

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E ESTATÍSTICA**

Igor da Silva Solecki

**REPRESENTAÇÃO OTIMIZADA DE
TOPOLOGIAS DE MÁQUINA**

Florianópolis

2017

Igor da Silva Solecki

REPRESENTAÇÃO OTIMIZADA DE TOPOLOGIAS DE MÁQUINA

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Curso de Bacharelado
em Ciências da Computação para a
obtenção do Grau de Bacharel em
Ciências da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Laércio Lima
Pilla

Universidade Federal de Santa Ca-
tarina

Florianópolis

2017

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver novas formas otimizadas de representar e disponibilizar informações sobre topologias de máquina para o uso em aplicações de alto desempenho. O projeto *Hardware Locality* (hwloc), estado da arte em representação de topologias, foi analisado para identificar pontos passíveis de otimizações. Os algoritmos e estruturas desenvolvidos foram testados e comparados com outras abordagens.

Palavras-chave: hierarquia de memória. topologia de máquina. computação de alto desempenho.

ABSTRACT

The goal of this project is to develop new optimized ways of representing and providing informations about machine topologies for the use in high performance applications. The Hardware Locality (hwloc) project, state of the art in topologies representation, was analysed in order to identify points that could be optimized. The developed algorithms and structures were tested and compared with other approaches.

Keywords: memory hierarchy. machine topology. high performance computing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relações entre objetos em topologias do hwloc. Fonte: (PORTABLE..., 2016)	26
Figura 2 – Exemplo de árvore com IDs atribuídos aos nós . . .	34
Figura 3 – Saída do programa lstopo sobre as máquinas utilizadas	41
Figura 4 – Tempos com e sem acesso ao ACMP	44
Figura 5 – Tempo médio por busca (ns) – Máquina A	45
Figura 6 – Tempo médio por busca (ns) – Máquina B	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Complexidade das representações com árvore e com matriz	32
Tabela 2 – Características das máquinas utilizadas nos testes .	40
Tabela 3 – Aumento (%) do tempo mediano	43
Tabela 4 – Árvores utilizadas nos testes	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACMP	Ancestral Comum Mais Próximo
ECL	Laboratório de Computação Embarcada - <i>Embedded Computing Lab</i>
hwloc	<i>Hardware Locality</i>
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
NUMA	<i>Non-Uniform Memory Access</i>
UMA	<i>Uniform Memory Access</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivos Específicos	19
1.3	Metodologia	20
1.4	Organização do Trabalho	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Memórias Cache	21
2.1.1	Localidade Espacial	21
2.2	<i>Non-Uniform Memory Access</i>	22
2.3	Estruturas de dados	23
3	ESTADO DA ARTE	25
3.1	Objetos	25
3.2	Funções e atributos	27
3.3	Conjuntos de CPUs	28
4	IMPLEMENTAÇÃO	29
4.1	Implementações da função ACMP	29
4.1.1	Abordagem inicial	29
4.1.2	Matriz	31
4.1.3	Função de espalhamento	32
5	TESTES DE DESEMPENHO	39
5.1	Máquinas utilizadas nos testes	39
5.2	Configurações	39
5.3	Estrutura dos testes	40
5.3.1	RESULTADOS	42
6	CONCLUSÃO	47

	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE A – CÓDIGO DESENVOLVIDO	51
A.1	Estruturas (CombinACMP)	51
A.2	Estruturas (MatrizACMP)	67
A.3	Testes de desempenho	75

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, arquiteturas de computadores são construídas de forma hierárquica quanto à memória. Essa hierarquia diz respeito à passagem de dados entre os diferentes níveis, ou seja, quais caminhos existem para que dados sejam comunicados entre pontos dessa hierarquia. O que motiva sua existência é o fato de que diferentes tipos de memória possuem tamanhos, velocidades de acesso e custos distintos, e ela permite que o espaço das memórias maiores esteja disponível sem que se perca a velocidade das menores e mais rápidas (PATTERSON; HENNESSY, 2011). Níveis de memória mais baixos possuem maior capacidade de armazenamento, porém seu tempo de acesso é maior. Parte dessa hierarquia é composta por um ou mais níveis de cache, memórias com capacidade reduzida, mas maior velocidade, permitindo que, em um dado momento, um conjunto de dados qualquer possa ser acessado mais rapidamente. Sobre essas hierarquias e fazendo uso delas estão as unidades de processamento, acessando e operando sobre os dados em memória. Quanto mais próximo for o nível de memória em que esses dados estiverem, menor o tempo de acesso. Quando essas unidades precisam se comunicar entre si, elas fazem uso da hierarquia de memória.

A hierarquia pode ser organizada de várias formas, podendo se tornar complexa e de grande profundidade. Uma possibilidade na organização é o compartilhamento de alguns níveis de cache, ou seja, duas unidades de processamento ou mais estarão acima de uma mesma cache da hierarquia. Isso permite, por exemplo, realizar comunicações com eficiência, pois o tempo entre algum dado ser atualizado e o novo valor ser visto é determinado pelo tempo de acesso à cache compartilhada. Uma grande variedade de organizações pode ser encontrada ao se considerar arquiteturas como multicore, em que várias unidades de processamento chamadas de núcleos (*cores*) fazem parte de um mesmo circuito integrado, ou *Non-Uniform Memory Access* (NUMA), onde a rede que interconecta os nós dá origem a mais níveis de hierarquia. Esta rede, por si só, pode ser organizada de várias formas distintas. Essa organização compreendendo hierarquia de memória e unidades de

processamento, na sua totalidade, define uma topologia de máquina.

A necessidade de plataformas para rodar aplicações de alto desempenho tem dado origem às diversas arquiteturas paralelas modernas existentes. À medida que novas tecnologias surgem, se faz necessário adaptar as arquiteturas para permitir o seu uso eficiente, de modo a se atingir alto desempenho nessas plataformas (BARROSO et al., 2017). Suas topologias são as mais variadas, visando atender às necessidades de várias classes de aplicações com características e comportamentos distintos, que vão desde simulações científicas até o processamento de tarefas em sistemas que dão suporte a redes sociais (FRANCESQUINI; GOLDMAN; MÉHAUT, 2013). Diante da crescente complexidade das topologias dessas máquinas, as suas organizações e as demais características dos elementos que compõe a hierarquia de memória são aspectos de muita relevância para o desempenho de aplicações.

Certas combinações de fatores da aplicação e da arquitetura podem resultar na melhoria ou na degradação do desempenho. Tais fatores podem ser, por exemplo, a quantidade de dados manipulados e o tamanho das caches, que podem comportar ou não todos os dados simultaneamente, ou os padrões de troca de mensagens entre tarefas e a localização delas, além dos meios existentes para realizar essas comunicações, que podem resultar em maior ou menor eficiência (FATAHALIAN et al., 2006). Um estudo de caso apresentado por Treibig, Hager e Wellein (2010) mostra como uma certa distribuição de tarefas faz o desempenho cair aproximadamente pela metade.

Ainda, em arquiteturas NUMA, nas quais cada parte da memória está mais próxima de alguns nós, de modo que o tempo de acesso varia conforme a região da memória, é importante que haja proximidade entre os dados acessados por uma thread e o núcleo em que ela reside. Portanto, é essencial o conhecimento da topologia da máquina, que possibilita o devido ajuste das aplicações a ela, de modo a aproveitar ao máximo os recursos disponíveis.

Disso vem a necessidade de haver alguma representação da topologia para fornecer as informações necessárias sobre ela, seja diretamente às aplicações ou a outras partes do sistema, que usarão tais informações

para realizar otimizações estática ou dinamicamente. Como exemplo de uso estático, pode-se citar compilação de algoritmos com conhecimento da hierarquia (FATAHALIAN et al., 2006), ou posicionamento de processos MPI (BROQUEDIS et al., 2010a); e, quanto ao uso dinâmico, posicionamento de threads e dados OpenMP (BROQUEDIS et al., 2010b).

No entanto, a disponibilização de tais informações gera custos adicionais, além de ter outras implicações relacionadas ao tamanho das estruturas de dados que podem afetar o desempenho. Assim, é necessário que haja um compromisso entre o tempo de acesso e o espaço ocupado pela representação utilizada. Tempos de acesso muito grandes podem acabar anulando os ganhos das otimizações. Já se as estruturas de dados forem muito espaçosas, pode ser que não possuam boa localidade espacial, dependendo dos padrões de referência aos dados em acessos consecutivos. Isso pode resultar em perda de desempenho ocasionada por faltas de cache, tanto no acesso às informações da topologia quanto no acesso pelas aplicações aos seus próprios dados. Entretanto, é possível que a adição de algumas informações facilitem certas consultas sobre a topologia sem causar tais prejuízos, que é o desejado.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os exemplos de usos estáticos e dinâmicos dados acima, além de vários outros existentes, com o uso de benchmarks, servem como justificativa para a realização de esforços para desenvolver representações com as características citadas, isto é, bom tempo de acesso e uso eficiente da memória.

Para as aplicações, o ideal é que os dados estejam sempre nos níveis de cache os mais próximos possíveis, de modo que seu uso nas computações seja mais eficiente. Diante disso, compilação com conhecimento da hierarquia (FATAHALIAN et al., 2006) se vale do fato de que frequentemente problemas podem ser divididos em problemas menores de tamanho variável, e ajustar esses tamanhos à capacidade das caches torna o uso delas mais efetivo, pois todos os dados usados nessas partes

menores da computação caberão nelas. Ainda, quando é possível haver vários níveis de subdivisão do problema, formando também uma espécie de hierarquia de subdivisões, os tamanhos das partes em diferentes níveis podem ser ajustados aos níveis de cache consecutivos. Isso pode ser visualizado com facilidade no exemplo de multiplicação de grandes matrizes presente no artigo referenciado.

A velocidade de níveis de cache mais próximos também beneficia a comunicação. Isso pode ser visto no uso de *Message Passing Interface* (MPI), um padrão utilizado no desenvolvimento de programas paralelos que seguem o modelo de passagem de mensagens. Em conjunto com dados sobre os padrões de comunicação entre processos, as informações sobre compartilhamento de caches podem ser usadas para definir um posicionamento de processos MPI que favoreça as comunicações (BROQUEDIS et al., 2010a). Outra otimização possível é o uso de métodos específicos do *hardware* para realizar comunicações dentro de um nó.

No contexto de arquiteturas NUMA, para diminuir o número de acessos a memórias remotas, há a possibilidade de mover os dados para outro nó ou as threads para outros núcleos. Uma combinação dessas opções foi desenvolvida no ForestGOMP (BROQUEDIS et al., 2010b), uma extensão de uma implementação de OpenMP, padrão utilizado no desenvolvimento de programas paralelos para sistemas com memória compartilhada. Seguindo o princípio de realizar essa combinação com base nos níveis da topologia, o posicionamento dinâmico de threads e dados desenvolvido no ForestGOMP se mostrou efetivo. Um cenário apresentado é a existência de vários conjuntos de threads e dados com grande afinidade, em que a migração de uma thread para outro núcleo só ocorreria se houvesse um nível de cache compartilhado, de modo a manter a thread próxima dos seus dados, enquanto em outros casos poderia haver a migração de todas as threads e dados relacionados.

Outro projeto que se vale do conhecimento da topologia é o HieSchella (HIERARCHICAL... , 2013), cujo objetivo é prover portabilidade de desempenho, característica presente quando se consegue que uma mesma aplicação rode em diferentes plataformas utilizando os núcleos com eficiência. Informações sobre os custos de comunicação

da plataforma são obtidos e disponibilizados para algoritmos de mapeamento de tarefas. Alguns algoritmos de balanceamento de carga desenvolvidos utilizando o modelo de topologia disponibilizado pelo HieSchella demonstraram desempenho superior ao de outros balanceadores de carga existentes (PILLA, 2014).

Esses exemplos ilustram como informações sobre a hierarquia podem efetivamente ser usadas para melhorar o desempenho de aplicações que seguem modelos ou estratégias em uso real, ou seja, os benchmarks utilizados possuem características encontradas na solução de problemas reais. Isso diz respeito a, por exemplo, padrões de comunicação ou distribuição de carga, que podem apresentar irregularidades e outras características presentes em aplicações científicas de diversas áreas.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma representação de topologias de máquina, compreendendo as estruturas de dados utilizadas e os métodos de acesso, que mantenha o compromisso necessário entre tempo de acesso e espaço ocupado na memória pelas estruturas de dados.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar fatores relevantes para a eficiência na representação de topologias
- Desenvolver representações (estruturas de dados e métodos de acesso)
- Testar as representações desenvolvidas, por meio de experimentos em diferentes máquinas, observando o uso da memória e o tempo de execução
- Disponibilizar bases para uma nova ferramenta para a representação de topologias de máquina

1.3 METODOLOGIA

- Estudar organização de computadores com foco na hierarquia de memória
- Estudar como topologias de máquina são representadas em trabalhos e ferramentas do estado da arte
- Entender o protótipo utilizado no Laboratório de Computação Embarcada - *Embedded Computing Lab* (ECL) até o momento
- Implementar novos métodos de armazenamento e acesso às informações
- Testar os novos métodos e estruturas de dados utilizando máquinas com topologias diferentes e avaliar os resultados

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

As seções restantes estão organizadas da seguinte forma: No Capítulo 2, serão apresentados alguns conceitos fundamentais relevantes para o trabalho. No Capítulo 3, será fornecida uma visão geral do estado da arte em representação de topologias de máquina. No Capítulo 4, as estruturas e algoritmos desenvolvidos e implementados serão apresentados e analisados e, no Capítulo 5, os resultados dos testes de desempenho realizados com eles. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros serão apresentados no Capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As hierarquias de memória possuem várias características que afetam o desempenho de aplicações e precisam, portanto, ser conhecidas ao se trabalhar com aplicações de alto desempenho. Nas seções a seguir são apresentados alguns conceitos importantes nesse contexto, e, ao final, alguns conceitos relacionados a estruturas de dados relevantes.

2.1 MEMÓRIAS CACHE

Caches são memórias com o propósito de diminuir o tempo médio de acesso aos dados. Mais especificamente, é comum haver dois ou três níveis de cache entre as unidades de processamento e a memória principal. Elas são construídas com tecnologias que as tornam mais rápidas que outros níveis abaixo (PATTERSON; HENNESSY, 2011). Porém, essa velocidade vem em troca de custo mais elevado. Por isso, elas têm espaço de armazenamento menor, além de que memórias maiores podem ter sua velocidade de acesso diminuída, o que também motiva a existência de vários níveis de cache.

O princípio de sua funcionalidade é manter à disposição dos programas, de forma rápida, aqueles dados dos quais eles precisam ou que estão usando no momento. Esses dados são disponibilizados conforme a capacidade de armazenamento da cache. Esta comumente é menor que o conjunto de todos os dados sobre os quais o programa opera, resultando na necessidade de remover alguns dados para acomodar outros.

2.1.1 Localidade Espacial

Quando um programa referencia determinada posição da memória, é comum que logo em seguida os dados nas posições de memória adjacentes sejam necessários também. Assim é definida a localidade espacial: endereços próximos tendem a ser referenciados um após o outro com pouco tempo de diferença (PATTERSON; HENNESSY, 2011). As caches levam isso em conta para beneficiar as aplicações, trazendo dos

níveis de memória abaixo não só o dado requisitado, mas também os dados que o rodeiam, constituindo um bloco. Assim, do ponto de vista da cache, a memória é uma sequência de blocos que, quando necessários, são carregados em algum espaço disponível, ou substituem um bloco carregado previamente se não houver espaços disponíveis.

Analisar as caches ajuda a entender por que um esquema que usasse estruturas muito espaçosas para reduzir a quantidade de operações e acessos poderia não funcionar bem. No pior caso, acessos consecutivos poderiam ser todos a blocos diferentes, ocasionando o custo de trazer cada um para a cache e resultando na poluição da cache das aplicações, ou seja, diversos blocos com dados das aplicações seriam substituídos, tornando maior o tempo para acessá-los na próxima vez.

2.2 NON-UNIFORM MEMORY ACCESS

Non-Uniform Memory Access (NUMA) é um tipo de multiprocessador com espaço de endereçamento único em que diferentes partes da memória estão mais próximas de alguns núcleos do que dos outros (PATTERSON; HENNESSY, 2011). Deste modo, o tempo de acesso depende do núcleo e da memória acessada. Sistemas desse tipo possuem boa escalabilidade, pois é possível adicionar nós sem prejudicar o tempo de acesso dos núcleos às memórias mais próximas. Estas características diferem das de outro tipo de multiprocessador existente, *Uniform Memory Access* (UMA), em que o tempo de acesso independe do núcleo e da memória, e não há a vantagem de memórias locais com tempo de acesso reduzido. Um problema com arquiteturas UMA é a contenção: vários núcleos disputam pelo barramento para acessar a memória, podendo fazer com que alguns fiquem ociosos enquanto esperam, diminuindo o desempenho. Além disso, a escalabilidade é reduzida – ao aumentar a quantidade de núcleos, o tempo de acesso à memória também cresce, seja qual for a região acessada, podendo se tornar inaceitável.

O modo como os nós NUMA são interconectados determina os custos de comunicação entre quaisquer dois núcleos em nós distintos. Além disso, ele define os níveis que existirão a mais na hierarquia,

ou seja, a sua profundidade. Essas informações são de grande valia e devem ser fornecidas por representações da topologia com precisão. Mesmo poucos níveis a mais na rede de interconexão podem resultar em diferenças de desempenho significativas (RASHTI et al., 2011).

2.3 ESTRUTURAS DE DADOS

Uma *árvore* é uma estrutura de dados que define uma hierarquia, logo, é conveniente para representar hierarquias de memória.

Árvores são compostas por nós e ligações que relacionam esses nós. Cada nó possui dados que dependem do que a árvore representa e de com que propósito ela será usada. Cada ligação relaciona dois nós, um com papel de *pai*, e o outro com papel de *filho*. Ou seja, uma ligação estabelece que um nó a é pai de outro nó b , e, equivalentemente, que o nó b é filho do nó a .

Em uma árvore, existe um único nó que não possui pai, o qual é chamado de *nó raiz* (ou simplesmente *raiz*). Todos os demais nós possuem exatamente um pai. Cada nó pode ter qualquer quantidade de filhos. Se não possui nenhum, é chamado de *nó folha* (ou *folha*). Os filhos de um nó são ordenados. Essa ordem não necessariamente reflete algum atributo ou característica daquilo que os nós estão representando.

Para se realizar operações sobre essa estrutura de árvore, é possível seguir as ligações para descobrir os nós adjacentes (pai e filhos). Visto que árvores geralmente são visualizadas com o nó raiz no topo, *subir* uma ligação significa obter o pai de algum nó, e *descer*, obter um dos filhos de um nó.

Todos os nós que podem ser obtidos subindo, em sequência, uma ou mais ligações a partir de um nó são chamados de *ancestrais* desse nó. Semelhantemente, nós que podem ser obtidos apenas descendo ligações são *descendentes*. Nenhum nó é ancestral de si mesmo.

Uma árvore é dividida em *níveis*, cada um composto por um ou mais nós. O nível 0 é composto pela raiz. O nível i é composto por todos os nós que podem ser obtidos descendo i ligações em sequência a partir da raiz. O nível em que um nó está é também chamado de sua

profundidade.

A quantidade de filhos que um nó possui é chamada de *grau do nó*. O maior entre os graus dos nós que compõe um nível é chamado de *grau do nível*.

3 ESTADO DA ARTE

No estado da arte quanto à representação de topologias de máquina encontra-se o projeto *Hardware Locality* (hwloc) (BROQUEDIS et al., 2010a).

O hwloc é um pacote de software amplamente utilizado para a representação de topologias de máquina com grande portabilidade. Ele contém ferramentas de linha de comando, além de permitir que aplicações acessem as informações sobre a topologia por meio de uma API na linguagem C.

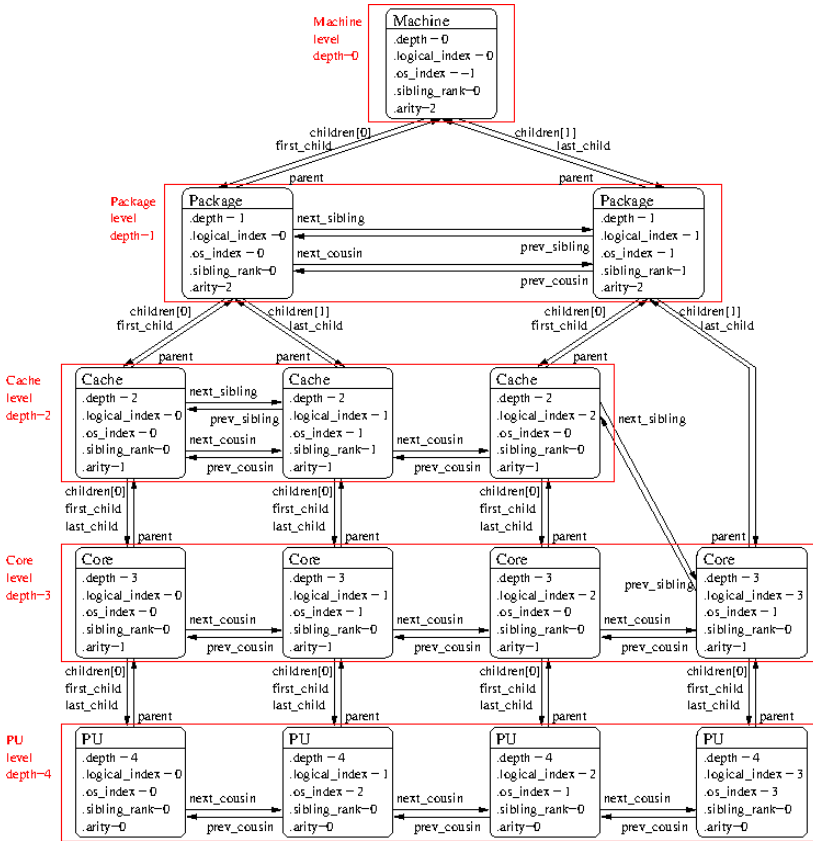
3.1 OBJETOS

Objetos são uma abstração usada para representar todos os elementos presentes na topologia, tanto memória quanto núcleos. A hierarquia de memória é modelada como uma árvore de objetos, onde cada nível contém objetos de apenas um tipo. A topologia por completo é representada de forma mais detalhada por meio de várias ligações (ponteiros) entre objetos, conforme as suas relações na hierarquia. Essas relações são definidas como:

- Pai (*parent*): nó pai na estrutura de árvore
- Filhos (*children*): nós filhos na estrutura de árvore
- Irmãos (*siblings*): nós com o mesmo pai
- Primos (*cousins*): Objetos numa mesma profundidade (e, portanto, de mesmo tipo); todos os objetos que compõe um determinado nível (irmãos ou não) são primos

A Figura 1 apresenta um exemplo dessas relações em uma dada topologia. Ela ilustra, ainda, no ramo mais a direita, como hierarquias assimétricas (que possuem quantidades diferentes de objetos em ramos partindo do mesmo nó) são tratadas: podem surgir “buracos” devido a objetos de um mesmo tipo serem agrupados no mesmo nível. Portanto, objetos irmãos não estarão necessariamente no mesmo nível, e o conceito de

Figura 1 – Relações entre objetos em topologias do hwloc. Fonte: (PORTABLE..., 2016)



profundidade não é exatamente o usado no contexto de estruturas de árvore, sendo possível irmãos terem profundidades diferentes.

Essas relações acrescentadas à estrutura de árvore facilitam a navegação entre objetos, em troca do espaço adicional ocupado por cada ponteiro nos objetos. Por exemplo, como indicado na figura, a partir de qualquer objeto, é possível navegar para o próximo primo (pelo ponteiro `next_cousin`), ou para o próximo irmão (ponteiro `next_sibling`), se existirem. Além disso, todos os objetos são armazenados numa estrutura de arranjo de arranjos de objetos, semelhante a uma matriz, mas com

arranjos internos de tamanho variável. Cada um dos arranjos internos contém os objetos de um nível, e eles são organizados no arranjo externo na ordem dos níveis, de modo que é possível acessar o *n*ésimo objeto de um dado nível diretamente usando essa estrutura.

Todos os objetos que compõe a hierarquia e outras estruturas de dados utilizadas na representação da topologia são armazenados em uma estrutura (`struct hwloc_topology`) que é utilizada pelas funções que acessam dados da topologia.

3.2 FUNÇÕES E ATRIBUTOS

Existem funções que podem ser utilizadas para acessar os objetos da hierarquia e informações sobre eles. Entre elas, o `hwloc` possui diversas funções de percorrimento. Estas permitem acessar nós da árvore que representa a hierarquia de forma absoluta ou relativa a outros nós. Por exemplo, é possível encontrar o nó com um determinado índice dentro de um dado nível, ou, a partir de algum nó, o próximo no mesmo nível. Alguns exemplos de funções são:

- `hwloc_get_nbobjs_by_type`: Informa quantos objetos de um determinado tipo existem, por exemplo, a quantidade de núcleos.
- `hwloc_get_cache_covering_cpuset`: Encontra a primeira memória cache que abrange um dado conjunto de CPUs.
- `hwloc_get_ancestor_obj_by_type`: Encontra o ancestral de um objeto que seja de um determinado tipo.
- `hwloc_get_ancestor_obj_by_depth`: Semelhante à função anterior, procurando por nível em vez de tipo.
- `hwloc_get_common_ancestor_obj`: Encontra o ancestral comum mais próximo (ACMP) entre dois objetos, isto é, o nó de maior profundidade que é ancestral de ambos.

Essas funções foram analisadas quanto à complexidade com o objetivo de identificar pontos que poderiam ser melhorados do ponto

de vista do desempenho. Essa análise revelou que, em geral, elas têm tempo constante ($O(1)$) ou linear na altura da árvore ($O(\textit{altura})$), que é o mesmo que $O(\log N)$, onde N é a quantidade de nós da árvore. Além disso, foi analisado o projeto HieSchella, o qual possui código aberto e utiliza o hwloc (HIERARCHICAL. . . , 2013). Foram identificadas as chamadas mais importantes a funções do hwloc no HieSchella para se ter uma referência de quais funções são mais relevantes para o desempenho dentro de um projeto real. O Capítulo 4 apresenta o que foi feito em decorrimento dessas análises.

Os objetos ainda têm atributos que podem guardar diversas informações, como detalhes do sistema operacional ou da máquina, que podem ser coletadas automaticamente durante o descobrimento da topologia ou adicionadas manualmente. Além disso, há várias informações específicas de caches, como associatividade ou tamanho. Também é possível associar estruturas arbitrárias aos objetos, conforme for necessário, usando dados de usuário (ponteiro `userdata`).

3.3 CONJUNTOS DE CPUS

Cada objeto pode ter um *cpuset* (conjunto de CPUs), que é um mapeamento dos núcleos existentes para bits (*bitmap*), usado para determinar quais núcleos estão sob o objeto na hierarquia, implementado como uma sequência de variáveis de 32 bits, tantas quantas forem necessárias. A implementação dos *bitmaps* poderia ser otimizada para diminuir a quantidade de variáveis utilizadas em casos em que existam grandes quantidades de núcleos. Algo nesse sentido é citado no respectivo arquivo fonte em um comentário sobre otimizações que poderiam ser realizadas (HARDWARE. . . , 2016).

4 IMPLEMENTAÇÃO

Esta seção apresenta as análises realizadas com foco no desempenho e os algoritmos e implementações resultantes. Todo o código foi desenvolvido na linguagem C++.

Diante das considerações feitas sobre o projeto hwloc e o seu uso no projeto HieSchella, a função que encontra o ancestral comum mais próximo (ACMP) entre dois nós foi escolhida como alvo de otimizações. Ela é uma das funções implementadas no hwloc com complexidade $O(\textit{altura})$ (ou $O(\log N)$) e está entre as de uso mais significativo no HieSchella. Na seção a seguir, será discutido como essa função poderia ser implementada de forma mais eficiente e quais as implicações de diferentes abordagens.

4.1 IMPLEMENTAÇÕES DA FUNÇÃO ACMP

A função que encontra o ancestral comum mais próximo recebe dois nós como entrada (e possivelmente algumas estruturas adicionais, se houver necessidade) e retorna um nó (o ancestral) como saída. Cada par de nós em uma árvore tem exatamente um ancestral comum mais próximo. Em geral, o caso em que os dois nós são o mesmo ($\text{ACMP}(a, a)$) não será tratado. Se um nó a for ancestral de outro nó b , $\text{ACMP}(a, b)$ terá como resultado a .

4.1.1 Abordagem inicial

A maneira provavelmente mais intuitiva de se descobrir o ACMP é “subir” pela árvore, isto é, a partir dos dois nós dos quais se deseja encontrar o ACMP, seguir as ligações em direção aos pais até se chegar ao mesmo nó. Por ser um método que funciona subindo as ligações, será referido como método **ASCENDACMP** (Algoritmo 1). Sua complexidade é $O(\log N)$. Para que esse método funcione, é necessário subir de forma sincronizada – a cada passo, devem-se comparar ancestrais dos dois nós iniciais que estejam no mesmo nível. No caso do hwloc, o algoritmo se torna um pouco mais complicado, pois ele trata hierarquias assimétricas

(pode haver ramos sem nó em algum nível). Neste caso, mesmo que se tenham dois nós no mesmo nível, seus pais podem estar em níveis diferentes. Ao fim de cada iteração, um dos nós pode estar “mais alto” (nível menor), portanto, este método será chamado de ONDULACMP (Algoritmo 2), em analogia a uma superfície ondulada. Um ponto que pode afetar o desempenho destes algoritmos é o fato de que é necessário acessar cada nó (os nós iniciais e todos os seus ancestrais até o ACMP), e os nós estão espalhados pela memória.

Algoritmo 1: ASCENDACMP – ACMP subindo as ligações

Entrada: Dois nós a e b

Saída: O ACMP entre a e b

// Inicialmente, encontra ancestrais de a e b no
mesmo nível

enquanto nível $_a$ > nível $_b$ **faça**

└ $a \leftarrow \text{pai}(a)$

enquanto nível $_b$ > nível $_a$ **faça**

└ $b \leftarrow \text{pai}(b)$

enquanto $a \neq b$ **faça**

└ $a \leftarrow \text{pai}(a)$

└ $b \leftarrow \text{pai}(b)$

retorna a

Algoritmo 2: ONDULACMP – ACMP implementado no
hwloc

Entrada: Dois nós a e b

Saída: O ACMP entre a e b

enquanto $a \neq b$ **faça**

└ **enquanto** nível $_a$ > nível $_b$ **faça**

└└ $a \leftarrow \text{pai}(a)$

└ **enquanto** nível $_b$ > nível $_a$ **faça**

└└ $b \leftarrow \text{pai}(b)$

└ **se** $a \neq b$ e nível $_a$ = nível $_b$ **então**

└└ $a \leftarrow \text{pai}(a)$

└└ $b \leftarrow \text{pai}(b)$

retorna a

Considerando a estrutura de árvore apenas, a única informação que relaciona um nó aos seus ancestrais são as ligações. Isso indica que outras estruturas associadas aos nós ou à árvore como um todo se fazem necessárias para ser possível encontrar o ACMP com algum método além dos mencionados. Podemos considerar a seguinte ideia para encontrar outra maneira de implementar a função ACMP: Para uma dada árvore que representa uma topologia,

1. Atribuir um valor (chamado de ID) a cada nó da árvore;
2. Definir uma função $ACMP_{IDs}$ que receba o ID de dois nós distintos e tenha como resultado o nó ACMP.

Esses IDs (em conjunto com outras informações associadas a cada nó individualmente ou à árvore como um todo conforme necessário) podem estabelecer alguma relação entre um nó e seus ancestrais além da que já existe por meio das ligações da árvore.

Idealmente, essa função $ACMP_{IDs}$ deveria ser *processada* em tempo constante. Ou seja, é necessário encontrar um algoritmo que seja executado em tempo constante nos processadores modernos. No entanto, é preciso lembrar que, mesmo que a quantidade de instruções executadas pelo processador seja constante, a maneira como a memória é acessada pode aumentar o tempo de execução, especialmente quando há outras tarefas fazendo uso da memória, o que deve acontecer em cenários reais.

Com isso em mente, podemos definir tal função usando as operações básicas encontradas no conjunto de instruções das arquiteturas atuais, tais como as operações aritméticas e operações lógicas bit-a-bit.

4.1.2 Matriz

Uma possibilidade é relacionar cada par de nós ao seu ACMP por meio de uma matriz em que cada linha representa um nó da árvore, assim como cada coluna, e o cruzamento contém o ACMP entre o nó da linha e o nó da coluna. Para isso, pode-se atribuir a cada um dos N nós da árvore um ID único entre 0 e $N - 1$ e usar esses IDs como

índices na matriz, que terá, na posição $A(i, j)$, o ACMP entre o nó de ID i e o nó de ID j . No entanto, esta é uma estratégia ingênua, pois esse espaço $O(N^2)$ ocupado na memória resultaria em problemas como sujar a cache da aplicação. A Tabela 1 sumariza a diferença entre a utilização de uma árvore e de uma matriz para a função ACMP. Visto que a matriz é simétrica, apenas cerca de metade dela precisa realmente ser armazenada. Esta otimização foi utilizada na implementação dos testes de desempenho, conforme o Algoritmo 3. Isso, no entanto, não altera a complexidade espacial.

Tabela 1 – Complexidade das representações com árvore e com matriz

	Árvore	Matriz
Acesso (encontrar ACMP)	$O(\log N)$	$O(1)$
Espaço ocupado na memória	$O(N)$	$O(N^2)$

Algoritmo 3: MATRIZACMP – ACMP usando uma matriz

Entrada: Dois nós a e b

Uma matriz M que possui na linha i e coluna j
 $(M(i, j)), i > j$, o ACMP entre os nós de ID i e j

Saída: O ACMP entre a e b

linha $\leftarrow \max(\text{id}_a, \text{id}_b)$

coluna $\leftarrow \min(\text{id}_a, \text{id}_b)$

retorna $M(\text{linha}, \text{coluna})$

4.1.3 Função de espalhamento

Outra possibilidade foi idealizada, dividindo a função ACMP_{IDs} em dois passos:

1. dados os IDs de dois nós, descobrir o ID do ancestral;
2. encontrar o nó que possui esse ID.

Em linhas gerais, o funcionamento do primeiro passo se baseia no seguinte: O ID de um nó é formado por um ou mais bits seguidos do ID do seu pai, de modo que, dados dois nós a e b , b descendente de a , os bits menos significativos de b são iguais ao ID de a . Desse modo, dados dois descendentes de um nó c , todos os bits menos significativos deles que coincidem (todos os que vêm antes do primeiro que difere) são iguais ao ID de c (ignorando zeros à esquerda). Usando apenas as operações que podem ser vistas nas linhas 1 – 4 do Algoritmo 4 mais adiante, para as quais existem instruções que tomam poucos ciclos nas arquiteturas atuais, pode-se descobrir o ID do ACMP. A quantidade de instruções é fixa, portanto, a complexidade é constante. Essa estratégia será chamada de COMBINACMP pelo modo como o ID do ancestral é extraído da parte dos IDs em que eles combinam.

Para descrever como os IDs são formados, as seguintes definições são necessárias:

- id_a é o ID do nó a .
- id_a^{str} é uma cadeia (*string*) de bits correspondente ao id_a em binário (com o bit menos significativo na última posição). O tamanho depende do nível de a , como será especificado adiante.

Os IDs, então, são definidos da seguinte forma:

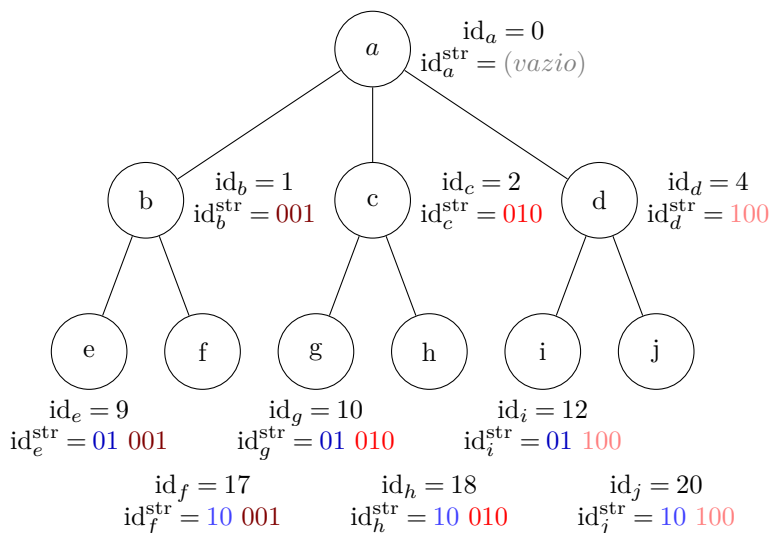
- A raiz tem id 0, e $\text{id}_{\text{raiz}}^{\text{str}}$ é a cadeia vazia.
- Quanto aos demais, para cada nó a ,

$$\text{id}_a^{\text{str}} = x \parallel \text{id}_{\text{pai}(a)}^{\text{str}}$$

onde \parallel é a concatenação e x é uma cadeia cujo tamanho é o grau do nível de $\text{pai}(a)$. Se a é o i -ésimo filho de seu pai, x possui 1 na i -ésima posição da direita para a esquerda e 0 nas demais.

Assim, as cadeias correspondentes aos IDs de todos os nós de um nível têm o mesmo tamanho, que é o somatório dos graus dos níveis anteriores. A Figura 2 apresenta os IDs atribuídos aos nós de uma árvore.

Figura 2 – Exemplo de árvore com IDs atribuídos aos nós



Falta, então, apenas o segundo passo, o de encontrar o nó a partir do ID. Algumas opções para isso seriam:

- Usar os IDs como índices em um arranjo: Seria simples, mas impraticável – poderiam ser necessários arranjos com milhões de posições (devido a como os IDs são formados) e apenas algumas centenas ocupadas.
- Usar uma função de espalhamento (*hash*): a maneira mais simples seria apenas aplicar a operação módulo com algum m ($id \bmod m$). No entanto, podem haver colisões (dois IDs diferentes podem ser congruentes módulo m). Isso pode ser tratado, mas acarretaria acessos adicionais à memória, o que não é desejável. Por exemplo, para os IDs do nível 1 da Figura 2, $(1, 2, 4)$, $m = 3$ resultaria em $(1, 2, 1)$, com dois nós mapeados para a posição 1.
- Buscar uma função que não cause colisões: o mesmo que a função de espalhamento, porém utilizando um valor de módulo que não cause colisões. Pode exigir arranjos cujo tamanho é algumas vezes

Algoritmo 4: COMBINACMP – ACMP usando as novas estruturas

Entrada: Dois nós a e b

Uma função BITPARANÍVEL, que retorna o nível do ancestral comum entre dois nós dado um número com apenas um bit 1, na primeira posição em que o ID dos nós difere

A função ESPALHAMENTO (Algoritmo 5) com dados da árvore em questão

Uma matriz (vetor de vetores) E , onde o vetor $E(i)$ possui os nós do nível i distribuídos pela função ESPALHAMENTO(i , id)

Saída: O ACMP entre a e b

```
// Bits que diferem
1 dif ← ida OuExbit-a-bit idb
  // Bit 1 apenas na primeira posição em que os IDs
  // diferem
2 bit ← dif Ebit-a-bit (−dif)
  // Todos os bits antes do primeiro diferente
3 masc ← bit − 1
  // Id do ancestral comum mais próximo
4 id ← ida Ebit-a-bit masc
  // Encontra o nó
5 nível ← BITPARANÍVEL(bit)
6 pos ← ESPALHAMENTO(nível, id)
7 retorna  $E(\text{nível}, \text{pos})$ 
```

maior que a quantidade de nós, mas aparenta compensar quando comparado a tratar colisões de outros modos. Por exemplo, com os mesmos IDs, $m = 4$ resultaria em (1,2,0), sem colisões (e, coincidentemente, exigiria um arranjo de apenas três posições). Este foi o método escolhido.

As linhas 5 – 7 do Algoritmo 4 apresentam como este método funciona. Quanto à implementação da função BITPARANÍVEL, os processadores atuais possuem uma instrução que encontra a posição do primeiro bit 1 em um número, a qual pode ser usada como índice em um pequeno arranjo contendo o devido resultado da função BITPARANÍVEL.

Algoritmo 5: ESPALHAMENTO – Função de espalhamento

Entrada: Um nível n ($n \in \mathbb{Z}$, $n \geq 0$)

O id de um nó

Saída: A posição em que o nó deve ficar no vetor do seu nível

Nota: Os valores ad_n , m_n , $mult_n$ e $desl_n$ dependem da árvore com a qual se usará esta função e do nível recebido (n).

x **Desl_{direita}** b é o valor x deslocado b bits para a direita, equivalente a $\lfloor x/(2^b) \rfloor$.

```
// Minimiza o maior resultado mod  $m_n$  para
    minimizar o tamanho do vetor
```

```
v  $\leftarrow$  id +  $ad_n$ 
```

```
// Equivalente a  $v \bmod m_n$ 
```

```
retorna v - ((v *  $mult_n$ ) Desldireita  $desl_n$ ) *  $m_n$ 
```

Se os IDs têm até b bits, esse arranjo precisar ter b posições. A função ESPALHAMENTO (Algoritmo 5) utiliza dados específicos para a árvore, que devem ser descobertos previamente.

Testes feitos indicaram que a operação mais custosa no COMBINACMP era o módulo, usado na função ESPALHAMENTO. No entanto, existem técnicas para realizar de maneira mais barata a divisão com denominador previamente conhecido (RECIPROCAL..., 2002), e com o resultado da divisão pode-se calcular o módulo. Essas otimizações são usadas, por exemplo, por compiladores, sendo chamadas de Redução de Força. Aqui, no entanto, a ideia não é realizá-las em tempo de compilação, mas quando se está montando as estruturas para uma hierarquia específica. Isso continua sendo vantajoso pois a montagem ocorre apenas uma vez e esta operação de módulo com o mesmo valor será realizada uma grande quantidade de vezes. Portanto, é possível substituir a operação de módulo por outras operações que se mostraram mais baratas, a saber, duas multiplicações, um deslocamento e uma subtração.

Para se encontrarem valores apropriados para a função ESPALHAMENTO, são testados valores cada vez maiores para m , até

que não haja colisões. Ao se encontrar um m válido, se busca um ad que minimize o maior resultado de $(id + ad) \bmod m$, minimizando o tamanho do arranjo usado. Então, são descobertos os valores de $mult$ e $desl$, usando a técnica descrita em Reciprocal... (2002), para evitar a operação de módulo.

A corretude das estruturas utilizadas na implementação do COMBINACMP foi testada. O programa de testes cria uma árvore e compara o resultado do ASCENDACMP com o do COMBINACMP para algumas buscas, além de verificar se todos os nós estão realmente na posição retornada pela função ESPALHAMENTO. Também é causada uma mutação em uma árvore e é verificado se o erro é detectado por esse código de verificação.

O COMBINACMP, assim como o ONDULACMP e o MATRIZACMP, trata corretamente hierarquias assimétricas, diferentemente do ASCENDACMP. No entanto, ele possui uma limitação: A quantidade de bits do ID de um nó pode chegar até o somatório dos graus de todos os níveis. Se esta quantidade ultrapassar o tamanho de uma palavra (geralmente 32 ou 64 bits), o método terá problemas, limitando as árvores que podem ser usadas. Além disso, a técnica usada na função ESPALHAMENTO para otimizar o módulo inclui uma multiplicação cujo resultado pode ter até cerca do dobro da quantidade de bits do penúltimo nível (o último nível não possui espalhamento, pois seus nós nunca serão ACMP). Como uma solução parcial, níveis de grau um podem ser omitidos na definição dos IDs, visto que seus nós também nunca serão ACMP. Atribuindo a cada nó desses níveis e ao seu filho o mesmo ID, eles continuam podendo ser usados em buscas de ACMP. Deste modo, o tamanho máximo seria o somatório dos graus de todos os níveis de grau diferente de 1.

O método poderia ser adaptado para usar mais palavras se necessário, teoricamente deixando de ser $O(1)$ e se tornando $O(\log N)$, mas, na prática, nenhuma árvore deve ser tão grande que exija uma quantidade significativa.

O código implementado tem suporte à aplicação das operações Ou e Ou-Exclusivo ao ID no início da função ESPALHAMENTO, com valores

que também precisariam ser descobertos previamente, o que poderia reduzir ainda mais o tamanho dos arranjos usados. No entanto, devido a restrições de tempo, a busca desses valores não foi implementada.

5 TESTES DE DESEMPENHO

Com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo desenvolvido, foram realizados testes que permitiram comparar o desempenho das diferentes abordagens. Os dados foram obtidos medindo o tempo tomado pelos algoritmos ao se encontrar repetidamente o ACMP entre os nós folhas de uma árvore.

Um programa foi desenvolvido, também na linguagem C++, para realizar os testes de desempenho. Foi utilizada a funcionalidade de templates da linguagem para facilitar a definição equivalente dos testes para todos os algoritmos, mas ainda assim permitir que o compilador otimizasse as chamadas, evitando custos adicionais durante os testes devido à hierarquia de classes utilizada. O programa depende da biblioteca do hwloc. Os valores medidos são escritos em um arquivo no formato CSV (Valores Separados por Vírgula – *Comma-Separated Values*)

5.1 MÁQUINAS UTILIZADAS NOS TESTES

Os testes foram executados sobre duas máquinas (*notebooks*), que serão identificadas como Máquina A e Máquina B, para as quais o programa lstopo gera as representações de hierarquia apresentadas na Figura 3. Estas representações revelam o tamanho das memórias cache, que podem ter efeito nos resultados dos testes. A Tabela 2 apresenta mais detalhes de ambas.

5.2 CONFIGURAÇÕES

Em ambas as máquinas, os testes foram compilados usando a versão 5.3.0 do compilador GCC (*GNU Compiler Collection*) (GCC..., 2017), inclusa no projeto Cygwin (CYGWIN, 2017), o qual emula um sistema Unix em versões atuais do sistema operacional Windows. Esta versão do GCC era a única disponível no Cygwin durante o desenvolvimento do trabalho com a qual não foram encontrados problemas com

Tabela 2 – Características das máquinas utilizadas nos testes

	Máquina A	Máquina B
Sistema Operacional	Windows 10 Home 64 bits	
Processador	Intel® Core™ i5 5200U 2.20 GHz	i7 6600U 2.50 GHz
Memória Principal	DDR3 6 GB 798.7 MHz	DDR4 8 GB 1067 MHz

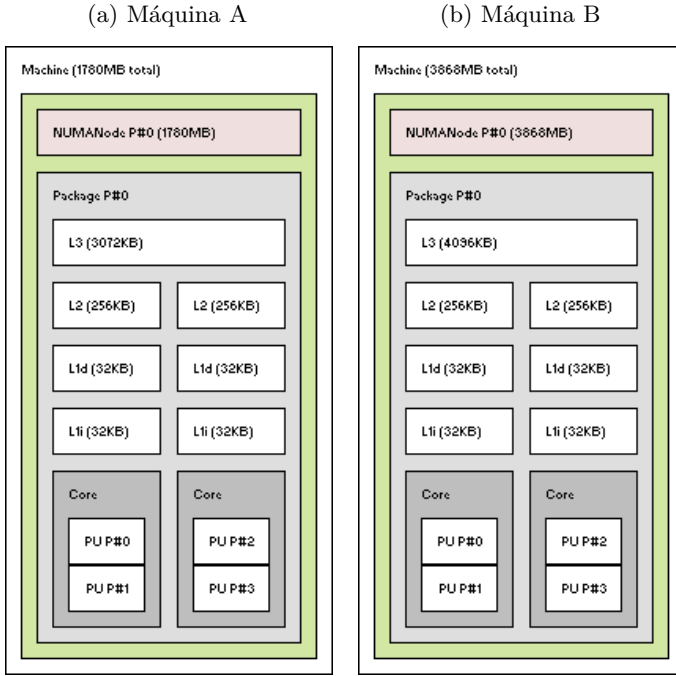
funcionalidades da linguagem C++. Foram usadas as seguintes *flags* de compilação:

- `-std=c++11`: Utiliza funcionalidades do padrão C++11 da linguagem C++
- `-O3`: Ativa diversas otimizações
- *flags* obtidas com os comandos `pkg-config --cflags hwloc` e `pkg-config --libs hwloc` no Cygwin, que imprimem as *flags* necessárias para utilizar o hwloc

5.3 ESTRUTURA DOS TESTES

Os testes consistem em encontrar repetidamente o ACMP entre os nós folhas de uma dada árvore com os diferentes algoritmos. Cada vez que as estruturas necessárias são criadas e os testes são executados sobre elas com um determinado algoritmo, obtém-se uma observação, que é o tempo que levou para realizar a quantidade especificada de repetições da função ACMP entre os nós folhas da árvore com o algoritmo. É usada uma grande quantidade de repetições pois não é possível medir corretamente o tempo de apenas uma chamada à função, o qual é menor que a resolução das chamadas de temporização no processador.

Figura 3 – Saída do programa lstopo sobre as máquinas utilizadas



Para cada algoritmo, uma árvore de estrutura equivalente é criada (as estruturas de dados dependem do algoritmo) a partir dos graus fornecidos como entrada. Os graus são recebidos como uma lista de inteiros positivos. O i -ésimo será o grau do nível $i - 1$. Deste modo, se os graus recebidos são (g_1, g_2, \dots, g_n) , a raiz terá g_1 filhos, cada um com g_2 filhos, e assim por diante, até os nós do nível $n - 1$, que terão g_n filhos cada.

Para obter uma observação de um algoritmo, uma lista contendo todos os pares possíveis de nós folhas (todas as combinações de duas folhas) é criada. Esta lista é embaralhada, usando uma semente fixa, de modo que a ordem pseudo-aleatória é a mesma para todas as execuções de todos os algoritmos sobre esta árvore. Isto é feito para evitar que o desempenho dos algoritmos seja beneficiado pelo acesso repetido dos mesmos nós, o que não corresponde a situações reais.

Uma observação é obtida por meio de uma etapa de aquecimento seguida de uma de medição, na qual o tempo total das repetições da função ACMP é medido. Ambas as etapas consistem em algum número de rodadas, o qual geralmente deve estar na casa de alguns milhares, dependendo do tamanho da árvore, para que o tempo medido seja significativo. Em cada rodada, a lista previamente embaralhada de pares de folhas é varrida e, para cada par, o ACMP é encontrado usando o algoritmo em questão.

As observações dos diferentes algoritmos são realizadas de forma intercalada. O número de observações obtidas para cada algoritmo em uma execução do programa depende de dois parâmetros, número de iterações externas e de iterações internas. O número de iterações internas é a quantidade de observações que serão obtidas para um dos algoritmos antes de passar para outro. A execução da quantidade de iterações internas para cada algoritmo compõe uma iteração externa. Esta forma de especificar a quantidade de observações originou-se nas etapas iniciais dos testes, para facilitar a visualização dos resultados, mas foi mantida. No entanto, julga-se melhor usar poucas iterações internas e mais externas para evitar que eventuais condições temporárias da máquina, causadas por elementos externos ao programa, afetem diversas observações de apenas um dos algoritmos.

O programa também permite escolher quais algoritmos serão testados dentre os quatro analisados.

5.3.1 RESULTADOS

As árvores utilizadas nos testes correspondem à hierarquia de memória de máquinas reais, apresentadas no site do projeto hwloc, como representadas pelo programa lstopo (THE . . . , 2016). Assim, os resultados refletem a diferença dos algoritmos quando operando sobre hierarquias reais.

Foram usadas, em todas as execuções, mil rodadas na etapa de aquecimento e dez mil na etapa de medição. Foram usadas sempre três iterações internas.

Notou-se a presença de diversos *outliers* de valor significativamente mais baixo nas observações obtidas. Acredita-se que isso se deva a momentos em que os processos do sistema operacional em segundo plano em conjunto tenham coincidentemente requerido pouco processamento.

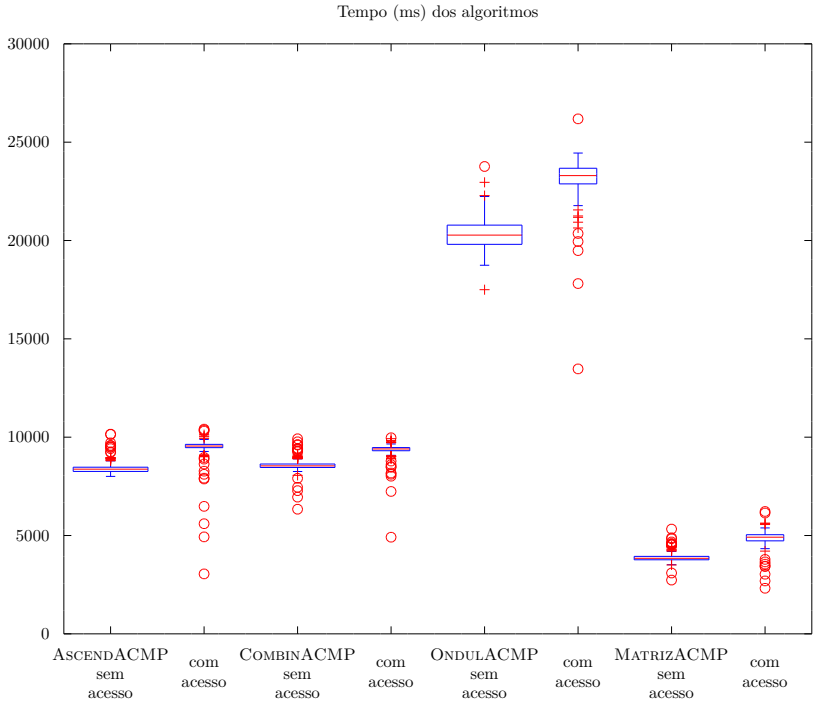
Inicialmente, os testes foram feitos sem acessar o ACMP obtido a cada execução, ou seja, para cada par de folhas, simplesmente se encontrava o ponteiro para o ancestral, mas nenhum dado do ancestral era obtido. No entanto, em cenários reais, os nós seriam buscados para se obter alguma informação sobre eles, portanto, foi adicionado um acesso a um valor qualquer de cada ACMP encontrado para simular isso. A Figura 4 compara o desempenho dos quatro algoritmos na Máquina A para a árvore com os graus (1, 4, 1, 1, 9, 2, 1, 1, 4) antes e depois do acréscimo desse acesso. Sem o acesso foram feitas 300 observações de cada algoritmo e, com o acesso, 150 observações. Como era esperado, os tempos aumentaram para todos os algoritmos, porém o algoritmo menos afetado foi o novo e o mais afetado foi o da matriz, considerando a porcentagem de aumento do valor mediano após acrescentar o acesso, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Aumento (%) do tempo mediano

	ASCENDACMP	COMBINACMP	ONDULACMP	MATRIZACMP
Mediana sem acesso	8373.99	8540.89	20274.45	3841.80
Mediana com acesso	9549.51	9401.76	23300.20	4914.60
Aumento (%)	14,04	10,08	14,92	27,92

Cinco árvores distintas foram usadas nos testes. Dados sobre elas são apresentados na Tabela 4. Para cada algoritmo e com cada árvore, foram feitas 150 observações na Máquina A e 450 observações na Máquina B. As Figuras 5 e 6 apresentam o tempo médio por chamada da função ACMP, calculado usando a mediana dos dados, para cada uma das árvores. É possível ver que o COMBINACMP foi o que teve tempos mais estáveis, apesar da variação do tamanho das árvores.

Figura 4 – Tempos com e sem acesso ao ACMP



Cada retângulo representa o intervalo onde estão as 50% observações centrais. A linha vermelha dentro do retângulo indica a mediana. O símbolo “+” indica observações distantes da mediana em comparação com as demais (*outliers*), e o símbolo “o”, observações ainda mais distantes.

Tabela 4 – Árvores utilizadas nos testes

Graus	Nº de nós	Nº de folhas
2 1 1 8 1 1 1 2	103	32
8 1 1 6 1 1 1	217	48
4 4 1 3 2 1 1 1	469	96
2 2 1 5 1 1 1 1 8	271	160
1 4 1 1 9 2 1 1 4	554	288

Figura 5 – Tempo médio por busca (ns) – Máquina A

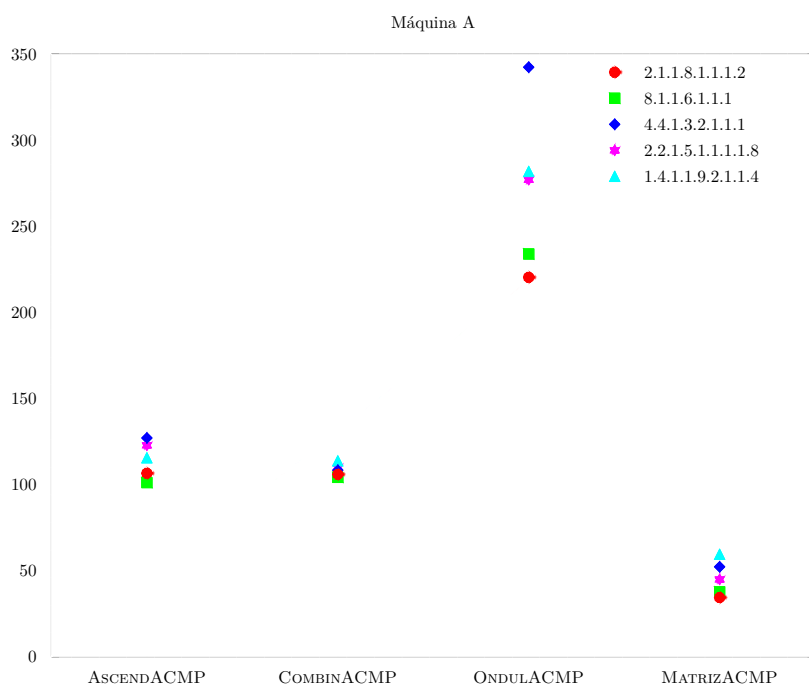
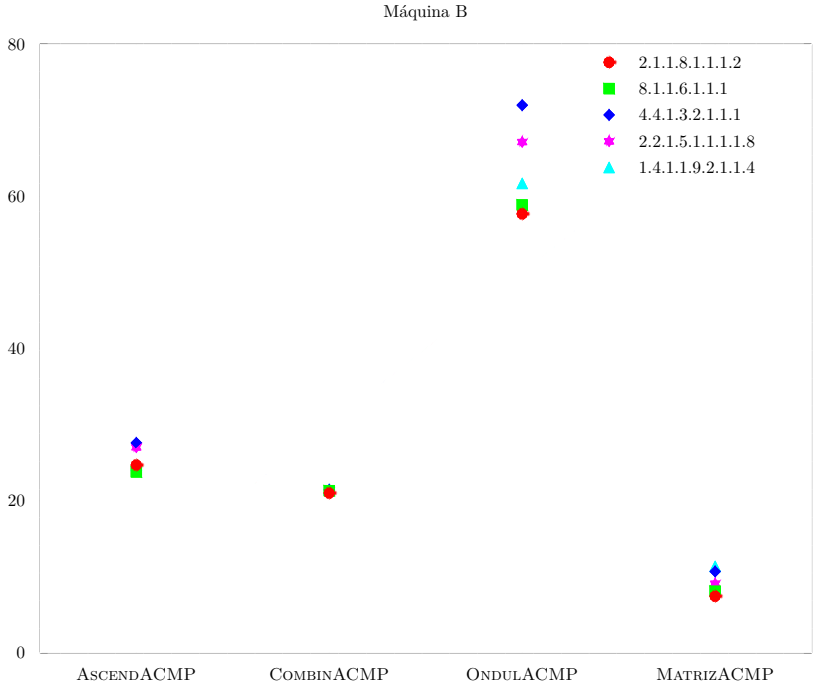


Figura 6 – Tempo médio por busca (ns) – Máquina B



6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver formas otimizadas de representar topologias de máquina. O projeto hwloc, estado da arte em representação de topologias, foi analisado e a função que encontra o ACMP foi identificada como um ponto relevante a se otimizar. Com essa análise, novas estruturas foram desenvolvidas, além de um algoritmo utilizando-as, COMBINACMP. Esse algoritmo e outras abordagens foram implementados e testados.

O COMBINACMP mostrou características promissoras, como maior estabilidade quanto ao tempo e estruturas que devem originar acessos à memória menos esparsos do que nas outras abordagens. O MATRIZACMP, apesar de ter tido tempos menores, se mostrou instável diante do aumento do tamanho das árvores utilizadas. Não foram feitos testes com aplicações reais, mas a instabilidade diante dos testes realizados é uma evidência de que seu uso da memória prejudicaria o desempenho. O desempenho do ASCENDACMP foi semelhante ao do COMBINACMP, mas pode também estar sujeito à influência do padrão de acessos à memória, assim como o ONDULACMP, utilizado pelo hwloc, que ainda necessita de um processamento maior.

Como trabalhos futuros, pode-se avaliar o desempenho dos algoritmos diante de aplicações reais e fazer outras análises, como acompanhar o uso da memória com mais detalhes. Se isto se mostrar relevante, outras técnicas podem ser estudadas para diminuir o tamanho das estruturas usadas no COMBINACMP, incluindo a aplicação de máscaras `Ou` e `Ou-Exclusivo` aos IDs na função `ESPALHAMENTO`, para o que há suporte no código desenvolvido, embora não tenha sido usado.

Quanto a outras funções presentes no hwloc, pode-se estudar a possibilidade e o impacto de otimizações na representação do conjunto de CPUs dos objetos, o qual é usado, por exemplo, para determinar se um objeto está sobre outro na hierarquia de memória. Além disso, outra função identificada como relevante no projeto HieSchella é a `hwloc_get_ancestor_obj_by_type`, que encontra o ancestral em determinado nível, também deixando espaço para se estudar se otimizações

teriam efeito significativo no desempenho.

REFERÊNCIAS

- BARROSO, L. et al. Attack of the killer microseconds. *Communications of the ACM*, ACM, v. 60, n. 4, p. 48–54, 2017.
- BROQUEDIS, F. et al. hwloc: a Generic Framework for Managing Hardware Affinities in HPC Applications. In: *PDP 2010-The 18th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Computing*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 180–186. ISSN 1066-6192.
- BROQUEDIS, F. et al. ForestGOMP: an efficient OpenMP environment for NUMA architectures. *International Journal of Parallel Programming*, Springer, v. 38, n. 5-6, p. 418–439, 2010.
- CYGWIN. 2017. Disponível em: <<https://www.cygwin.com>>. Acesso em: 31/05/2017.
- FATAHALIAN, K. et al. Sequoia: Programming the Memory Hierarchy. In: *Proceedings of the 2006 ACM/IEEE Conference on Supercomputing*. New York, NY, USA: ACM, 2006. (SC '06). ISBN 0-7695-2700-0. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1188455.1188543>>.
- FRANCESQUINI, E.; GOLDMAN, A.; MÉHAUT, J.-F. A numa-aware runtime environment for the actor model. In: *IEEE. Parallel Processing (ICPP), 2013 42nd International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 250–259.
- GCC, the GNU Compiler Collection. 2017. Disponível em: <<https://gcc.gnu.org>>. Acesso em: 31/05/2017.
- HARDWARE locality (hwloc). 2016. Disponível em: <<https://github.com/open-mpi/hwloc/>>. Acesso em: 16/07/2016.
- HIERARCHICAL Scheduling for Large Scale Architectures. 2013. Disponível em: <<http://forge.imag.fr/projects/hieschella/>>. Acesso em: 14/07/2016.
- PATTERSON, D. A.; HENNESSY, J. L. *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*. 4th ed.. ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2011.
- PILLA, L. L. *Topology-Aware Load Balancing for Performance Portability over Parallel High Performance Systems*. Tese (Doutorado) — Université de Grenoble; UFRGS, 2014.

PORTABLE Hardware Locality (hwloc) Documentation: v1.11.3. 2016. Disponível em: <<https://www.open-mpi.org/projects/hwloc/doc/v1.11.3/a00002.php>>. Acesso em: 16/07/2016.

RASHTI, M. J. et al. Multi-core and network aware mpi topology functions. *Recent Advances in the Message Passing Interface*, Springer, jan 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-24449-0_8>.

RECIPROCAL Multiplication, a tutorial. 2002. Disponível em: <<http://homepage.divms.uiowa.edu/~jones/bcd/divide.html>>. Acesso em: 01/06/2017.

THE Best of lstopo. 2016. Disponível em: <<https://www.open-mpi.org/projects/hwloc/lstopo/>>. Acesso em: 29/05/2017.

TREIBIG, J.; HAGER, G.; WELLEIN, G. LIKWID: A lightweight performance-oriented tool suite for x86 multicore environments. In: *Proc. 39th Int. Conf. Parallel Processing Workshops*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 207–216. ISSN 0190-3918.

APÊNDICE A – CÓDIGO DESENVOLVIDO

A.1 ESTRUTURAS (COMBINACMP)

arv/arv.h

```

1  #ifndef ARV_H
2  #define ARV_H
3
4  #include <iostream>
5  #include <bitset>
6  #include <climits>
7  #include <string>
8  #include <vector>
9
10 #include <algorithm>
11
12 #include "id.h"
13 #include "arv_mod.h"
14 #include "config_dbg.h"
15
16 struct estr_No;
17 typedef estr_No* No;
18
19 struct estr_No
20 {
21     // Id usado para encontrar ancestral mais próximo
22     ID id;
23
24     No pai;
25     int numFilhos;
26     No *filhos;
27
28     // Nível do nó: 0 -> raiz
29     int nivel;
30
31     void imprimir(int nBits = sizeof(id)*CHAR_BIT) { imprimir(0,
        nBits); }
32
33     friend inline std::ostream& operator<<(std::ostream &o, const No
        n) { o << n->id; return o; } // !!!
34
35     void imprimir(int ind, int nBits)
36     {
37         for (int i = 0; i < ind; i++)
38             std::cout << ' '; // Indentação
39         std::cout << "No " << idBin(nBits)
40             /*<< " (" << nível << ' ' << numFilhos << ') '*/ << '\n';
41         ++ind;

```

```
42     for (int f = 0; f < numFilhos; f++)
43         filhos[f]->imprimir(ind, nBits);
44 }
45
46 std::string idBin(int bits)
47 {
48     return ::idBin(id, bits);
49 }
50
51 ~estr_No()
52 {
53     for (auto i = 0; i < numFilhos; i++)
54         delete filhos[i];
55     delete filhos;
56 }
57 };
58
59 class Arvore
60 {
61     static const bool DEBUG = ConfigDebug::Arvore::DEBUG;
62     static const int DEBUG_MAX_LINHAS_IDS =
63         ConfigDebug::Arvore::DEBUG_MAX_LINHAS_IDS;
64
65     public:
66     No raiz;
67
68     // Quantidade de níveis
69     int numNiveis;
70
71     // Quantidade de nós e grau de cada nível
72     int *nosPorNivel, *grauPorNivel;
73
74     // Nós de cada nível
75     No **nosNiveis;
76
77     // Arranjos por nível com nós na posição resultante
78     No **imagemNiveis;
79     // NOTA: Níveis cujos nós têm um só filho poderiam ser totalmente
80     // omitidos na busca do ancestral mais próximo, desde o bit
81     // ocupado
82     // desnecessariamente no id até as estruturas (pois não são
83     // ancestral
84     // mais próximo de nenhum par de nós distintos), mas isso
85     // exigiria um
86     // tratamento todo especial...
87     // A não ser que os nós tenham um No *filhosEspecial.
88
89     // nivelDosBits[i]: Nível do ancestral mais próximo de a e b
90     // quando
91     // o primeiro bit que difere entre a->id e b->id é i
```

```
87     int *nivelDosBits;
88
89     // Função usada para cada nível da árvore
90     // Folhas não precisam
91     DadosFuncao *dadosFuncao;
92
93     Arvore(No r, int nNiveis)
94     {
95         raiz = r;
96         numNiveis = nNiveis;
97         dadosFuncao = new DadosFuncao[numNiveis];
98
99         montarEstruturas();
100     }
101
102     ~Arvore()
103     {
104         delete raiz;
105
106         delete[] nosPorNivel;
107         delete[] grauPorNivel;
108         for (int i = 0; i < numNiveis; i++)
109             delete[] nosNiveis[i];
110         delete[] nosNiveis;
111
112         for (int i = 0; i < numNiveis-1; i++)
113             delete[] imagemNiveis[i];
114         delete[] imagemNiveis;
115         delete[] nivelDosBits;
116         delete[] dadosFuncao;
117     }
118
119     // Descobrir quantos nós por nível
120     // Descobrir quantos níveis são realmente necessários
121     // Pegar todos os nós de um nível em um array e descobrir o m
122
123     int bitParaNivel(ID bit)
124     {
125         int pos = __builtin_ctz(bit); // Primeiro bit 1
126         return nivelDosBits[pos];
127     }
128
129     void montarEstruturas()
130     {
131         if (DEBUG)
132             std::cout << "<Arvore::montarEstruturas>\n";
133
134         // Descobre quantos nós há em cada nível e o grau máximo
135         nosPorNivel = new int[numNiveis] (); // Zerado
136         grauPorNivel = new int[numNiveis] (); // Zerado
```

```

137     preencherNosGrauPorNivel(nosPorNivel, grauPorNivel, raiz);
138
139     // Preenche mapeamento (primeiro bit diferente -> nivel do
140     // Se os graus (da raiz, filhos e netos) são [2, 3, 3]: [0, 0,
141     // 1, 1, 1, 2, 2, 2]
142     int somaGraus = std::accumulate(grauPorNivel, grauPorNivel +
143     numNiveis-1, 0);
144     nivelDosBits = new int[somaGraus];
145     int *bit = nivelDosBits, nivelAnc = 0;
146     while (grauPorNivel[nivelAnc] != 0)
147     {
148         for (int i = 0; i < grauPorNivel[nivelAnc]; i++)
149             *(bit++) = nivelAnc;
150         nivelAnc++;
151     }
152     if (DEBUG)
153     {
154         std::cout << "Nós por nível:";
155         for (int nos : std::vector<int>(nosPorNivel,
156         nosPorNivel+numNiveis))
157             std::cout << ' ' << nos;
158         std::cout << '\n';
159         std::cout << "Grau por nível:";
160         for (int grau : std::vector<int>(grauPorNivel,
161         grauPorNivel+numNiveis))
162             std::cout << ' ' << grau;
163         std::cout << '\n';
164         std::cout << "Somatório dos graus: " << somaGraus << '\n';
165         std::cout << "Nível dos bits:";
166         for (int nivel : std::vector<int>(nivelDosBits,
167         nivelDosBits+somaGraus))
168             std::cout << ' ' << nivel;
169         std::cout << '\n';
170     }
171
172     // Se os nós ainda não têm ids, atribuir aqui... (agora têm-se
173     // os graus)
174     // (Árvores geradas com construirArvore() já têm os ids)
175     // TODO
176
177     // Cria um arranjo por nível com os ids e outro com os nós
178     // do nível para descobrir os módulos e distribuir os nós
179     nosNiveis = new No*[numNiveis];
180     ID* idsNiveis[numNiveis];
181     for (int nivel = 0; nivel < numNiveis; nivel++)
182     {
183         nosNiveis[nivel] = new No[nosPorNivel[nivel]];
184         idsNiveis[nivel] = new ID[nosPorNivel[nivel]];
185     }

```



```

180 // Próxima posição a preencher de cada nível
181 int proxPos[numNiveis];
182 std::fill(proxPos, proxPos+numNiveis, 0);
183 // Pega os ids
184 preencherNosIdsNiveis(nosNiveis, idsNiveis, proxPos, raiz);
185 // Mostra ids
186 if (DEBUG)
187 {
188     int total = 0;
189     std::cout << "##### IDS DOS NÓS #####\n";
190     for (int i = 0; i < numNiveis; i++)
191     {
192         std::cout << "Nível " << i << '\n';
193         total += nosPorNivel[i];
194         if (total > DEBUG_MAX_LINHAS_IDS)
195         {
196             std::cout << "Grande demais\n";
197             break;
198         }
199         for (int j = 0; j < nosPorNivel[i]; j++)
200             std::cout << idBin(idsNiveis[i][j], somaGraus) << '\n';
201     }
202     std::cout << '\n';
203 }
204
205 // Descobrir o módulo para cada nível (menos último nível)
206 imagemNiveis = new No*[numNiveis-1];
207 for (int nivel = 0; nivel < numNiveis-1; nivel++)
208 {
209     // Níveis com grau 1 não precisam
210     if (grauPorNivel[nivel] == 1)
211     {
212         imagemNiveis[nivel] = nullptr;
213         continue;
214     }
215
216     int numNos = nosPorNivel[nivel];
217     No *nos = nosNiveis[nivel];
218     ID *ids = idsNiveis[nivel];
219     DadosFuncao *dadosNivel = &dadosFuncao[nivel];
220     // Encontra valores para a função que distribui os nós
221     buscarFuncaoIdeal(numNos, ids, dadosNivel);
222     // Coloca os nós nas posições resultantes da função
223     No *imagemNivel = new No[dadosNivel->tam] (); // Zerado
224     for (int no = 0; no < numNos; no++)
225         imagemNivel[dadosNivel->aplicar(ids[no])] = nos[no];
226     imagemNiveis[nivel] = imagemNivel;
227 }
228 // Mostra dados da função para cada nível (que tem)
229 if (DEBUG)

```

```

230     {
231         std::cout << "##### DADOS DAS FUNÇÕES #####\n";
232         for (int i = 0; i < numNiveis-1; i++)
233             if (grauPorNivel[i] > 1)
234                 std::cout << "Nível " << i << '\n' << dadosFuncao[i] <<
                    '\n';
235         else
236             std::cout << "Nível " << i << "\nSEM DADOS\n";
237     }
238
239     // Libera
240     for (int nivel = 0; nivel < numNiveis; nivel++)
241         delete[] idsNiveis[nivel];
242
243     if (DEBUG)
244         std::cout << "<fim Arvore::montarEstruturas>\n";
245 }
246
247 void preencherNosGrauPorNivel(int *nosPorNivel, int
    *grauPorNivel, No no)
248 {
249     ++nosPorNivel[no->nivel];
250     grauPorNivel[no->nivel] = std::max(grauPorNivel[no->nivel],
        no->numFilhos);
251     for (int i = 0; i < no->numFilhos; i++)
252         preencherNosGrauPorNivel(nosPorNivel, grauPorNivel,
            no->filhos[i]);
253 }
254
255 void preencherNosIdsNiveis(No **nosNiveis, ID **idsNiveis, int
    *proxPos, No no)
256 {
257     // Coloca nó e id na próxima posição da linha do nível do nó
258     nosNiveis[no->nivel][proxPos[no->nivel]] = no;
259     idsNiveis[no->nivel][proxPos[no->nivel]++] = no->id;
260     for (int i = 0; i < no->numFilhos; i++)
261         preencherNosIdsNiveis(nosNiveis, idsNiveis, proxPos,
            no->filhos[i]);
262 }
263 };
264
265 #endif /* ARV_H */

```

arv/arv_mod.h

```

1  /*
2  * Funções para descobrir os valores de módulo ideais para uma á
    rvore.
3  */

```

```

4
5 #ifndef ARV_MOD_H
6 #define ARV_MOD_H
7
8 #include <algorithm>
9
10 #include "id.h"
11
12 /*
13  * Guarda dados da função para um nível da árvore e aplica a função.
14  */
15 struct DadosFuncao
16 {
17     /*
18      * Possivelmente, as operações OuEx e Ou em conjunto minimizam o
19      * m.
20      * Pode-se provar que E e Ou têm o mesmo efeito sob módulo m,
21      * seja qual
22      * for o m.
23      * ( Aplicar "⊗ 0" após "| 1" é o mesmo que apenas "⊗ 0".
24      * Fazendo isso, subtrai-se 2bit de todo mundo, apenas
25      * "rodando" todos
26      * os valores módulo m.
27      * Portanto, "⊗ 0" após "| 1" é o mesmo (módulo m) que apenas
28      * "| 1".
29      * Logo, "⊗ 0" tem o mesmo efeito que "| 1". )
30      * A ordem não importa: um bit pode estar ativo (1) em apenas uma
31      * das
32      * duas máscaras, pois não há sentido estar ativo nas duas.
33      *  $(x \mid 1) \wedge 1 == x \otimes 0$ ,  $(x \wedge 1) \mid 1 == x \mid 1$ 
34      * Outras questões devem ser observadas com respeito ao Ou,
35      * pois a maioria das combinações de bits *garantem* colisões
36      * (devido
37      * a como os ids são formados).
38      * Pouco foi testado com respeito a isso ainda.
39      */
40     ID mascOuEx, mascOu, ad, m;
41     // Tamanho do arranjo necessário (pode ser < m)
42     unsigned tam;
43     // Dados para aplicar o módulo
44     // Outro método pode ser necessário caso a multiplicação
45     // seja muito cara.
46     // Usar __int128_t para multiplicações maiores?
47     ID mult, desl;
48
49     ID aplicar(ID id) const
50     {
51         ID v = ((id ^ mascOuEx | mascOu) + ad);
52         return v - (v * mult >> desl)*m; // v % m
53     }
54 }

```

```

48
49 ID testar(ID id) const
50 {
51     return (id ^ mascOuEx | mascOu) % m;
52 }
53
54 friend inline std::ostream& operator<<(std::ostream &o, const
    DadosFuncao d)
55 {
56     o << "OuEx: " << idBin(d.mascOuEx) << "\n";
57     o << "Ou:   " << idBin(d.mascOu)   << "\n";
58     o << "ad:   " << d.ad               << ", ";
59     o << "m:    " << d.m               << ", ";
60     o << "tam:  " << d.tam             << "\n";
61     o << "mult: " << d.mult            << ", ";
62     o << "desl: " << d.desl;
63
64     return o;
65 }
66 };
67
68 /*
69  * Verifica se os valores no array módulo m resultam todos em
    valores
70  * diferentes.
71  */
72 bool funcaoInjetora(int tam, ID valores[], const DadosFuncao &f)
73 {
74     // Valores já atingidos
75     bool imagem[f.m];
76     std::fill(imagem, imagem+f.m, false);
77
78     // Aplica a função a cada valor
79     for (ID *valor = valores; valor < valores+tam; valor++)
80     {
81         ID res = f.testar(*valor);
82         // Valor já foi atingido
83         if (imagem[res])
84             return false;
85         imagem[res] = true;
86     }
87
88     // Não houve colisões
89     return true;
90 }
91
92 void dadosModulo(int numNos, ID *ids, DadosFuncao *dadosFuncao);
93
94 // Buscar os valores ideais da função
95 void buscarFuncaoIdeal(int numNos, ID *ids, DadosFuncao

```

```
*sai_dadosFuncao)
96 {
97     // Busca função
98     DadosFuncao dados;
99     dados.mascOu = dados.mascOuEx = dados.ad = 0;
100     dados.m = numNos-1;
101
102     // Para fazer buscas mais elaboradas (verificar vários dados)
103     bool continuar = true;
104     sai_dadosFuncao->tam = -0u; // Maior possível
105     while (continuar)
106     {
107         // Próxima tentativa
108         dados.m++;
109
110         // A função não satisfaz
111         while (!funcaoInjetora(numNos, ids, dados))
112             dados.m++;
113
114         // Imagem do módulo
115         ID imagem[numNos];
116         for (int i = 0; i < numNos; i++)
117             imagem[i] = dados.testar(ids[i]);
118         // Analisa a imagem para descobrir o melhor ad (que resulta em
119         // menor tam)
120         // Ideia: encontrar o maior "buraco" na imagem do módulo
121         // ordenada e
122         // "empurrá-lo" para cima, de modo que o maior valor da imagem
123         // seja o menor possível
124         std::sort(imagem, imagem+numNos);
125         ID difMax = (dados.m+imagem[0]) - (imagem[numNos-1]);
126         dados.ad = dados.m-imagem[0];
127         dados.tam = imagem[numNos-1] - imagem[0] + 1;
128         for (int i = 1; i < numNos; i++)
129         {
130             ID dif = imagem[i] - imagem[i-1];
131             if (dif > difMax) // Maior resulta em tam menor
132             {
133                 dados.ad = dados.m - imagem[i];
134                 dados.tam = imagem[i-1] + dados.ad + 1;
135                 difMax = dif;
136             }
137         }
138
139         // Conseguiu tamanho melhor
140         if (dados.tam < sai_dadosFuncao->tam)
141             *sai_dadosFuncao = dados;
142
143         // TODO Encontrar condição melhor
```

```
143     continuar = dados.m < numNos*numNos;
144 }
145
146 dadosModulo(numNos, ids, sai_dadosFuncao);
147 }
148
149 /* Retorna dados para calcular o módulo sem usar divisão */
150 void dadosModulo(int numNos, ID *ids, DadosFuncao *dadosFuncao)
151 {
152     // Conta bits
153     ID id = *std::max_element(ids, ids+numNos);
154     int bits = 0;
155     while (id)
156     {
157         id >>= 1;
158         bits++;
159     }
160
161     // Expansão fracionária
162     // Mais precisão pode ser necessária?
163     ID m = dadosFuncao->m;
164     double r = 1.d/m;
165     // Zeros na frente
166     int z = 0;
167     while ((int) (2*r) == 0) // Próximo bit será 0
168     {
169         r *= 2;
170         z++;
171     }
172     // Pega (bits+1) bits significativos
173     ID mult = 0;
174     for (int i = 0; i < bits+1; i++)
175     {
176         r *= 2;
177         int bit = (int) r;
178         mult = (mult << 1) + bit;
179         r -= bit;
180     }
181
182     // Arredondamento
183     mult++;
184     // Deslocamento
185     int desl = z + bits + 1;
186
187     // Atribui valores
188     dadosFuncao->mult = mult;
189     dadosFuncao->desl = desl;
190
191     // Verifica se deu certo
192     for (auto i = 0; i < numNos; i++)
```

```

193     {
194         if (mult*ids[i] >> desl != ids[i]/m)
195         {
196             dadosFuncao->mult = dadosFuncao->desl = 0;
197             break;
198         }
199     }
200 }
201
202 #endif /* ARV_MOD_H */

```

arv/config_dbg.h

```

1  #ifndef CONFIG_DBG_H
2  #define CONFIG_DBG_H
3
4  struct ConfigDebug
5  {
6      struct Arvore
7      {
8          static const bool DEBUG = false;
9          static const int DEBUG_MAX_LINHAS_IDS = 100;
10     };
11 };
12
13 #endif /* CONFIG_DBG_H */

```

arv/constr.h

```

1  #ifndef CONSTR_H
2  #define CONSTR_H
3
4  #include <vector>
5
6  //////////////////////////////////////
7  // Constrói árvore simétrica com níveis níveis abaixo da raiz
8  // e graus[i] filhos para cada nó no nível i (nível 0 = raiz).
9  // <raiz> deve ser um nó (até então folha) válido (pai, id e nível
10     válidos)
11  // numFilhos e filhos de raiz são atribuídos.
12  static void construirSubArvore(No raiz, int níveis, int *graus, int
13     soma)
14  {
15     if (níveis == 0) // Nó folha
16     {
17         raiz->numFilhos = 0;
18         raiz->filhos = NULL;
19     }

```

```

18     else
19     {
20         int grau = *graus, nivelF = raiz->nivel + 1;
21         ++graus;
22         --niveis;
23         // Cria filhos
24         No *filhos = new No[grau];
25         for (int i = 0; i < grau; i++)
26         {
27             No f = new estr_No();
28             f->id = raiz->id | (1 << (soma+i));
29             f->pai = raiz;
30             f->nivel = nivelF;
31             filhos[i] = f;
32             construirSubArvore(f, niveis, graus, soma+grau);
33         }
34         raiz->numFilhos = grau;
35         raiz->filhos = filhos;
36     }
37 }
38
39 //////////////////////////////////////
40 // Constrói árvore simétrica
41 // niveis: Niveis *abaixo* da raiz
42 No construirArvore(int niveis, int *graus)
43 {
44     No raiz = new estr_No();
45     raiz->id = 0;
46     raiz->pai = NULL;
47     raiz->nivel = 0;
48     construirSubArvore(raiz, niveis, graus, 0);
49     return raiz;
50 }
51
52 No construirArvore(std::vector<int> graus)
53 {
54     return construirArvore(graus.size(), graus.data());
55 }
56
57 #endif /* CONSTR_H */

```

arv/id.h

```

1  #ifndef ID_H
2  #define ID_H
3
4  #include <bitset>
5  #include <climits>
6  #include <string>

```



```

7
8 typedef unsigned long ID;
9
10 std::string idBin(ID id, int bits = sizeof(ID)*CHAR_BIT)
11 {
12     std::string repr =
13         std::bitset<sizeof(ID)*CHAR_BIT>(id).to_string();
14     return repr.substr(repr.size() - bits);
15 }
16 #endif /* ID_H */

```

arv/percorr.h

```

1  #ifndef PERCORR_H
2  #define PERCORR_H
3
4  #include "arv.h"
5
6  //////////////////////////////////////
7  /*
8   * Encontra o ancestral comum mais próximo "subindo" a árvore.
9   */
10 No ancestralSimples(No a, No b)
11 {
12     while (a->nivel > b->nivel)
13         a = a->pai;
14     while (b->nivel > a->nivel)
15         b = b->pai;
16     while (a != b)
17     {
18         a = a->pai;
19         b = b->pai;
20     }
21     return a;
22 }
23
24 //////////////////////////////////////
25 No ancestral(Arvore* arv, No a, No b)
26 {
27     /* Opções:
28      * mascaras[bsf(dif)] // bit scan forward (__builtin_ctz(x))
29      * (signed) ((dif-1) ^ dif) >> 1
30      * ((dif-1) | dif) ^ dif
31      */
32     ID dif, bit, masc, id;
33     // Bits que diferem
34     dif = a->id ^ b->id;
35     // Primeiro diferente (usar para encontrar o array do nível?)

```

```

36     bit = dif & (-dif);
37     masc = bit - 1; // Todos bits antes do primeiro diferente
38     //masc = (((dif-1) ^ dif) >> 1);
39     // Id do ancestral comum mais próximo
40     id = a->id & masc; // a->id ou b->id, tanto faz
41
42     // Encontra o nó
43     int nivel = arv->bitParaNivel(bit);
44     No *imagemNivel = arv->imagemNiveis[nivel];
45     return imagemNivel[arv->dadosFuncao[nivel].aplicar(id)];
46 }
47
48 #endif /* PERCORR_H */

```

arv/tst_estr.cpp

```

1  /*
2   * Testes com as estruturas para encontrar o ancestral comum.
3   *
4   * TODO: Testar as estruturas em si, construídas em
5   *       Arvore::montarEstruturas()
6   *       (apenas os resultados finais e a distribuição dos nós estão
7   *       sendo testados)
8   */
9
10 #include <algorithm>
11 #include <vector>
12
13 #include "arv.h"
14 #include "constr.h"
15 #include "percorr.h"
16
17 using namespace std;
18
19 void testarDistribuicaoNos(Arvore*);
20 void testarAncestralComum(Arvore*, vector<int>, vector<int>,
21     vector<int>);
22 No descendente(No, vector<int>);
23
24 void erro(string);
25 template <class T> void testarIgual(T, T, string);
26
27 void testes();
28 int main()
29 {
30     try { testes(); }
31     catch (string &erro) { cout << erro; }
32
33     return 0;

```

```

31 }
32
33 void testes()
34 {
35     vector<int> graus = {3, 2, 2, 5};
36     int niveis, nBits;
37     niveis = graus.size() + 1;
38     nBits = std::accumulate(graus.begin(), graus.end(), 0);
39
40     No raiz = construirArvore(graus);
41     //raiz->imprimir(nBits);
42     Arvore arv(raiz, niveis);
43
44     testarDistribuicaoNos(&arv);
45     try // Exceções...?
46     {
47         try
48         {
49             Arvore arvErro(construirArvore(graus), niveis);
50             arvErro.dadosFuncao[3].ad--; // Deve dar erro
51             testarDistribuicaoNos(&arvErro);
52         }
53         catch (std::string str) { throw 0; } // Deu erro: ok
54         erro("Mutação nas estruturas deveria causar erro"); // Não deu
55         erro
56     }
57     catch (int i) { cout << "Erro (mutação nas estruturas)
58         corretamente detectado\n"; }
59
60     // descendente() funcionando
61     cout << "descendente() funcionando: ";
62     cout << (raiz == descendente(raiz, {})) << ' ';
63     No a = raiz->filhos[0]->filhos[1]->filhos[0];
64     cout << (a == descendente(raiz, {1, 2, 1})) << ' ';
65     No b = raiz->filhos[0]->filhos[0]->filhos[0]->filhos[3];
66     cout << (b == descendente(raiz, {1, 1, 1, 4})) << '\n';
67
68     cout << "a e b: " << a->idBin(nBits) << ' ' << b->idBin(nBits) <<
69         '\n';
70     cout << ancestralSimples(a, b)->idBin(nBits) << '\n';
71     cout << ancestral(&arv, a, b)->idBin(nBits) << '\n';
72
73     testarAncestralComum(&arv, {1}, {2, 1, 4}, {1, 1, 1});
74     testarAncestralComum(&arv, {3}, {2, 1, 4}, {1});
75     testarAncestralComum(&arv, {3, 2, 1}, {4}, {3});
76     testarAncestralComum(&arv, {}, {1}, {});
77     testarAncestralComum(&arv, {}, {1}, {2});
78 }
79
80 void testarDistribuicaoNos(Arvore *a, No no)

```

```

78 {
79     // Último nível (folhas) não tem
80     if (no->numFilhos == 0)
81         return;
82
83     int nivel = no->nivel;
84     No imagem = a->imagemNiveis[nivel][
85         a->dadosFuncao[nivel].aplicar(no->id) ];
86     testarIgual(no, imagem, "testarDistribuicaoNos()");
87
88     for (No filho : vector<No>(no->filhos, no->filhos +
89         no->numFilhos))
90         testarDistribuicaoNos(a, filho);
91 }
92
93 void testarDistribuicaoNos(Arvore *a)
94 {
95     testarDistribuicaoNos(a, a->raiz);
96     cout << "Distribuição dos nós correta\n";
97 }
98
99 /*
100  * Verifica se as funções de busca de ancestral retornam o nó
101  * correto.
102  * camAnc: Caminho até o ancestral
103  * cam1, cam2: Caminho do ancestral até os descendentes
104  * cam1[0] != cam2[0]
105  */
106 void testarAncestralComum(Arvore *arv, vector<int> camAnc,
107     vector<int> cam1, vector<int> cam2)
108 {
109     if (cam1.size() > 0 && cam2.size() > 0 && cam1[0] == cam2[0])
110         erro("testarAncestralComum(): caminhos dos filhos devem começar
111             com valores diferentes");
112
113     No anc, desc1, desc2;
114     anc = descendente(arv->raiz, camAnc);
115     desc1 = descendente(anc, cam1);
116     desc2 = descendente(anc, cam2);
117
118     No ancSimples, ancNovo;
119     ancSimples = ancestralSimples(desc1, desc2);
120     ancNovo = ancestral(arv, desc1, desc2);
121
122     cout << "-----\n";
123     cout << "ancestral simples ok: " << (ancSimples == anc) << '\n';
124     cout << "ancestral novo ok: " << (ancNovo == anc) << '\n';
125     cout << "-----\n";
126 }

```

```

123  /*
124  * descendente(raiz, {1, 2, 2}) -> 2º filho do 2º filho do 1º filho
      de raiz
125  * (1, e não 0, indica o primeiro filho).
126  */
127  No descendente(No no, vector<int> caminho)
128  {
129      for (int f : caminho)
130          if (f > no->numFilhos)
131              erro("descendente(): Caminho inválido");
132          else
133              no = no->filhos[f-1];
134      return no;
135  }
136
137
138  void erro(string msg)
139  {
140      throw (string("### ERRO ###\n") + msg +
              string("\n#####\n"));
141  }
142
143  template <class T> void testarIgual(T a, T b, string msg)
144  {
145      if (a != b)
146          erro("Teste de igualdade falhou: " + msg);
147  }

```

A.2 ESTRUTURAS (MATRIZACMP)

matriz/arv.h

```

1  #ifndef MATRIZ_H
2  #define MATRIZ_H
3
4  #include <iostream>
5  #include <bitset>
6  #include <climits>
7  #include <string>
8  #include <vector>
9
10 #include <algorithm>
11
12 #include "config_dbg.h"
13
14 namespace matriz
15 {

```

```

16 struct estr_No;
17 typedef estr_No* No;
18
19 using ID = unsigned;
20
21 struct estr_No
22 {
23     // Id usado para encontrar ancestral mais próximo
24     ID id;
25
26     No pai;
27     int numFilhos;
28     No *filhos;
29
30     // Nível do nó: 0 -> raiz
31     int nivel;
32
33     void imprimir() { imprimir(0); }
34
35     friend inline std::ostream& operator<<(std::ostream &o, const
        No n) { o << n->id; return o; } // !!!
36
37     void imprimir(int ind)
38     {
39         for (int i = 0; i < ind; i++)
40             std::cout << '|'; // Indentação
41         std::cout << "No " << id
42             /*<< " (" << nível << ' ' << numFilhos << ')'*/* << '\n';
43         ++ind;
44         for (int f = 0; f < numFilhos; f++)
45             filhos[f]->imprimir(ind);
46     }
47
48     ~estr_No()
49     {
50         for (auto i = 0; i < numFilhos; i++)
51             delete filhos[i];
52         delete filhos;
53     }
54 };
55
56 No ancestralSimples(No a, No b);
57
58 class Arvore
59 {
60     static const bool DEBUG = ConfigDebug::Arvore::DEBUG;
61     static const int DEBUG_MAX_LINHAS_IDS =
        ConfigDebug::Arvore::DEBUG_MAX_LINHAS_IDS;
62
63     public:

```

```

64     No raiz;
65
66     // Matriz de ancestral comum
67     // ancestral[i][j], i > j
68     No **ancestral;
69
70     // Quantidade de nós da árvore inteira
71     int numNos;
72
73     Arvore(No r)
74     {
75         raiz = r;
76         montarEstruturas();
77     }
78
79     ~Arvore()
80     {
81         for (int i = 1; i < numNos; i++)
82             delete[] ancestral[i];
83         delete[] ancestral;
84     }
85
86     void montarEstruturas()
87     {
88         if (DEBUG)
89             std::cout << "<Arvore::montarEstruturas>\n";
90
91         // Lista nós
92         std::vector<No> nos;
93         pegarNos(raiz, nos);
94         numNos = nos.size();
95
96         if (DEBUG)
97             std::cout << "Número de nós: " << numNos << '\n';
98
99         // Cria a (meia) matriz
100        ancestral = new No*[numNos] ();
101        for (int i = 1; i < numNos; i++)
102            ancestral[i] = new No[i];
103
104        // Preenche a matriz
105        for (int i = 0; i < numNos; i++)
106        {
107            for (int j = i+1; j < numNos; j++)
108            {
109                No a, b;
110                a = nos[i];
111                b = nos[j];
112                ancestral[std::max(a->id, b->id)][std::min(a->id, b->id)]
                    = ancestralSimples(a, b);

```

```

113     }
114 }
115 }
116
117 void pegarNos(No no, std::vector<No> &nos)
118 {
119     nos.push_back(no);
120     for (No filho : std::vector<No>(no->filhos,
121         no->filhos+no->numFilhos))
122         pegarNos(filho, nos);
123 };
124 }
125
126 #endif /* MATRIZ_H */

```

matriz/config_dbg.h

```

1  #ifndef MATRIZ_CONFIG_DBG_H
2  #define MATRIZ_CONFIG_DBG_H
3
4  namespace matriz
5  {
6      struct ConfigDebug
7      {
8          struct Arvore
9          {
10             static const bool DEBUG = false;
11             static const int DEBUG_MAX_LINHAS_IDS = 0;
12         };
13     };
14 }
15
16 #endif /* MATRIZ_CONFIG_DBG_H */

```

matriz/constr.h

```

1  #ifndef MATRIZ_CONSTR_H
2  #define MATRIZ_CONSTR_H
3
4  #include <vector>
5
6  namespace matriz
7  {
8      //////////////////////////////////////
9      // Constrói árvore simétrica com níveis níveis abaixo da raiz
10     // e graus[i] filhos para cada nó no nível i (nível 0 = raiz).
11     // <raiz> deve ser um nó (até então folha) válido (pai, id e
12     // nível válidos)

```



```

12 // numFilhos e filhos de raiz são atribuídos.
13 static void construirSubArvore(No raiz, int niveis, int *graus,
    unsigned &proxID)
14 {
15     if (niveis == 0) // Nó folha
16     {
17         raiz->numFilhos = 0;
18         raiz->filhos = nullptr;
19     }
20     else
21     {
22         int grau = *graus, nivelF = raiz->nivel + 1;
23         ++graus;
24         --niveis;
25         // Cria filhos
26         No *filhos = new No[grau];
27         for (int i = 0; i < grau; i++)
28         {
29             No f = new estr_No();
30             f->id = proxID++;
31             f->pai = raiz;
32             f->nivel = nivelF;
33             filhos[i] = f;
34             construirSubArvore(f, niveis, graus, proxID);
35         }
36         raiz->numFilhos = grau;
37         raiz->filhos = filhos;
38     }
39 }
40
41 //////////////////////////////////////
42 // Constrói árvore simétrica
43 // niveis: Níveis *abaixo* da raiz
44 No construirArvore(int niveis, int *graus)
45 {
46     unsigned proxID = 0;
47
48     No raiz = new estr_No();
49     raiz->id = proxID++;
50     raiz->pai = NULL;
51     raiz->nivel = 0;
52     construirSubArvore(raiz, niveis, graus, proxID);
53     return raiz;
54 }
55
56 No construirArvore(std::vector<int> graus)
57 {
58     return construirArvore(graus.size(), graus.data());
59 }
60 }

```

```

61
62 #endif /* MATRIZ_CONSTR_H */

```

matriz/percorr.h

```

1  #ifndef MATRIZ_PERCORR_H
2  #define MATRIZ_PERCORR_H
3
4  #include "arv.h"
5
6  #include <algorithm>
7
8  namespace matriz
9  {
10     //////////////////////////////////////
11     /*
12      * Encontra o ancestral comum mais próximo "subindo" a árvore.
13      */
14     No ancestralSimples(No a, No b)
15     {
16         while (a->nivel > b->nivel)
17             a = a->pai;
18         while (b->nivel > a->nivel)
19             b = b->pai;
20         while (a != b)
21         {
22             a = a->pai;
23             b = b->pai;
24         }
25         return a;
26     }
27
28     //////////////////////////////////////
29     No ancestral(Arvore* arv, No a, No b)
30     {
31         return arv->ancestral[std::max(a->id, b->id)][std::min(a->id,
32             b->id)];
33     }
34 }
35 #endif /* MATRIZ_PERCORR_H */

```

matriz/tst_estr.cpp

```

1  /*
2   * Testes com a matriz para encontrar o ancestral comum.
3   */
4

```

```

5  #include <algorithm>
6  #include <vector>
7
8  #include "arv.h"
9  #include "constr.h"
10 #include "percorr.h"
11
12 using namespace std;
13 using matriz::Arvore;
14 using matriz::No;
15
16 void testarAncestralComum(Arvore*, vector<int>, vector<int>,
    vector<int>);
17 No descendente(No, vector<int>);
18
19 void erro(string);
20 template <class T> void testarIgual(T, T, string);
21
22 void testes();
23 int main()
24 {
25     try { testes(); }
26     catch (string &erro) { cout << erro; }
27
28     return 0;
29 }
30
31 void testes()
32 {
33     vector<int> graus = {3, 2, 2, 5};
34     int niveis;
35     niveis = graus.size() + 1;
36
37     No raiz = matriz::construirArvore(graus);
38     //raiz->imprimir();
39     Arvore arv(raiz);
40
41     // descendente() funcionando
42     cout << "descendente() funcionando: ";
43     cout << (raiz == descendente(raiz, {})) << ' ';
44     No a = raiz->filhos[0]->filhos[1]->filhos[0];
45     cout << (a == descendente(raiz, {1, 2, 1})) << ' ';
46     No b = raiz->filhos[0]->filhos[0]->filhos[0]->filhos[3];
47     cout << (b == descendente(raiz, {1, 1, 1, 4})) << '\n';
48
49     cout << "a e b: " << a->id << ' ' << b->id << '\n';
50     cout << ancestralSimples(a, b)->id << '\n';
51     cout << ancestral(&arv, a, b)->id << '\n';
52
53     testarAncestralComum(&arv, {1}, {2, 1, 4}, {1, 1, 1});

```

```

54     testarAncestralComum(&arv, {3}, {2, 1, 4}, {1});
55     testarAncestralComum(&arv, {3, 2, 1}, {4}, {3});
56     testarAncestralComum(&arv, {}, {1}, {});
57     testarAncestralComum(&arv, {}, {1}, {2});
58 }
59
60 /*
61  * Verifica se as funções de busca de ancestral retornam o nó
62    correto.
63  * camAnc: Caminho até o ancestral
64  * cam1, cam2: Caminho do ancestral até os descendentes
65  * cam1[0] != cam2[0]
66  */
67 void testarAncestralComum(Arvore *arv, vector<int> camAnc,
68     vector<int> cam1, vector<int> cam2)
69 {
70     if (cam1.size() > 0 && cam2.size() > 0 && cam1[0] == cam2[0])
71         erro("testarAncestralComum(): caminhos dos filhos devem começar
72             com valores diferentes");
73
74     No anc, desc1, desc2;
75     anc = descendente(arv->raiz, camAnc);
76     desc1 = descendente(anc, cam1);
77     desc2 = descendente(anc, cam2);
78
79     No ancSimples, ancNovo;
80     ancSimples = ancestralSimples(desc1, desc2);
81     ancNovo = ancestral(arv, desc1, desc2);
82
83     cout << "-----\n";
84     cout << "ancestral simples ok: " << (ancSimples == anc) << '\n';
85     cout << "ancestral matriz ok: " << (ancNovo == anc) << '\n';
86     cout << "-----\n";
87 }
88
89 /*
90  * descendente(raiz, {1, 2, 2}) -> 2º filho do 2º filho do 1º filho
91    de raiz
92  * (1, e não 0, indica o primeiro filho).
93  */
94 No descendente(No no, vector<int> caminho)
95 {
96     for (int f : caminho)
97         if (f > no->numFilhos)
98             erro("descendente(): Caminho inválido");
99         else
100             no = no->filhos[f-1];
101     return no;
102 }

```

```

100
101 void erro(string msg)
102 {
103     throw (string("### ERRO ###\n") + msg +
104           string("\n#####\n"));
105 }
106
107 template <class T> void testarIgual(T a, T b, string msg)
108 {
109     if (a != b)
110         erro("Teste de igualdade falhou: " + msg);
111 }

```

A.3 TESTES DE DESEMPENHO

tst_tmp/tst_tmp.cpp

```

1  /*
2   * Testes de desempenho temporal das funções de ancestral comum
3   */
4
5  #include <cstdlib>
6  #include <fstream>
7  #include <iostream>
8  #include <string>
9  #include <vector>
10
11 #include "tst_tmp.h"
12 #include "tst_tmp_arv.h"
13 #include "tst_tmp_hwloc.h"
14 #include "tst_tmp_matriz.h"
15
16 using namespace std;
17
18 using matriz::TesteAncestralComumMatriz;
19
20 void executarTestes(
21     const vector<int> &graus,
22     int iter, int iterAquec,
23     int vezesFora = 1, int vezesDentro = 1);
24
25 template <class A, class N>
26 void testar(BaseTesteAncestralComum<A, N> &tst, const vector<int>
27           &graus, int vezes = 1);
28
29 const int ALG_SIMPLES = 0,
30           ALG_NOVO = 1,

```

```

30         ALG_HWLOC      = 2,
31         ALG_MATRIZ     = 3,
32         ALG_OVERHEAD   = 4,
33         NUM_ALGS       = 5;
34 bool alg_ativo[NUM_ALGS] = {};
35 vector<int> algs_ativos;
36 string nomes[NUM_ALGS] =
37 {
38     "Simples",
39     "Novo",
40     "Hwloc",
41     "Matriz",
42     "Overhead"
43 };
44 int tamMaxNome = max_element(nomes, nomes+NUM_ALGS,
45     [](string &a, string &b) { return a.size() < b.size(); })->size();
46 vector<double> tempos[NUM_ALGS];
47
48 int main(int argc, char *argv[])
49 {
50     // Graus de https://www.open-mpi.org/
51     projects/hwloc/lstopo/images/16XeonX7400.v1.11.png
52     vector<int> graus({4, 4, 1, 3, 2, 1, 1, 1});
53     string maquina;
54     bool suprimir = false;
55     int vezesFora = 2, vezesDentro = 3, iteracoes = 10000,
56         aquecimento = 1000;
57     alg_ativo[ALG_SIMPLES] = true;
58     alg_ativo[ALG_NOVO] = true;
59     alg_ativo[ALG_HWLOC] = true;
60
61     int i = 1;
62     string arg;
63     while (i < argc)
64     {
65         arg = argv[i++];
66         string resto = arg.substr(1);
67         switch (arg.front())
68         {
69             case 's': suprimir = true; break; // Suprimir saída
70             para arquivo
71             case 'M': maquina = resto; break; // Identificador
72             da máquina rodando os testes
73             case 'i': iteracoes = stoi(resto); break; // Iterações
74             case 'a': aquecimento = stoi(resto); break; // Aquecimento
75             case 'r': vezesDentro = stoi(resto); break; // Repetições de
76             cada algoritmo
77             case 'R': vezesFora = stoi(resto); break; // Repetições de
78             tudo
79             case 'A': // Algoritmos

```

```

74         for (bool &b : alg_ativo) b = false;
75         for (char &alg : resto)
76             switch (alg)
77             {
78                 case 's': alg_ativo[ALG_SIMPLES ] = true; break; //
79                             Simples
80                 case 'n': alg_ativo[ALG_NOVO    ] = true; break; // Novo
81                 case 'h': alg_ativo[ALG_HWLOC   ] = true; break; //
82                             Hwloc
83                 case 'm': alg_ativo[ALG_MATRIZ  ] = true; break; //
84                             Matriz
85                 case 'o': alg_ativo[ALG_OVERHEAD] = true; break; //
86                             Overhead
87                 case '*': for (bool &b : alg_ativo) b = true; break; //
88                             Todos
89                 default: cerr << "Algoritmo não reconhecido: " << alg
90                             << '\n';
91             }
92         break;
93     case '-': // Graus
94         graus = vector<int>();
95         while (i < argc)
96             graus.push_back(stoi(argv[i++]));
97         break;
98     default:
99         cerr << "Argumento não reconhecido: " + arg << '\n';
100 }
101 }
102 for (int alg = 0; alg < NUM_ALGS; alg++)
103     if (alg_ativo[alg])
104         algs_ativos.push_back(alg);
105 if (algs_ativos.empty())
106 {
107     cerr << "Nenhum algoritmo especificado\n";
108     return 0;
109 }
110 executarTestes(graus, iteracoes, aquecimento, vezesFora,
111                 vezesDentro);
112
113 if (suprimir)
114     return 0;
115
116 // Escreve em um arquivo em uma pasta definida pela configuração
117 string sep, pasta, iniNome, iniCmd;
118 #ifdef _WIN32
119     sep = "\\ ";
120     iniCmd = "mkdir res";
121 #else
122     sep = "/ ";

```

```

117     iniCmd = "mkdir -p res";
118 #endif
119
120 // Define nome da pasta
121 if (!maquina.empty())
122     pasta += maquina + sep;
123 pasta += 'i' + to_string(iteracoes);
124 pasta += 'a' + to_string(aquecimento);
125 pasta += '-';
126 for (const int &g : graus)
127     pasta += to_string(g) + '.';
128 pasta.pop_back();
129
130 // Cria a pasta
131 system((iniCmd + sep + pasta).data());
132
133 // Descobre nome não usado
134 iniNome = "res" + sep + pasta + sep + "resultados";
135 int n = -1;
136 while (ifstream(iniNome + to_string(++n) + ".csv")); // Existe
137 // Cria o arquivo
138 ofstream saida(iniNome + to_string(n) + ".csv");
139 if (!saida)
140 {
141     cerr << "Impossível criar o arquivo\n";
142     return 0;
143 }
144
145 // Escreve no arquivo
146 int ult_alg = algs_ativos.back();
147 algs_ativos.pop_back();
148 // Cabeçalho
149 for (const int &alg : algs_ativos)
150     saida << nomes[alg] << ',';
151 saida << nomes[ult_alg] << '\n';
152 // Amostras
153 int numAmostras = vezesFora*vezesDentro;
154 for (int i = 0; i < numAmostras; i++)
155 {
156     for (const int &alg : algs_ativos)
157         saida << tempos[alg][i] << ',';
158     saida << tempos[ult_alg][i] << '\n';
159 }
160
161 cout << "Arquivo \"" << iniNome + to_string(n) + ".csv" << "\"
    criado\n";
162 }
163
164 template <class A, class N>

```



```

165 void testar(BaseTesteAncestralComum<A, N> &tst, int alg, const
    vector<int> &graus, int vezes)
166 {
167     if (!alg_ativo[alg])
168         return;
169
170     vector<double> resultados;
171     for (auto i = 0; i < vezes; i++)
172     {
173         double t = tst.executar(graus);
174         resultados.push_back(t);
175         tempos[alg].push_back(t);
176     }
177
178     string &nome = nomes[alg];
179     cout << nome << ": ";
180     for (int i = 0; i < tamMaxNome-nome.size(); i++)
181         cout << ' ';
182     for (auto t : resultados)
183         cout << " (" << t << " ms)";
184     cout << '\n';
185 }
186
187 void executarTestes(
188     const vector<int> &graus,
189     int iter, int iterAquec,
190     int vezesFora, int vezesDentro)
191 {
192     TesteAncestralComumSimples  simples (iter, iterAquec);
193     TesteAncestralComumNovo     novo    (iter, iterAquec);
194     TesteAncestralComumHwloc    hwloc   (iter, iterAquec);
195     TesteAncestralComumMatriz   matriz  (iter, iterAquec);
196     TesteAncestralComumOverhead overhead(iter, iterAquec);
197     for (auto i = 0; i < vezesFora; i++)
198     {
199         testar(simples , ALG_SIMPLES , graus, vezesDentro);
200         testar(novo    , ALG_NOVO    , graus, vezesDentro);
201         testar(hwloc   , ALG_HWLOC   , graus, vezesDentro);
202         testar(matriz  , ALG_MATRIZ  , graus, vezesDentro);
203         testar(overhead, ALG_OVERHEAD, graus, vezesDentro);
204         cout << '\n';
205     }
206 }

```

tst_tmp/tst_tmp.h

```

1  #ifndef TST_TMP_H
2  #define TST_TMP_H
3

```

```

4  #include <algorithm>
5  #include <chrono>
6  #include <random>
7  #include <vector>
8
9  template <class Arv, class No>
10 class BaseTesteAncestralComum
11 {
12     using Par = std::pair<No, No>;
13
14     int numIter, numIterAquec;
15
16     public:
17
18     BaseTesteAncestralComum(int nI, int nIA) : numIter(nI),
        numIterAquec(nIA) {}
19
20     virtual Arv criarArvore(std::vector<int> graus);
21     virtual std::vector<No> pegarFolhas(Arv a);
22     virtual No ancestralComum(Arv arv, No a, No b);
23     virtual int acessar(No n); // Acessa qualquer coisa no nó
24     virtual void destruirArvore(Arv a);
25
26     // Tempo em milissegundos
27     double executar(std::vector<int> graus)
28     {
29         Arv a = criarArvore(graus);
30
31         std::vector<No> fs = pegarFolhas(a);
32         std::vector<Par> pares = gerarPares(fs);
33         embaralhar(pares);
34
35         // Acumulador (evita otimizações)
36         int acumulador = 0;
37         volatile int saida;
38
39         // Aquecer
40         for (int i = 0; i < numIterAquec; i++)
41             for (Par par : pares)
42                 acumulador += acessar(ancestralComum(a, par.first,
                    par.second));
43
44         // Mede o tempo
45         using namespace std::chrono;
46         using relógio = high_resolution_clock;
47         using milisDouble = duration<double, std::milli>;
48         relógio::time_point t0 = relógio::now();
49
50         // Roda
51         for (int i = 0; i < numIter; i++)

```

```

52         for (Par par : pares)
53             acumulador += acessar(ancestralComum(a, par.first,
54                                     par.second));
55
56         // Mede o tempo
57         relógio::time_point t1 = relógio::now();
58
59         saida = acumulador;
60         destruirArvore(a);
61
62         double tempo = duration_cast<milisDouble>(t1 - t0).count();
63         return tempo;
64     }
65
66     private:
67
68     std::vector<Par> gerarPares(std::vector<No> nos)
69     {
70         int tam = nos.size();
71         std::vector<Par> pares;
72         for (int i = 0; i < tam-1; i++)
73             for (int j = i+1; j < tam; j++)
74                 pares.push_back({nos[i], nos[j]});
75         return pares;
76     }
77
78     void embaralhar(std::vector<Par> pares)
79     {
80         std::shuffle(pares.begin(), pares.end(),
81                     std::default_random_engine());
82     }
83 };
84
85 #endif /* TST_TMP_H */

```

tst_tmp/tst_tmp_arv.h

```

1  /*
2   * Classes para testes de tempo de ancestral comum usando as
3   * estruturas em arv.h
4   */
5
6  #ifndef TST_TMP_ARV_H
7  #define TST_TMP_ARV_H
8
9  #include "tst_tmp.h"
10 #include "../arv/arv.h"
11 #include "../arv/constr.h"
12 #include "../arv/percorr.h"

```

```
12
13 // Teste usando Arvore e No
14 class TesteAncestralComumArvore : public
15     BaseTesteAncestralComum<Arvore*, No>
16 {
17     public:
18     TesteAncestralComumArvore(int nI, int nIA) :
19         BaseTesteAncestralComum(nI, nIA) {};
20
21     Arvore* criarArvore(std::vector<int> graus)
22     {
23         return new Arvore(construirArvore(graus), graus.size()+1);
24     }
25
26     std::vector<No> pegarFolhas(Arvore *a)
27     {
28         int ultNivel = a->numNiveis - 1;
29         No *folhas = a->nosNiveis[ultNivel];
30         return std::vector<No>(folhas, folhas +
31             a->nosPorNivel[ultNivel]);
32     }
33
34     int acessar(No n)
35     {
36         return int(n->id);
37     }
38
39     void destruirArvore(Arvore *a)
40     {
41         delete a;
42     }
43 };
44
45 // Teste usando ancestral comum simples
46 class TesteAncestralComumSimples : public TesteAncestralComumArvore
47 {
48     public:
49
50     TesteAncestralComumSimples(int nI, int nIA) :
51         TesteAncestralComumArvore(nI, nIA) {};
52
53     No ancestralComum(Arvore *arv, No a, No b)
54     {
55         return ancestralSimples(a, b);
56     }
57 };
58
59 // Teste usando ancestral comum novo (usando as estruturas)
60 class TesteAncestralComumNovo : public TesteAncestralComumArvore
```

```

58 {
59     public:
60
61     TesteAncestralComumNovo(int nI, int nIA) :
        TesteAncestralComumArvore(nI, nIA) {};
62
63     No ancestralComum(Arvore *arv, No a, No b)
64     {
65         return ancestral(arv, a, b);
66     }
67 };
68
69 // Teste que não usa nada: Mede o overhead do loop
70 class TesteAncestralComumOverhead : public TesteAncestralComumArvore
71 {
72     public:
73
74     TesteAncestralComumOverhead(int nI, int nIA) :
        TesteAncestralComumArvore(nI, nIA) {};
75
76     No ancestralComum(Arvore *arv, No a, No b)
77     {
78         return nullptr;
79     }
80
81     int acessar(No n)
82     {
83         return 0;
84     }
85 };
86
87 #endif /* TST_TMP_ARV_H */

```

tst_tmp/tst_tmp_hwloc.h

```

1  /*
2  * Classe para teste de tempo de ancestral comum usando hwloc
3  */
4
5  #ifndef TST_TMP_HWLOC_H
6  #define TST_TMP_HWLOC_H
7
8  #include "tst_tmp.h"
9  #include <hwloc.h>
10 #include <string>
11
12 // Teste usando hwloc
13 class TesteAncestralComumHwloc : public
        BaseTesteAncestralComum<hwloc_topology_t, hwloc_obj_t>

```

```

14 {
15     public:
16
17     TesteAncestralComumHwloc(int nI, int nIA) :
18         BaseTesteAncestralComum(nI, nIA) {};
19
20     hwloc_topology_t criarArvore(std::vector<int> graus)
21     {
22         // Descrição da topologia sintética
23         std::string s;
24         int ultimo = graus.back();
25         graus.pop_back();
26         for (int g : graus)
27             s += "ca:" + std::to_string(g) + ' '; // Caches evitam
28             "compactação"
29         s += std::to_string(ultimo);
30
31         // Cria a topologia
32         hwloc_topology_t t;
33         hwloc_topology_init(&t);
34         hwloc_topology_set_synthetic(t, s.data());
35         hwloc_topology_load(t);
36
37         return t;
38     }
39
40     std::vector<hwloc_obj_t> pegarFolhas(hwloc_topology_t t)
41     {
42         int ultNivel = hwloc_topology_get_depth(t) - 1;
43         std::vector<hwloc_obj_t> folhas;
44         hwloc_obj_t folha = hwloc_get_obj_by_depth(t, ultNivel, 0);
45         while (folha != nullptr)
46         {
47             folhas.push_back(folha);
48             folha = hwloc_get_next_obj_by_depth(t, ultNivel, folha);
49         }
50         return folhas;
51     }
52
53     hwloc_obj_t ancestralComum(hwloc_topology_t t, hwloc_obj_t a,
54                                hwloc_obj_t b)
55     {
56         return hwloc_get_common_ancestor_obj(t, a, b);
57     }
58
59     int acessar(hwloc_obj_t n)
60     {
61         return int(n->depth);
62     }

```

```

61 void destruirArvore(hwloc_topology_t t)
62 {
63     hwloc_topology_destroy(t);
64 }
65 };
66
67 #endif /* TST_TMP_HWLOC_H */

```

tst_tmp/tst_tmp_matriz.h

```

1  /*
2   * Classes para testes de tempo de ancestral comum usando as
3     estruturas em arv.h
4   */
5   #ifndef TST_TMP_MATRIZ_H
6   #define TST_TMP_MATRIZ_H
7
8   #include "tst_tmp.h"
9   #include "../matriz/arv.h"
10  #include "../matriz/constr.h"
11  #include "../matriz/percorr.h"
12
13  namespace matriz
14  {
15      // Teste usando matriz Arvore e No
16      class TesteAncestralComumMatriz : public
17          BaseTesteAncestralComum<Arvore*, No>
18      {
19      public:
20
21          TesteAncestralComumMatriz(int nI, int nIA) :
22              BaseTesteAncestralComum(nI, nIA) {};
23
24          Arvore* criarArvore(std::vector<int> graus)
25          {
26              return new Arvore(construirArvore(graus));
27          }
28
29          std::vector<No> pegarFolhas(Arvore *a)
30          {
31              std::vector<No> vetorFolhas;
32              pegarFolhas(a->raiz, vetorFolhas);
33              No *folhas = vetorFolhas.data();
34              return std::vector<No>(folhas, folhas + vetorFolhas.size());
35          }
36
37          void pegarFolhas(No no, std::vector<No> &nos)
38          {

```

```
37         if (no->numFilhos == 0)
38             nos.push_back(no);
39         else
40             for (No filho : std::vector<No>(no->filhos,
41                 no->filhos+no->numFilhos))
42                 pegarFolhas(filho, nos);
43     }
44
45     No ancestralComum(Arvore *arv, No a, No b)
46     {
47         return ancestral(arv, a, b);
48     }
49
50     int acessar(No n)
51     {
52         return int(n->id);
53     }
54
55     void destruirArvore(Arvore *a)
56     {
57         delete a;
58     }
59 }
60
61 #endif /* TST_TMP_MATRIZ_H */
```