

Gerenciador de Memória Weaver

Thiago Leucz Astrizi

thiago@bitbitbit.com.br

Abstract: *This article describes using literary programming a memory manager written for Weaver Game Engine. It aims to be a very simple and fast memory manager for programs where memory is allocated and freed in a stack-based order and we know the maximum amount of memory that the program will need. It allows users creating markings during the program execution that after allows them to free at once all the memory allocated after the last marking. It also warns users about memory leaks. After the memory manager creation, we also run some benchmarks comparing its performance against malloc and free from GNU's Glibc running at Linux and also running in a web browser using Web Assembly.*

Resumo: *Este artigo descreve usando programação literária um gerenciador de memória escrito para o Motor de Jogos Weaver. Ele é voltado a programas onde a memória é alocada e liberada seguindo uma ordem baseada em pilha e a quantidade máxima de memória é conhecida. Ele fornece a possibilidade de criar marcações durante a execução do programa de modo que depois possam liberar toda a memória alocada desde a última marcação. Ele também avisa usuários sobre vazamentos de memória. Depois da criação do gerenciador de memória, também comparamos o desempenho dele com o malloc e free da biblioteca C GNU rodando emLinux e em um navegador de Internet usando Web Assembly.*

1. Introdução

1.1. Gerenciadores de Memória em Motores de Jogos

Muitos motores de jogos implementam seus próprios gerenciadores de memória ao invés de utilizar as funções da biblioteca de sistema para obter memória dinamicamente. Segundo [Gregory 2019], isso ocorre porque, a implementação de funções como *malloc* e *free* costumam ser relativamente lentas quando utilizadas em jogos quando comparados a gerenciadores feitos sob medida, além de poderem causar fragmentação de memória.

Gregory identifica cinco padrões de projeto comuns utilizados em gerenciadores de memória de jogos:

Alocadores Baseados em Pilha: Esses alocadores sempre alocam novas regiões de memória sequencialmente e toda desalocação deve ser feita em ordem inversa à alocação. A implementação é bastante simples e busca manter a localidade espacial das regiões de memória usadas. Toda a memória alocada a partir de qualquer ponto de execução pode ser desalocada muito rapidamente com uma única chamada de função.

Alocadores de Reservatório: Essa técnica pode ser usada quando sabemos que podemos precisar de até n tipos de elementos, todos eles com o mesmo tamanho. Pode-se então alocar com antecedência o espaço para todos os elementos e manter ele sempre à disposição usando variáveis para definir quando o elemento realmente existe e quando podemos considerar sua posição com livre.

Alocações Alinhadas: Diferentes tipos de dados e arquiteturas podem ter

diferentes restrições de alinhamento de memória alocada. A plataforma de jogos *Playstation 3*, por exemplo, requer que qualquer posição de memória a ser passada por meio de DMA (*Direct Memory Access*) tenha um alinhamento de 128 bits. Ou seja, o endereço precisa ser um múltiplo de 128 bits.

Alocações de Quadro Único e Duplo: Um motor de jogos divide sua computação em quadros, sendo que em cada quadro uma nova imagem é enviada para a tela. Podem existir então variáveis alocadas que devem ter um tempo de vida de um ou dois quadros somente, podendo ser desalocadas automaticamente depois disso.

Desfragmentação de Memória: Quando uma memória é alocada e liberada em ordem que não pode ser controladas, podem se formar lacunas entre espaços de memória alocados, as quais podem ser muitas e ao mesmo tempo com um tamanho pequeno demais para serem reaproveitadas. Para evitar isso é comum usar ao invés de ponteiros para objetos alocados, índices de referência para os ponteiros em si. Desta forma, regiões de memória alocadas podem ser movidas incremental e periodicamente de modo a evitar a fragmentação.

O objetivo deste artigo será definir um alocador baseado em pilha, o qual consegue armazenar duas pilhas diferentes na região de memória gerenciada por ele. Gerenciar qual das pilhas a ser usada será responsabilidade do usuário. No caso do Motor de Jogos Weaver, a primeira pilha (que chamamos de “pilha externa”) será reservada para alocar memória para elementos criados pelo programador que utiliza o motor de jogos e a segunda pilha (“pilha interna”) será reservada para uso interno do motor. Essa técnica é descrita em [Ranck, 2000] que mostra que ela foi usada no jogo *Hydro Thunder* da empresa *Midway*.

Alocadores de reservatório não serão tratados aqui, mas podem ser construídos sobre o alocador presente aqui como uma segunda camada de gerenciamento. Como o objetivo é fornecer um gerenciador de memória para rodar em computadores pessoais para a linguagem C e C++, iremos manter um alinhamento automático de memória sempre igual ao tamanho de um `long int`. O gerenciador confiará na informação fornecida pelo compilador para obter o alinhamento ideal. E como estamos definindo um alocador baseado em pilha, não precisaremos nos preocupar com desfragmentação.

1.2. Ambientes de Execução

Neste artigo vamos nos preocupar em garantir que as funções definidas rodem com sucesso em quatro ambientes diferentes: Windows 10, macOS Sierra, Linux e Web Assembly. Os três primeiros são os três sistemas operacionais para computadores pessoais. O último é uma especificação de máquina virtual especializada em interpretar um subconjunto otimizado de Javascript, criada para permitir a execução de programas de computador completos dentro de ambientes como navegadores de Internet. Seu desenvolvimento partiu do método apresentado por [Zakai, 2011] que ofereceu um modo de compilar código em C e C++ para Javascript de maneira otimizada.

Para desenvolver de maneira portátil nos quatro ambientes, serão usadas macros condicionais e as diferentes formas de obter memória nos diferentes sistemas será comparada.

1.3. Programação Literária e Notação Usada no Artigo

Este artigo utiliza a técnica de “Programação Literária” para desenvolver o seu gerenciador de memória. Esta técnica foi apresentada em [Knuth, 1984] e consiste em uma filosofia de desenvolvimento de *software* na qual um programador desenvolve um programa escrevendo e explicando didaticamente o código necessário, se preocu-

pando em deixar o seu funcionamento claro para as pessoas que lerem a explicação. Ferramentas automáticas são então utilizadas para extrair o código existente na explicação, mudar a ordem do código conforme for mais adequado para o compilador e produzir à partir do código extraído um programa executável.

Por exemplo, neste artigo serão definidos dois arquivos diferentes: `memory.c` e `memory.h`, os quais podem ser inseridos estaticamente em qualquer projeto, ou compilados como uma biblioteca compartilhada. O que colocaremos em `memory.h` será:

Arquivo: `src/memory.h`:

```
#ifndef WEAVER_MEMORY_MANAGER
#define WEAVER_MEMORY_MANAGER
#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif
    <Seção a ser Inserida: Declarações de Memória>
#ifdef __cplusplus
}
#endif
#endif
```

As duas primeiras linhas assim como a última são macros de segurança que impedem que as funções e variáveis declaradas ali sejam declaradas redundantemente se alguém incluir mais de uma vez o arquivo em um código-fonte. As demais linhas contêm macros que checam se estamos compilando usando C++ ao invés de C. Se for o caso, nós declaramos todas as funções que existem neste arquivo como funções do tipo C, para que o compilador C++ saiba que elas não serão modificadas por meio de sobrecarga de operadores e que por isso não é necessário armazenar informações adicionais além do nome da função para reconhecê-la.

No meio do código acima, deixamos indicado em letras vermelhas que iremos adicionar mais tarde ali um novo trecho de código chamado “Declarações de Memória”, com a declaração das funções que iremos usar. Folheando o artigo, você encontrará nas páginas seguintes um outro trecho de código cujo título não será `memory.h`, mas sim “Declarações de Memória”. Será ali que o código que vai nesta parte do arquivo será encontrado. Podem existir mais de um trecho de código com este título. Isso significa que para produzir o código funcional utilizado pelo compilador, devemos concatenar todos estes trechos com o mesmo título e colocar na parte indicada deste arquivo. Isso nos permite colocar a declaração de funções à medida que formos explicando elas no código, sem precisar declarar todas de uma vez só porque elas pertencem a um mesmo trecho de código.

1.4. Funções a serem Definidas

Nosso gerenciador de memória irá definir um total de 6 novas funções. A primeira recebe um tamanho em bytes e retorna uma região contínua de memória a ser gerenciada (que chamamos de “arena”):

Seção: Declarações de Memória:

```
#include <stdlib.h> // Include 'size_t'
void *Wcreate_arena(size_t size);
```

A segunda recebe uma arena criada pela primeira e libera toda a memória reservada nela, retornando se ela foi bem-sucedida ou não:

Seção: Declarações de Memória (continuação):

```
#include <stdbool.h> // Include 'bool'
bool Wdestroy_arena(void *);
```

A terceira equivale a um `malloc` e recebe uma arena, um número que indica

se queremos alocar da pilha externa (0) ou interna (1) da arena e um tamanho em bytes. Se uma macro de depuração estiver definida, ela também deve receber o nome do arquivo em que é chamada e o número de linha para que quando um vazamento de memória for detectado, uma mensagem de erro informativa possa ser impressa. Por fim, definimos também uma macro para preencher automaticamente tais informações sem que o usuário precise intervir caso o modo de depuração esteja ativo:

Seção: Declarações de Memória (continuação):

```
#if W_DEBUG_MEMORY
void *_alloc_(void *arena, int flag, size_t size, char *filename,
              unsigned long line);
#define Walloc(a, b, c) _alloc_(a, b, c, __FILE__, __LINE__)
#else
void *_alloc_(void *arena, int flag, size_t size);
#define Walloc(a, b, c) _alloc_(a, b, c)
#endif
```

A quarta função é a equivalente ao `free` e desaloca uma região previamente alocada com o `Walloc`. Se estivermos em modo de depuração, ela também deve ser informada do nome do arquivo e número de linha para imprimir mensagens úteis em caso de depuração:

Seção: Declarações de Memória (continuação):

```
#if defined(W_DEBUG_MEMORY)
void _free_(void *mem, char *filename, unsigned long line);
#define Wfree(a) _free_(a, __FILE__, __LINE__)
#else
void *_free_(void *mem);
#define Wfree(a) _free_(a)
#endif
```

A quinta função serve para colocar uma marcação, a qual chamamos de “breakpoint” dentro de uma arena onde alocamos memória. Essa marcação pode ser usada para determinar que alocações ocorreram antes e quais ocorreram depois que ela foi feita. A flag indica se essa marcação deve ser colocada na região de alocação externa (0) ou interna (1). A função retorna se foi bem-sucedida ou não.

Seção: Declarações de Memória (continuação):

```
bool Wbreakpoint(void *arena, int regioao);
```

A última função usa a marcação criada pela função anterior e desaloca de uma só vez toda a memória alocada com `Walloc` desde que a última marcação foi criada. Ela recebe uma flag para saber se isso deve ser feito na região externa (0) ou interna (1):

Seção: Declarações de Memória (continuação):

```
void Wtrash(void *arena, int regioao);
```

2. Implementação

2.1. Obtendo uma Região de Memória Inicial

Em um gerenciador de memória de propósito geral nós não temos como saber qual a quantidade máxima de memória que iremos precisar. Mas em um gerenciador de memória usado em jogos, é essencial que estabeleçamos um limite máximo de uso de memória. Em tais casos, estamos menos interessados em obter resultados precisos de computação e mais interessados em garantir um desempenho contínuo,

sem perda de performance súbita como quando esgotamos a memória principal e temos que usar memória *swap*. Nestes casos é interessante alocar de uma só vez a quantidade máxima de memória que nos comprometemos a usar e gerenciar esta mesma quantidade durante o tempo de execução do programa.

O modo que utilizaremos para obter essa quantidade de memória inicial varia dependendo do ambiente de execução. Pode-se usar até mesmo um `malloc` para fazer isso, embora aqui nós iremos preferir usar a alternativa que desperdice menos memória possível. Se possível uma que retorne exatamente o valor que queremos sem gastar qualquer valor adicional preenchendo informações e estruturas de dado adicionais.

Tanto em qualquer sistema Unix (Linux, OpenBSD, macOS) como quando compilamos para WebAssembly com o compilador Emscripten, a escolha mais econômica é usar o `mmap`. É uma função bastante ampla que permite mapear para a memória qualquer coisa, de arquivos em disco até simplesmente alocar uma região nova de memória para um programa.

Para podermos usar `mmap`, só temos que inserir o cabeçalho adequado:

Seção: Incluir Cabeçalhos Necessários:

```
#if defined(__EMSCRIPTEN__) || defined(__unix__) || defined(__APPLE__)
#include <sys/mman.h>
#endif
```

Tendo definido o cabeçalho, para usar a função para alocar uma região de tamanho M que não está associada a nenhum arquivo, somente à memória física e que pode tanto ser lida como escrita, invocamos ela da seguinte forma:

Seção: Alocar em ‘arena’ região de ‘M’ bytes:

```
#if defined(__EMSCRIPTEN__) || defined(__unix__) || defined(__APPLE__)
arena = mmap(NULL, M, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_ANON,
             -1, 0);
#endif
```

Os argumentos que foram setados para nulo, zero ou -1 são apenas argumentos que não são necessários no modo que estamos usando o `mmap`.

Assim como nós criamos uma nova região de memória para usarmos, depois vai ser necessário desfazer ela. Neste caso, usamos o `munmap`:

Seção: Desalocar ‘arena’ de tamanho ‘M’ bytes:

```
#if defined(__EMSCRIPTEN__) || defined(__unix__) || defined(__APPLE__)
munmap(arena, M);
#endif
```

Em ambientes Windows, a função equivalente a isso é a `CreateFileMapping`, com a diferença de que ela retorna um controlador que precisa de uma função adicional para por fim obter um ponteiro para a região alocada. Felizmente, segundo a documentação da API do Windows, é permitido fechar tal controlador com o `CloseHandle` antes de desalocar e desfazer a região para a qual o ponteiro aponta. Graças à isso, conseguimos manter a simetria entre o código Windows e das demais plataformas, pois como o controlador será fechado aqui, não precisamos memorizá-lo com uma estrutura adicional a ser encerrada futuramente.

Seção: Alocar em ‘arena’ região de ‘M’ bytes (continuação):

```
#if defined(_WIN32)
{
    HANDLE handle;
    handle = CreateFileMappingA(INVALID_HANDLE_VALUE, NULL,
                               PAGE_READWRITE,
                               (DWORD) ((DWORDLONG) M) / ((DWORDLONG) 4294967296),
                               (DWORD) ((DWORDLONG) M) % ((DWORDLONG) 4294967296),
```

```

        NULL);
    arena = MapViewOfFile(handle, FILE_MAP_READ | FILE_MAP_WRITE, 0, 0, 0);
    CloseHandle(handle);
}
#endif

```

Para desalocar a região alocada usaremos o `UnmapViewOfFile`:

Seção: Desalocar 'arena' de tamanho 'M' bytes (continuação):

```

#ifdef _WIN32
UnmapViewOfFile(arena);
#endif

```

Usar as funções acima requer os seguintes cabeçalhos:

Seção: Incluir Cabeçalhos Necessários (continuação):

```

#ifdef _WIN32
#include <windows.h> // Include 'CreateFileMapping', 'MapViewOfFile',
#include <memoryapi.h> // 'UnmapViewOfFile', 'CloseHandle'
#endif

```

2.2. Obtendo o Tamanho da Página

Em um computador real, em contraste com uma máquina virtual, quando um programa pede memória para o Sistema Operacional, ele sempre irá receber memória em múltiplos do tamanho da página usada internamente pela máquina. Tipicamente o tamanho de uma página é de 4 KiB. Sendo assim, não adianta pedirmos quantidade de memória que não seja múltiplo de 4 KiB. Se pedirmos apenas 2 KiB, continuaremos recebendo 4 KiB. Se pedirmos 5 KiB, receberemos 8 KiB.

É importante então que nestes ambientes, nosso gerenciador esteja ciente disso e que mesmo que um usuário peça uma quantidade de memória que não seja múltipla do tamanho da página, ele sempre irá ajustar o pedido para um valor múltiplo para assim não desperdiçar memória.

Na maioria dos sistemas Unix, desde que compatíveis com o POSIX, podemos obter facilmente o tamanho de uma página por meio da função `sysconf`:

Seção: Obter tamanho de página 'p':

```

#ifdef __unix__
p = sysconf(_SC_PAGESIZE);
#endif

```

A documentação do macOS afirma que ele possui tal função que é compatível com o POSIX. Contudo, a documentação não menciona a opção de obter o tamanho da página por ela. Ao invés disso, a documentação menciona usar a função BSD `getpagesize` para obter tal informação. Para nos mantermos seguindo a documentação, faremos isso então:

Seção: Obter tamanho de página 'p' (continuação):

```

#ifdef __APPLE__
p = getpagesize();
#endif

```

Tanto a função BSD acima como a função POSIX estão definidas no mesmo cabeçalho:

Seção: Incluir Cabeçalhos Necessários (continuação):

```

#ifdef __APPLE__ || defined(__unix__)
#include <unistd.h>
#endif

```

No Windows, o modo de obter o tamanho da página é por meio da função mais complexa `GetSystemInfo` que retorna também uma série de informações adicionais sobre o sistema que não precisaremos usar no momento.

Seção: Obter tamanho de página ‘p’ (continuação):

```
#if defined(_WIN32)
{
    SYSTEM_INFO info;
    GetSystemInfo(&info);
    p = info.dwPageSize;
}
#endif
```

E para usar esta função, a documentação nos aconselha incluir diretamente o cabeçalho `windows.h`:

Seção: Incluir Cabeçalhos Necessários (continuação):

```
#if defined(_WIN32)
#include <windows.h> // Include 'GetSystemInfo'
#endif
```

Por fim, o caso do ambiente WebAssembly. Neste ambiente, a memória dinâmica é obtida por meio de uma seção de memória linear que começa com um tamanho padrão e pode crescer por meio de um operador `grow_memory`, o qual também é configurado com um tamanho máximo. De qualquer forma, aqui também a quantidade de memória alocada é múltipla de uma página. O tamanho da página na máquina virtual WebAssembly é documentado como sendo sempre o mesmo:

Seção: Obter tamanho de página ‘p’ (continuação):

```
#if defined(__EMSCRIPTEN__)
p = 64 * 1024; // 64 KiB
#endif
```

2.3. Sobre Execução em Diferentes Threads

É importante garantir que o código definido aqui não deixe de funcionar quando invocado simultaneamente por mais de um trecho de código. Para isso, iremos apenas garantir um *mutex* para que o nosso gerenciador de memória não tenha a mesma região de memória sendo acessada por mais de uma *thread*. Caso tenhamos um caso no qual várias threads precise alocar memória simultaneamente, pode ser mais vantajoso dar para cada uma delas a sua própria região de memória para evitar que cada uma delas bloqueie todas as outras durante sua alocação.

Nem todos os ambientes suportam threads. A máquina virtual Web Assembly, ao menos a versão implementada nos navegadores de Internet não oferece suporte à elas, exceto em versões experimentais. Sendo assim, definiremos código para nossos *mutex* somente para os demais ambientes. No caso do Windows, iremos preferir usar a API para “Seções Críticas” ao invés de usar diretamente um *mutex*. O principal motivo é evitar uma chamada de sistema para o Kernel caso ninguém esteja usando nosso *Mutex*. As seções críticas conseguem isso apenas trazendo a restrição de não poderem ser compartilhadas com outros programas. No mais, as seções críticas funcionam de maneira análoga a um *mutex*.

Em sistemas baseados em Unix, incluímos o cabeçalho da biblioteca POSIX “*pthread*”. No Windows, os cabeçalhos relevantes já foram incluídos no `windows.h`.

Seção: Incluir Cabeçalhos Necessários (continuação):

```
#if defined(__unix__) || defined(__APPLE__)
#include <pthread.h>
```

```
#endif
```

Um mutex é declarado da

Seção: Declaração de Mutex:

```
#if defined(__unix__) || defined(__APPLE__)
pthread_mutex_t mutex;
#endif
#if defined(_WIN32)
CRITICAL_SECTION mutex;
#endif
```

Quando o mutex é inicializado, colocamos em uma variável booleana chamada **error** se ocorreu algum problema. No caso da biblioteca *pthread*, sua função de inicialização já retorna valor não-nulo se ocorreu um problema. No Windows, o sistema garante que a função de inicialização nunca falhe. Nos dois casos assumimos que temos um ponteiro genérico para o nosso mutex.

Seção: Inicialização de ‘*mutex’:

```
#if defined(__unix__) || defined(__APPLE__)
error = pthread_mutex_init((pthread_mutex_t *) mutex, NULL);
#endif
#if defined(_WIN32)
InitializeCriticalSection((CRITICAL_SECTION *) mutex);
#endif
```

O código para destruir um mutex é o exposto abaixo. Neste caso não iremos nos preocupar com casos de erro.

Seção: Finaliza ‘*mutex’:

```
#if defined(__unix__) || defined(__APPLE__)
pthread_mutex_destroy((pthread_mutex_t *) mutex);
#endif
#if defined(_WIN32)
DeleteCriticalSection((CRITICAL_SECTION *) mutex);
#endif
```

A operação clássica de *wait* para requerer o uso do mutex:

Seção: ‘*mutex’:WAIT():

```
#if defined(__unix__) || defined(__APPLE__)
pthread_mutex_lock((pthread_mutex_t *) mutex);
#endif
#if defined(_WIN32)
EnterCriticalSection((CRITICAL_SECTION *) mutex);
#endif
```

E a função de *signal* para liberar um mutex que foi pedido pela thread:

Seção: ‘*mutex’:SIGNAL():

```
#if defined(__unix__) || defined(__APPLE__)
pthread_mutex_unlock((pthread_mutex_t *) mutex);
#endif
#if defined(_WIN32)
LeaveCriticalSection((CRITICAL_SECTION *) mutex);
#endif
```

2.3. Cabeçalho de Arenas de Memória

Logo após alocarmos uma região de memória (ou “arena”), a primeira coisa a fazer é reservar os seus bytes iniciais para armazenar informações gerais sobre

ela. As informações que desejamos são: o tamanho total de espaço que temos (`remaining_space`), quanto de espaço realmente foi alocado com ela (`total_size`), um ponteiro para o começo de uma região livre na pilha de memória interna e externa que iremos alocar (`internal_free`, `external_free`) e um ponteiro para o último elemento que alocamos em cada uma das pilhas (`internal_last`, `external_last`).

Outra coisa que também deixaremos no cabeçalho é um `array` de elementos de tamanho igual a `unsigned long` reservados para alocar quantidades pequenas de memória. Para alocações minúsculas de curta duração não valerá à pena gastar espaço da região livre, tendo que armazenar para cada uma delas um cabeçalho de alocação. Iremos alocar em tais casos, sempre que possível, um espaço deste `array` do cabeçalho. E também precisaremos de um índice para a próxima região do `array` para a região interna e para a externa. Ambas as regiões compartilharão o mesmo `array`, mas uma começará ocupando as primeiras posições e a outra as últimas posições.

Precisaremos de um mutex como o que definimos para proteger a arena de ser manipulada simultaneamente por duas threads.

Outra informação que podemos precisar só em momentos de depuração: qual a quantidade mínima de memória que chegamos a ter ao longo do tempo de vida da arena? Isso é útil de armazenar em tais momentos porque após encerrarmos a arena e descobirmos que nós usamos muito pouco dela, podemos ter interesse em diminuir o tamanho que demos a ela, já que nossa aplicação não está precisando de tanta memória quanto reservamos. Usaremos a variável `smallest_remaining_space` para armazenar isso e ela só estará definida se a macro `W_DEBUG_MEMORY` estiver definida.

O cabeçalho de nossa arena de memória terá então a seguinte forma:

Seção: Cabeçalho da Arena:

```
struct arena_header{
    <Seção a ser Inserida: Declaração de Mutex>
    void *internal_free, *external_free;
    void *internal_last, *external_last;
    unsigned long array[1024];
    int internal_index, external_index;
    size_t total_size, remaining_space;
#ifdef W_DEBUG_MEMORY
    size_t smallest_remaining_space;
#endif
};
```

Assumimos que nós temos um ponteiro para a arena de memória recém-obtida, o qual chamamos de `arena` e que nós temos o tamanho total em bytes que está alocado nela na variável `M`, então conseguimos inicializar o cabeçalho ali com o código abaixo. Para calcular as próximas posições onde iremos inserir, convertemos o ponteiro para o começo da arena para um ponteiro de caractere para podermos fazer nossos cálculos com aritmética de ponteiro com múltiplos de 1 byte. O próximo espaço que temos livre para a pilha de memória externa é o byte imediatamente após o cabeçalho. Já a pilha interna fica com o último byte da arena.

Seção: Inicializa cabeçalho em 'arena' de tamanho 'M':

```
{
    struct arena_header *header = (struct arena_header *) arena;
    header -> internal_free = ((char *) header) + M - 1;
    header -> external_free = ((char *) header) + sizeof(struct arena_header);
    header -> internal_last = header -> external_last = NULL;
    header -> internal_index = 1023;
    header -> external_index = 0;
    header -> remaining_space = M - sizeof(struct arena_header);
    header -> total_size = M;
```

```

#if defined(W_DEBUG_MEMORY)
    header -> smallest_remaining_space = header -> remaining_space;
#endif
{ // Mutex initialization
    void *mutex = &(header -> mutex);
        <Seção a ser Inserida: Inicialização de '*mutex'>
    }
}

```

2.4. O Código de Alocação de Nova Arena

Com o código que definirmos já temos como definir a função `Wcreate_arena`. O que a função terá que fazer são as 6 operações abaixo:

1. Receber do usuário um tamanho `t` para alocar.
2. Descobrir qual o tamanho da página `p` no sistema atual.
3. Obter `M`, sendo igual ao menor múltiplo de `p` maior que `t`. Se `M` for menor que o espaço necessário para o cabeçalho da arena, ele se torna igual ao menor múltiplo de `p` que é maior que o tamanho do cabeçalho.
4. Alocamos uma nova arena de tamanho `M`.
5. Inicializamos o seu cabeçalho.
6. Retornamos o ponteiro para o começo da arena, onde está seu cabeçalho, ou `NULL` em caso de problemas.

O código para fazer isso será então:

Seção: Definição de 'Wcreate_arena':

```

void *Wcreate_arena(size_t t){
    bool error = false;
    void *arena;
    size_t p, M, header_size = sizeof(struct arena_header);
    // Operation 2:
        <Seção a ser Inserida: Obter tamanho de página 'p'>
    // Operation 3:
    M = (((t - 1) / p) + 1) * p;
    if(M < header_size)
        M = (((header_size - 1) / p) + 1) * p;
    // Operation 4:
        <Seção a ser Inserida: Alocar em 'arena' região de 'M' bytes>
    // Operation 5:
        <Seção a ser Inserida: Inicializa cabeçalho em 'arena' de tamanho 'M'>
    // Operation 6:
    if(error) return NULL;
    return arena;
}

```

2.?. Organização Final do Arquivo-Fonte

Salvaremos todo o código de definição de funções que fizemos no arquivo abaixo que poderá então ser compilado:

Arquivo: `src/memory.c`:

```

        <Seção a ser Inserida: Incluir Cabeçalhos Necessários>
#include "memory.h"
        <Seção a ser Inserida: Cabeçalho da Arena>
        <Seção a ser Inserida: Definição de 'Wcreate_arena'>

```

Referências

- Gregory, J. (2019) “Game Engine Architecture”, CRC Press, terceira edição.
- Zakai, A. (2011) “Emscripten: an LLVM-to-JavaScript compiler”, Proceedings of the ACM international conference companion on Object oriented programming systems languages and applications companion, p. 301–312.
- Knuth, D. E. (1984) “Literate Programming”, The Computer Journal, volume 27, edição 2, p. 97–111
- Ranck, S. (2000) “Game Programming Gems”, Charles River Media, volume 1, edição 1, p. 92–100