = O(n^2)$ qual é minimizado tomando $k = 1$, portanto $W_{clássico} = O(n^2)$

No caso quântico, a situação é um pouco diferente. O trabalho total na primeira etapa é apenas o máximo de o trabalho nas próximas duas etapas, desde o trabalho na primeira etapa é sempre dominada por esses outros fatores de trabalho. O trabalho total é, portanto, $\max(O(k^1/2n^3/2), O(k^1/2n^2))$

e para minimizar isso, o parâmetro k deve ser escolhido para tornar esses dois fatores de trabalho iguais. Definição $k^1/2n^3/2 = k^{-1}/2n^2$ dá $k = n^1/2$ e portanto $W_{quântico} = O(n^7/4)$

Na verdade, isso é uma melhoria em relação ao clássico fator de trabalho de n^2

9.2.2 Machine Learning

Em geral, os computadores quânticos não são desafiados pela quantidade de computação necessária para resolver um problema. Em vez disso, o desafio é obter um número limitado de respostas e restringir o tamanho das entradas. Por causa disso, os problemas de Machine Learning (ML) muitas vezes não funcionam perfeitamente devido à grande quantidade de dados de entrada. No entanto, os problemas de otimização são um tipo de problema de ML que podem ser adequado para um computador quântico.

Imagine que você tem uma grande fábrica e o objetivo é maximizar a produção. Para fazer isso, cada processo individual precisaria ser otimizado por conta própria, bem como comparado com o todo. As configurações possíveis de todos os processos que precisam ser considerados são exponencialmente maiores do que o tamanho dos dados de entrada. Com um espaço de busca exponencialmente maior do que os dados de entrada, problemas de otimização são viáveis para um computador quântico.

Além disso, devido aos requisitos exclusivos da programação quântica, um dos benefícios inesperados do desenvolvimento de algoritmos quânticos é a identificação de novos métodos para resolver problemas. Em muitos casos, esses novos métodos podem ser trazidos de volta à computação clássica, produzindo melhorias significativas. A implementação dessas novas técnicas é o que chamamos de algoritmos inspirados no quantum.

9.2.3 Robótica – tomar SEMPRE a melhor decisão

Nos dias atuais, decisões são tomadas de forma não otimizadas, e ainda, muitas vezes baseadas em “achismo”. Nesse aspecto a nova tecnologia baseada na física quântica promete grandes avanços.

9.2.4 Vale pena enfrentar uma decisão computacional?

9.3 Considerações finais - incompleto

Assim, o impacto que o avanço da física quântica aplicada a computação terá na criptografia, supera as barreiras técnicas e afeta de maneira irreversível diversas outras áreas. Para mitigar os danos gerados por esse avanço, em paralelo estão sendo feitos estudos que avançam na área da criptografia quântica. Mas esses ainda não apresentam soluções aplicáveis e viáveis em tempo hábil.

10 Conclusões

Nesse capítulo serão colocadas as conclusões ao final do projeto.

10.1 Perspectivas

O estudo dessa área abre diversas outras perspectivas de estudos, seja pela nova forma de realizar a computação, seja pelos impactos causados pelo uso de tal tecnologia. Ao final do trabalho, essa seção irá abordar algumas dessas perspectivas.

11 Apêndice A – Sistema Operacional

Além do trabalho desenvolvido no projeto, um protótipo de sistema operacional foi feito.

Esse protótipo contempla: inicialização.

Conteúdos que foram compreendidos a partir do desenvolvimento de um [sistema operacional](#) simples que passa por todas as etapas essenciais do processo de “boot” – ilustrado na figura a baixo – *state-of-the-art* de computadores clássicos: ligando em ‘modo real de 16 bits’, carregando o kernel¹⁵, transferindo-se para ‘modo protegido de 32 bits’ e ‘gerenciando interrupções’.

```
Successfully landed in 32 - bit Protected Mode

IPXE (http://ipxe.org) 00:03.0 C980 PCI2.10 PnP PMM+07F8DD0+07ECDD0 C980

Booting from Hard Disk...
Boot failed: could not read the boot disk

Booting from Floppy...
Started in 16 - bit Real Mode
Loading kernel into memory.
-
```

Figura 19: Processo de boot

¹⁵Uma parte integrante de qualquer sistema operacional. Que se constitui em um programa com controle completo sobre tudo no sistema.

Referências

- Grand Rapids Business Journal – David Van Andel. Project-based learning is the future of education, out. 2019. URL <https://www.grbj.com/articles/94422-project-based-learning-is-the-future-of-education/>.
- Frank Arute. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 2019. URL <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5#citeas>.
- Fabio Gagliardi Cozman. Turing e complexidade. University Lecture, 2000. URL <http://sites.poli.usp.br/p/fabio.cozman/Didatico/Comp/Material/Turing.pdf>.
- Elizabeth Gibney. Hello quantum world! google publishes landmark quantum supremacy claim. *Nature*, 2019. URL <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03213-z>.
- Mark Heiligman. Quantum algorithms for lowest weight paths and spanning trees in complete graphs. *arXiv: Quantum Physics*, pages 10–19, 2003.
- Rolf Herken. A half-century survey on the universal turing machine. 1988.
- G. Ifrah. *The Universal History of Numbers: From Prehistory to the Invention of the Computer*. Wiley, 2000. ISBN 9780471393405. URL <https://books.google.com.br/books?id=FMTI7rwevZcC>.
- Melhoramentos Itda. – Michaels. Computador, out. 2019. URL <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/computador/>.
- Regina Célia Tamaso Mioto. Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica. *Revista Katálysis*, 10(SPE):37–45, 2007.
- John von Neumann. First draft of a report on the edvac. Technical report, 1945.

- David Nield. Ibm just committed to having a functioning 1,000 qubit quantum computer by 2023. *Science Alert*, 2020. URL <https://www.sciencealert.com/ibm-thinks-it-will-have-a-1-000-qubit-quantum-computer-running-within-three-years>.
- B. Ram. *Computer Fundamentals: Architecture and Organization*. New Age International, 2000. ISBN 9788122412673. URL https://books.google.com.br/books?id=PVz_IvZr5lcC.
- Charles Riley. Google claims its quantum computer can do the impossible in 200 seconds., out. 2019. URL <https://edition.cnn.com/2019/10/23/tech/google-quantum-supremacy-scn/index.html>.
- Humberto Rodrigo Sandmann. Ambiente de produção. personal website, 2019. URL <https://hsandmann.github.io/espmt.105/>.
- Bruno Santana. Iphone 6 é 120 milhões de vezes mais poderoso que o computador de bordo da apollo 11, jul. 2019. URL <https://macmagazine.uol.com.br/post/2019/07/16/iphone-6-e-120-milhoes-de-vezes-mais-poderoso-que-o-computador-de-bordo-da-apollo-11>
- Bruce Schneier and Phil Sutherland. *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C*. John Wiley and Sons, Inc., USA, 2nd edition, 1995. ISBN 0471128457.
- A. M. Turing, Michael Woodger, B. E. Carpenter, and R. W. Doran. *A. M. Turing's ACE Report of 1946 and Other Papers*. The MIT Press, Cambridge, Mass. : Los Angeles, April 1986. ISBN 978-0-262-03114-1.
- Alan M. Turing. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2:230–265, 1936. URL <http://www.cs.helsinki.fi/u/gionis/cc05/OnComputableNumbers.pdf>.
- Yuanhao Wang. 16-qubit ibm universal quantum computer can be fully entangled. *Nature*, 2018. URL <https://www.nature.com/articles/s41534-018-0095-x>.
- Paul Wazlawick. *História da computação*. Elsevier, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

Chelsea Whyte. Google claims it has finally reached quantum supremacy. *New Scientist*, 2019. URL <https://www.newscientist.com/article/2217347-google-claims-it-has-finally-reached-quantum-supremacy/>.