UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

Colegiado de Ciência da Computação

Curso de Bacharelado em Ciência da Computação

Um estudo sobre bugs de concorrência em aplicações Go open-source

Trabalho de Conclusão de Curso

Alonso Lucca Fritz

Cascavel–PR

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

Colegiado de Ciência da Computação

Curso de Bacharelado em Ciência da Computação

Alonso Lucca Fritz

Um estudo sobre bugs de concorrência em aplicações Go open-source

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação, do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel.

Orientador(a): Marcio Seiji Oyamada

Cascavel–PR

2024

Lista de figuras

Lista de tabelas

Lista de códigos

Lista de abreviaturas e siglas

IaC	Infrastructure as Code - Infraestrutura como Código
SMTP	*Simple Mail Transfer Protocol* - Protocolo de Transferência de Correio Simples
POSIX	*Portable Operating System Interface* - Interface de Sistema Operacional Portátil
CSP	*Communicating Sequential Processes* - Comunicação de Processos Sequenciais Comunicantes

Sumário

1 Introdução

Com a evolução atual dos dispositivos de hardware, o hardware multi-core tornou-se uma realidade não somente para grandes corporações e servidores de ponta, mas também para computadores desktop, notebooks, tablets, smartphones e outros dispositivos que possuem mais de um núcleo de processamento. Conforme destacado por Posovszky (2020), as Unidades de Processamento Central (CPUs), popularmente conhecidos como processadores, têm experimentado incrementos significativos em sua capacidade computacional a cada iteração tecnológica nas últimas décadas. Ao longo dos últimos 40 anos, observou-se um aumento no desempenho dos microchips em um fator impressionante de 10.000 desde 1978. Esse avanço tecnológico suscitou a formulação de duas leis fundamentais, sendo a Lei de Escalonamento de Dennard, que postula a possibilidade de manter a queda atual de corrente/tensão e, ao mesmo tempo, preservar a confiabilidade entre circuitos integrados; e a Lei de Moore, que prevê a duplicação do número de transistores por chip a cada ano. Contudo, é importante notar que o aumento de desempenho por geração está diminuindo com cada novo desenvolvimento. A estagnação dessa curva de aumento de desempenho nos últimos 15 anos reflete o declínio das duas leis mencionadas. Em torno de 2004, o Escalonamento de Dennard chegou ao seu fim, e, mais recentemente, em 2011, a Lei de Moore foi demonstrada como não mais válida (HENNESSY; PATTERSON, 2011). A partir de 2010, fica evidente que o aumento no processamento de um núcleo específico está praticamente estagnado. Nesse contexto, a introdução de processadores com múltiplos núcleos paralelos tem se destacado como uma estratégia para conferir um impulso adicional de desempenho, contudo, isso só se concretiza se a aplicação for desenvolvida para execução paralela.

Consequentemente a quantidade de desenvolvimento de sistemas de software concorrentes aumentou, trazendo consigo a necessidade das empresas por desenvolver sistemas que utilizem ao máximo os recursos disponíveis dos dispositivos, dessa forma a computação concorrente tem se tornado crucial para se aproveitar da evolução do hardware. Porém escrever programas concorrentes não é trivial e essa complexidade tem atingido a comunidade de desenvolvimento de software, desde que escrever programas concorrentes de boa qualidade e corretos tornou-se

importante (STOICA et al., 2014).

Escrever programas concorrentes corretamente não somente é difícil, como a maioria dos programadores pensam de forma sequencial, portanto, cometem erros facilmente ao escrever programas concorrentes, além disso a natureza não determinística torna extremamente difícil para os desenvolvedores detectarem, diagnosticarem e corrigirem bugs relacionados. Estes chamados bugs de concorrência, são causados por problemas de sincronização em software multithread e podem causar bilhões de dólares em perdas econômicas, tornando-se uma ameaça à confiabilidade do uso de softwares multithread (LU et al., 2008).

Estudos software de código aberto realizados por Lu et al. (2008) mostraram que geralmente leva vários meses para os desenvolvedores corrigirem corretamente os bugs de concorrência. Além disso, os bugs de concorrência são os mais difíceis de corrigir corretamente entre os tipos de bugs comuns (YIN et al., 2011), com muitos patches incorretos lançados. Partindo deste ponto podemos dizer que desenvolver programas concorrentes de forma correta é um desafio que ainda necessita de conhecimento e avanços em diversos cenários, incluindo entre eles a detecção de bugs de concorrência, teste e verificação de modelo de programas concorrentes e o design de uma linguagem de programação concorrente.

Algumas linguagens entretanto passaram por diversas adaptações para então poder disponibilizar o conjunto de ferramentas necessárias para o desenvolvimento concorrente, desde que inicialmente essas linguagens não nasceram com esse tema específico em mente. A linguagem Java criou um modelo de green threads, um tipo de mecanismo de concorrência que facilita o uso de fluxos concorrentes, sem utilizar múltiplos processadores, e só depois disponibilizou threads nativas do Java (ORACLE, 2000). C++ disponibilizou uma biblioteca própria de threads apenas na versão de 2011, antes tendo de utilizar threads POSIX, ou a biblioteca pthreads do C (ISO, 2011). A linguagem Python, por exemplo, passou a oferecer os recursos de *async/await*, que permite a escrita de códigos assíncronos, com o lançamento da versão 3.5, em setembro de 2015 (PRANSKEVICHUS; SELIVANOV, 2015), estes são alguns exemplos de adaptações realizadas pelas linguagens para atenderem as necessidades atuais de hardware.

A linguagem Go, originalmente desenvolvida pelo Google em 2009 (GO, 2023), tem conquistado rapidamente seu espaço na indústria de software, segundo pesquisa realizada por StackOverflow (2023) 13,24% dos desenvolvedores de todo o mundo codam em Go. Sendo uma linguagem adotada em uma ampla gama de aplicações, desde bibliotecas como gRPC (GOOGLE, 2023) e softwares de alto nível como clientes SMTP (HECTANE, 2023), sistemas de infraestrutura como serviço, também conhecido como IaaS (TERRAFORM, 2023), bancos de dados (LABS, 2023a) até sistemas de infraestrutura em nuvem, como sistemas de contêineres (DOCKER, 2023a). Uma das propostas fundamentais do Go é simplificar e tornar mais segura a programação concorrente, buscando soluções que minimizem os erros nesse contexto, sendo esse o foco de nossa pesquisa.

Um dos principais objetivos do design da linguagem Go é aprimorar a programação

concorrente em comparação com as linguagens tradicionais multithreaded. Para alcançar esse objetivo, o Go concentra seu design de concorrência em dois princípios essenciais: primeiramente tornar as threads, chamadas goroutines, leves e de fácil criação; e em segundo adotar o uso de mensagens explícitas, conhecidas como canais, para facilitar a comunicação entre essas threads. Esses princípios fundamentais não apenas introduzem novas primitivas e bibliotecas de concorrência, mas também promovem uma reinterpretação das semânticas já existentes (TU et al., 2019).

Compreender o impacto dessas novas primitivas e mecanismos de concorrência do Go em relação aos bugs de concorrência é crucial. Esses tipos de bugs são notoriamente complexos de diagnosticar e têm sido amplamente estudados em linguagens de programação tradicionais multithread. Tu et al. (2019), realizou um estudo sobre bugs de concorrência na linguagem Go, nas seguintes aplicações open-source: Docker, Kubernetes, gRPC, etcd, CockroachDB e BoltDB. Conforme o autor avaliou, existe uma incerteza se os mecanismos de concorrência realmente tornam a programação em Go mais acessível e menos propensa a erros de concorrência quando comparada às abordagens tradicionais.

Os bugs foram coletados realizando uma busca nos repositórios *open-source* de projetos populares em Go verificando a recorrencia de bugs de concorrência. Assim como feito por Tu et al. (2019) e Lu et al. (2008), o objetivo desse trabalho não é corrigir bugs de concorrência, mas sim estudar e classificar quais os fatores que ocasionaram o bugs, quais as caracteristicas necessárias para sua manifestação e como ele foi corrigido.

1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho é uma mesclagem dos estudos realizados por Tu et al. (2019), uma pesquisa sobre bugs de concorrência na linguagem Go em aplicações de mundo real, propondo uma nova taxonomia, ou forma de classificar os bugs de concorrência considerando o design da linguagem, além de colocar em pauta a discussão entre memória compartilhada e a passagem de mensagem na programação concorrente buscando entender se a linguagem realmente cumpre a promessa de simplificar e tornar mais segura a programação concorrente; e por Lu et al. (2008) que realizou um estudo sobre bugs de concorrência em aplicações que utilizavam linguagem C, sua metodologia concentra seu estudo em três principais aspectos: padrão de bug, condições de manifestação e estratégia de correção de bugs. Será realizado um estudo sobre os bugs de concorrência na linguagem de programação Go, e em como suas primitivas e mecanismos de concorrência afetam de alguma forma os bugs de concorrência em aplicações open source como Docker (DOCKER, 2023a), Terraform (TERRAFORM, 2023) e CockroachDB (LABS, 2023a). Go é uma linguagem que possui estruturas tanto para memória compartilhada quanto passagem de mensagens, no entanto ele incentiva o uso de canais em vez de memória compartilhada, considerando assim a passagem explícita de mensagens menos propensa a erros, assim como proposto por Tu et

al. (2019) podemos olhar para uma questão antiga e fundamental da programação concorrente, qual dos mecanismos de comunicação entre threads é menos propenso a erros, passagem de mensagens ou memória compartilhada.

O foco principal deste trabalho é investigar como os mecanismos de concorrência do Go impactam a ocorrência e a natureza dos bugs de concorrência, bem como identificar e classificar seu comportamento, causa, condições de manifestação e estratégias de correção. A pesquisa visa aprofundar a compreensão bugs em aplicações concorrentes de mundo real em Go, em entender, se implementações em Go realmente tornam mais segura e simples a programação concorrente; e qual a relação da utilização de passagem explícita de mensagens e da memória compartilhada com a propensão a bugs de concorrência, com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento de software mais confiável, e até no desenvolvimento e aprimoramento de ferramentas de diagnósticos eficazes tanto para essa linguagem quanto para bugs de concorrência de forma geral.

1.2 Objetivos Específicos

- Definir aplicações Open Source a serem utilizadas como fonte de pesquisa para Bugs;
- Identificar e Selecionar os Bugs de concorrência em repositórios de aplicações open-source, segundo palavras chave definidas;
- Entender a taxonomia de bugs proposta por Tu et al. (2019), e aplica-la aos bugs selecionados
- Compreender as causas raiz dos bugs de concorrência identificados, incluindo o uso inadequado das primitivas de concorrência do Go;
- Investigar as issues, tempos de resposta e solução para problemas de concorrência encontrados;
- Analisar os padrões comuns de erro relacionados à concorrência observados nas aplicações open-source estudadas;
- Fornecer orientações e boas práticas para desenvolvedores e pesquisadores que desejam escrever código Go mais confiável e criar ferramentas de depuração e diagnóstico de bugs de concorrência mais eficazes para essa linguagem;
- Contribuir para o avanço do conhecimento sobre programação concorrente em Go e aprimorar a compreensão dos desafios e das soluções associados à concorrência nessa linguagem.

Falta um paragrafo ou seção descrevendo organização dos capitulos do trabalho

2

Fundamentação Teórica e Trabalhos relacionados

Esta seção fornece uma contextualização sobre a linguagem Go, seus mecanismos de concorrência, incluindo seu modelo de *thread*, métodos de comunicação entre *threads*, mecanismos e outras primitivas relacionadas a sincronização de *threads*. Fornece também informações importantes com relação aos paradigmas tradicionais de concorrência, bem como seus bugs e principais definições e bugs conhecidos. E por fim é apresentado brevemente as três aplicações em Go selecionadas para estudo.

2.1 A linguagem de programação Go

Bugs de concorrência representam desafios significativos para o desenvolvimento e a confiabilidade de sistemas de software. No âmbito de linguagens de programação projetadas para enfrentar tais desafios, o Go, também conhecido como Golang, surgiu como uma ferramenta poderosa e eficiente para programação concorrente. Esta introdução fornece uma breve visão geral da linguagem de programação Go, destacando seus princípios de design, recursos e contexto histórico, estabelecendo as bases para a exploração subsequente de bugs de concorrência em aplicativos Go de código aberto.

Go é uma linguagem de propósito geral explicitamente criada com programação de sistemas em mente (PIKE, 2023g). Desenvolvido como um projeto de código aberto, o Go tem como objetivo aprimorar a produtividade do programador, oferecendo uma linguagem expressiva, concisa e eficiente, com forte suporte para programação concorrente (PIKE, 2023a). A linguagem é fortemente tipada, possui coleta de lixo e utiliza uma sintaxe direta que permite análise fácil, tornando-a propícia para análises automáticas por ferramentas como ambientes de desenvolvimento integrado (PIKE, 2023b).

Programas em Go são construídos a partir de pacotes, facilitando a gestão eficiente de dependências. Os princípios de design do Go buscam inspiração na família C em termos de

sintaxe básica, com influências adicionais da família Pascal/Modula/Oberon para declarações e pacotes, e ideias de linguagens inspiradas por Processos Sequenciais Comunicantes (CSP), como Newsqueak e Limbo, para concorrência (PIKE, 2023e).

A linguagem de programação Go, apresentada ao público como um projeto de código aberto em 2009, angariou uma comunidade ampla de desenvolvedores chamados "gophers"(PIKE, 2023d). Seu sucesso superou as expectativas iniciais, tornando-se a linguagem de escolha para inúmeros programadores em todo o mundo (PIKE, 2023d).

Notavelmente, o Go possui uma extensa biblioteca de tempo de execução, integrada a cada programa Go. Essa biblioteca implementa recursos críticos, como coleta de lixo, concorrência e gerenciamento de pilhas (PIKE, 2023h). É essencial esclarecer que o tempo de execução do Go difere de ambientes tradicionais de máquinas virtuais, já que os programas Go são compilados antecipadamente para código nativo da máquina (**??**).

O Go enfrenta os desafios da concorrência construindo sobre as ideias de CSP (PIKE, 2023e). Este modelo enfatiza interfaces de nível mais alto para simplificar o código, desviando da complexidade associada a detalhes de baixo nível, como mutexes e barreiras de memória. As primitivas de concorrência do Go, inspiradas pelo CSP, incluem o conceito inovador de canais como objetos de primeira classe (PIKE, 2023e).

A linguagem de programação Go, com suas raízes na família C e influências do CSP, oferece uma abordagem única para a programação concorrente. Seus princípios de design, sistema de tempo de execução eficiente e ênfase na simplicidade contribuem para sua popularidade entre os desenvolvedores. As seções subsequentes desta irão explorar as características, e primitivas que dão suporte ao diferencial da programação concorrente (PIKE, 2023c).

2.2 Concorrência

O conceito de concorrência na computação está associado à ideia de independência da ordem de execução entre programas, onde fluxos distintos não possuem uma dependência causal entre si, permitindo que sejam considerados como fluxos concorrentes (LAMPORT, 2019). A palavra "concorrência"pode ter diferentes interpretações para aqueles na área de computação, sendo algumas vezes utilizada de forma intercambiável com termos como "assíncrono", "paralelo"ou "*threaded*". Alguns consideram essas variações como tendo os mesmos significados, enquanto outros as consideram inteiramente distintas entre si (COX-BUDAY, 2017). A programação concorrente tem tido cada vez de mais importância na ciência da computação, destacando sua complexidade, desafios e a necessidade de um estudo cuidadoso. Segundo Cox-Buday (2017) apesar dos desafios, a linguagem de programação Go oferece primitivas de concorrência que prometem tornar os programas mais claros e eficientes.

Entretanto, o código concorrente é conhecido por ser notoriamente difícil de ser desenvol-

vido corretamente, muitas vezes exigindo iterações para alcançar o funcionamento esperado. Bugs em códigos concorrentes podem permanecer não detectados por longos períodos, sendo revelados apenas quando ocorrem mudanças nas condições temporais, como aumento na utilização de disco ou maior número de usuários no sistema. A comunidade científica, ciente desses desafios, identificou questões comuns relacionadas ao código concorrente, possibilitando discussões sobre como esses problemas surgem, por que ocorrem e como podem ser solucionados (COX-BUDAY, 2017).

2.2.1 Processos

Em um sistema operacional, a representação de um programa em execução é denominada processo. Essa abstração possibilita a execução simultânea de vários processos no mesmo sistema, aparentando que cada um tem uso exclusivo do *hardware*. O conceito de simultaneidade refere-se à intercalação de instruções entre processos, sendo que, na maioria dos sistemas, há mais processos para execução do que núcleos disponíveis. Nos sistemas tradicionais, apenas um programa era executado de cada vez, ao passo que processadores *multicore* mais modernos têm a capacidade de executar diversos processos ou *threads* simultaneamente. Mesmo em um único núcleo, a ilusão de execução simultânea entre processos é obtida por meio da troca de contexto, um mecanismo operado pelo sistema operacional (BRYANT; O'HALLARON, 2011). Essa flexibilidade no uso de threads dentro de um processo destaca a adaptação dos sistemas operacionais modernos para atender às demandas de eficiência e concorrência na execução de programas.

Em sistemas operacionais contemporâneos, cada processo é alocado em um espaço de memória exclusivo, prevenindo assim problemas de integridade dos dados do programa, uma vez que cada processo possui seu próprio espaço de endereçamento. O sistema operacional desempenha o papel de fornecer e proteger esse espaço de memória contra acessos indevidos por outros processos. A comunicação com dispositivos ocorre frequentemente por meio de chamadas de sistema, operações realizadas por um processo para requisitar ao sistema operacional a execução de uma tarefa específica, como desenhar um ponto na tela (TANENBAUM; FILHO, 2016).

Além disso, os processos em sistemas operacionais modernos não são a menor abstração de um fluxo de execução, uma vez que podem conter uma ou mais threads, fluxos de execução independentes. Threads compartilham o espaço de memória e código de um processo, mas cada uma possui seus próprios registradores e ponteiros de instrução. Embora compartilhem dados, as threads não interferem umas nas outras, garantindo a independência de execução. A criação e o gerenciamento de threads são responsabilidades do sistema operacional, que provê recursos como espaço de memória e registradores, além de controlar a execução das threads (TANENBAUM; FILHO, 2016).

2.2.2 *Threads*

Em sistemas operacionais modernos, o conceito de processo evoluiu para além de um único fluxo de controle, permitindo que um processo consista em múltiplas unidades de execução conhecidas como threads. As threads operam no contexto do processo, compartilhando o mesmo código e dados globais. Essa abordagem destaca a importância crescente das threads como um modelo de programação vital, especialmente diante da necessidade de concorrência em servidores de rede, por exemplo (BRYANT; O'HALLARON, 2011).

A relevância das threads é evidenciada pela facilidade de compartilhamento de dados entre elas, comparado com a complexidade de compartilhar dados entre processos distintos. Além disso, as threads, em geral, são mais eficientes que processos isolados. O uso de multi-threading não apenas atende à demanda por concorrência, mas também representa uma estratégia para acelerar a execução de programas em sistemas com múltiplos processadores disponíveis (TANENBAUM; FILHO, 2016).

Atualmente podemos destacar dois tipos principais de threads, sendo elas as kernel threads e as chamadas user-space threads, ou threads de espaço de usuário. A diferença essencial entre elas está no detentor da responsabilidade pela coordenação de execução de fluxos. Sendo para as kernel threads, o sistema operacional é o responsável por essa gerência, é comum em sistemas UNIX e Windows essas threads serem do padrão POSIX. Enquanto para as de espaço de usuário, um programa criado por um usuário que é o responsável por essa gerência, não tendo uma visão global que o sistema operacional possui, como exemplo conhecido podemos citar a máquina virtual do Java com o recurso de green threads, outro exemplo, importante para esse trabalho é o escalonador de Go, que gerencia as *goroutines* (TANENBAUM; FILHO, 2016), mostradas em subseção 2.3.1.

2.2.3 Condição de Corrida

Em um contexto de abstração para threads, uma condição de ocorrida ocorre sempre que um programa depende de uma thread atingir um objetivo x em seu fluxo de controle antes que outra thread atinja o objetivo y (BRYANT; O'HALLARON, 2011). E como iremos trabalhar com Go, dentro desse contexto pode-se considerar que uma condição de corrida ocorre quando o programa não fornece o resultado correto para algumas intercalações das operações de múltiplas *goroutines* (DONOVAN; KERNIGHAN, 2015).

No contexto geral então uma condição de corrida ocorre quando duas ou mais operações devem ser executadas em uma ordem correta, mas o programa não foi escrito de forma a garantir que essa ordem seja mantida, se manifestando no que é chamado de corrida de dados, onde uma operação concorrente tenta ler uma variável enquanto, em um determinado momento, outra operação concorrente tenta escrever na mesma variável (COX-BUDAY, 2017).

Um exemplo é a maneira mais clara de entender a natureza desse problema, considerando

o Código 1. O termo *go* é utilizado para executar uma função concorrentemente, dessa maneira ao fazer isso é criado o que é denominado como *goroutines*, discutido em maior detalhes em subseção 2.3.1. Dessa maneira nas linhas 16 e 17 são criadas duas *goroutines* que incrementam uma variável compartilhada chamada *counter* em um *loop*. A função *main* utiliza *sync.WaitGroup* para garantir que as duas *goroutines* concluam antes de imprimir o valor final de *counter*, isso é discutido em detalhes na subseção 2.3.2.1.

Código 1 – Exemplo de Condição de Corrida

```
1  var counter int
2  var wg sync.WaitGroup
3
4  func main() {
5    runtime.GOMAXPROCS(2)
6    wg.Add(2)
7
8    go incrementCounter()
9    go incrementCounter()
10
11   wg.Wait()
12   fmt.Println("Final Counter:", counter)
13 }
14
15 func incrementCounter() {
16   defer wg.Done()
17   for i := 0; i < 1000000; i++ {
18     // Critic! Race condition here!
19     counter++
20   }
21 }
```

A condição de corrida ocorre porque duas *goroutines* estão concorrendo para acessar e modificar a variável counter sem uma sincronização adequada. Sendo esta uma situação em que o comportamento do programa depende da ordem de execução das threads ou *goroutines*.

Ambas as *goroutines* estão incrementando counter simultaneamente sem qualquer mecanismo de sincronização, o que pode resultar em leituras e gravações concorrentes na variável compartilhada.

Na maioria das vezes, as corridas de dados são introduzidas porque os desenvolvedores estão pensando no problema de forma sequencial assumindo que, porque uma linha de código está antes de outra, ela será executada primeiro (COX-BUDAY, 2017). De forma mais específica ocorre porque os desenvolvedores assumem que as threads seguirão alguma trajetória específica pelo espaço de estados de execução, esquecendo a regra fundamental de que programas com threads devem funcionar corretamente para qualquer trajetória viável (BRYANT; O'HALLARON, 2011).

Condições de corrida são perigosas porque podem permanecer latentes em um programa e aparecer raramente, talvez apenas sob carga intensa ou ao usar determinados compiladores,

plataformas ou arquiteturas. Isso torna difícil reproduzi-las e diagnosticá-las (DONOVAN; KERNIGHAN, 2015).

2.2.4 *Deadlocks*

Um cenário de deadlock ocorre quando todos os processos concorrentes aguardam uns aos outros. Nesse estado, o programa torna-se irrecuperável sem intervenção externa (COX-BUDAY, 2017). O tempo de execução (*runtime*) do Go faz tentativas de detectar alguns *deadlocks*, nos quais todas as *goroutines* devem estar bloqueadas ou "adormecidas" (Golang Team, 2023). No entanto, essa abordagem não oferece uma solução abrangente para prevenir *deadlocks*.

Para uma compreensão mais clara do que constitui um deadlock, o Código 2 apresenta um exemplo de deadlock devido à possibilidade de duas *goroutines* ficarem bloqueadas uma esperando pela outra.

Código 2 – Exemplo de *Deadlock*. Adaptado de (COX-BUDAY, 2017).

```
1  type value struct {
2    mu    sync.Mutex
3    value int
4  }
5  var wg sync.WaitGroup
6  printSum := func(v1, v2 *value) {
7    defer wg.Done()
8    v1.mu.Lock()
9    defer v1.mu.Unlock()
10
11   time.Sleep(2 * time.Second)
12   v2.mu.Lock()
13   defer v2.mu.Unlock()
14   fmt.Printf("sum=%v\n", v1.value+v2.value)
15 }
16 var a, b value
17 wg.Add(2)
18 go printSum(&a, &b)
19 go printSum(&b, &a)
20 wg.Wait()
```

Analisando as sessões críticas segundo Cox-Buday (2017):

- **Linha 8**: Aqui tentamos entrar na seção crítica, a *goroutine* adquire a trava (*lock*) do *mutex* associado à estrutura v1. Isso significa que ela está bloqueando o acesso a qualquer outra *goroutine* que tente adquirir o mesmo *mutex*. No entanto, observe que a *goroutine* também chama v2.mu.Lock() (linha 11) mais tarde no código.
- **Linha 9**: O uso de *defer* garante que o *mutex* seja desbloqueado mesmo se ocorrer uma exceção ou se a função retornar. Neste caso, a *goroutine* desbloqueia o *mutex* associado a v1 quando a função *printSum* é concluída, portanto usamos a instrução *defer* para sair da seção crítica antes que *printSum* retorne.

- **Linha 11**: Este é um atraso de 2 segundos adicionado intencionalmente para simular trabalho, aumentando as chances de ocorrer um deadlock. Durante esse tempo, a primeira *goroutine* ainda mantém o lock de v1, mas está prestes a solicitar o lock para v2.
- **Linha 12**: A segunda *goroutine* tenta adquirir o lock para o mutex associado a v2. No entanto, este mutex está atualmente bloqueado pela primeira *goroutine*.

O que ocorre em suma é que a primeira chamada para *printSum* trava v1 e, em seguida, tenta travar v2, mas enquanto isso, a segunda chamada para *printSum* travou v2 e tentou travar v1, dessa forma ambas as *goroutines* esperam uma pela outra infinitamente. Dessa forma fica muito claro que estamos lidando com um *deadlock*, mas para validarmos um *deadlock* devemos cumprir quatro condições, conhecidas como Condições Coffman, sendo elas a base para técnicas de detecção, prevenção e correção de *deadlocks*. Sobre as Condições de Coffman segundo Cox-Buday (2017).

1. **Exclusão Mútua:** Um processo concorrente detém direitos exclusivos sobre um recurso em qualquer momento.
2. **Condição de Espera:** Um processo concorrente deve simultaneamente deter um recurso e estar aguardando por um recurso adicional.
3. **Não Preempção:** Um recurso detido por um processo concorrente só pode ser liberado por esse processo.
4. **Espera Circular:** Um processo concorrente (P1) deve estar aguardando em uma cadeia de outros processos concorrentes (P2), que, por sua vez, estão aguardando por ele (P1).

Ao analisar o Código 2 por essa perspectiva:

1. A função printSum requer direitos exclusivos tanto para "v1"quanto para "v2", portanto, ela atende a condição de exclusão mútua.
2. Como printSum mantém a posse de "v1"ou "v2"e está aguardando pelo outro, temos a condição de espera.
3. Não existe nenhuma maneira para que as *goroutines* sejam preemptadas
4. A primeira chamada de printSum está aguardando a segunda chamada, a recíproca também é verdadeira, portanto temos a espera circular.

Essas condições permite não apenas identificar mas também evitar deadlocks ao garantir que ao menos uma das Condições de Coffman não seja verdadeira, supostamente é evitado o *bug* relacionado a *deadlocks*, porém na prática essas condições se mostram difíceis de serem analisadas e prevenidas (COX-BUDAY, 2017).

2.2.5 Sincronização por Memória Compartilhada

A memória compartilhada, uma técnica de sincronização concorrente em Go, permite que múltiplas *goroutines* acessem simultaneamente a mesma variável ou recurso, evitando a sobrecarga de comunicação entre elas. Para implementar a memória compartilhada em Go, utilizam-se estruturas como *channels* e *mutexes*. *Channels* possibilitam comunicação assíncrona entre *goroutines*, enquanto *mutexes* protegem o acesso exclusivo a recursos compartilhados. Contudo, essa eficiente técnica é mais propensa a condições de corrida. Por outro lado, a passagem de mensagens, uma alternativa que envolve o envio de mensagens entre *goroutines*, é menos propensa a race conditions, mas pode apresentar menor eficiência em termos de desempenho. A escolha entre essas técnicas é crucial, e a análise de Tu et al. (2019) sobre 171 bugs de concorrência em Golang destaca a importância de usar a memória compartilhada com cautela, visto que a maioria dos bugs identificados estava relacionada a race conditions (TU et al., 2019).

O Go oferece suporte a acessos tradicionais à memória compartilhada, proporcionando primitivas de sincronização como Mutex, RWMutex, Cond e atomic. O RWMutex no Go difere da implementação pthread_rwlock_t em C, conferindo maior privilégio a solicitações de trava de escrita. Introduzindo a primitiva "Once", o Go assegura que uma função seja executada apenas uma vez, sendo valioso para a inicialização única de variáveis compartilhadas por várias *goroutines*. Além disso, o "WaitGroup"é empregado para permitir que múltiplas *goroutines* concluam seus acessos a variáveis compartilhadas antes que uma *goroutine* de espera prossiga. Contudo, o uso inadequado do WaitGroup pode resultar em bugs de bloqueio e não-bloquentes (TU et al., 2019). Essas ferramentas oferecidas pelo Go refletem a preocupação em equilibrar eficiência e segurança em ambientes concorrentes.

2.2.6 Sincronização por Passagem de Mensagem

A sincronização por passagem de mensagem é uma técnica de sincronização de threads que utiliza a troca de mensagens entre threads para garantir a consistência de dados (TU et al., 2019). Essa técnica é baseada no princípio de que threads só podem acessar dados compartilhados se receberem uma mensagem autorizando-os a fazê-lo.

Uma das vantagens da sincronização por passagem de mensagem é que ela é mais segura do que a sincronização por memória compartilhada, pois reduz a possibilidade de condições de corrida (CORMEN et al., 2009). Isso ocorre porque, nesta sincronização, as threads só podem acessar dados compartilhados se receberem uma mensagem autorizando-os a fazê-lo. Isso elimina a possibilidade de um thread acessar dados compartilhados que estão sendo modificados por outro thread.

Outra vantagem da sincronização por passagem de mensagem é que ela é mais flexível do que a sincronização por memória compartilhada (CORMEN et al., 2009). Isso ocorre porque, na sincronização por passagem de mensagem, os threads podem trocar mensagens de qualquer

tipo, incluindo dados estruturados complexos. Isso permite que os threads compartilhem dados de forma mais eficiente e flexível.

No entanto, a sincronização por passagem de mensagem também apresenta algumas desvantagens. Uma das desvantagens é que ela pode ser menos eficiente do que a sincronização por memória compartilhada. Isso ocorre porque, na sincronização por passagem de mensagem, os threads precisam trocar mensagens para acessar dados compartilhados. Essa troca de mensagens pode adicionar overhead ao sistema (TANENBAUM; FILHO, 2016).

Outra desvantagem da sincronização por passagem de mensagem é que ela pode ser mais complexa do que a sincronização por memória compartilhada. Isso ocorre porque, na sincronização por passagem de mensagem, os desenvolvedores precisam implementar mecanismos para gerenciar a troca de mensagens entre threads (TANENBAUM; FILHO, 2016).

2.3 Concorrência em Go

A importância da concorrência no cenário computacional contemporâneo, especialmente no contexto de máquinas multicore e servidores web lidando com múltiplos clientes. Go, como linguagem, merece atenção ao incorporar uma variante da comunicação de processos sequenciais (CSP) com canais de primeira classe. A adoção do CSP é motivada não apenas pela familiaridade de um dos projetistas da linguagem, mas também pela sua integração fácil a um modelo de programação procedural sem exigir mudanças profundas na estrutura da linguagem. Essa composição de funções executando de forma independente dentro de código procedural regular permite que o Go una a concorrência à computação. (PIKE, 2012).

Embora o modelo de concorrência do Go prove ser vantajoso para cenários típicos, ele vem com uma ressalva significativa: o Go não é puramente seguro em termos de memória na presença de concorrência. A linguagem permite compartilhamento, incluindo a passagem de ponteiros por canais, o que é tanto idiomático quanto eficiente. Apesar de alguma decepção por parte de especialistas em concorrência e programação funcional que esperavam uma abordagem de escrita única para semântica de valor, semelhante a linguagens como Erlang, as escolhas de design do Go priorizam a familiaridade e adequação ao domínio do problema. A linguagem promove programação concorrente simples e segura, confiando em convenções e treinamento para incentivar programadores a adotar um paradigma de passagem de mensagens como uma forma de controle de propriedade. O lema "Não se comunique compartilhando memória, compartilhe memória se comunicando"encapsula a abordagem do Go, promovendo simplicidade e robustez em software de rede concorrente (PIKE, 2012).

2.3.1 *Goroutines*

Goroutines, fundamentais no Go, simplificam o uso de concorrência ao serem funções que operam de maneira independente ou coroutines, multiplexadas em um conjunto de threads. O

sistema de tempo de execução, conforme destacado por Pike (2023f), gerencia automaticamente situações de bloqueio, movendo coroutines entre threads, garantindo eficiência na utilização dos recursos do sistema.

No sentido de atingir eficiência, o tempo de execução do Go implementa pilhas redimensionáveis e limitadas para *goroutines*. A dinâmica de ajuste do tamanho da pilha possibilita a criação de inúmeras *goroutines* com uma quantidade moderada de memória. Essa escolha de design diferencia as *goroutines* das threads tradicionais, contribuindo para a reputação do Go como uma linguagem que facilita a programação escalável e concorrente, conforme destacado por Pike (2023f).

Goroutines, sendo unidades fundamentais de organização em programas Go, merecem compreensão aprofundada. Todo programa Go, ao iniciar, possui pelo menos uma *goroutine*, denominada *goroutine* principal, automaticamente criada e iniciada durante o processo (COX-BUDAY, 2017). A criação de novas *goroutines* é realizada pela instrução go, que, sintaticamente, precede uma chamada de função ou método comum, levando à execução da função em uma *goroutine* recém-criada (DONOVAN; KERNIGHAN, 2015).

A definição de *goroutines* em Go, como atividades executadas concorrentemente, difere de um programa sequencial, onde chamadas para diferentes funções ocorrem de maneira linear. Donovan e Kernighan (2015) introduzem a ideia de que, em um programa concorrente com duas ou mais *goroutines*, chamadas para diferentes funções podem estar ativas simultaneamente, proporcionando novas possibilidades de execução.

Goroutines, é uma característica distintiva do Go, diferenciam-se por não serem threads do sistema operacional e também por não serem green threads, que são threads gerenciadas pelo tempo de execução de uma linguagem. Elas representam um nível mais elevado de abstração conhecido como coroutines. As coroutines, por sua vez, são sub-rotinas concorrentes, como funções, closures ou métodos em Go, caracterizadas pela não preempção, ou seja, não podem ser interrompidas. Coroutines proporcionam vários pontos ao longo dos quais é possível a suspensão ou reentrada (COX-BUDAY, 2017). Embora a sintaxe para lançar *goroutines* seja semelhante à chamada de threads em outras linguagens, Donovan e Kernighan (2015) esclarecem que as diferenças entre threads e *goroutines* são predominantemente quantitativas.

O Código 3, representa uma simples de utilização de *goroutines* em Go. Este exemplo cria duas *goroutines* anônimas usando a palavra-chave go antes de uma função anônima. A função printMessage é chamada em cada *goroutine* para imprimir uma mensagem específica. A sync.WaitGroup é usada para aguardar a conclusão de ambas as *goroutines* antes de sair da função main. Isso garante que a função main aguarde a conclusão de todas as *goroutines* antes de terminar.

As duas *goroutines* são criadas de forma concorrente para executar as funções anônimas que chamam printMessage. A utilização de *defer* wg.Done() garante que o contador do WaitGroup

Código 3 – Exemplo de *Goroutine*

```
func main() {
  var wg sync.WaitGroup
  wg.Add(2)

  go func() {
    defer wg.Done()
    printMessage("Hello from Goroutine 1")
  }()

  go func() {
    defer wg.Done()
    printMessage("Hello from Goroutine 2")
  }()

  wg.Wait()
  fmt.Println("Main function exiting")
}

func printMessage(message string) {
  fmt.Println(message)
}
```

seja decrementado quando as *goroutines* terminam.

Ao executar esse código, você verá mensagens "Hello from Goroutine 1"e "Hello from Goroutine 2"sendo intercaladas na saída, demonstrando a execução concorrente das *goroutines*.

A singularidade das *goroutines* no Go está relacionada à sua profunda integração com o tempo de execução da linguagem. Ao contrário de outras implementações, as *goroutines* não especificam seus próprios pontos de suspensão ou reentrada. O tempo de execução do Go monitora dinamicamente o comportamento em tempo de execução das *goroutines*, suspendendo-as automaticamente quando bloqueadas e retomando-as quando desbloqueadas. Isso as torna, de certa forma, preemptivas, mas apenas nos pontos específicos em que a *goroutine* fica bloqueada. Essa colaboração eficaz entre o tempo de execução e a lógica de uma *goroutine* as configura como uma classe especial de coroutine (COX-BUDAY, 2017).

2.3.2 Pacote *Sync*

O pacote *sync* contém as primitivas de concorrência mais úteis para a sincronização de acesso à memória em um nível mais baixo, como *locks* de exclusão mútua com exeção dos tipos *Once* e *WaitGroup*. Sincronização em níveis mais altos é mais bem realizada através de canais de comunicação (PIKE, 2023h). Go construiu um novo conjunto de primitivas de concorrência sobre as primitivas de sincronização de memória compartilhada, fornecendo assim um conjunto maior de elementos para trabalhar, essas operações têm seu uso, principalmente em escopos pequenos, como uma *struct*, cabendo assim ao projetista decidir quando a sincronização por memória compartilhada é apropriada (COX-BUDAY, 2017).

Quando a modelagem por troca de mensagem se mostra difícil e complexa, o Go oferece recursos clássicos, tais como mutexes e semáforos, por meio da biblioteca sync (COX-BUDAY, 2017). Além disso, a biblioteca sync disponibiliza outras estruturas que podem ser usadas de maneira complementar aos canais (channels) e *goroutines*.

2.3.2.1 *WaitGroup*

O mecanismo de WaitGroup no Go oferece uma forma eficaz de coordenar a execução de *goroutines*, permitindo que a *goroutine* principal aguarde a conclusão de um conjunto específico delas. Conforme descrito por Pike (2023h), a principal funcionalidade da WaitGroup envolve a chamada do método Add para definir o número de *goroutines* a serem aguardadas, seguido por cada *goroutine* chamando o método Done quando conclui sua execução. A utilização do método Wait possibilita que a *goroutine* principal bloqueie sua execução até que todas as *goroutines* tenham sido finalizadas.

Conforme sugerido por Cox-Buday (2017), o WaitGroup se destaca como uma ferramenta valiosa para a espera de operações concorrentes quando o resultado dessas operações não é relevante ou quando existem outros meios de coletar esses resultados. No entanto, se essas condições não forem atendidas, a autora recomenda o uso de canais e uma instrução select como uma alternativa. A versatilidade e utilidade do WaitGroup são evidentes, justificando sua apresentação como um recurso fundamental no desenvolvimento de aplicações concorrentes em Go.

O Código 4 demonstra um exemplo básico de como utilizar o WaitGroup to aguardar a finalização de *goroutines*.

Na função principal (main), declaramos uma variável do tipo sync.WaitGroup chamada wg. Essa variável é crucial para sincronizar a execução entre a função principal e as *goroutines*, permitindo que a função principal aguarde a conclusão de todas as *goroutines* antes de encerrar.

Adicionamos 2 ao contador do WaitGroup, indicando que estamos esperando duas *goroutines*. Em seguida, criamos duas *goroutines* anônimas utilizando a palavra-chave go. Cada *goroutine* executa uma função anônima que imprime uma mensagem específica, como "Hello from Goroutine 1"ou "Hello from Goroutine 2".

Ao utilizar *defer* wg.Done(), garantimos que o contador do WaitGroup seja decrementado quando cada *goroutine* termina, permitindo que a função principal saiba quando todas as *goroutines* concluíram a execução. Chamamos wg.Wait() para bloquear a execução da função principal até que o contador do WaitGroup retorne a zero, indicando que todas as *goroutines* terminaram.

Por fim, imprimimos uma mensagem indicando que a função main está saindo. A execução das *goroutines* demonstra a natureza concorrente, e a utilização do WaitGroup garante uma coordenação eficiente entre as diferentes partes do programa, proporcionando um controle

Código 4 – Exemplo de *WaitGroup*

```
func main() {
  var wg sync.WaitGroup
  wg.Add(2)

  go func() {
    defer wg.Done()
    printMessage("Hello from Goroutine 1")
  }()

  go func() {
    defer wg.Done()
    printMessage("Hello from Goroutine 2")
  }()

  wg.Wait()
  fmt.Println("Main function exiting")
}

func printMessage(message string) {
  fmt.Println(message)
}
```

ordenado da execução concorrente.

2.3.2.2 *RWMutex*

Uma abordagem para otimizar o acesso concorrente à memória compartilhada é a utilização do sync.RWMutex, conforme proposto por Cox-Buday (2017). O sync.RWMutex compartilha o mesmo propósito fundamental que um Mutex, protegendo o acesso à memória compartilhada, mas oferece uma funcionalidade adicional de controle mais refinado. Ao solicitar um bloqueio para leitura, o RWMutex concede acesso a múltiplos leitores simultâneos, desde que nenhum bloqueio de escrita esteja sendo mantido. Essa característica proporciona uma flexibilidade valiosa, permitindo um equilíbrio entre concorrência e exclusividade no acesso a dados compartilhados. No Código 5 demonstra a utilização do sync.RWMutex para controle de acesso concorrente.

Este código cria três funções: producer, observer, e test. A função producer representa uma *goroutine* que realiza operações de Lock e Unlock em um Locker fornecido, simulando uma seção crítica. A função observer é uma *goroutine* que apenas adquire um Lock e o libera imediatamente. A função test simula um teste onde uma quantidade especificada de leitores (observers) e um produtor (producer) operam simultaneamente em uma seção crítica protegida por um sync.Locker (que pode ser um sync.Mutex ou um sync.RWMutex).

Código 5 – Exemplo de *RWMutex*

```
func producer(wg *sync.WaitGroup, l sync.Locker) {
  defer wg.Done()
  for i := 5; i > 0; i-- {
    l.Lock()
    l.Unlock()
    time.Sleep(1 * time.Millisecond)
  }
}

func observer(wg *sync.WaitGroup, l sync.Locker) {
  defer wg.Done()
  l.Lock()
  defer l.Unlock()
}

func test(count int, mutex, rwMutex sync.Locker) time.Duration {
  var wg sync.WaitGroup
  wg.Add(count + 1)
  beginTestTime := time.Now()
  go producer(&wg, mutex)
  for i := count; i > 0; i-- {
    go observer(&wg, rwMutex)
  }
  wg.Wait()
  return time.Since(beginTestTime)
}

func main() {
  tw := tabwriter.NewWriter(os.Stdout, 0, 1, 2, ' ', 0)
  defer tw.Flush()
  var m sync.RWMutex

  fmt.Fprintf(tw, "Readers\tRWMutex\tMutex\n")
  for i := 0; i < 5; i++ {
    count := int(math.Pow(2, float64(i)))
    fmt.Fprintf(
      tw,
      "%d\t%v\t%v\n",
      count,
      test(count, &m, m.RLocker()),
      test(count, &m, &m),
    )
  }
}
```

2.3.2.3 *Cond*

A implementação de uma variável de condição, como descrita por Pike (2023h), é fundamental para coordenar a execução de *goroutines* em Go, proporcionando um ponto de encontro para a comunicação entre elas em relação à ocorrência de eventos. Cada variável de condição, representada pela estrutura Cond, está associada a um Locker (frequentemente um Mutex ou RWMutex), que deve ser mantido durante alterações na condição e chamadas ao método

Wait. É crucial notar que, conforme as diretrizes apresentadas por Pike (2023h), uma variável de condição não deve ser copiada após o primeiro uso. No contexto do modelo de memória do Go, a Cond estabelece uma ordem de sincronização, indicando que chamadas para Broadcast ou Signal ocorrem "sincroniza antes"de chamadas para Wait que desbloqueiam a execução.

Seguindo as recomendações de Cox-Buday (2017), é destacado que um "evento"refere-se a qualquer sinal arbitrário entre *goroutines*, indicando apenas a ocorrência de um evento sem carregar informações adicionais. Em muitos casos, aguardar por esses sinais torna-se essencial antes de prosseguir com a execução de uma *goroutine*. A definição de eventos, conforme Cox-Buday (2017), destaca a simplicidade e eficácia do uso de canais para muitos casos de uso, onde o Broadcast corresponde ao fechamento de um canal, e o Signal equivale ao envio em um canal. Essas abstrações facilitam a comunicação entre *goroutines*, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas concorrentes robustos em Go.

A estrutura sync.Cond em Go é utilizada para implementar variáveis de condição, proporcionando um ponto de encontro para *goroutines* que desejam esperar ou anunciar a ocorrência de eventos. O Código 6 demonstra o uso prático de sync.Cond. Neste exemplo, a estrutura Data contém um valor inteiro e uma variável de condição (sync.Cond). Duas *goroutines* são criadas: uma para atualizar o valor de Data a cada 2 segundos e sinalizar a condição, e outra para esperar pelo sinal de atualização e imprimir o valor.

A função sync.NewCond(&sync.Mutex) cria uma nova variável de condição associada a um mutex. O método Signal() é usado para notificar a *goroutine* adormecida que a condição foi satisfeita. A função Wait() é usada para aguardar até que a condição seja satisfeita, liberando temporariamente o mutex associado.

O uso do sync.Cond facilita a coordenação eficiente entre *goroutines*, permitindo que elas cooperem na execução de tarefas específicas quando as condições desejadas são atendidas. Este tipo é particularmente útil em casos onde canais podem ser inadequados ou quando se deseja coordenar o comportamento de múltiplas *goroutines*.

Como ocorre com a maioria das outras funcionalidades do pacote sync, o Cond é mais eficaz quando utilizado em um escopo específico e restrito, ou quando exposto a um escopo mais amplo por meio de um tipo que o encapsula (COX-BUDAY, 2017).

2.3.2.4 *Once*

Como uma nova primitiva introduzida pelo Go, Once é projetado para garantir que uma função seja executada apenas uma vez (TU et al., 2019). Um Once é um objeto que realizará exatamente uma ação e não deve ser copiado após o primeiro uso (PIKE, 2023h). Podemos acompanhar no Código 7 um programa representando a utilização de sync.Once.

Neste exemplo, a função initializer será executada apenas uma vez, independentemente de quantas *goroutines* chamem once.Do(initializer). Isso é alcançado pelo mecanismo interno do

Código 6 – Exemplo de *Cond*

```
type Data struct {
  value int
  cond  *sync.Cond
}

func main() {
  data := &Data{
    value: 0,
    cond:  sync.NewCond(&sync.Mutex{}),
  }

  go func() {
    for {
      time.Sleep(2 * time.Second)
      data.cond.L.Lock()
      data.value++
      fmt.Println("Updated value:", data.value)
      data.cond.Signal()
      data.cond.L.Unlock()
    }
  }()

  go func() {
    for {
      data.cond.L.Lock()
      data.cond.Wait()
      fmt.Println("Updated value:", data.value)
      data.cond.L.Unlock()
    }
  }()

  select {}
}
```

sync.Once, que garante que a função seja executada apenas na primeira chamada e, subsequentemente, seja ignorada.

O uso do sync.Once é especialmente útil quando há a necessidade de realizar uma inicialização única em um programa concorrente, evitando a repetição desnecessária da mesma operação por várias *goroutines*. Isso é particularmente útil em situações em que a inicialização é custosa ou envolve acesso a recursos compartilhados.

2.3.3 *Channels*

Os canais, primitivas de sincronização em Go inspiradas no CSP de Hoare, são empregados não apenas para sincronizar acesso à memória, mas principalmente para facilitar a comunicação entre *goroutines*, conforme destacado por Cox-Buday (2017). Funcionando como condutores de fluxo de informações, os canais permitem a transmissão de valores entre partes distintas do programa, proporcionando uma forma eficiente de compor funcionalidades em programas de

Código 7 – Exemplo de *Once*

```
func main() {
  var once sync.Once

  initializer := func() {
    fmt.Println("Initializing...")
  }

  go func() {
    once.Do(initializer)
    fmt.Println("Hello from Goroutine 1.")
  }()

  go func() {
    once.Do(initializer)
    fmt.Println("Hello from Goroutine 2.")
  }()

  go func() {
    once.Do(initializer)
    fmt.Println("Hello from Goroutine 3.")
  }()

  select {}
}
```

qualquer tamanho. A comunicação por meio de canais simplifica a interação entre *goroutines*, permitindo que valores sejam transmitidos e lidos, sem a necessidade de conhecimento detalhado entre as partes envolvidas. A criação de canais pode ser realizada de maneira concisa com o operador :=, evidenciando a simplicidade e a eficácia dessa primitiva em Go (COX-BUDAY, 2017). Em paralelo, se as *goroutines* são as atividades concorrentes em um programa Go, os canais representam as conexões entre elas, funcionando como mecanismos de comunicação para a transmissão de valores específicos entre *goroutines*. Cada canal é associado a um tipo específico de elemento, sendo expresso, por exemplo, como chan int para um canal que transmite valores inteiros. A criação de canais é realizada utilizando a função make, como exemplificado por 'ch := make(chan int)', proporcionando uma abordagem simples e poderosa para facilitar a comunicação efetiva entre as atividades concorrentes.

No Código 8, temos um canal chamado messageChannel que é usado para comunicação entre duas *goroutines*: uma produtora e outra consumidora. A *goroutine* produtora envia mensagens para o canal, e a *goroutine* consumidora as recebe.

A relação dos canais com a sincronização por passagem de mensagem está no fato de que os canais proporcionam um meio seguro e eficiente para que as *goroutines* se comuniquem trocando mensagens. A sincronização por passagem de mensagem refere-se à troca de dados entre threads ou processos para coordenar suas atividades. Em Go, os canais desempenham um papel essencial nesse modelo de comunicação, garantindo que a troca de mensagens seja

Código 8 – Exemplo de *Channels*

```
func main() {
  messageChannel := make(chan string)

  var wg sync.WaitGroup

  wg.Add(1)
  go func() {
    defer wg.Done()
    for i := 1; i <= 5; i++ {
      message := fmt.Sprintf("Mensagem %d", i)
      messageChannel <- message
    }
    close(messageChannel)
  }()

  wg.Add(1)
  go func() {
    defer wg.Done()
    for message := range messageChannel {
      fmt.Println("Recebido:", message)
    }
  }()

  wg.Wait()
}
```

sincronizada e segura para ambientes concorrentes.

Ao utilizar canais, as *goroutines* podem se comunicar sem a necessidade de mutexes ou outras estruturas de sincronização, simplificando o desenvolvimento de programas concorrentes e garantindo a prevenção de condições de corrida. Isso torna os canais uma ferramenta poderosa para implementar a sincronização por passagem de mensagem em Go.

2.3.4 *Select*

A instrução select em Go desempenha um papel crucial na composição de canais, conectando efetivamente *goroutines* e permitindo a formação de abstrações mais amplas em um programa concorrente, conforme enfatizado por Cox-Buday (2017). Ao ser a "cola que une os canais,"o select pode ser localmente empregado em uma única função ou tipo, bem como globalmente, na interseção de diversos componentes em um sistema. Além de unir componentes, as instruções select podem ser estrategicamente utilizadas em pontos críticos do programa para integrar canais de forma segura, incorporando conceitos como cancelamentos, limites de tempo, espera e valores padrão.

A funcionalidade do select assemelha-se a um switch, apresentando vários casos e um padrão opcional, conforme destacado por Donovan e Kernighan (2015). Cada caso no select especifica uma comunicação, representando operações de envio ou recebimento em algum canal,

junto a um bloco associado de declarações. O select aguarda até que uma dessas comunicações esteja pronta para prosseguir, realizando a comunicação associada ao caso correspondente e executando as declarações relacionadas. Caso nenhum caso esteja pronto, um select sem casos (select) aguarda indefinidamente.

O select funciona como um mecanismo de controle de fluxos concorrentes, proporcionando decisões condicionais em operações de escrita ou leitura em canais, conforme mencionado por Cox-Buday (2017) e Donovan e Kernighan (2015). Assim como no switch, é possível escolher um comportamento padrão através do caso especial default, acionado se todas as operações resultarem em bloqueio. O select possibilita a escrita de fluxos de controle comuns em códigos sequenciais clássicos, enriquecendo códigos concorrentes com a capacidade de tomar decisões em múltiplos fluxos. Essa abordagem flexível e poderosa do select torna-o uma ferramenta essencial na construção de programas concorrentes robustos em Go.

No Código 9, temos duas *goroutines* produtoras que enviam mensagens para dois canais diferentes (ch1 e ch2). A *goroutine* consumidora utiliza select para receber mensagens de ambos os canais. O select permite que a *goroutine* consumidora aguarde a comunicação em qualquer um dos canais prontos para enviar, garantindo que a execução não seja bloqueada.

A relação com canais é fundamental no contexto do select. O select é frequentemente utilizado em conjunto com canais para coordenar a comunicação entre *goroutines*. Cada caso dentro do select representa uma possível operação de leitura ou escrita em um canal, e o select aguarda até que uma dessas operações esteja pronta para prosseguir. Isso proporciona uma forma eficiente de lidar com múltiplos canais de forma concorrente, permitindo a tomada de decisões dinâmicas com base na disponibilidade de comunicação em diferentes canais.

2.4 Aplicações Go

Atualmente Go é a décima linguagem mais popular no Github, ocupando também a décima oitava posição quando considerarmos o percentual de crescimento por contribuidores (GITHUB, 2023). As linguagens de programação não estão mais restritas ao âmbito do desenvolvimento de software convencional. Observamos uma equivalência significativa entre as linguagens mais amplamente utilizadas em projetos desenvolvidos em 2023 em comparação com aquelas predominantes no GitHub. Alguns casos atípicos notáveis incluem Kotlin, Rust, Go e Lua, que demonstraram um aumento mais expressivo em popularidade em projetos mais recentes hospedados no GitHub (GITHUB, 2023). No momento dessa pesquisa foram encontrados 566k repositórios escritos em Go (GITHUB, 2024).

Este estudo selecionou três aplicações de mundo real escritas em Go, incluindo um sistema de container (Docker), um banco de dados (CockroachDB) e um sistema de automação e provisionamento de infraestrutura como código (Terraform). Essas aplicações são projetos de código aberto que ganharam ampla utilização em ambientes de data center.

Código 9 – Exemplo de *Select*

```
func main() {
  ch1 := make(chan string)
  ch2 := make(chan string)

  go func() {
    for i := 0; i < 5; i++ {
      time.Sleep(time.Second)
      ch1 <- fmt.Sprintf("Message from Channel 1: %d", i)
    }
    close(ch1)
  }()

  go func() {
    for i := 0; i < 5; i++ {
      time.Sleep(2 * time.Second)
      ch2 <- fmt.Sprintf("Message from Channel 2: %d", i)
    }
    close(ch2)
  }()

  for {
    select {
    case msg, ok := <-ch1:
      if ok {
        fmt.Println(msg)
      } else {
        fmt.Println("Channel 1 closed.")
      }
    case msg, ok := <-ch2:
      if ok {
        fmt.Println(msg)
      } else {
        fmt.Println("Channel 2 closed.")
      }
    }
  }
}
```

O Docker é um sistema de containerização que permite a criação, o empacotamento e o envio de aplicações como unidades executáveis portáteis. É um dos sistemas de containerização mais populares do mundo, com mais de 67 mil estrelas no GitHub. O Docker é mantido ativamente por uma comunidade de desenvolvedores e é usado por empresas de todos os tamanhos (DOCKER, 2023b).

O CockroachDB é um banco de dados relacional distribuído que oferece alta disponibilidade, escalabilidade e desempenho. É uma alternativa popular ao PostgreSQL e ao MySQL, e é usado por empresas como Netflix, Spotify e Uber. O CockroachDB tem mais de 28 mil estrelas no GitHub e é mantido ativamente pela equipe da Cockroach Labs (LABS, 2023b).

O Terraform é uma ferramenta de automação e provisionamento de infraestrutura como código (IaC) que permite aos desenvolvedores gerenciar recursos de infraestrutura, como

servidores, redes e armazenamento, usando um único arquivo de configuração. O Terraform é uma ferramenta popular para DevOps e arquitetos de infraestrutura, e é usado por empresas de todos os tamanhos. O Terraform tem mais de 40 mil estrelas no GitHub e é mantido ativamente pela equipe da HashiCorp (HASHICORP, 2023).

2.5 Trabalhos Relacionados

O estudo realizado por Tu et al. (2019) é o primeiro estudo empírico sobre bugs de concorrencia em aplicações amplamente utilizadas no mundo real e implementadas com a linguagem Go, foram estudados 171 bugs de concorrência em seis aplicações de código aberto dentre eles Docker, Kubernetes, etcd, gRPC, CockroachDB e BoltDB, ele se concentra em uma antiga questão fundamenta na programaçãao concorrente e busca definir qual mecanismo de comunicação entre threads, passagem de mensagem ou memória compartilhada, qual é menos propensa a erros, sendo Go a linguagem ideal para esse estudo, desde que a mesma oferece estruruas para ambos os modelos, porém Go incentiva o uso de passagem de mensagem, utilizando a primitiva *channels* da linguagem, com a crença de que a passagem explicita de mensagens é menos propensa a erros.

Aplicação	**Funções**	**Funções Anonimas**	**Total**	**Por 1000 linhas de código**
Docker	33	112	145	0.18
Kubernetes	301	233	534	0.23
etcd	86	211	297	0.67
CockroachDB	27	125	152	0.29
gRPC-Go	14	30	44	0.83
BoltDB	2	0	2	0.22

Tabela 1 – **Quantidade de locais que criam goroutines**. Aplicação, quantidade de locais onde criam goroutines com funcoes normais, utilizando funções anônimas, total de criações e criações por mil linhas de código. Adaptada de (TU et al., 2019).

Dessa maneira Tu et al. (2019) realiza uma análise estática e dinâmica do uso de *goroutines* e de outras primitivas de concorrência em Go nas aplicações estudadas, para isso foi feito uma coleta de dados no código-fonte dessas aplicações procurando pela quantidade de linhas de código-fonte que criam *goroutines* e posteriormente por ocorrências dos usos de diferentes primitivas, constatou que a média de locais de criação de *goroutines* por mil linhas de código varia de 0,18 a 0,83, pode-se avaliar os valores por aplicação na Tabela 1, sendo em todas as aplicações a grande maioria utilizando funções anônimas exceto por Kubernetes e BoltDb. Destaca-se também que operações de sincronização de memória compartilhada são mais frequentes do que por passagem de mensagens, e Mutex é a primitiva mais amplamente utilizada em todas as aplicações. Para primitivas de passagem de mensagem, chan é a mais frequentemente utilizada, variando de 18,48% a 42,99%, Tabela 2.

Aplicação	Memória Compartilhada					Passagem de Msg.		Total
	Mutex	**atomic**	**Once**	**WaitGroup**	**Cond**	**chan**	**Misc.**	
Docker	62.62%	1.06%	4.75%	1.70%	0.99%	27.87%	0.99%	1410
Kubernetes	70.34%	1.21%	6.13%	2.68%	0.96%	18.48%	0.20%	3951
etcd	45.01%	0.63%	7.18%	3.95%	0.24%	42.99%	0	2075
CockroachDB	55.90%	0.49%	3.76%	8.57%	1.48%	28.23%	1.57%	3245
gRPC-Go	61.20%	1.15%	4.2%	7.00%	1.65%	23.03%	1.78%	786
BoltDB	70.31%	2.13%	0	0	0	23.40%	4.26%	47

Tabela 2 – **Uso de primitivas de concorrência**. A coluna referente a *Mutex* contempla *Mutex* e *RWMutex*. Adaptada de (TU et al., 2019).

No trabalho desenvolvido por Tu et al. (2019) o processo de coleta de bugs, foi feito uma busca nos históricos de commits do Github, nos repositórios das aplicações definidas no estudo, buscando em seus logs de commits pelas seguintes palavras-chave: *"race"*, *"deadlock"*, *"synchronization"*, *"concurrency"*, *"lock"*, *"mutex"*, *"atomic"*, *"compete"*, *"context"*, *"once"* e *"goroutine leak"*. Foram encontrados 3211 commits distintos correspondentes aos critérios de busca, uma amostragem aleatória foi retirada e foram estudados 171 bugs, propondo assim uma nova taxonomia para bugs de concorrência em Go, ou pode-se dizer um novo método para categorizar bugs de concorrência em Go.

A nova taxonomia proposta por Tu et al. (2019) classifica os bugs por duas visões, uma relacionada ao comportamento e outra a causa. A dimensão baseada no comportamento separa os bugs entre bloqueantes e não-bloqueantes, sendo os bloqueantes aqueles onde uma ou mais *goroutines* ficam involuntariamente presas em sua execução e não conseguem avançar e os não-bloqueantes aqueles que em vez disso, todas as *goroutines* podem concluir suas tarefas, mas seus comportamentos não são desejados, chamamos esses de bugs não-bloquentes. A dimensão da causa separa os bugs em aqueles causados pelo uso inadequado de memória compartilhada e aqueles causados pelo uso inadequado de passagem de mensagens.

Constatou-se que dos 171 bugs existem um total de 85 bugs bloqueantes e 86 bugs não-bloquentes, e há um total de 105 bugs causados por proteção incorreta de memória compartilhada e 66 bugs causados por passagem incorreta de mensagens. Os bugs bloqueantes ocorrem quando uma ou mais *goroutines* realizam operações que aguardam recursos e esses recursos nunca estão disponíveis. Foram descobertos que aproximadamente 42% dos bugs bloqueantes sao causados por erros na protecao da memoria compartilhada, enquanto 58% sao causados por erros na passagem de mensagem. Os bugs bloqueantes coletados envolvidos com a má proteção de memória compartilhada foram encontrados 28 bugs bloqueantes causados por uso indevido de bloqueios (Mutex), incluindo dupla aplicação de bloqueio, aplicação de bloqueios em ordens conflitantes e esquecimento de desbloqueio.

Bugs bloqueantes relacionados ao uso indevido de passagem de mensagem, sao atualmente o principal tipo de bug bloqueante nas aplicacoes estudadas por Tu et al. (2019), erros no uso de

canais para passar mensagens entre *goroutines* causam 29 bugs bloqueantes. Muitos dos bugs bloqueantes relacionados a canais são causados pela falta de envio para (ou recebimento de) um canal ou pelo fechamento de um canal, o que resultará no bloqueio de uma *goroutine* que espera para receber (ou enviar) para o canal. Em 16 bugs bloqueantes, uma *goroutine* é bloqueada em uma operação de canal, enquanto outra *goroutine* é bloqueada em uma operação de trava (lock) ou espera (wait).

Foi descoberto que cerca de 90% dos bugs bloqueantes estudados são corrigidos ajustando primitivas de sincronização, a maioria dos bugs bloqueantes estudados (tanto os tradicionais de memória compartilhada quanto os de passagem de mensagem) pode ser corrigida com soluções simples, e muitas correções estão correlacionadas com as causas dos bugs. Sugere no fim que devido a alta correlação entre as causas e as soluções nos bugs bloqueantes do Go, juntamente com a simplicidade em suas correções,pode-se pensar em desenvolver ferramentas automatizadas ou semi-automatizadas para corrigir esses tipos de bugs bloqueantes.

Cerca de 80% dos bugs não-bloqueantes coletados são devido a acessos à memória compartilhada não protegidos ou protegidos de maneira incorreta. No entanto, nem todos compartilham as mesmas causas que bugs não-bloqueantes em linguagens tradicionais. Cerca de dois terços dos bugs não-bloquentes de memória compartilhada são causados por causas tradicionais. As novas semânticas de multithreading e novas bibliotecas do Go contribuem para o restante, cerca de um terço. Erros durante a passagem de mensagens também podem causar bugs não-bloquentes e compreendem cerca de 20% dos nossos bugs não-bloquentes coletados. Há 16 bugs não-bloquentes causados pelo uso inadequado de channels. Outro tipo de bug de concorrência ocorre ao usar channel e select juntos. No Go, quando várias mensagens são recebidas por um select, não há garantia de qual delas será processada primeiro. Essa implementação não determinística do select causou 3 bugs. Conclui-se que há muitos menos bugs não-bloquentes causados por passagem de mensagens do que por acessos a memória compartilhada.

Aproximadamente 69% dos bugs não-bloqueantes foram corrigidos restringindo o tempo, seja adicionando primitivas de sincronização como Mutex, ou movendo primitivas existentes. Dez bugs não-bloquentes foram corrigidos eliminando instruções que acessam variáveis compartilhadas ou ignorando as instruções. Quatorze bugs foram corrigidos fazendo uma cópia privada da variável compartilhada, e esses bugs são todos relacionados à memória compartilhada. 24 bugs foram corrigidos por outras primitivas de concorrência e 19 bugs foram corrigidos sem o uso de nenhuma primitiva de concorrência.

O estudo concluiu que a passagem de mensagens não torna necessariamente os programas multithread menos propensos a erros do que a memória compartilhada, na verdade, a passagem de mensagens é a principal causa de bugs de bloqueio. Ela causa menos bugs não-bloquentes do que a sincronização de memória compartilhada e, surpreendentemente, foi até usada para corrigir bugs causados por sincronização errada de memória compartilhada. Conclui-se que

a passagem de mensagens oferece uma forma limpa de comunicação entre threads e pode ser útil para passar dados e sinais. Mas eles são úteis apenas se usados corretamente, o que exige que os programadores entendam não apenas os mecanismos de passagem de mensagens, mas também outros mecanismos de sincronização do Go. O uso incorreto de bibliotecas Go pode causar bugs tanto de bloqueio quanto não-bloquentes. Existe uma porção não negligenciável de bugs não-bloquentes causados por erros durante a passagem de mensagens, e esses bugs não são cobertos por trabalhos anteriores.

O estudo realizado por Lu et al. (2008) abrange as características reais de bugs de concorrência, examinando cuidadosamente padrões de bugs de concorrência, manifestações e estratégias de correção de 105 bugs de concorrência em aplicações do mundo real de código aberto representativos cliente servidor, sendo eles MySQL, Apache, Mozilla e OpenOffice, revelando descobertas interessantes e oferecendo orientações úteis para detecção de bugs de concorrência, testes e definição de linguagens de programação concorrente.

O processo de coleta de bugs foi realizado utilizando um conjunto de palavras-chave como "race(s)", "deadlock(s)", "synchronization(s)", "concurrency", "lock(s)", "mutex(es)", "atomic", "compete(s)", e suas variações, filtrando assim meio milhão de relatórios de bug, destes foram escolhidos aleatoriamente 500 relatórios com descrições de causa raiz claras e detalhadas, códigos-fonte e informações de correção de bugs, depois de verificado manualmente para garantir que os bugs fossem realmente causados por suposições erradas dos programadores sobre a execução concorrente, dessa forma chegou-se a 105 bugs de concorrência. Nesse estudo os bugs foram separados em dois tipos sendo eles de *deadlock*, que ocorrem quando duas ou mais operações esperam circularmente uma pela outra para liberar o recurso adquirido; e de não *deadlock*, que ocorrem essencialmente quando as intenções de sincronização são violadas, (LU et al., 2008) os classifica em dois tipos principais com base em suas causas raízes, são estes, bugs de violação de ordem e bugs de violação de atomicidade. Uma violação de ordem se manifesta como um padrão composto por dois acessos sequenciais de thread a uma localização de memória compartilhada, onde pelo menos um dos acessos é uma gravação, enquanto que uma violação de atomicidade ocorre quando um conjunto de acessos em uma região atômica é interferido por outros acessos em uma thread diferente, e essa interferência resulta em comportamento não intencional do programa. Classificação a qual se difere do formato utilizado por Tu et al. (2019), o qual classifica os bugs em bloqueantes, ou seja, ocorrem quando uma ou mais *goroutines* realizam operações que aguardam recursos e esses recursos nunca estão disponíveis, a definição proposta é mais ampla do que a de deadlocks e situações em que não há espera circular, mas ao menos uma *goroutine* espera por recursos que nenhuma outra *goroutine* fornece, dessa maneira podemos ter bugs bloqueantes não relacionados a deadlock; e bugs não-bloquentes, ou seja, ocorrem quando todas as *goroutines* podem concluir suas tarefas, mas seus comportamentos não são desejados, sendo 80% dos bugs não-bloquentes coletados ocasionados por acessos à memória compartilhada não protegidos ou protegidos de maneira incorreta. No entanto, nem todos compartilham as mesmas causas que bugs não-bloqueantes em linguagens tradicionais.

Para cada um dos 105 bugs, sendo 74 bugs de concorrência não relacionados a deadlock e 31 bugs de deadlock. Para cada um desses Lu et al. (2008) examinou cuidadosamente seu relatório de bug, código-fonte correspondente, patches relacionados e discussões entre programadores, fornecendo, assim, uma compreensão relativamente completa dos padrões de bugs, condições de manifestação, estratégias de correção e processos de diagnóstico como podemos observar na Tabela 3.

Aplicação	**# de Bugs**			
	Não relacionados a Deadlock			***Deadlock***
	Ordem	**Atomicidade**	**Outros**	
MySQL	14	1	1	9
Apache	7	6	0	4
Mozilla	29	15	0	16
OpenOffice	3	2	1	2
Total	51	24	2	31

Tabela 3 – **Contagem e classificação de Bugs**. Adaptado de Lu et al. (2008)

O estudo de (LU et al., 2008) inclui muitas descobertas interessantes e implicações para a detecção de bugs de concorrência, testes e design de linguagens de programação concorrente como pode ser melhor observado na Tabela 4. Pesquisas futuras podem se beneficiar do estudo realizado por Lu et al. (2008) em vários aspectos, podendo utilizar este para projetar novas ferramentas de detecção de bugs para lidar com bugs de várias variáveis e violações de ordem; testar em pares as threads do programa concorrente e focar em ordens parciais de pequenos grupos de acessos à memória para aproveitar ao máximo o esforço de teste; podem ter melhores recursos de linguagem para suportar semânticas de "ordem"para facilitar ainda mais a programação concorrente.

Descobertas	Implicações
72 dos 74 bugs concorrência não relacionados a deadlock examinados são abrangidos por dois padrões simples: violação de atomicidade e violação de ordem.	A detecção de bugs em programas concorrentes, os testes e o design de linguagens devem primeiro se concentrar nesses dois principais padrões de bugs.
24 dos 74 bugs de concorrência não relacionados a deadlock examinados são bugs de ordem, os quais não são abordados por trabalhos anteriores de detecção de bugs.	Novas técnicas de detecção de bugs são desejadas para lidar com bugs de ordem.
A manifestação de 101 dos 105 bugs de concorrência examinados envolve no máximo duas threads.	Os testes de programas concorrentes podem testar em pares as threads do programa, o que reduz a complexidade dos testes sem perder muito na capacidade de expor bugs essa descoberta sugere que os testes podem se concentrar nas ordens de execução entre acessos de cada par de threads. Essa técnica de teste em pares pode evitar que a complexidade dos testes aumente exponencialmente com o número de threads. Ao mesmo tempo, poucos bugs de concorrência seriam perdidos.
A manifestação de 7 de 31 bugs de concorrência de deadlock envolve apenas uma thread.	Este tipo de bug é relativamente fácil de detectar e evitar. Técnicas de detecção de bugs e linguagens de programação podem tentar eliminar esses bugs simples primeiro.
49 de 74 dos bugs de concorrência não relacionados a deadlock examinados envolvem apenas uma variável.	Focar nos acessos concorrentes a uma variável é uma boa simplificação para a detecção de bugs de concorrência.
34% bugs de concorrência não relacionados a deadlock envolve mais de uma variável	É preciso novas ferramentas de detecção de bugs de concorrência para lidar com bugs de concorrência de várias variáveis. Bugs de concorrência de várias variáveis geralmente ocorrem quando acessos não sincronizados a variáveis correlacionadas causam um estado inconsistente no programa. Conexões semânticas entre variáveis são comuns e, portanto, bugs de concorrência de várias variáveis também são comuns.
30 de 31 dos bugs de concorrência de deadlock examinados envolvem no máximo dois recursos.	Testes de programas concorrentes orientados a deadlock podem testar em pares a ordem entre aquisição e liberação de dois recursos.
92% dos bugs de concorrência analisados manifestam-se quando é imposta uma ordem parcial entre não mais do que 4 acessos à memória.	Testar ordens parciais entre cada pequeno grupo de acessos pode expor a maioria dos bugs de concorrência e simplificar o espaço de interleaving de exponencial para polinomial.
67 de 74 dos bugs de concorrência examinados podem manifestar-se de forma determinística se certas ordens entre no máximo quatro acessos à memória forem aplicadas.	
30 de 31 dos bugs de deadlock examinados podem manifestar-se de forma determinística se certas ordens entre no máximo quatro operações de aquisição/liberação de recursos forem aplicadas.	O teste de programas concorrentes pode se concentrar na ordem parcial entre pequenos grupos de acessos. Isso simplifica o espaço de teste de interleaving de exponencial para polinomial em relação ao número total de acessos, com pouca perda na capacidade de expor bugs.
Apenas 20 dos 74 bugs de concorrência de não deadlock utilizam travas como principal estratégia de correção.	Não há uma solução única para corrigir bugs de concorrência.
61% dos bugs de deadlock analisados são corrigidos ao impedir que uma thread adquira um recurso (por exemplo, uma trava). Essa correção pode introduzir bugs de concorrência não relacionados a deadlocks.	Corrigir bugs de deadlock pode resultar na introdução de bugs de concorrência não relacionados a deadlocks. É necessário auxílio especial para garantir a correção das correções de bugs de deadlock.

Tabela 4 – ***Descobertas sobre as características reais dos bugs de concorrência do mundo real e suas implicações*** para a detecção de bugs de concorrência. Adaptada de (LU et al., 2008)

3
Metodologia

Essa seção descreve e demonstra a metodologia utilizada durante o desenvolvimento deste estudo através das etapas, durante a escolha das aplicações a serem estudadas, a escolha dos bugs e da classificação dos bugs.

3.1 Aplicações

Foram selecionadas 3 aplicações de código aberto, sendo um sistema de containers (Docker) (DOCKER, 2023a), um sistema um banco de dados (CockroachDB) (LABS, 2023a) e uma ferramenta de IaC (Infraestrutura como Código) de código aberto para provisionar e gerenciar a infraestrutura de nuvem (TERRAFORM, 2023). Essas são aplicações de código aberto maduras e amplamente utilizadas em ambientes de mundo real. Todas as aplicações tem pelo menos 9 anos de historico de desenvolvimento e sao ativamente mantidas pelos desenvolvedores na atualidade, tendo crescendo cada vez mais em uso conforme o passar do tempo. As aplicacoes selecionadas tem tamanhos medios a grandes, com linhas de codigo variando de 9 mil a mais de 2 milhoes. Foram escolhidas 3 aplicações com finalidades diferentes com o intuito de não se fechar a apenas um tipo de utilização das primitivas de concorrencia em Go. CoackroachDB especificamente foi uma escolha influenciada pelo trabalho de Tu et al. (2019), enquanto Docker além de também fazer parte do estudo o qual este trabalho estende, foi escolhido assim como o Terraform, por seu tamanho, sua popularidade no ambiente de produção e pela familiaridade com as ferramentas.

3.2 Bugs

Para coletar bugs de concorrência, foi filtrado os históricos de commits dos repositórios no Github das três aplicações, buscando em seus logs de commits por palavras chave relacionadas a concorrência: *"race"*, *"deadlock"*, *"synchronization"*, *"concurrency"*, *"lock"*, *"mutex"*, *"atomic"*,

"compete", *"context"*, *"once"* e *"goroutine leak"*. Essas palavras chave são as mesmas utilizadas em estudos de bugs de concorrência Lu et al. (2008) e também no trabalho de Tu et al. (2019), o qual adiciona as novas palavras a busca como *"context"* e *"once"* pois estão relacionadas a novas primitivas ou bibliotecas de concorrência introduzidas pelo Go e *"goroutine leak"* pois está relacionado ao problema específico do Go. Além das palavras chaves, foram filtrados logs de commits que tenham sido criados depois de 2020 e que já tenham sido fechados antes de 2024 (2021-2023). Foram encontrados no total XXXX bugs distintos nas três aplicações que correspondem com o critério de busca estabelecido, a quantidade de resultados encontrados para cada aplicação pode ser encontrado na Tabela 5.

Aplicação	**# de logs de commits**
Docker	
Terraform	
CoackroachDB	
Total	

Tabela 5 – **Total de logs de commits**. Quantidade total de resultados para os critérios de busca definido.

Em seguida, foi amostrado aleatoriamente os commits filtrados, eles foram identificados e verificados manualmente para garantir que os bugs sejam realmente causados por suposições erradas dos programadores sobre a execução concorrente ou por problemas na utilização de novas primitivas e paradigmas concorrentes do design da linguagem. Muitos dos logs de commits relacionados a bugs também mencionam os relatórios de bugs correspondentes, estes relatórios também são considerados para a análise do bug. Foram assim selecionados um total de XXX bugs com detalhes sobre a causa, códigos-fonte e informações sobre a correção de bugs.

3.3 Classificação

Para realizar a classificação dos bugs será utilizada uma mescla entre os métodos propostos por Lu et al. (2008) e Tu et al. (2019). Dessa forma focaremos em quatro aspectos das características de bugs de concorrência: padrão de bug, manifestação e estratégia de correção de bugs.

A maioria dos estudos sobre bugs de concorrência categorizam os bugs entre bugs de deadlock e bugs não relacionados a deadlock como podemos notar no estudo de Lu et al. (2008), onde deadlocks incluem situações em que há uma espera circular entre várias threads (TU et al., 2019) e onde bugs não relacionados a deadlock são aqueles nos quais as intenções de sincronização são violadas (LU et al., 2008). Porém para este trabalho estaremos utilizando a definição da dimensão de comportamento adotada por Tu et al. (2019), separando-a em bugs bloqueantes, quando uma ou mais goroutines ficam involuntariamente presas em sua execução e não conseguem avançar, sendo uma definição mais ampla do que deadlocks e inclui situações em

que não há espera circular, mas uma (ou mais) goroutines esperam por recursos que nenhuma outra goroutine fornece; e bugs não-bloquentes que ocorrem sempre que todas as goroutines podem concluir suas tarefas, mas seus comportamentos não são desejados. Sendo assim os bugs serão classificados entre bloqueantes e não-bloquentes.

No aspecto do padrão de bug, classificaremos os bugs bloqueantes em duas categorias utilizando a segunda dimensão de classificação proposta por Tu et al. (2019), aqueles ocasionados por uma má proteção de memória compartilhada, ou seja, aqueles causados por operações travadas, destinadas a proteger acessos à memória compartilhada ou e aqueles causados por uso indevido de passagem de mensagem. Os bugs não-bloquentes também serão classificados em aqueles causados por falha em proteger a memória compartilhada e aqueles que possuem erros com passagem de mensagem.

Quando falamos do aspecto causa utilizaremos a mesma definição proposta por Tu et al. (2019), onde a ideia é categorizar as causas dos bugs de concorrência pelo modo como diferentes threas se comunicam, considerando que Go permite comunicação acessando memória compartilhada ou por passagem de mensagens, podendo assim ajudar programadores e pesquisadores a escolherem melhores maneiras de realizar a comunicação entre threads e a detectar e evitar erros potenciais ao realizar essa comunicação, além de fornecer dados para possíveis melhorias em ferramentas de detecção de bugs de concorrência.

Para o aspecto caracteristicas de manifestacao, é analisado a condição necessária para que cada bug de concorrencia possa se manifestar, denominada por Lu et al. (2008) de condição de manifestação, depois é discutido sobre os bugs com base em quantas goroutines, quantas variáveis, quantas primitivas especializadas de concorrencia e quantos acessos estão envolvidos em suas condições de manifestação

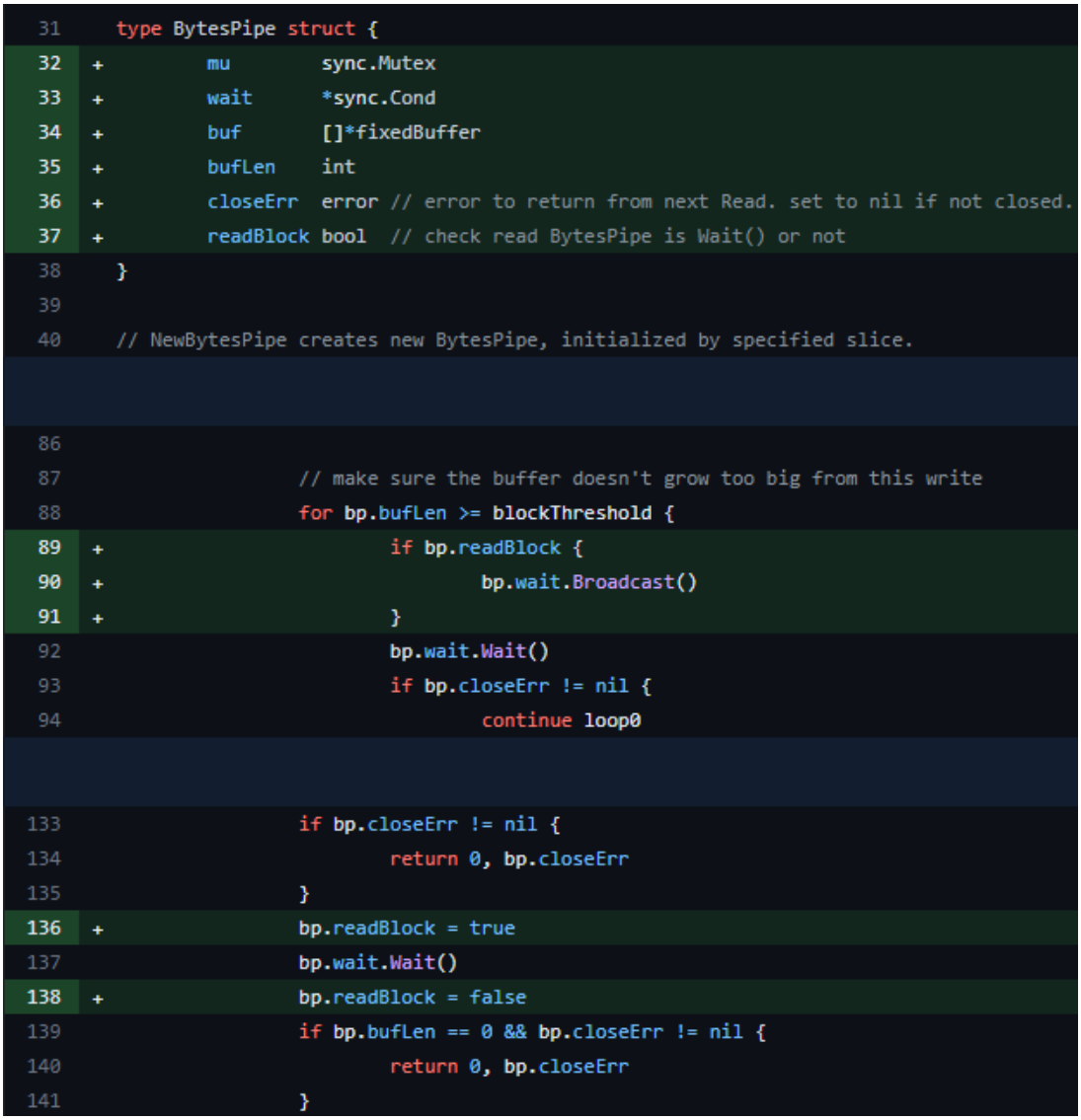
E por ultimo para a estratégia de correção de bugs, será estudado tanto a estratégia de correção do patch final quanto os erros em patches intermediários, também será analisado a vida útil dos bugs estudados, ou seja, o tempo desde a adição do código com bug no software até sua correção no software. Como observado a maioria dos bugs estudados por Tu et al. (2019) possui uma longa vida útil, ou seja, demoram para serem detectados desde sua adição ao código, porém assim que são identificados são rapidamente corrigidos, demonstrando a dificuldade de acionar e detectar esses tipos de erros e também que por serem corrigidos rapidamente, são bugs que não podem ser considerados triviais, merecendo assim uma análise mais detalhada.

Como exemplo, Docker#43112 na Figura 1, a solicitação foi aberta em 30 de Dezembro de 2021, esse bug só foi finalizado e mesclado a ramificação principal em 16 de Janeiro de 2023. Trata-se de um erro de deadlock, onde caso bp.bufLen for igual a zero, então bp.wait.Wait() ira bloquear func(bp *BytesPipe) Read(p []byte) (n int, err error), então se caso bp.bufLen for maior ou igual a blockThreshold em func (bp *BytesPipe) Write(p []byte) (int, error) irá bloquear em bp.wait.Wait(), nesse caso como existem dois bp.wait.Wait() acontece então o bloqueio, logo considerando o padrão desse bug segundo nossa classificação, este é um bug bloqueante, mais

especificamente de deadlock.

Figura 1 – **Bug 43112**. Relacionado a Deadlock. Retirado de Docker (2023b)

Para a resolução, Figura 2, foram adicionadas variáveis e blocos de controle, alem de se utilizar de sync.Cond.Broadcast(), para acordar todas as goroutines que estão aguardando por uma condição, evitando assim a espera circular que ocasiona o bloqueio, dessa maneira deixamos de ter um deadlock, apesar de possivelmente termos resolvido também o bug de concorrência, podemos notar durante as discussões a dificuldade de se replicar o bug, mesmo quando fornecido os detalhes para fazê-lo, ou até chegar a um consenso se o código submetido corrigiria de fato os problemas ou seria apenas uma solução paliativa, por fim esta é atualmente a correção em vigência para esse caso.



```
31    type BytesPipe struct {
32  +         mu        sync.Mutex
33  +         wait      *sync.Cond
34  +         buf       []*fixedBuffer
35  +         bufLen    int
36  +         closeErr  error // error to return from next Read. set to nil if not closed.
37  +         readBlock bool  // check read BytesPipe is Wait() or not
38    }
39
40    // NewBytesPipe creates new BytesPipe, initialized by specified slice.

86
87                  // make sure the buffer doesn't grow too big from this write
88                  for bp.bufLen >= blockThreshold {
89  +                       if bp.readBlock {
90  +                               bp.wait.Broadcast()
91  +                       }
92                          bp.wait.Wait()
93                          if bp.closeErr != nil {
94                                  continue loop0

133                 if bp.closeErr != nil {
134                         return 0, bp.closeErr
135                 }
136 +               bp.readBlock = true
137                 bp.wait.Wait()
138 +               bp.readBlock = false
139                 if bp.bufLen == 0 && bp.closeErr != nil {
140                         return 0, bp.closeErr
141                 }
```

Figura 2 – **Resolução de Bug 43112**. Relacionado a Deadlock. Retirado de Docker (2023b)

Referências

BRYANT, R. E.; O'HALLARON, D. R. *Computer systems: a programmer's perspective*. [S.l.]: Prentice Hall, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14 e 15.

CORMEN, T. et al. *Book: introduction to algorithms*. [S.l.]: MIT Press, 2009. Citado na página 18.

COX-BUDAY, K. *Concurrency in Go: Tools and Techniques for Developers*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2017. Citado 16 vezes nas páginas 4, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28 e 29.

DOCKER. *Docker - Build, Ship, and Run Any App, Anywhere*. 2023. Disponível em: <https://www.docker.com/>. Acesso em: 15 dez 2023. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 37.

DOCKER. *Docker v20.10.3*. 2023. Disponível em: <https://github.com/docker/docker>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado 4 vezes nas páginas 2, 30, 40 e 41.

DONOVAN, A. A.; KERNIGHAN, B. W. *The Go programming language*. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 14, 16, 20, 28 e 29.

GITHUB. *The State of Open Source and AI*. 2023. Disponível em: <https://github.blog/2023-11-08-the-state-of-open-source-and-ai/>. Acesso em: 22 dez 2023. Citado na página 29.

GITHUB. *Repositorios Go*. 2024. Disponível em: <https://github.com/search?q=go+language%3AGo&type=repositories&l=Go>. Acesso em: 22 dez 2023. Citado na página 29.

GO. *Effective Go*. 2023. Disponível em: <https://go.dev/doc/effective_go/>. Acesso em: 15 dez 2023. Citado na página 8.

Golang Team. *Add a Partial Deadlock Detector For Go*. 2023. Disponível em: <https://github.com/golang/go/issues/13759>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 16.

GOOGLE. *A high performance, open source, general RPC framework that puts mobile and HTTP/2 first*. 2023. Disponível em: <https://github.com/grpc/grpc-go>. Acesso em: 15 dez 2023. Citado na página 8.

HASHICORP. *Terraform*. 2023. Disponível em: <https://github.com/hashicorp/terraform>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 31.

HECTANE. *Lightweight SMTP client written in Go*. 2023. Disponível em: <https://github.com/hectane/smtp>. Acesso em: 15 dez 2023. Citado na página 8.

HENNESSY, J. L.; PATTERSON, D. A. *Computer architecture: a quantitative approach*. [S.l.]: Elsevier, 2011. Citado na página 7.

ISO. *ISO/IEC 14882:2011 Information technology — Programming languages — C++*. 3. ed. [S.l.], 2011. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/50372.html>>. Citado na página 8.

LABS, C. *CockroachDB - Distributed SQL for your applications*. 2023. Disponível em: <https://www.cockroachlabs.com/>. Acesso em: 15 dez 2023. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 37.

LABS, C. *CockroachDB v2.2.3*. 2023. Disponível em: <https://github.com/cockroachdb/cockroach>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 30.

LAMPORT, L. Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system. In: *Concurrency: the Works of Leslie Lamport*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 179–196. Citado na página 12.

LU, S. et al. Learning from mistakes: a comprehensive study on real world concurrency bug characteristics. In: *Proceedings of the 13th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 329–339. Citado 8 vezes nas páginas 3, 8, 9, 34, 35, 36, 38 e 39.

ORACLE. *JDK 1.1 for Solaris Developer's Guide*. [S.l.]: Sun Microsystems, 2000. Citado na página 8.

PIKE, R. *Go at Google: Language Design in the Service of Software Engineering*. 2012. Disponível em: <https://go.dev/talks/2012/splash.article#TOC_13>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 19.

PIKE, R. e. a. *Documentation*. 2023. Disponível em: <https://go.dev/doc/>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 11.

PIKE, R. e. a. *Frequently Asked Questions (FAQ)*. 2023. Disponível em: <https://go.dev/doc/faq>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 11.

PIKE, R. e. a. *Frequently Asked Questions (FAQ): Does Go have a runtime?* 2023. Disponível em: <https://go.dev/doc/faq#runtime>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 12.

PIKE, R. e. a. *Frequently Asked Questions (FAQ): What is the history of the project?* 2023. Disponível em: <https://go.dev/doc/faq#history>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 12.

PIKE, R. e. a. *Frequently Asked Questions (FAQ): Why build concurrency on the ideas of CSP?* 2023. Disponível em: <https://go.dev/doc/faq#csp>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 12.

PIKE, R. e. a. *Frequently Asked Questions (FAQ): Why goroutines instead of threads?* 2023. Disponível em: <https://go.dev/doc/faq#goroutines>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 20.

PIKE, R. e. a. *The Go Programming Language Specification*. 2023. Disponível em: <https://go.dev/ref/spec>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado na página 11.

PIKE, R. e. a. *sync package*. 2023. Disponível em: <https://pkg.go.dev/sync@go1.21.5>. Acesso em: 21 dez 2023. Citado 5 vezes nas páginas 12, 21, 22, 24 e 25.

POSOVSZKY, P. *Improving Data Locality in Distributed Processing of Multi-Channel Remote Sensing Data with Potentially Large Stencils*. Tese (Doutorado) — Ludwig-Maximilians-Universitat Munchen, 2020. Citado na página 7.

PRANSKEVICHUS, E.; SELIVANOV, Y. *What's New in Python 3.5*. 2015. Disponível em: <<URL>>. Acesso em: 15 dez 2023. Citado na página 8.

STACKOVERFLOW. *Stack Overflow Developer Survey 2023*. 2023. Disponível em: <https://survey.stackoverflow.co/2023/#most-popular-technologies-new-collab-tools-learn>. Acesso em: 02 fev 2024. Citado na página 8.

STOICA, I. et al. The evolution of multicore processors: A survey of hardware trends and software challenges. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, v. 47, p. 1–38, 2014. Citado na página 8.

TANENBAUM, A.; FILHO, N. M. Sistemas operacionais modernos (vol. 4). *Único,(Copyright, 1992)*, p. 152, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14 e 19.

TERRAFORM. *Terraform - Infrastructure as Code*. 2023. Disponível em: <https://www.terraform.io/>. Acesso em: 15 dez 2023. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 37.

TU, T. et al. Understanding real-world concurrency bugs in go. In: *Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 865–878. Citado 11 vezes nas páginas 3, 9, 10, 18, 25, 31, 32, 34, 37, 38 e 39.

YIN, Z. et al. How do fixes become bugs? In: *Proceedings of the 19th ACM SIGSOFT symposium and the 13th European conference on Foundations of software engineering*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 26–36. Citado na página 8.