

Compiladores, Interpretadores

Frank Coelho de Alcantara

Compilação e Interpretação

Chegamos a um ponto interessante da nossa jornada. Já vimos um pouco da história de linguagens desenvolvidas para o uso humano e percebemos a necessidade de uma linguagem que fosse entendida por máquinas. Nos resta entender como podemos traduzir uma na outra. Ou seja, como podemos escrever um conjunto de instruções em uma linguagem que os humanos entendam e ter como resultado, um conjunto de instruções em uma linguagem que as máquinas entendam. Como podemos traduzir uma linguagem na outra?

Vamos dividir este processo de tradução em três técnicas distintas, mas não excludentes, a compilação, a interpretação e os processos híbridos. Contudo, antes de colocar a mão na massa e começar a destrinchar estas técnicas, precisamos fazer algumas considerações importantes, a seguir, principalmente porque se estamos em um livro sobre linguagem será bom se todos estivermos usando a mesma.

- **Algoritmo:** uma sequência finita de instruções que precisamos seguir para cumprir determinada tarefa ou resolver um determinado problema. Os algoritmos datam do Século IX e são atribuídos a mente criativa de *Abu Abdullah Muhammad ibn Musa Al-Khwarizmi*, um matemático Persa, também conhecido como o fundador da álgebra. A palavra algoritmo parece ter origem em uma publicação dos trabalhos de *Al-Khwarizmi* na Europa do Século XII, nesta publicação seu nome foi latinizado para *Algorithmi*. Algoritmos ideias escritas em uma linguagem de programação.
- **Linguagem de programação:** vamos chamar de linguagem de programação uma linguagem formal e regular desenvolvida para uso humano, constituída por um conjunto finito e pré-determinado de *strings* formadas de símbolos retirados de um alfabeto finito Σ qualquer. Este é o momento em que você deve pensar nas linguagens de programação que você conhece: C, Python, Assembly ou qualquer outra da sua preferência. Todas estas são linguagens formais e todas são linguagens de programação e todas são utilizadas para escrever um algoritmo na forma de um código.
- **Código:** vamos chamar de código ao texto que você irá escrever na sua linguagem de programação preferida. O texto deverá obedecer a gramática,

semântica e sintaxe da linguagem de programação que será utilizada pelo programador. Também podemos chamar, eventualmente, de código, o conjunto de instruções que será executado pela máquina, mas neste caso sempre usaremos a expressão código de máquina. O algoritmo, escrito na linguagem de programação é o código fonte do processo de compilação ou interpretação.

- **Programa:** esta é uma definição controversa que enche a cabeça dos acadêmicos há algumas décadas. Neste livro, a palavra programa será utilizada apenas para representar o código de máquina que está em memória, sendo executado, ou que está armazenado em algum dispositivo para ser executado quando for conveniente. O programa é o resultado do processo de tradução de uma linguagem desenvolvida para humanos em uma linguagem desenvolvida para máquinas. O programa é o que resulta quando o compilador, ou o interpretador, traduz o seu código fonte, escrito em uma linguagem de programação em código de máquina.
- **Tempos:** vamos dividir em tempos as fases do processo de criação de um programa. Sendo assim, temos o tempo de redação, este é o momento em que o programador está organizando suas ideias e escrevendo o código que representa seu algoritmo em uma determinada linguagem de programação. Em seguida, temos o tempo de compilação. Este é o momento em que o compilador está traduzindo seu código em código de máquina. Por fim, temos o tempo de execução, este é o momento em o seu programa está na memória e está sendo executado.
- **Níveis:** frequentemente nos referimos as linguagens de programação como de alto ou baixo nível. Esta referência está diretamente ligada a distância que existe entre a linguagem e a máquina. Quanto mais perto do código de máquina uma linguagem de programação for, menor será o seu nível, *Assembly* é uma das linguagens de mais baixo nível. Por outro lado, quanto mais próximo das linguagens naturais uma linguagem de programação estiver, maior será o seu nível. O Python, o C e o Haskell são exemplos de linguagens de alto nível.

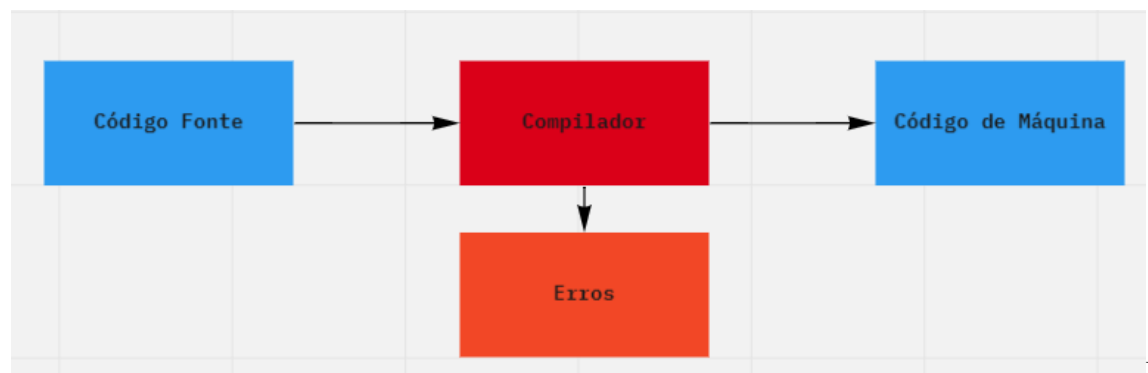
Compilação

A palavra compilação significa o ato de selecionar informações, ou materiais relevantes e adicioná-los a uma coleção. Neste livro vamos chamar de compilação ao processo de transformar um texto, escrito em uma linguagem formal e regular desenvolvida para Humanos em uma linguagem formal e regular desenvolvida para máquinas de forma persistente. Uma tradução.

A última parte da nossa definição “de forma persistente”, é muito importante para o entendimento do processo de compilação. Este “de forma persistente” significa que o resultado do processo de compilação, o código de máquina, de alguma forma permanece além da existência do compilador, ou do programa, em algum dispositivo de armazenamento.

Jogando um pouco mais de luz no parágrafo anterior podemos dizer que um compilador é um dispositivo, de hardware ou software, que traduz um texto fonte, ou texto original, em outro texto, chamado de texto objetivo. O texto fonte, ou código fonte, será escrito em uma linguagem de programação, uma linguagem forma. O texto objetivo, ou código de máquina, será escrito em uma linguagem de máquina. O resultado do processo de compilação, o texto objetivo, será, de alguma forma, armazenado para transporte e para o uso posterior.

A última frase do parágrafo anterior é muito importante: o resultado do processo de compilação, o código de máquina, será, de alguma forma, armazenado para transporte e uso posterior. Esta condição determina que o resultado do trabalho do compilador é perene. Ele deve durar por um tempo indefinido depois que o trabalho do compilador se encerra assim, podemos armazenar o código de máquina, transportar o código entre máquinas e executar este código em máquinas diversas, não importando nenhuma referência de lugar e tempo. A única restrição a execução do código de máquina gerado é que este código só poderá ser executado em máquinas que atendam a arquitetura que escolhida para a geração do código de máquina.



Uma

consequência direta destas funcionalidades e do fato de que uma linguagem de programação é uma linguagem formal e regular é que os compiladores são capazes de emitir mensagens de erro, durante o processo de compilação e, mais recentemente, durante o processo de redação do algoritmo. A Figura 4 mostra, de forma genérica, o processo de compilação como vimos até o momento.

O processo de compilação tem o seu próprio tempo separado do tempo de redação e do tempo de execução. O compilador pode usar este tempo para conseguir o melhor nível de otimização possível em busca do máximo de eficiência no uso de recursos e velocidade durante a execução do código, o tempo de execução. Os recursos utilizados para a execução de um determinado código de máquina serão sempre, raros e caros. Desta forma, é imprescindível que cada instrução seja analisada e otimizada em busca do menor custo e da maior velocidade.

Vamos tentar entender todo o processo de compilação como sendo uma série de blocos especializados em refinar, otimizar e modificar as informações originadas no código fonte, em ordem, de forma que o bloco seguinte seja capaz de agregar

valor ao processo alterando e expandindo a forma da informação envolvida no processo de tradução. Neste livro, vamos utilizar como referência a divisão em blocos que pode ser vista na Figura 6.

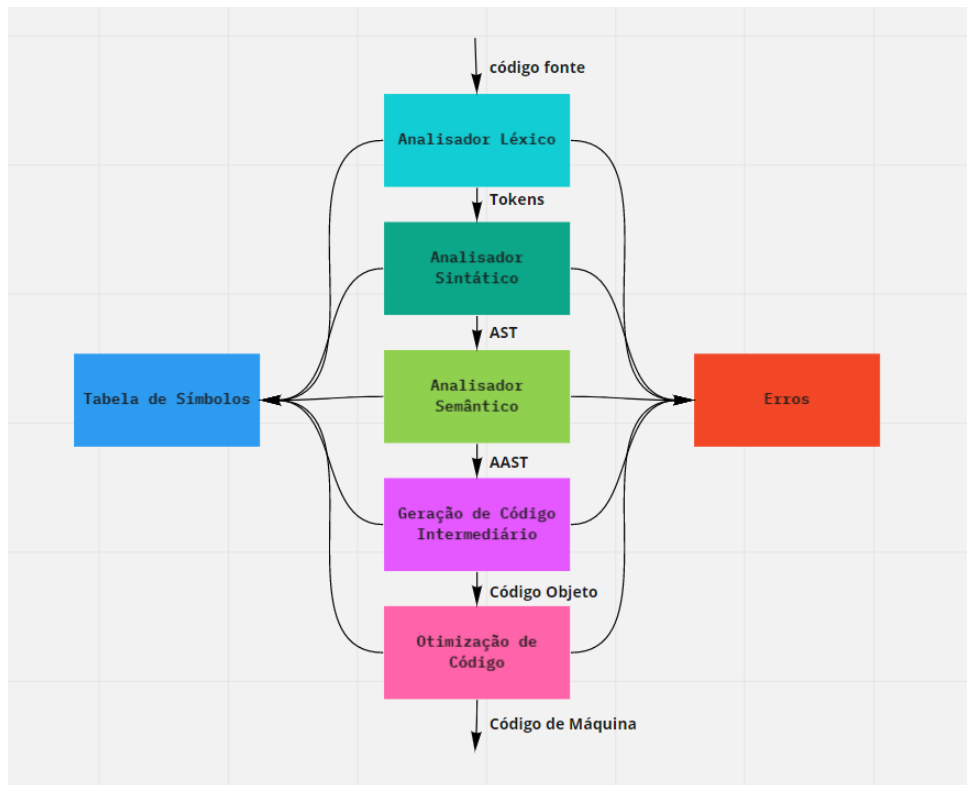


Figure 1: Uma imagem contendo texto, mapa Descrição gerada automaticamente

Figura 6 - Módulos componentes de um compilador

Cada um destes módulos tem funções específicas para tratar a informação de entrada e passar esta informação para o próximo módulo de forma a permitir que o próximo módulo trate essa informação da forma mais eficiente possível.

O Analisador Léxico é responsável por analisar a formação das palavras, operadores e símbolos da linguagem de programação, classificar estes símbolos e passar a lista para o Analisador Sintático. Por sua vez, cabe ao Analisador sintático verificar a forma como cada instrução foi escrita, verificando a adequação da instrução as regras de sintaxe da linguagem, uma vez que a instrução tenha sido validada, criar uma árvore sintática abstrata (AST)¹.

¹AST é uma abreviação da expressão inglesa *Abstract Sintact Tree*, ou, em tradução livre: árvore sintática abstrata.

O Analisador Semântico irá analisar a AST de forma a criar a Árvore Sintática Abstrata Aumentada (AAST). Esta árvore contém informações referentes ao sentido de cada uma das instruções do código. Para criar esta árvore coube ao Analisador Semântico a tarefa de entender o sentido da instrução e marcar esta instrução com etiquetas que facilitem a criação do código intermediário.

O módulo responsável pela Geração do Código intermediário irá transformar a AAST em um código simples, próximo da linguagem *Assembly* para a entrega ao módulo responsável pela otimização do código. O uso deste código intermediário surge como uma forma de tornar mais simples e eficiente fazer otimizações neste código antes de transformá-lo em linguagem de máquina.

Ao longo do livro vamos ver cada um destes módulos com detalhe. Neste momento você irá perceber que esta divisão é apenas didática e que pode ser estendida ou reduzida de acordo com o objetivo de cada autor.

Interpretação

O processo de interpretação consiste em traduzir um texto escrito em uma linguagem formal e regular, desenvolvida para uso humano, em uma linguagem formal criada para o uso por uma máquina específica. Ou, caso não tenha sido óbvio, algo muito parecido com as tarefas executadas pelo compilador. Existem, no entanto, alguns detalhes importantes. No passado, o processo de interpretação era feito linha à linha e o resultado deste processo era executado ou, quando fosse o caso, passado para a próxima linha. Este processo é característico de linguagens como o Basic. Hoje, com as linguagens muito mais complexas, contando com artefatos como funções, objetos e templates, a interpretação linha a linha é impossível, tendo sido indispensável a criação de um processo de interpretação de código inteiro ou de blocos de código auto contidos.

Enquanto o compilador opera em seu próprio tempo, o interpretador é um programa, ou dispositivo, criado para operar em tempo de execução. Podemos ressaltar isso: interpretadores são sistemas criados para a fazer a tradução entre uma linguagem de programação e o código de máquina em tempo de execução. Isso implica que o interpretador deve ser muito rápido. Esta necessidade exige que o processo de tradução, executado pelo interpretador ocorre de forma simultânea ao processo de execução do código fonte. Para que isso seja possível, o interpretador começa a traduzir e executar blocos de código fonte assim que o programa começa a ser executado. No processo de interpretação, não existe tempo disponível para ciclos repetitivos de otimização. Esta desvantagem aparente pode ser superada com algumas técnicas de otimização em tempo de execução.

Uma diferença importante entre um compilador e um interpretador é que compilador jamais executa o código de máquina, enquanto o interpretador faz isso todas as vezes que é executado. Observe que, graças a isso, o resultado do processo de compilação é persistente enquanto o resultado do processo de interpretação é efêmero.

Vamos, apenas para entendimento, considerar que não há nenhuma diferença entre o tempo de interpretação e o tempo de execução. Se considerarmos assim, o código de máquina resultante está na memória no mesmo instante de tempo em que o processo de interpretação está sendo executado. Esta hipótese permite a criação de rotinas de otimização para o código que está em execução. De fato, a linguagem Java e o V8 (interpretador de Javascript do Navegador Chrome) usam estes tipos de técnicas e este uso é parte do sucesso tanto do Chrome quanto do Java. Estes são os processos híbridos.

Processos Híbridos

Acho que já escrevi isso, mas, não custa nada repetir: recursos computacionais serão sempre raros e caros. E esta é a alavanca que impulsiona todo o desenvolvimento tecnológico além da criação de soluções para problemas novos que a própria tecnologia criou. Quando conseguimos resolver estes problemas de forma mais rápida, usando menos recursos, geramos mais riqueza. Nesta busca de eficiência podemos combinar conceitos de compilação e interpretação em ambientes híbridos com compiladores e interpretadores trabalhando lado a lado de forma que o resultado do todo seja melhor que o resultado da soma das partes.

O usuário digita o código fonte e manda executar. Imediatamente o processo de interpretação coloca o código de máquina na memória e inicia o tempo de execução. Em tempo de execução, com o programa rodando, podemos observar a eficiência de cada artefato de código em memória, identificar artefatos que possam ser otimizados, disparar o compilador em paralelo para otimizar este artefato ao máximo e, assim que os cliques extra de otimização estejam completos, substituir este artefato em memória. É esta tecnologia que fez o sucesso do Java.

No caso do Java o compilador produz um código intermediário, o código objeto que no caso do Java é chamado de *Bytecode*. este código é persistente e altamente otimizado. Depois de gerado o *Bytecode* pode ser interpretado em qualquer máquina virtual. Ou, em outras palavras, você escreve seu código fonte uma única vez, gera o *Bytecode* e, portando este código intermediário você pode executar seu programa em qualquer arquitetura de hardware desde que exista uma máquina virtual Java rodando nesta arquitetura.

O processo híbrido original do Java em duas fases distintas com um interregno de portabilidade, não é a única opção de hibridismo que podemos encontrar. O *Javascript*, uma linguagem criada para ser executada em navegadores web é, geralmente, interpretada. O código fonte é carregado junto com uma determinada página e cabe ao navegador interpretar este código e executar as instruções desejadas. A fluidez da navegação web depende da velocidade e eficiência do interpretador *Javascript* dos navegadores. O Google Chrome *V8 engine* é um dos melhores exemplos de sucesso nesta área.

O *V8 engine* é um motor de interpretação *Javascript*, desenvolvido em *C++*, em código aberto, que está em desenvolvimento constante pela equipe de desenvolvedores do Google na Alemanha. O *V8* usa dois processos de tradução. O

primeiro, um compilador muito rápido, cujo processo de otimização é o mínimo, para que o código seja executado imediatamente. O segundo, um compilador de otimização que gera código de máquina altamente eficiente e rápido. Este segundo compilador atua em segundo plano, depois que o código já está rodando, e observa o processo de uso do código de máquina, em memória e durante a execução do programa, observando a existência, ou não de artefatos de código que precisam de níveis mais profundos de otimização. Leia este parágrafo novamente.

Acabei de falar que o interpretador do *V8 engine* é composto de dois compiladores. Essa linha entre compilação e interpretação é tênue e autores diferentes traçam esta linha em pontos diferentes. Neste livro vamos tentar explicar as características de cada um, os algoritmos e técnicas envolvidas e a forma como você poderá fazer uso destes algoritmos para, além de projetar seu próprio compilador, ou interpretador, usar este conhecimento para criar soluções mais rápidas, eficientes e baratas.

Linguagens formais e regulares

The purely **formal language** of geometry describes adequately the reality of space. We might say, in this sense, that geometry is successful magic. I should like to state a converse: is not all magic, to the extent that it is successful, geometry?

Rene Thom

Podemos começar o estudo das linguagens formais lembrando que apenas a evolução da nossa espécie levou a criação da linguagem natural. Um processo aleatório, resultado da evolução e do relacionamento social. São naturais todas as linguagens que falamos e que são resultado desta evolução.

O relacionamento social, certamente, foi o fator decisivo para a criação de um conjunto de regras de uso e formação para cada uma das linguagens naturais que existe de forma a permitir que estas linguagens naturais pudessem ser aprendidas, praticadas e preservadas por todos os indivíduos de uma aglomeração humana. O entendimento do que o outro fala e a forma como ele fala fundamentam a convivência e evitam a violência e afastam a guerra. Este resultado da evolução, as linguagens naturais, por sua vez, permitiram a criação das linguagens artificiais. As linguagens artificiais são as linguagens criadas pelo homem com um objetivo específico, para entender uma necessidade ou resolver um problema. São exemplos de linguagens artificiais, o *Haskell*, a Lógica Proposicional de Aristóteles e as Partituras Musicais de Guittone d' Arezzo. As duas últimas são exemplos de linguagens artificiais ancestrais e servem para nos recordar que a criação de linguagens artificiais não é exclusividade nem da modernidade nem da computação.

A partir da metade do Século XX, como vimos no Capítulo 1, as linguagens artificiais explodiram em quantidade e diversidade. Notadamente graças as linguagens

de programação. Ao nosso estudo interessam apenas as linguagens artificiais formais e regulares e usaremos os termos *linguagem formal* e *linguagem regular* como se sinônimos fossem até que destacar a diferença entre elas seja inevitável. Todas as linguagens regulares são formais, mas nem todas as linguagens formais são regulares. Da mesma forma, todas as linguagens formais são artificiais, mas nem todas as linguagens artificiais são formais. O Esperanto é o exemplo clássico de linguagem artificial não formal e, portanto, está fora do escopo deste livro.

Ao longo deste livro usaremos os termos formal ou regular, para nos referir à alguma coisa que seja passível de ser computável e, neste caso, “passível de ser computável” implica forçosamente na necessidade do uso de um algoritmo. E, muitas vezes vamos usar os termos linguagem formal e linguagem regular de forma como se fossem sinônimos. Contudo, existem linguagens formais que não são regulares. As linguagens formais e regulares são o objeto de estudo deste livro.

Para que uma linguagem seja formal é necessário que a forma das suas sentenças (sintaxe), e o seu significado (semântica), seja precisa, rígida e algorítmicamente determinado. Veremos que uma linguagem será considerada formal se suas instruções puderem ser identificadas por um autômato finito ou por uma expressão regular, atendendo ao Teorema de Kleene.

Uma linguagem, seja ela natural ou artificial, será um conjunto de cadeias de símbolos, *strings*, formadas com base em um alfabeto finito e pré-definido. A sintaxe irá determinar as formas destas *strings* sem se preocupar muito com a forma dos seus menores componentes, os Lexemas.

Lexema é uma palavra originada do grego que representa a unidade mínima de distinguível de um sistema semântico, seus sinônimos mais comuns são morfema e palavra. Para nós, neste livro, o lexema é a menor unidade significativa de uma linguagem. Pode ser, por exemplo a palavra *for* ou o operador $+$. Cabe ao Analisador Léxico identificar os lexemas específicos da linguagem que será compilada. Mas isso é andar um pouco rápido demais. Vamos voltar as linguagens formais.

O estudo das linguagens formais começa com os conceitos de alfabeto, *string*, operações com *strings* e a matemática que suporta estes conceitos e operações.

A Base Matemática

Compiladores e interpretadores trabalham com linguagens formais e linguagens formais são estruturas matemáticas desenvolvidas na linguística computacional. E podemos começar com a definição de alfabeto.

Alfabetos, *strings* e linguagens

Um alfabeto é um conjunto finito de símbolos, muitas vezes chamados de símbolos terminais não repetitivos. Para todos os efeitos neste livro, um símbolo é uma unidade abstrata que não tem significado em si próprio trata-se da unidade

mais primitiva de dado que pode ser representada em uma alfabeto. Em alguns alfabetos os símbolos detêm significado graças ao seu uso específico. Como exemplo, podemos citar as letras maiúsculas ou minúsculas do português. Cada letra em si, não tem significado, mas nós as reconhecemos.

$$\Sigma_{\text{ptbr}} = \{a..z, A..z\}$$

Os alfabetos não admitem repetições de símbolos e, atendem a definição matemática de conjunto. Não existe nenhuma restrição quanto ao tipo de símbolo que compõe um alfabeto, eles podem ser compostos por dígitos, números reais, letras, caracteres, *emoji* ou qualquer outro tipo de do. Representamos o alfabeto pelo caractere sigma maiúsculo: Σ . Dessa forma podemos ter:

$$\Sigma = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_k\}$$

Que representa a existência de uma alfabeto com k elementos onde k é a cardinalidade do alfabeto e representa seu número de membros. Por exemplo, a cardinalidade de um alfabeto Σ_{prbr} formado apenas pelas letras do alfabeto do português seria dada por:

$$|\Sigma_{\text{ptbr}}| = |\{a..z, A..z\}| = 52$$

Com um pouco mais de formalidade, podemos dizer que, se um alfabeto contém um elemento a dizemos que $a \in \Sigma$ e este elemento a será chamado de membro de Σ . Da mesma forma se Σ não contém c então dizemos que $c \notin \Sigma$.

O alfabeto que não contém símbolos é um conjunto vazio e é representado por \emptyset observe que a cardinalidade de um conjunto vazio é zero. Observe também que a ordem dos membros em um alfabeto não é relevante.

Uma *string* em Σ é um subconjunto de Σ , ordenado e com possíveis repetições. A quantidade de símbolos em uma *string*, determina sua cardinalidade que podemos chamar de comprimento.

A ordem dos elementos em um *string* é importante de tal forma que duas *strings* com os mesmos elementos em ordem diferente, são *strings* diferentes. Uma *string* que não contém símbolos do seu alfabeto ainda é uma *string*, vamos chamá-la de vazia e representar pelo símbolo ε , que será lido com *epsilon*. Note que a *string* vazia ε é comum a todos os alfabetos e que sua cardinalidade é zero

A definição do símbolo ε para representar uma *string* vazia implica no banimento deste símbolo de todos os alfabetos que usaremos neste livro para evitar a ambiguidade no seu significado.

Exemplo 1:

Considere o alfabeto $\Sigma = \{a, b\}$. Defina o conjunto de todas as *strings* possíveis deste alfabeto cujo comprimento seja inferior a três.

$$S = \{a, b, aa, ab, ba, bb\}$$

Formalmente representamos as *strings* usando a mesma norma que usamos para a representação de conjuntos. Uma *string* s de um alfabeto $\Sigma = \{1, a\}$, deveria ser representada por:

$$s = \{a, 1, a\}$$

vamos adotar esta representação. Exceto quando formos tratar especificamente de operações com *strings* podemos representar $s = \{a1a\}$, ou simplesmente “ $a1a$ ”.

Podemos aproveitar a oportunidade e definir outra entidade matemática interessante a tupla. Tuplas são sequências finitas de elementos. o número de elementos da sequência dá nome a tupla. Logo, uma tupla com três elementos é uma 3 – *tupla*, uma tupla com cinco elementos é uma 5 – *tupla*. A tupla com dois elementos é chamada de par. Se a ordem dos elementos é importante, na definição da tupla, então as chamamos de tuplas ordenadas. No caso da 2 – *tupla* temos o par ordenado Dessa forma, podemos melhorar a definição de *string*: uma *string* de um alfabeto Σ é de comprimento n maior que zero é uma n – *tupla* ordenada do alfabeto Σ .

Exemplo 2:

Considere os alfabetos $\Sigma_1 = \{a, b, c\}$ e $\Sigma_2 = \{3\}$. Neste caso, podemos ter as seguintes *strings*:

- a) $s_1 = \{abc\}$ a qual é uma *string* de Σ_1 ;
- b) $s_2 = \varepsilon$ e $s_3 = \{3333\}$ as quais são *strings* de Σ_2 ;

O conceito de cardinalidade, discutido em relação a alfabetos e *strings* permite a criação de uma notação um pouco diferente. Tomemos a como exemplo a *string* $aabb$, neste caso a cardinalidade será dada pelo número de símbolos da *string* então:

$$|aabb| = 4$$

Podemos afirmar, sem sombra de dúvida que $|\varepsilon| = 0$. Ou seja, a cardinalidade, ou comprimento, da *string* vazia é zero. Com estas duas definições solidificadas podemos criar uma notação que especifique a quantidade de elementos de um determinado tipo na *string* emprestando um pouco do conceito de cardinalidade. Neste caso teremos:

$$|\text{aabb}| = 4$$

$$|\text{aabb}|_a = 2$$

$$|\text{aabb}|_b = 2$$

Resta definir a igualdade entre *strings* tomemos agora duas *strings* quaisquer:

$$s_1 = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_i\} \wedge s_2 = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_i\}$$

Podemos dizer que $s_1 = s_2$ se e somente se $a_i = b_i$ para todo e qualquer valor de i . Ou se preferir, um pouco menos de formalidade, podemos determinar a igualdade entre duas *string* primeiro comparando seus comprimentos e dois, comparando, da esquerda para direita, todos os seus elementos. As *strings* serão iguais se o comprimento for igual e todos os seus elementos forem iguais um a um na mesma ordem.

A concatenação de *strings* é uma operação binária interessante. Definimos a concatenação como uma operação binária que recebe como operandos duas *strings* e retorna uma nova *string* formada pelas duas anteriores. Podemos representar a concatenação de duas *strings* $s_1 = \{\text{ab}\}$ e $s_2 = \{\text{ba}\}$ como:

$$s_1 s_2 = \{\text{ab}\} \{\text{ba}\} = \{\text{abba}\}$$

Formalmente diríamos que a concatenação de s_1 e s_2 é definida por:

$$s_1 s_2 = \{xy \mid (x \in s_1) \wedge (y \in s_2)\}$$

Que vem a ser a definição exata de produto cartesiano se apenas substituirmos xy pelo par ordenado (x, y) e de onde podemos inferir algumas propriedades interessantes:

- a) $s\varepsilon = s$;
- b) $\varepsilon s = s$;
- c) $\varepsilon\varepsilon = \varepsilon$;
- d) $|\varepsilon s| = |s|$;
- e) a concatenação não é comutativa logo: $s_1 s_2 \neq s_2 s_1$;
- f) a concatenação é associativa logo: $s_1 (s_2 s_3) = (s_1 s_2) s_3$;
- g) $|s_1 s_2| = |s_1| + |s_2|$,

Outra operação interessante com *strings* é a reversão, ou como preferem alguns autores reflexo. A reversão é uma operação unária que, quando aplicada a uma *string* resulta em outra *string* de mesmo comprimento e com todos os elementos na ordem inversa. Considere a *string* $s = \{abcd\}$ sua reversão será dada por:

$$s^R = \{abcd\}^R = \{dcba\}$$

Novamente existem algumas propriedades que devemos observar:

- a) $\varepsilon^R = \varepsilon$;
- b) $|s^R| = |s|$;
- c) Se $s = \{a\}$ então $s^R = \{a\}$;
- d) $s^R x = x s^R$
- e) $(s^R)^R = s$;
- f) $(s_1 s_2)^R = s_2^R s_1^R$

Por último temos a repetição. Usamos a repetição para denotar *strings* que sejam a concatenação da *string* com ela mesma. A repetição será indicada por um número m inteiro positivo \mathbb{Z}^+ . Por definição vamos considerar que $m = 0$ indica a *string* vazia. Ou seja:

$$\begin{cases} s^m = s^{m-1}s, & m > 0 \\ s^0 = \varepsilon \end{cases}$$

Exemplo 3

Considere a *string* $s_1 = \{ab\}$, teremos:

- 1. $s_1^0 = \{\varepsilon\}$;
- 2. $s_1^1 = s_1 = \{ab\}$;
- 3. $s_1^2 = s_1 s_1 = \{abab\}$;
- 4. $\varepsilon^0 = \varepsilon^1 = \varepsilon^2 = \varepsilon$

Agora que temos as definições de alfabeto e *string* podemos começar a definir a linguagem L como sendo um conjunto de *strings* de um alfabeto especificado. Esta definição não contém um limite implícito para a cardinalidade deste conjunto. Isto implica que podemos ter uma linguagem L qualquer que tenha um número infinito de membros, um número finito de membros ou nenhum membro. No caso do estudo de compiladores e interpretadores, consideraremos apenas linguagens formais com cardinalidade finita. Ou seja,

$$0 \leq |L| \leq \infty$$

Formalmente podemos usar a notação de conjuntos para definir uma linguagem ser você considerar uma linguagem L derivada do alfabeto $\Sigma = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ podemos definir L da seguinte forma:

$$L = \{x \mid x \in \Sigma^* \wedge x \in \mathbb{Z} \mid 30 < x < 90\}$$

Em bom português podemos dizer que é uma linguagem formada por *string* que representam os números inteiros maiores que 30 e menores que 90.

Exemplo 4:

Considere o alfabeto $\Sigma = \{a, b\}$ e defina a linguagem L_1 e L_2 sabendo que L_1 é formada por todas as *strings* começadas com o símbolo a com no máximo três membros e que L_2 é formada por todas as *strings* que contém a mesma quantidade de símbolos a e b .

$$L_1 = \{a, aa, ab, aaa, aab, aba, abb\}$$

$$L_2 = \{ab, ba, aabb, abab, baba, bbaa, aaabbb \dots\}$$

Neste ponto podemos observar que uma linguagem pode ser entendida como sendo um conjunto de conjuntos em dois níveis distintos. No primeiro, um conjunto não ordenado de membros, as *strings* no segundo nível, um conjunto de símbolos terminais, o alfabeto.

Dada uma linguagem L todas as *strings* pertencentes a essa linguagem serão chamadas de lexemas ou palavras. Tomando a linguagem L_2 podemos dizer que $aabb$ é lexema, ou palavra, de L_2 ou, formalmente dizemos que $aabb \in L_2$.

A cardinalidade de uma linguagem L é o número de *strings*, ou se preferir, número de instruções contidas nesta linguagem. A linguagem L_2 , que definimos anteriormente, tem cardinalidade infinita enquanto L_1 tem cardinalidade igual a sete, ou seja:

$$|L_1| = |\{a, aa, ab, aaa, aab, aba, abb\}| = 7$$

Observe que uma linguagem finita é um conjunto finito de *strings* construídas a partir de um alfabeto também finito. Um caso especial de linguagem é a linguagem vazia $L_v = \{\}$ que será representada pelo símbolo \emptyset cuja cardinalidade é zero $|L_v| = 0$. Outro caso especial é a linguagem denominada, fecho de Kleene e representada por Σ^* . Esta linguagem é, por definição, o conjunto de todas as *strings* de comprimento finito que podem ser criadas utilizando os símbolos do alfabeto Σ acrescido da *string* vazia. Logo, considerando o alfabeto $\Sigma = \{a, b\}$ teremos:

$$\Sigma^* = \{\varepsilon, a, b, ab, ba, aaa, aab, aba, abb, baa, bab, bba, bbb, \dots\}$$

Exemplo 5:

Considere as linguagens Σ^* em relação aos alfabetos propostos:

1. Se $\Sigma = \{a, b\}$ então $\Sigma^* = \{\varepsilon, a, b, ab, ba, aa, bb, aaa, aab, \dots\}$;
2. Se $\Sigma = \{a\}$ então $\Sigma^* = \{\varepsilon, a, aa, aaa, aaaa, \dots\}$;
3. Se $\Sigma = \emptyset$ então $\Sigma^* = \{\varepsilon\}$.

Neste caso, além de apresentar a linguagem Σ^* na sua ordem lexicográfica, podemos inferir que qualquer *string* derivada do alfabeto Σ é obrigatoriamente um membro da linguagem Σ^* e qualquer linguagem L do alfabeto Σ é obrigatoriamente um subconjunto da linguagem Σ^* . Ou se preferir $L \subset \Sigma^*$. Além disso, o conjunto formado por todos os subconjuntos possíveis de Σ^* é o conjunto de todas as linguagens possíveis derivadas do alfabeto Σ .

Existe outra linguagem importantes derivada de um alfabeto Σ qualquer e criadas por definição. A linguagem Σ^+ que representa todas as *strings* do alfabeto Σ com comprimento maior ou igual a 1. Neste caso, a linguagem Σ^+ não inclui a *string* vazia ε . Em resumo temos:

- a) a linguagem L de um alfabeto Σ ;
- b) a linguagem Σ^n para todas as strings de comprimento $n >$ para qualquer n pertencente aos números naturais \mathbb{N} ;
- c) A linguagem Σ^* , para todas as strings de Σ ;
- d) A linguagem Σ^+ para todas as strings de Σ com $>$ comprimento maior ou igual a 1;
- e) A linguagem \emptyset a linguagem sem nenhuma string do alfabeto $> \Sigma$.

Exemplo 6:

Considere o alfabeto $\Sigma_b = \{0, 1\}$

1. $\Sigma_b, L = \Sigma_b^2 \Rightarrow L = \{00, 01, 10, 11\}$
2. $\Sigma_b, L = \Sigma_b^8 \Rightarrow L = \{00000000, 00000001, \dots\}$ (bytes).

Operações com linguagens

Dado um alfabeto finito qualquer Σ podemos afirmar que:

- a) $L = \emptyset$ é uma linguagem formal;
- b) Para qualquer *string* $> s \in \Sigma^*$, $L = \{s\}$ é uma linguagem $>$ formal;
- c) Para qualquer *string* $> s \in \Sigma^*$, $L = \{s\}$ é uma linguagem $>$ formal;

- d) Se L_1 e L_2 são linguagens formais então $L_1 \cup L_2$, é uma linguagem formal;
- e) Se L_1 e L_2 são linguagens formais então $L_1 L_2$, é uma linguagem formal;
- f) Se L_1 é uma linguagens formal então L_1^* é uma linguagem formal.

As afirmações que indicam que \emptyset , $\{x\}$ e $\{\varepsilon\}$ são linguagens formais são as afirmações básicas sobre as quais construiremos, passo-a-passo, a definição de linguagem formal. As outras três, derivadas das operações União, Concatenação e fechamento têm importância ímpar para a definição das linguagens formais. Antes de prosseguirmos, precisamos definir estas operações. Em linhas gerais, tudo que teremos que fazer é observar as operações com *strings* e aplicar a todas as *strings* da linguagem.

União Trata-se de uma operação binária. Considere as linguagens L_1 e L_2 referentes ao alfabeto Σ . Definimos a união destas linguagens como:

$$L_1 \cup L_2 = \{x \mid (x \in L_1) \vee (x \in L_2)\}$$

Exemplo 7:

Considere o alfabeto $\Sigma = \{a, b, c\}$ e as linguagens $L_1 = \{aa, bb\}$ e $L_2 = \{cc, cb\}$ neste caso a concatenação entre estas duas linguagens será dada por:

$$L_1 \cup L_2 = \{aa, bb\} \cup \{cc, cb\} = \{aa, bb, cc, cb\}$$

Algumas propriedades da união são importantes para o estudo das linguagens formais e regulares:

- a) $L_1 \cup (L_2 \cup L_3) = (L_1 \cup L_2) \cup L_3$ (associativa);
- b) $(L_1 \cup L_2) L_3 = L_1 L_3 \cup L_2 L_3$ (associativa para concatenação).

Concatenação Trata-se de uma operação binária. Considere as linguagens L_1 e L_2 referentes ao alfabeto Σ . Definimos a concatenação destas linguagens como:

$$L_1 L_2 = \{xy \mid (x \in L_1) \wedge (y \in L_2)\}$$

Exemplo 8:

Considere o alfabeto $\Sigma = \{a, b, c\}$ e as linguagens $L_1 = \{aa, bb\}$ e $L_2 = \{cc, cb\}$ neste caso a concatenação entre estas duas linguagens será dada por:

$$L_1 L_2 = \{aa, bb\} \cup \{cc, cb\} = \{aacc, aacb, bbcc, bbcb\}$$

A concatenação de uma linguagem L consigo mesma, repetidamente dá origem a uma representação muito próxima da representação da operação de exponenciação. Sendo assim, considerando uma linguagem $L = \{a, b\}$ teremos:

- a) $L^0 = \emptyset$
- b) $L^1 = L = \{a, b\}$;
- c) $L^2 = LL = \{a, b\} \{a, b\} = \{aa, ab, ba, bb\}$;
- d) $L^3 = LLL = \{a, b\} \{a, b\} \{a, b\} = \{aa, ab, ba, bb\} \{a, b\} = \{aaa, aba, baa, bba, aab, abb, bab, bbb\}$;
- e) $L^k = LLL \dots L$ (k vezes).

Fechamento de Kleene O fechamento de Kleene, também chamado de fechamento recursivo transitivo é uma operação unária. Se L_1 for uma linguagem L_1^* indica que podemos pegar zero ou mais *strings* de L_1^* e concatená-los. Definimos seu fechamento por:

$$L_1^* = \bigcup_{i=0}^{\infty} L_1^i = L^0 \cup L^1 \cup L^2 \cup L^3 \dots$$

Em palavras podemos dizer que o fechamento de Kleene de uma linguagem dada é a união de todas as linguagens possíveis, formadas pela concatenação dela com ela mesma, operação que definimos como repetição.

$$L^n = \begin{cases} \{\varepsilon\} \\ L^{n-1}L \end{cases}$$

Por causa desta relação com a concatenação este fechamento é dito como sendo um fechamento por concatenação e união, ou se preferir um pouco mais de formalismo, podemos recorrer a álgebra abstrata. O L^* , é chamado de monoide livre. E deste conceito podemos tirar o subgrupo livre, também importado da álgebra, representado por L^+ definido por:

$$L_1^+ = \bigcup_{i=1}^{\infty} L_1^i = L^1 \cup L^2 \cup L^3 \dots$$

Ou seja, todas as linguagens possíveis de serem criadas a partir de um alfabeto Σ excluindo a linguagem vazia. Ou ainda:

$$L^+ = L^* - \{\varepsilon\}$$

A linguagem Σ^+ é o resultado da operação unária chamada de fechamento transitivo.

Exemplo 9:

Considere o alfabeto $\Sigma = \{a, b, c\}$ e as linguagens $L = \{aa, bb\}$ neste caso o fechamento de L_1 será dado por:

$$L_1^* = \{aa, bb\}^* = L^0 \cup L^1 \cup L^2 \cup L^3 \dots$$

Logo:

$$L_1^* = \{aa, bb\}^* = \{\varepsilon\}, \{aa, bb\}, \{aaaa, aabb, bbaa, bbbb\}, \{aaaaa, \dots\}, \dots\}$$

Finalmente temos que:

$$L_1^* = \{\varepsilon, aa, bb, aaaa, aabb, bbaa, bbbb, aaaaa, \dots\}$$

O fechamento de Kleene de uma linguagem finita L qualquer resulta em uma linguagem infinita L^* , com apenas duas exceções: a linguagem \emptyset e linguagem que contém apenas a *string* vazia $\{\varepsilon\}$, nos dois casos, o resultado da operação de fechamento será a própria linguagem.

Podemos voltar um pouco e ver as linguagens definidas anteriormente com relação a um alfabeto e observar que dado um alfabeto Σ qualquer e uma linguagem L derivada deste alfabeto o fechamento da linguagem L é igual a linguagem Σ^* , e contém todas as *strings* possíveis do alfabeto Σ . Isso mostra que:

$$L \subseteq \Sigma^*$$

Equação que podemos extrapolar e ler como: toda e qualquer linguagem L definida a partir de um alfabeto Σ é um subconjunto de Σ^* . Podemos destacar algumas propriedades interessantes do fechamento por concatenação:

- f) $L \subseteq \Sigma^*$;
- g) $\forall L_1 \in L^* \wedge L_2 \in L^* \mid L_1 L_2 \in L^*$;
- h) $(L^*)^* = L^*$;
- i) $(L^*)^R = (L^R)^*$;
- j) $\emptyset^* = \varepsilon$;
- k) $\{\varepsilon\}^* = \{\varepsilon\}$.

Por fim, já que Σ^* representa a maior linguagem possível referente a um determinado alfabeto Σ podemos definir o complemento de uma linguagem como sendo:

$$\overline{L} = \Sigma^* - L$$

Exemplo 10:

Vamos considerar uma linguagem de programação qualquer que defina os nomes dos seus identificadores, variáveis por exemplo, como tendo que ser escritos com letras maiúsculas e números. Podemos avaliar este problema considerando dois alfabetos:

$$\Sigma_{\text{letras}} = \{A, B, \dots Z\}$$

$$\Sigma_{\text{números}} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

De tal forma que o nosso alfabeto será:

$$\Sigma = \Sigma_{\text{letras}} \cup \Sigma_{\text{números}}$$

Com estes dois conjuntos podemos construir uma linguagem para as variáveis utilizando a união e o fechamento de Kleene.

$$L_{\text{var}} \subseteq \Sigma^*$$

Que podemos ler como L_{var} é um subconjunto de todas as *strings* que podem ser criadas com a união dos dois alfabetos definidos. O que inclui as *strings* vazias ε . Não parece ser uma boa ideia ter uma linguagem de programação com a possibilidade de termos identificadores, variáveis, que sejam *strings* vazias. Sendo assim:

$$L_{\text{var}} \subseteq \Sigma^+$$

O que garante que podemos ter identificadores, formados por *strings* do alfabeto Σ de qualquer comprimento, usando qualquer combinação de letras e números inteiros.

Neste ponto podemos fazer uma afirmação poderosa. Uma linguagem derivada de um alfabeto será considerada regular se puder ser definida por meio da *string* vazia e um conjunto finito de operações de união, concatenação e fechamento. Ao conjunto destas operações, capazes de determinar que uma determinada linguagem seja regular daremos o nome de *expressões regulares*.

Expressões regulares

Uma expressão regular é uma forma lógica e algébrica para representar uma linguagem formal, regular e complexa em termos de linguagens simples combinadas por meio dos operadores de união, concatenação e fechamento. Antes de nos aprofundarmos neste processo vamos melhorar um pouco a forma como lemos estas expressões:

- a) União: pode ser lida como e, e representada por $+$ ou \vee ;
- b) Concatenação: pode ser lida como “seguida por” ou “concatenado à”;
- c) Fechamento: pode ser lido por “tantas ... quanto desejado”;

Assim:

$$x \vee dc^*$$

Pode ser lido como: x e d seguido de quantos c desejarmos.

Exemplo 11:

Considere o alfabeto $k = \{0, 1\}$ a linguagem $L = \{0^j 1^k | m \geq 0, n \geq 0\}$, neste caso, podemos ler L como sendo a linguagem formada por *strings* de qualquer quantidade de zeros concatendos a qualquer quantidade de uns, ou seja:

$$L = \{\varepsilon, 0, 1, 00, 01, 10, 11, 000, \dots\}$$

Com um pouco de formalismo podemos definir uma linguagem regular R derivada de um alfabeto Σ se pudermos expressar esta linguagem a partir da aplicação de um conjunto finito de operações união, concatenação e fechamento sobre um conjunto de linguagens mais simples, que estejam contidas em R começando com a linguagem vazia \emptyset .

Expressões regulares são conjuntos diversos das operações de união, concatenação e fechamento em uma notação. Sendo assim, podemos afirmar que qualquer linguagem R derivada do alfabeto Σ será considerada regular se ela puder ser expressa apenas com as seguintes regras:

- a) \emptyset é uma expressão regular representa uma linguagem vazia $\{\}$;
- b) ε é uma expressão regular e representa uma linguagem com uma *string*, a *string* vazia $\{\varepsilon\}$;
- c) se $s \in \Sigma^*$, s é uma expressão regular e representa $>$ uma linguagem com apenas uma *string* $\{s\}$;
- d) Se R_1 e R_2 são expressões regulares então $R_1 \cup R_2$, é uma expressão regular que representa uma $>$ linguagem com todos os elementos de R_1 e R_2 ;
- e) Se R_1 e R_2 são expressões regulares então $R_1 R_2$, é $>$ uma expressão regular que representa uma linguagem resultante da $>$ concatenação de $R_1 R_2$;
- f) Se R é uma expressão regular então R^* é uma expressão $>$ regular.

Onde cada uma destas expressões regulares representa um conjunto contendo linguagens formais possíveis derivadas do mesmo alfabeto. O que pode ser facilmente percebido comparando-se estes itens com as afirmações feitas no

início da seção 2.21 indicando que expressões regulares são linguagens formais e regulares e vice-versa.

As expressões regulares são as ferramentas com as quais podemos criar linguagens regulares. Podemos traçar um paralelo com a aritmética. Na aritmética podemos utilizar as operações básicas para criar expressões, no mundo da linguagem computacional usamos as expressões regulares para criar linguagens. Ainda um pouco mais, podemos utilizar as expressões regulares para validar uma determinada linguagem ou *string*.

Precedência	Operador	Representação
Mais alta	Fechamento	x^*
Intermediária	Concatenação	$x \cdot y$ ou xy
Mais baixa	União	$x \mid y$ ou $x + y$

Tabela 3.1: Precedência dos operadores nas expressões regulares

Analizador léxico

Regularmente o Analizador Léxico é o primeiro módulo do processo de compilação e mesmo da interpretação. Contudo, algumas linguagens de programação como o *C* e o *C++* possuem um módulo anterior. O Pré-processador. Veremos o pré-processador logo assim que tivermos a base matemática necessária para

Material de apoio

Você pode baixar a versão em pdf desta aula clicando aqui

- Let α and β represent any regular expressions:
 - $\emptyset^* = \epsilon$
 - $\epsilon^* = \epsilon$
 - $(\alpha^*)^* = \alpha^*$
 - $\alpha^* \alpha^* = \alpha^*$
 - $(\alpha \cup \beta)^* = (\alpha^* \beta^*)^*$

Figure 2: Tela de celular com texto preto sobre fundo branco Descrição gerada automaticamente

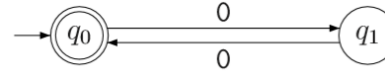
- If R is a regular expression, then
 - $R \cup \emptyset = R$
 - \emptyset is the identity for union
 - $\epsilon R = R \epsilon = R$
 - ϵ is the identity for concatenation
 - $\emptyset R = R \emptyset = \emptyset$
 - \emptyset is the “annihilator” for concatenation

Figure 3: Tela de celular com texto preto sobre fundo branco Descrição gerada automaticamente

3.1 Number of characters is even

Input: $\Sigma = \{0\}$.

Accept: all strings in which the number of characters is even.



3.2 Number of characters is divisible by 3

Input: $\Sigma = \{0\}$.

Accept: all strings in which the number of characters is divisible by 3.

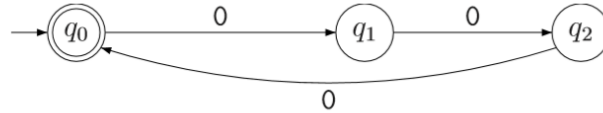


Figure 4: Tela de celular com texto preto sobre fundo branco Descrição gerada automaticamente

Obras Citadas

BARRAL, B. File:AnalyticalMachine Babbage London.jpg. Wikipedia, 2009. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AnalyticalMachine_Babbage_London.jpg#filelinks. Acesso em: 20 Fev. 2020. BERGIN, T. J. 50 Years of Army Computing from Eniac to MSRC. Aberdeen, MD. USA: Army Research Laboratory, 1996. BÖHM, C.; JACOPINI, G. Flow diagrams, turing machines and languages with only two formation rules. Communications of the ACM, v. 9, n. 5, p. 366-371, 1966. DAVIS, J. S. File:Commodore Grace M. Hopper, USN (covered).jpg. Wikipedia, 1984. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Commodore_Grace_M._Hopper,_USN_\(covered\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Commodore_Grace_M._Hopper,_USN_(covered).jpg). Acesso em: 20 Fev. 2020. DIJKSTRA, E. W. A Case against the GO TO Statement. Commun. ACM, v. 3, n. 1, p. 147-148, Mar. 1968. KNUTH, D. E. Structured programming with go to statements. ACM Computing Surveys (CSUR), v. 6, n. 4, p. 261-301, 1974. MENABREA, L. F. The Analytical Engine Invented by Charles Babbage. Fourmilab, 1842. Disponível em: <http://www.fourmilab.ch/babbage/sketch.html#NoteG>. Acesso em: 20 Fev. 2020. MICROSOFT. Microsoft Macro Assembler - Documentation. MSDN - Microsoft Developers Network, 2010. Disponível em: <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/assembler/masm/microsoft-macro-assembler-reference?view=vs-2019>. Acesso em: 01 Mar. 2020. NAUR, P. et al. Revised report on the algorithmic language Algol 60. Communications of the ACM, v. 6, n. 1, p. 1-17, 1963.

WIKIMEDIA COMMONS. File:JohnvonNeumann-LosAlamos.gif — Wikimedia Commons