



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Escalonador GPU Aware para a Plataforma de Nuvens Federadas BioNimbuZ

Francisco Anderson Bezerra Rodrigues

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador

Prof.a Dr.a Aletéia Patrícia Favacho de Araújo

Brasília
2018



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Escalonador GPU Aware para a Plataforma de Nuvens Federadas BioNimbuZ

Francisco Anderson Bezerra Rodrigues

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Bacharelado em Ciência da Computação

Prof.a Dr.a Aletéia Patrícia Favacho de Araújo (Orientador)
CIC/UnB

Prof. Dr. Goku Dr. Bruce Wayne
Planeta Vegeta Wayne Enterprises

Prof. Dr. Rodrigo Bonifácio de Almeida
Coordenador do Bacharelado em Ciência da Computação

Brasília, 32 de Onzembro de 2018

Dedicatória

Dedico esse trabalho à comunidade científica, à Universidade de Brasília, ao Departamento de Ciência da Computação, ao Laboratório de Bioinformática de Dados, à minha orientadora, professora Doutora Aletéia, aos amigos que fiz na faculdade e aos que tenho fora dela. Dedico também à minha família, à Goku, ao Zangado, ao MrSmartDonkey e ao CrazyRussianHacker e a todos que vieram assistir à defesa desta monografia.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade de Brasília, por ser uma universidade pública; ao Departamento de Ciência da Computação por seus professores e por (em maioria) ser a favor do software livre; à minha família pela paciência e apoio nos momentos difíceis; ao Zangado por suas lições de vida; aos meus amigos do RPG dominical pelos momentos de descontração; e à todos os meus amigos dentro e fora da faculdade, em especial os de longa data, que não citarei aqui para não correr o risco de esquecer alguém.

Resumo

O *resumo* é um texto inaugural para quem quer conhecer o trabalho, deve conter uma breve descrição de todo o trabalho (apenas um parágrafo). Portanto, só deve ser escrito após o texto estar pronto. Não é uma coletânea de frases recortadas do trabalho, mas uma apresentação concisa dos pontos relevantes, de modo que o leitor tenha uma ideia completa do que lhe espera. Uma sugestão é que seja composto por quatro pontos: 1) o que está sendo proposto, 2) qual o mérito da proposta, 3) como a proposta foi avaliada/validada, 4) quais as possibilidades para trabalhos futuros. É seguido de (geralmente) três palavras-chave que devem indicar claramente a que se refere o seu trabalho. Por exemplo: *Este trabalho apresenta informações úteis a produção de trabalhos científicos para descrever e exemplificar como utilizar a classe L^AT_EX do Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Brasília para gerar documentos. A classe UnB-CIC define um padrão de formato para textos do CIC, facilitando a geração de textos e permitindo que os autores foquem apenas no conteúdo. O formato foi aprovado pelos professores do Departamento e utilizado para gerar este documento. Melhorias futuras incluem manutenção contínua da classe e aprimoramento do texto explicativo.*

Palavras-chave: Computação em nuvem, Federação de nuvens, escalonamento, GPGPU, BioNimbuZ

Abstract

O *abstract* é o resumo feito na língua Inglesa. Embora o conteúdo apresentado deva ser o mesmo, este texto não deve ser a tradução literal de cada palavra ou frase do resumo, muito menos feito em um tradutor automático. É uma língua diferente e o texto deveria ser escrito de acordo com suas nuances (aproveite para ler [http://dx.doi.org/10.6061/2Fclinics%2F2014\(03\)01](http://dx.doi.org/10.6061/2Fclinics%2F2014(03)01)). Por exemplo: *This work presents useful information on how to create a scientific text to describe and provide examples of how to use the Computer Science Department's L^AT_EX class. The UnB-CIC class defines a standard format for texts, simplifying the process of generating CIC documents and enabling authors to focus only on content. The standard was approved by the Department's professors and used to create this document. Future work includes continued support for the class and improvements on the explanatory text.*

Keywords: Cloud Computing, Cloud Federation, schedulling, GPGPU, BioNimbuZ

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Estrutura do Trabalho	2
2	Nuvem Computacional	3
2.1	Definição de Computação em Nuvem	3
2.2	Tipos de Nuvens	4
2.3	Federações de Nuvens	5
3	Plataforma BioNimbuZ	8
3.1	Visão Geral	8
3.2	Arquitetura	9
3.2.1	Camada de Aplicação	11
3.2.2	Camada de Integração	11
3.2.3	Camada de Núcleo	11
3.2.4	Camada de Infraestrutura	12
3.3	Serviço de Escalonamento	12
3.3.1	<i>Analytic Hierarchy Proccess</i>	13
3.3.2	<i>Ant Colony Optmization</i>	13
3.3.3	<i>Beam Search</i> Multiobjetivo	13
4	Escalonamento	14
4.1	Definição	14
4.2	Escalonamento em Nuvens Computacionais	15
4.3	Trabalhos Relacionados	16
4.4	Escalonador Proposto	17
5	Implementação	20
5.1	Sistema de Escalonamento do BioNimbuZ	20
5.2	Implementação do Escalonador	21

5.3 Uso de GPU no BioNimbuZ	23
Referências	24

Lista de Figuras

2.1 Exemplo de uso de federação horizontal e vertical	6
3.1 Arquitetura do BioNimbuZ[1]	10
4.1 Diagrama de Funcionamento do Algoritmo de Escalonamento Proposto. . .	19
5.1 Subsistema de Escalonamento do BioNimbuZ	20
5.2 Subsistema de Escalonamento do BioNimbuZ	21
5.3 Arquitetura de Classes do Escalonador Implementado.	22

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACO *Ant Colony Optmization.*

AHP *Analytic Hierachy Process.*

API *Application Programming Interface.*

AWS *Amazon Web Services.*

CFS *Completely Fair Scheduler.*

CPU Unidade de Processamento Central, do inglês *Central Processing Unit.*

CSP *Cloud Service Provider.*

DNS *Domain Name System.*

FIFO *First In First Out.*

GCP *Google Cloud Plataform.*

GPGPU Unidade de Processamento Gráfico de Propósito Geral, do inglês *General Purpose Graphics Processing Unit.*

GPU Unidade de Processamento Gráfico, do inglês *Graphics Processing Unit.*

IaaS *Infrastructure as a Service.*

IP *Internet Protocol.*

JNI *Java Native Interface.*

LABID Laboratório de Bioinformática e Dados.

NIST *National Institute of Standards and Technology.*

P2P *Peer-to-Peer*.

PaaS *Platform as a Service*.

PSO *Particle Swarm Optimization*.

RAM *Random Access Memory*.

REST *REpresentational State Transfer*.

RPC Chamada de Procedimento Remoto, do inglês *Remote Procedure Call*.

SaaS *Software as a Service*.

SFTP Secure shell File Transfer Protocol.

SLA *Service Level Agreement*.

TCP *Transfer Control Protocol*.

TCTP *Trusted Cloud Transfer Protocol*.

TI Tecnologia da Informação.

UDP *User Datagram Protocol*.

UnB Universidade de Brasília.

VM Máquina virtual, do inglês *Virtual Machine*.

Capítulo 1

Introdução

A tecnologia tem se tornado cada vez mais ubíqua na sociedade. Com o advento da Internet, a interação dos seres humanos com a tecnologia explodiu, gerando um tráfego imenso de dados, e com isso a necessidade de processamento em larga escala. Nesse cenário, emergiu o conceito de nuvem computacional, um paradigma que permite processamento em larga escala sem ser necessário que o usuário tenha em mãos hardware com tamanha capacidade computacional.

Assim, grandes empresas da área de Tecnologia da Informação, como o *Google*[2] e a *Microsoft*[3], possuem vários *datacenters* com uma imensa quantidade de computadores interligados via rede, os quais disponibilizam esses recursos de forma virtualizada a usuários que necessitem de processamento e armazenamento em larga escala. A disponibilidade dessa capacidade de computação tem gerado uma revolução na forma como os serviços computacionais são disponibilizados na Internet. Dessa forma, pequenas empresas agora conseguem prover serviços em larga escala sem necessitarem de um grande investimento em infraestrutura computacional, e grandes empresas conseguem reduzir custos com equipamentos.

Como existem vários provedores de nuvem e cada um deles tem seus pontos fortes e fracos, surgiu então a ideia de criar uma plataforma que utilize serviços de vários provedores de nuvem, podendo explorar o ponto forte de cada um deles. Assim, emergiu o conceito de Federação de Nuvens[4], que são plataformas nas quais os usuários conseguem o máximo de flexibilidade provido pela combinação de funcionalidades que os distintos provedores de nuvem disponibilizam a seus usuários.

Todavia, como toda nova tecnologia, ela possui seus próprios desafios, pois desenvolver uma plataforma com tamanha flexibilidade requer uma arquitetura muito bem projetada, implementada e capaz de ser eficiente concomitantemente em que sua interface seja agradável ao usuário. Existem várias propostas para federações de nuvens, entre as quais é possível citar Demchenko[4] e Buyya[5]. Uma plataforma de Federação de Nuvens que

tem sido continuamente desenvolvida é o BioNimbuZ [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13], desenvolvido no Laboratório de Bioinformática e Dados (LABID) da Universidade de Brasília (UnB) por alunos de graduação e pós-graduação.

O BioNimbuZ é uma plataforma para nuvens federadas para a execução de *workflows*, inicialmente de bioinformática, mas atualmente sua arquitetura suporta *workflows* de propósito geral. Diante do exposto, este trabalho propõe adicionar ao serviço de escalonamento do BioNimbuZ a funcionalidade de distribuir de tarefas para CPUs e GPUs na nuvem.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um escalonador para a plataforma BioNimbuZ que seja capaz de escalonar tarefas para arquiteturas heterogêneas, ou seja, compostas por CPUs e GPUs. Para cumprir este objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Analisar alguns algoritmos de escalonamento para plataformas heterogêneas;
- Desenvolver um escalonador capaz de distribuir tarefas para plataformas heterogêneas;
- Integrar o escalonador ao BioNimbuZ;
- Analisar o desempenho do escalonador proposto.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este projeto contém, além deste capítulo introdutório, mais quatro capítulos. O Capítulo 2 discorre sobre computação em nuvem e federações de nuvens computacionais. O Capítulo 3 descreve a plataforma de nuvens Federadas BioNimbuZ. O Capítulo 4 aborda a atividade de escalonamento e propõe o algoritmo que será implementado. O Capítulo 5 fala como foi o processo de implementação do escalonador proposto.

Capítulo 2

Nuvem Computacional

Este capítulo apresenta, inicialmente, a definição de nuvem computacional, suas vantagens e desvantagens. Em seguida, busca-se classificar os tipos de nuvem, tanto em termos de quais serviços são providos, quanto em termos de como a infraestrutura computacional é implementada. Por fim, é apresentado o conceito de federação de nuvens e como essas federações podem combinar provedores de nuvens distintos em prol da performance e da relação custo-benefício.

2.1 Definição de Computação em Nuvem

Por alguns anos a computação em nuvem não possuía uma definição bem definida, principalmente, por ser uma tecnologia nova. Muitas vezes sendo confundida com computação em *Grid*[14]. Atualmente, há várias definições para computação em nuvem, dentre essas, umas das mais usadas foi definida pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), que conceituou computação em nuvem como um modelo de computação distribuída com as seguintes características [15]:

- Serviço *self-service on demand*;
- Fácil acesso via rede;
- Recursos virtualizados;
- Rápida elasticidade;
- Serviço mensurado.

Em contrapartida, Vaquero[14] definiu nuvens como um grande conjunto de recursos virtualizados, de fácil acesso e uso, que podem ser dinamicamente reconfigurados para se ajustarem à uma carga variável de uso, permitindo um uso ótimo dos recursos. Esse

conjunto de recursos são geralmente explorados por um modelo de uso *pay-per-use* no qual garantias são providas pelo provedor da infraestrutura, por meio de *Service Level Agreement* (SLA), que é um acordo de serviço que descreve o nível de qualidade e as garantias providas pelo provedor do serviço de nuvem.

Analisando as definições supracitadas, percebe-se que ambas concordam que recursos computacionais, como armazenamento, capacidade de processamento, memória e rede são disponibilizados de forma virtualizada, acessível via rede, na qual o uso desses recursos é monitorado, geralmente, com intenção de cobrança. Além de ser possível redimensionar os recursos disponíveis para uso *on-the-fly*, funcionalidade denominada elasticidade. Que ocorre de várias formas [16]: seja redimensionando uma VM em execução, ou seja criando novas máquinas virtuais para ajudar a prover o serviço, geralmente associadas a um distribuidor de carga.

Com base no conjunto de características supracitadas, é possível visualizar as vantagens desta tecnologia, as quais são: reduz o investimento inicial de empresas em infraestrutura de TI; a elasticidade, além de não desperdiçar investimentos feitos em servidores em momentos de pouca carga, se paga por aquilo que se consome. Isso tornou as nuvens computacionais populares, e um bom negócio para as grandes empresas da área de Tecnologia da Informação (TI), que são capazes de prover infraestrutura computacional, como a *Oracle*, a *Microsoft*, a *IBM*, a *Google*, entre outras.

2.2 Tipos de Nuvens

Os mesmos autores que definem nuvem computacional também buscam categorizar os tipos de nuvens. Assim, em relação aos tipos de serviços oferecidos, existem três classificações para nuvem computacional, que são [15] [14]:

- ***Infrastructure as a Service:*** O provedor disponibiliza recursos computacionais virtualizados diretamente, em termos de máquinas virtuais. Esses recursos são capazes de serem reconfigurados dinamicamente pelo serviço de elasticidade, por exemplo a *Oracle Cloud* [17];
- ***Plataform as a Service:*** Uma plataforma sobre a qual os usuários podem implantar softwares ou serviços é disponibilizada. Os programas implantados podem fazer uso de algumas funcionalidade fornecidas em forma de bibliotecas, linguagens de programação, entre outros. Um exemplo é o serviço de hospedagem de sites, que são disponibilizados, por exemplo, no *Amazon Web Services* (AWS)[18] e no *Google Cloud Plataform* (GCP)[19];

- **Software as a Service:** O usuário tem acesso a softwares que estão sendo executados na nuvem computacional. O que permite migrar requisito computacional do equipamento no qual o serviço executava para a nuvem. Um exemplo bastante conhecido é o *Google Docs* [20].

A categorização de nuvens computacionais por meio dos serviços providos não é a única forma de classificar nuvens. Elas também são categorizadas de acordo com a forma em que são implantadas. Assim, elas podem ser públicas, privadas, híbridas e comunitárias, descritas abaixo [15]:

- **Nuvem pública:** Criada para ser usada pelo público em geral. Ela pode ser disponibilizada e/ou mantida por uma organização, com ou sem fins lucrativos;
- **Nuvem privada:** Quando a infraestrutura da nuvem é provida por uma única organização, para uso interno. Ela pode ser gerenciada e/ou operada por um terceiro. Nuvens privadas são uma solução para o problema de privacidade dos dados, pois ela pode estar disponível apenas internamente na organização;
- **Nuvem comunitária:** Nuvem com infraestrutura desenvolvida com o objetivo de ser utilizada por um grupo de pessoas e/ou organizações para fins comuns. Ela pode ser gerenciada por uma ou mais partes dos interessados na nuvem;
- **Nuvem híbrida:** Combinação de duas ou mais das opções anteriores. Geralmente, unificadas por meio de padronizações de protocolos de comunicação ou uso de tecnologia proprietária.

2.3 Federações de Nuvens

Como cada provedor de nuvem possui seu próprio método de precificação, uma interface própria para comunicação com os usuários de seus serviços e funcionalidades próprias, surgiu o conceito de federações de nuvens computacionais. O objetivo dessa plataforma é minimizar dependências entre os provedores do serviço e também reduzir custos, aproveitando o melhor de cada provedor de nuvem. Assim, federação de nuvem é quando diferentes provedores de serviço de nuvem são agrupados e organizados para interoperarem entre si, seja pela busca de lucro, garantia de SLA ou mesmo uma melhor relação custo-benefício para o usuário.

Existem duas formas nas quais plataformas de federação podem combinar os serviços das nuvens: horizontalmente e verticalmente [21][22]. No modelo vertical instâncias de nuvem de um provedor A são criadas a partir de instâncias de nuvem de um provedor B, que pode solicitar serviços de um provedor de nuvem C, e assim por diante. No

modelo horizontal as nuvens trabalham sem existir uma hierarquia entre si, assemelhando-se bastante com sistemas de rede *peer to peer*. É possível combinar mais de um estilo em uma mesma federação.

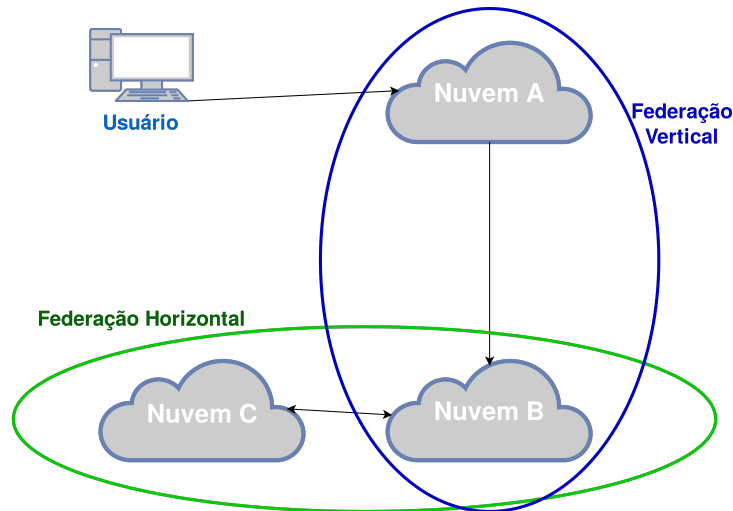


Figura 2.1: Exemplo de uso de federação horizontal e vertical

Buyya [5] descreve uma arquitetura para federações de nuvens que faz uso de uma *exchange* para aproximar clientes de provedores de nuvem, detalhando cada um de seus componentes em artigos distintos [23] [24] [25] [26]. Entretanto, o sistema descrito não menciona nada sobre virtualização de máquinas compostas por arquiteturas heterogêneas.

Chen[22] explora as vantagens de uso de nuvens horizontais e verticais concomitantemente, utilizando a teoria dos jogos para auxiliar no processo de decisão sobre quando fazer *outsourcing* de *workload*, explorando verticalidade da federação e quando remanejar o *workload* para instâncias da coalisão (nuvem horizontal). Um dos resultados obtidos revelou que o melhor para a performance de uma federação de nuvens é explorar tanto verticalmente quanto horizontalmente as nuvens existentes.

Margheri [27] propõe uma arquitetura de federações de nuvens completamente distribuída, que utiliza uma *blockchain* para prover um controle democrático da federação. Com grande foco em segurança e estabilidade, a arquitetura proposta provê a cada um dos membros o mesmo nível de controle sobre a federação, utiliza criptografia para tornar anônimo a origem dos serviços de computação. E utiliza *blockchain* para prover democracia na gestão da federação.

Alansari [28], propõe um sistema de controle de acesso com alta granularidade com o objetivo de provê compartilhamento seguro de informações, com grande foco na segurança e na privacidade dos usuários, especificando um protocolo de troca de chaves para processamento remoto de dados na nuvem. Também fazendo uso de *blockchain* para prover integridade de chaves públicas e outras informações necessárias do protocolo. Esse

trabalho faz uso de tecnologia proprietária em CPUs da Intel para fazer o processamento, o que significa que não possui nenhum porte para uso em equipamentos compostos por arquiteturas heterogêneas.

Gallico [29] apresenta a federação de nuvens CYCLONE, uma federação de nuvens em desenvolvimento com o objetivo, tanto comercial quanto científico, que utiliza as ferramentas *open-source* *OpenNaaS*[30], *OpenStack*[31] e *Trusted Cloud Transfer Protocol* (TCTP)[32].

Jrad [33] propõe um *framework* para executar *workflows* baseado no uso de um mediador entre os usuários e os provedores das nuvens. O mediador é capaz de negociar SLAs para buscar provedores que consigam garantir entrega do serviço a um custo menor. Faz uso de um *workflow engine* para processamento e clusterização de *workflows* requisitados. Resultados obtidos experimentalmente mostram redução significativa no custo do processamento dos *workflows*.

Mashayekhy [34] propõe o uso da teoria dos jogos para provedores de nuvens se aliarem em federações para situações em que sua infraestrutura não é capaz de lidar com a demanda de serviços. A teoria dos jogos é utilizada com o objetivo de determinar as melhores nuvens externas para *outsourcing* do excesso de demanda.

Demchenko [4] apresenta resultados obtidos em uma pesquisa em andamento sobre *framework* para provisionamento de infraestrutura de nuvem *on-demand*. O trabalho complementa a arquitetura da nuvem computacional de forma a simplificar federação horizontal para os tipos principais de serviços de nuvem (IaaS, PaaS e SaaS).

Marosi [35] propõe uma arquitetura de camadas que interage com intermediários de intermediários, conhecido como [?], de outras nuvens para interação com o máximo possível de provedores para prover infraestrutura sob demanda, tanto para nuvens públicas quanto para nuvens privadas.

Zant [36] explora federações horizontais de nuvem *Cloud Service Provider* (CSP) *side* com objetivo de maximizar os lucros das mesmas. Essas federações são invisíveis ao cliente da nuvem e considera que os CSP participantes da federação possuem equipamentos semelhantes. Os testes provam aumento no faturamento, entretanto, GPUs não são citadas ou utilizadas nos testes.

O capítulo seguinte apresenta o BioNimbuZ, a plataforma de federação de nuvens computacionais selecionada para utilização do escalonador desenvolvido neste trabalho.

Capítulo 3

Plataforma BioNimbuZ

Este capítulo possui como objetivo apresentar a plataforma de nuvens federadas BioNimbuZ, que foi selecionada para desenvolver o escalonador para plataformas heterogêneas proposto neste trabalho. A primeira seção apresenta de forma geral o BioNimbuZ e descreve sua evolução ao longo do tempo. A segunda seção descreve a arquitetura do BioNimbuZ e seus principais componentes. A última seção foca sobre os escalonadores que existem atualmente no BioNimbuZ.

3.1 Visão Geral

O BioNimbuZ é uma plataforma livre de nuvens federadas para execução de *workflows*, desenvolvido no Laboratório de Bioinformática e Dados (LABID) por alunos de graduação e pós-graduação. Ele foi originalmente proposto por Saldanha[13] e refinado por alunos de iniciação científica, graduação, mestrado e doutorado[6] [8] [10] [11] [12] [37].

É possível integrar nuvens de tipos de governança (vide capítulo 2), o que permite que cada provedor mantenha suas políticas e características internas, o que reduz a dependência da plataforma e, conseqüentemente, dos usuários de dependência de servidores específicos de nuvem. Essa funcionalidade é alcançada graças à facilidade e flexibilidade na inclusão de novos provedores na plataforma, o qual é regida por utilização de *plugins* de integração, que traduzem requisições vindas da plataforma para comandos equivalentes específicos de cada servidor. Isso é fundamental para evitar *vendor lock-in*[38], que é a dependência de um serviço a um provedor em específico, por mais que existam outros.

Em sua concepção inicial, a plataforma BioNimbuZ foi implementada toda por meio de comunicação *Peer-to-Peer* (P2P), porém, durante sua evolução optou-se por integrar o Zookeeper[39] à plataforma para gerenciar os serviços distribuídos.

Moura *et al.*[8] desenvolveram a Chamada de Procedimento Remoto RPC[40] para a plataforma. Fazendo uso do Apache Avro[41], que possibilita comunicação de forma

transparente entre computadores, para que seja possível a chamada de procedimentos em outros computadores via rede. Além disso, o núcleo do BioNimbuZ foi refatorado para utilização do serviço voltado para sistemas distribuídos Apache ZooKeeper[39], e também foi implementado uma política de armazenamento que considera latência e o local em que o serviço seria executado, utilizando Secure shell File Transfer Protocol (SFTP) para transferência de arquivos.

Barreiros *et al.*[42] refinaram a política de armazenamento, que analisa a viabilidade de compactação de arquivos pré-transferência com base na largura de banda, tempo de transferência de arquivos e tempo de compressão e descompressão.

Ramos *et al.*[43] desenvolveu um controlador de *jobs* para comunicação entre o núcleo do BioNimbuZ e a Camada de Interface com o Usuário, além de desenvolver uma interface gráfica que tornou a plataforma mais acessível.

Novamente, Barreiros[11] desenvolveu o escalonador que se baseia no *beam search* interativo multiobjetivo, chamado C99, com o objetivo de aumentar a eficiência do escalonamento, que passou a levar em consideração o custo por hora dos recursos a serem alocados.

Santos[44] refinou o serviço de armazenamento do BioNimbuZ, adicionando suporte ao uso de serviços de armazenamentos providos pelos diferentes provedores de nuvem, melhorando a praticidade e a usabilidade da plataforma.

Ao longo dos trabalhos supracitados, que evoluíram o sistema proposto inicialmente por Saldanha[13], o BioNimbuZ adquiriu uma arquitetura em camadas, que será descrita na próxima seção.

3.2 Arquitetura

O BioNimbuZ foi implementado utilizando uma arquitetura de camadas, dispostas de forma hierárquica e distribuída. Ele possui quatro camadas principais: Aplicação, Integração, Núcleo e Infraestrutura. Como apresentado na Figura 3.1.

Internamente, o BioNimbuZ utiliza o Apache Zookeeper[39] para prover serviços de coordenação de ambientes distribuídos. O Apache Zookeeper foi desenvolvido pela fundação Apache[45], tem como objetivo ser de fácil manuseio. Ele possui um modelo de dados semelhante a uma estrutura de diretórios.

Uma outra tecnologia que também é utilizada no BioNimbuZ é o Apache Avro[41], para serialização de dados para transmissão pela rede.

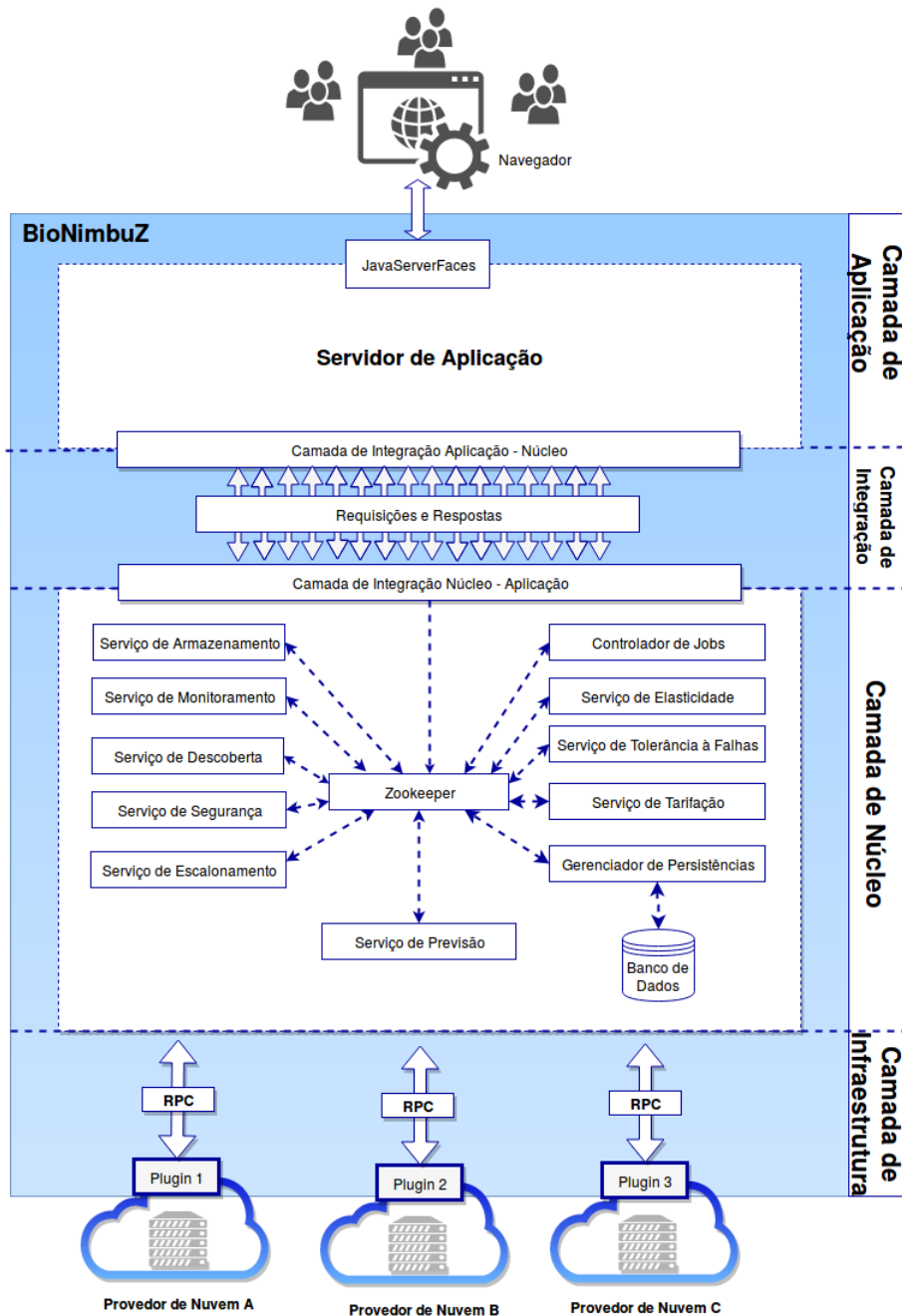


Figura 3.1: Arquitetura do BioNimbuZ[1]

3.2.1 Camada de Aplicação

Esta camada é responsável por prover a interface de comunicação com o usuário, seja via uma interface gráfica (GUI), seja via *web*. Após fazer *login*, o usuário pode submeter *workflows* para serem executados e fazer *upload* dos arquivos necessários. Além de poder acompanhar o andamento de seus *workflows* e obter, caso queira, os resultados que já tiverem sido produzidos.

3.2.2 Camada de Integração

A Camada de Integração tem como objetivo integrar as Camadas de Aplicação e de Núcleo, fazendo uso do *framework* REST para prover, de forma prática, essa funcionalidade, utilizando operações definidas no protocolo *HTTP*, como *GET*, *DELETE* e *PUT*. Existem três tipos de mensagens trocadas entre o Núcleo e a camada de Aplicação:

- *Request*: Requisições da camada de Aplicação que contém todos os dados necessários para o seu processamento;
- *Response*: Respostas que definem as mensagens enviadas da camada de Núcleo do BioNimbuZ;
- *Action*: Comandos a serem executados pelo núcleo, que são uma requisição enviada ao núcleo para se obter dados na resposta.

3.2.3 Camada de Núcleo

A Camada de Núcleo é a camada mais importante do BioNimbuZ. Ela realiza toda a gerência da federação, provendo vários serviços. Entre eles:

- Serviço de Predição: Objetiva orientar o usuário do BioNimbuZ a escolher as melhores combinações de máquinas virtuais/provedores a partir da especificação do *workflow* a ser executado, e do custo pretendido;
- Serviço de Tarifação: Responsável por calcular o valor que os usuários devem pagar pelos serviços providos do BioNimbuZ. Para tal, comunica-se com o serviço de monitoramento para obter informações como tempo de execução e quantidade de máquinas virtuais alocadas. É função deste serviço garantir o cumprimento das métricas de tarifação das nuvens integradas à federação, e repassar o valor ao usuário;
- Serviço de Segurança: Realiza, principalmente, a autenticação de usuário, além de verificar as autorizações do mesmo. Contudo, muitos outros aspectos de segurança computacional podem ser implementados por este serviço, tais como criptografia na troca de mensagens;

- Serviço de Tolerância a Falhas: Como o nome diz, este serviço é responsável em certificar que todos os serviços do BioNimbuZ estejam disponíveis o máximo de tempo possível. Além de ter a responsabilidade de tratar quaisquer falhas que venham a ocorrer, tira vantagem da arquitetura distribuída do BioNimbuZ para prover redundância de dados;
- Serviço de Armazenamento: Possui a responsabilidade de gerenciar arquivos utilizados como entrada e/ou saída de cada estágio de um *workflow*. Deve desempenhar seu papel de forma eficiente, do ponto de vista de custos de armazenamento e transmissão desses dados entre o local que está armazenado e o local que serão processados;
- Serviço de Escalonamento: Responsável por fazer o escalonamento dos *jobs* submetidos ao BioNimbuZ. Com curto prazo quer-se dizer que é tão somente o escalonamento de *jobs* que estão prontas para serem executadas, à máquinas virtuais que os processarão. Não é responsabilidade do serviço de escalonamento lidar com dependências, pois essa responsabilidade é do controlador de *jobs*.

3.2.4 Camada de Infraestrutura

A Camada de Infraestrutura disponibiliza uma interface de comunicação do BioNimbuZ com os provedores de nuvem. Esta camada utiliza *plugins* para mapear requisições provenientes da Camada de Núcleo para comandos específicos de cada provedor.

O BioNimbuZ é capaz de ser integrado tanto à nuvens públicas quanto privadas, utilizando *plugins* para permitir conexão com vários provedores de nuvem, cada qual com sua própria interface. Os *plugins* não existem apenas na camada de integração: vários serviços da camada de núcleos também são disponibilizados como tal, provendo grande flexibilidade à plataforma.

Diante do objetivo deste trabalho, o Serviço de Escalonamento do BioNimbuZ será detalhado na próxima seção.

3.3 Serviço de Escalonamento

Em suas primeiras fases de desenvolvimento, o escalonador do BioNimbuZ apenas realizava uma associação *First In First Out* (FIFO) entre *jobs* disponíveis e as VMs instanciadas. Em seguida, esta política de escalonamento evoluiu para um escalonamento *Round-Robin*. Desde então, foram propostas vários escalonadores diferentes, que serão explicados a seguir.

3.3.1 *Analytic Hierarchy Proccess*

Em sua primeira versão oficial, o BioNimbuZ possuía um escalonador baseado no *Analytic Hierachy Process* (AHP)[10], uma técnica de análise de decisões complexas, de amplo uso no meio corporativo. O problema é quebrado em uma estrutura hierárquica que cada elemento da hierarquia interage apenas com níveis imediatamente superiores e inferiores. Após análise comparativa de como cada elemento interfere em todos os outros elementos dos níveis hierárquicos vizinhos, é obtido o resultado da análise, que revela as opções escolhidas com base nos critérios analisados.

3.3.2 *Ant Colony Optmization*

Esta solução é baseada na metaheurística *Ant Colony Optmization* (ACO)[46] para o problema de otimização combinatória difícil. Esta meta-heurística foi inspirada no comportamento das formigas enquanto andam. Oliveira *et al.*[10] desenvolveram e implementaram um escalonador para o BioNimbuZ com esta proposta de solução, que obteve resultados positivos comparados ao escalonador anterior, baseado no AHP.

3.3.3 *Beam Search Multiobjetivo*

O escalonador utilizado atualmente, desenvolvido por Barreiros[11], é um escalonador cuja proposta principal é ser interativo e multiobjetivo, ou seja, que pode ser interrompido durante sua execução e ainda assim retornar um resultado válido. Este algoritmo considera, durante o processamento, a capacidade das máquinas virtuais disponíveis e o preço de cada uma delas. O escalonamento ocorre em três etapas, as quais são:

1. Busca gulosa para sobre conjuntos de Pareto, ou seja, conjuntos de resultados considerados equivalentes dado um conjunto de critérios, para poda(remoção) de conjuntos soluções não ideias;
2. *Limited Discrepancy Search*[47], cujo objetivo é impedir que a poda(remoção) do conjuntos soluções que pode levar a um conjunto solução melhor futuramente; e
3. *Beam Search* Iterativo, que busca iterativamente os melhores conjuntos resultado.

Uma funcionalidade que não foi abordada nos escalonadores citados acima é que eles não possuem suporte para rodar *jobs* em GPUs, apenas em CPUs. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é considerar as máquinas com CPUs e GPUs. O próximo capítulo discorrerá sobre escalonadores, e apresentará o algoritmo de escalonamento proposto neste trabalho.

Capítulo 4

Escalonamento

Este capítulo apresenta, inicialmente, os diferentes tipos de escalonadores, citando as várias áreas em que a atividade de escalonamento ocorre. Em seguida apresenta a definição do problema de escalonamento que este trabalho busca resolver. Em sequência, é discutido sobre trabalhos relacionados para então apresentar o algoritmo de escalonamento proposto.

4.1 Definição

O escalonamento é um problema clássico da computação que surgiu junto com os sistemas operacionais multitarefas. Sua complexidade é considerada NP-difícil[48], porém isso não impediu a evolução dos sistemas operacionais, cujos escalonadores são desenvolvidos com objetivos e metodologias diferentes para alcançarem uma boa performance. De qualquer forma, um problema que todos os sistemas operacionais multitarefa buscam resolver é o *starvation*, que é quando um processo/*thread* fica esperando indefinidamente por um recurso, que pode ser, inclusive, a CPU [49].

Escalonadores podem ser categorizados de várias formas, com base nas funcionalidades que possuem. Assim, uma importante questão é definir qual é a unidade escalonada, podendo ser:

- processos, *threads* para serem executados;
- *jobs* para serem executados na nuvem;
- páginas da memória *Random Access Memory* (RAM) para *swapping*;
- pacotes para serem transmitidos pela rede;
- requisições de leitura/escrita em memória secundária.

Além da unidade que é escalonada, outras características que ajudam a definir um escalonador é se ele permite que tarefas sejam interrompidas para que outras possam ser executadas, funcionalidade conhecida como preempção. Além disso, o escalonador pode ou não ser capaz de definir prioridades diferentes para cada um dos objetos que está sendo escalonado, e/ou dá suporte para processos que podem requisitar urgência para sua execução, conhecidos como processos de tempo-real.

O problema do escalonamento é o método pelo qual trabalho, definido por algum conjunto de características (como duração e requisitos), é atribuído à recursos que são capazes de completá-lo.

Atualmente, as CPUs possuem vários núcleos, e são capazes de ter mais de um contexto carregado por núcleo, vide Ryzen™ Threadripper™[50]. O que faz com que seja necessário que o processo de escalonamento leve em consideração como o mesmo será distribuído (ou não) entre os núcleos.

A atividade de escalonamento pode ser otimizada para vários objetivos, entre os quais é possível citar:

- Maximizar quantidade de trabalho realizada por unidade de tempo;
- Minimizar tempo no qual trabalhos ficam esperando para serem executados;
- Minimizar tempo entre um conjunto de trabalhos estar pronto para ser executados até o fim da execução do conjunto (latência ou tempo de resposta);
- Distribuir de forma justa o tempo que cada um dos trabalhos terá de uso de um recurso escasso.

Esses objetivos são, às vezes, contraditórios. Na prática, prioriza-se um conjunto de métricas como base para otimização. Por exemplo, o GNU/Linux utiliza o *Completely Fair Scheduler* (CFS), que se baseia no algoritmo *Fair queuing*. Como o nome já diz, o foco desse escalonador está em ser justo. Internamente, utiliza-se uma árvore rubro-negra indexada pelo tempo gasto no processador. Para ser justo, o tempo máximo de cada processo fica em execução interrompida é o quociente do tempo que o processo ficou aguardando para ser executado pelo número total de processos.

4.2 Escalonamento em Nuvens Computacionais

Este trabalho focará no escalonamento em federações de nuvens computacionais. O qual recentemente presenciou a ascensão do uso de unidades de processamento gráfico (Unidade de Processamento Gráfico, do inglês *Graphics Processing Unit* (GPU)) para processamento de propósito geral (Unidade de Processamento Gráfico de Propósito Geral,

do inglês *General Purpose Graphics Processing Unit* (GPGPU)[51][52]. Nesse contexto, o problema do escalonamento pode ser formalmente definido como, dado:

- Conjunto T de tarefas;
- Conjunto M de máquinas virtuais;
- Conjunto C , $|C| = |M|$ de CPUs das máquinas virtuais;
- Conjunto G , $|G| \leq |M|$ de GPUs das máquinas virtuais;
- Função $F : T \times (C \cup G) \rightarrow \mathbb{R}$, o qual estima o tempo de execução da tarefa T_i no recurso designado.

encontrar uma função injetora $A : T \rightarrow C \cup G$, que minimize $\sum_{t \in T} F(t, A(t))$.

4.3 Trabalhos Relacionados

Por mais que o problema do escalonamento seja um clássico na área da Ciência da Computação, são poucos que lidam com escalonamento em nuvens computacionais, e ainda menos os trabalhos que lidam com nuvens compostas por arquiteturas heterogêneas.

Gouasmi *et al.* [53] apresentam um algoritmo de *MapReduce*[54] para escalonamento em nuvens federadas que foca em priorizar a execução de *jobs* em nuvens/máquinas virtuais que já contém os dados necessários para a execução, com o objetivo de evitar transferências desnecessárias na rede. O algoritmo proposto é completamente distribuído e melhor do que o *MapReduce* anteriormente utilizado, porém nada é dito sobre escalonamento para máquinas com arquiteturas heterogêneas.

Nguyen e Thoai [55] propõem um sistema de intermediação para federações de nuvens horizontais, com foco em busca da melhor nuvem para auxiliar sobrecarga de serviços para execução. Levando em consideração que provedores de nuvens diferentes podem ter sua infraestrutura customizada com o objetivo de atender diferentes perfis de usuários que mais usam seus serviços, o algoritmo proposto leva em consideração tais características individuais de cada provedor. Novamente, nada é dito sobre nuvens compostas por equipamentos com arquiteturas heterogêneas.

Jennings e Stadler [56] documentaram várias metodologias, utilizadas em diferentes contextos que o escalonamento ocorre em ambientes de nuvens computacionais, revelando detalhadamente muitos dos problemas enfrentados durante a concepção. Entretanto, nada é citado sobre federações de nuvens e os problemas de escalonamento enfrentados internamente num provedor de nuvem diferem dos enfrentados em ambientes de federação.

Kumrai *et al.* [57] trata do escalonamento de tarefas do ponto de vista do intermediador, utilizando *Particle Swarm Optimization* (PSO), que busca imitar um bando de pássaros. Cada elemento da população representa uma possível solução, que ao longo de interações tendem a encontrar a o melhor resultado, baseado numa função que avalia quão bom cada elemento da população é. Também analisa uma variação multiobjetivo do *Particle Swarm Optimization*, buscando solução boas tanto para o provedor de nuvem quanto para quem solicita os serviços. O problema do escalonamento apreciado nesse artigo possui contexto similar ao que será enfrentado nesta monografia, entretanto, não é tratado problema criado pelo uso de máquinas compostas por arquiteturas heterogêneas.

Mostageran *et al.* [58] documentam sobre intermediadores, conhecidos como *brokers*, com foco em sua evolução para atenderem a níveis de qualidade de serviços propostos em SLAs. Apresentando definições úteis para termos utilizados na área, como *inter-cloud*, federação de nuvens e *cloud broker*. É importante diferenciar escalonador de intermediário: o intermediário mantém registro de entidades interessadas em um serviço e provedores desse serviço, incluindo busca de provedores e monitoramento das conexões feitas entre os interessados e os provedores. O escalonamento funciona em um escopo menor, que é gerenciar acesso a um recurso escasso buscando otimizar alguma métrica relativa ao seu contexto de uso, como por exemplo acesso de processos ao processador.

Diante dos trabalhos apresentados, nota-se que nenhum deles aborda o escalonamento para federações compostas por arquiteturas heterogêneas. Por isto, este trabalho propõe um escalonador para federações que utilizem equipamentos compostos por arquiteturas heterogêneas.

4.4 Escalonador Proposto

O escalonador proposto para implementação segue a ideia básica de escalonamento de listas. Dessa forma, haverá três listas: lista de tarefas a serem executadas, lista de CPUs disponíveis e lista de GPUs disponíveis. O uso de listas para escalonamento é uma das abordagens principais para escalonamento, incluindo listas de listas[59], pois é prático associar significados à posições na lista, por exemplo no Linux as posições zero à 9 são utilizadas para *threads* do sistema e de tempo real, enquanto as posições seguintes são usadas para *threads* de usuário [60].

A lista de tarefas é ordenada por tempo previsto de execução, que é dado por uma estimativa a partir do programa a ser executado e do arquivo de entrada. Essa ordenação será em ordem decrescente de tempo previsto. A lista de CPUs disponíveis é ordenada com base na frequência e no número de núcleos. A lista de GPUs tem sua ordem determinada

pela quantidade de operações em pontos flutuante que consegue realizar por segundo. Assim, ocorre de acordo com a Figura 4.1.

Algorithm 1 Escalonamento heterogêneo baseado em listas

```

procedure ESCALONAR(listas lTarefas, lCPUs e lGPUs)
  while Existem tarefas que podem ser executadas nos recursos disponíveis? do
     $aux \leftarrow lTarefas[0]$ 
    if aux é capaz de rodar em GPU then
      if  $T_{previsto}(lGPUs[0]) < T_{previsto}(lCPUs[0])$  then
        Escalone aux para lGPUs[0]
      else
        Escalone aux para lCPUs[0]
    else
      Escalone aux para lCPUs[0]
  Remova a tarefa e o recurso alocado de suas respectivas listas.
  Encerra escalonamento

```

Assim sendo, observe que para o algoritmo mostrado na Figura 4.1 seja válido, pressupõe-se que toda tarefa do algoritmo é capaz de rodar em CPU. O pressuposto simplifica o primeiro passo do algoritmo, exibido na Figura 4.1, pois se a lista de CPUs não estiver vazia, essa condição é automaticamente satisfeita.

O próximo capítulo apresentará os problemas enfrentados na implementação e implantação do escalonador.

COLOCAR EM TRABALHOS FUTUROS: Como trabalho futuro, se o BioNimbuZ obtiver suporte execução de uma mesma tarefa de forma distribuída, uma pequena modificação que pode ser feita no algoritmo supracitado é: ao invés de remover as tarefas escalonadas da lista de tarefas, colocá-las no fim dessa mesma lista. Fará com que o escalonamento seja interrompido apenas quando todos os recursos disponíveis forem alocados, pois sempre haverá tarefas para serem alocadas.

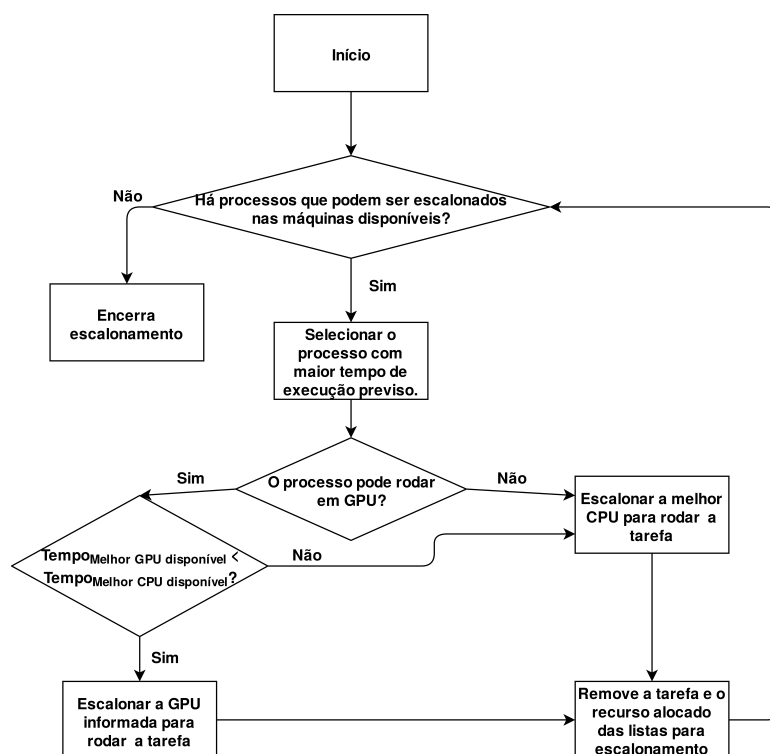


Figura 4.1: Diagrama de Funcionamento do Algoritmo de Escalonamento Proposto.

Capítulo 5

Implementação

Este capítulo apresenta, inicialmente o sistema de escalonamento do BioNimbuZ em seus pormenores, a nível de classes e seus objetivos. Posteriormente, discorre sobre a implementação, mostrando alguns dos problemas encontrados durante o desenvolvimento e como eles foram solucionados. A terceira seção aborda a adição de tarefas que utilizam a GPU no BioNimbuZ, e na última parte do capítulo são descritos os testes feitos e o resultado do novo escalonador.

5.1 Sistema de Escalonamento do BioNimbuZ

O serviço de escalonamento é implementado no BioNimbuZ como um serviço da Camada de Núcleo(veja a Figura 3.1), de acordo com o subsistema mostrado na Figura 5.1. A interface *services* define métodos para inicialização, término de serviços e métodos para comunicação com o *Zookeeper* [39]. A classe *AbstractBioService* define funcionalidades comuns aos serviços do BioNimbuZ, em especial, comunicação entre as máquinas que compõem a plataforma e o padrão de projeto *observer*, utilizado para notificação de eventos.

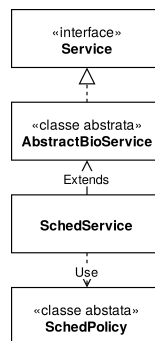


Figura 5.1: Subsistema de Escalonamento do BioNimbuZ

A classe *SchedService* é a responsável por prover o serviço de escalonamento em si, entretanto, para permitir a existência de várias políticas de escalonamento, internamente ela utiliza instâncias da classe abstrata *SchedPolicy*, que implementam cada uma das distintas políticas de escalonamento existentes. Conforme mostrado na Figura 5.2.

Essas políticas de escalonamento são implementadas através da definição dos seguintes métodos herdados de *SchedPolicy*:

- *schedule*, que realiza o escalonamento inicial propriamente dito;
- *relocate*, o qual realoca um processamento que está em execução;
- *cancelJobEvent*, cujo objetivo é reportar ao escalonador o cancelamento de um *job*;
- *jobDone*, que informa ao escalonador que um *job* terminou.

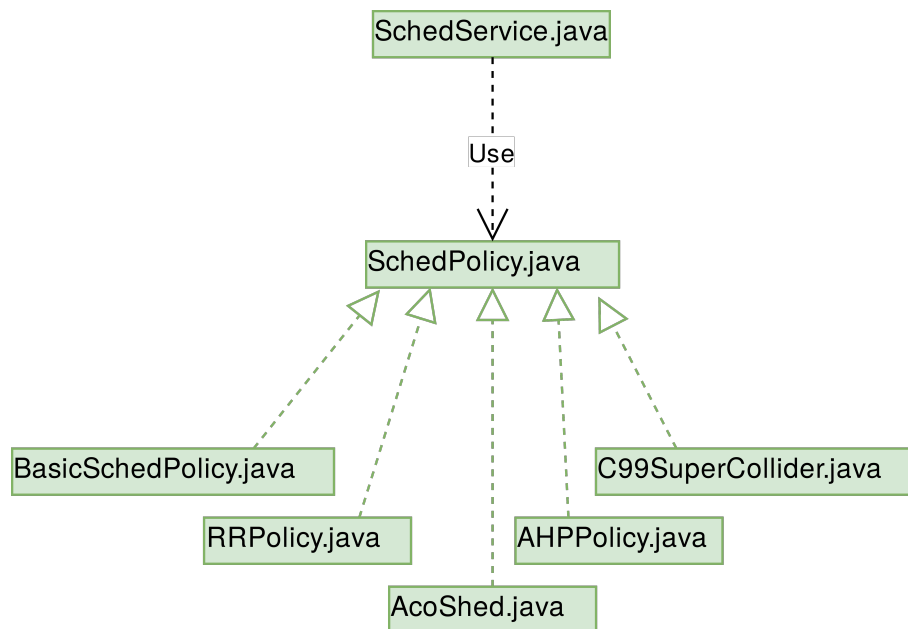


Figura 5.2: Subsistema de Escalonamento do BioNimbuZ

5.2 Implementação do Escalonador

Por motivos de familiaridade com a linguagem de programação, o escalonador proposto foi implementado em C++. Para ter compatibilidade com o resto do software, classes auxiliares, como a que representa os *Jobs* e as VMs instanciáveis tiveram equivalentes escritos em C++. Além disso, dois outros problemas surgiram, que foram como iniciar o escalonador C++, e como ele deve se comunicar com os demais componentes da plataforma. O primeiro problema foi resolvido através de pesquisa na *Application*

Programming Interface (API) do Java, utilizando as classes *Runtime*[61] e *Process*[62], os quais permitem executar comandos de terminal, o que possibilitou a execução da parte C++ do escalonador.

O problema da comunicação do C++ com o Java é mais difícil, pois há várias formas de fazer. Por exemplo, o uso de classes *wrappers* que usam *handles*, que são objetos cujo objetivo é manipular estruturas que não são nativas da linguagem[63]. Uma outra forma documentada é através do uso do *Java Native Interface* (JNI), que é uma outra forma existente no qual, através do uso de *handles*, é chamar código C++ num programa Java[64]. Além disso, existem variações deste método utilizando bibliotecas que buscam simplificar o gerenciamento do *handle*. Como as formas pesquisadas para fazer tal comunicação aparentam não chegar a um consenso, decidiu-se então utilizar formas mais genéricas de comunicação entre processos, onde então surgiu a ideia de usar *sockets* para fazer a comunicação.

Socket é uma abstração que sistemas operacionais fazem para permitir que programas tenham acesso à rede. O sistema de portas permite diferenciar em um computador qual dos programas interessados está enviando ou deve receber a mensagem.

Uma vez decidido o uso de *sockets* faltava decidir qual seria o protocolo da camada de rede e de transporte. Na camada de rede o principal protocolo existente é o *Internet Protocol* (IP), entretanto, existem duas versões: o IPv4[65] e o IPv6[66], sendo que o último é mais recente e permite um maior número de dispositivos na rede, por isso essa foi a versão utilizada na implementação. Quanto à camada de transporte, os candidatos eram o TCP[67] e o UDP[68]. O TCP provê uma série de garantias ao usuário dos pacotes que serão transmitidos pela rede ao custo de *overhead*, mas como apenas será utilizado para comunicação em *loopback*, o UDP é mais simples e enxuto, sendo o escolhido como protocolo da camada de transporte neste trabalho.

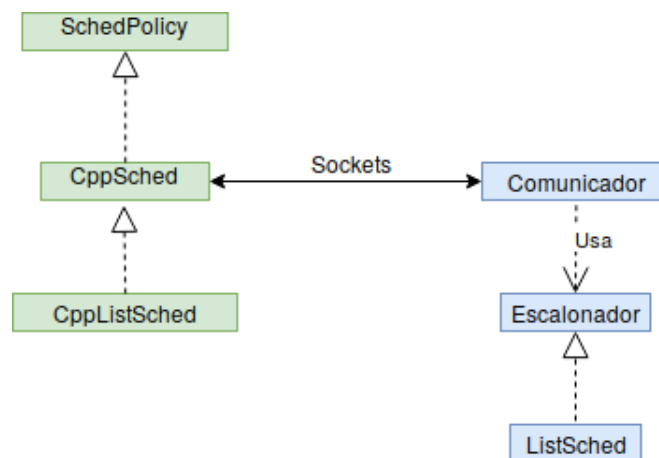


Figura 5.3: Arquitetura de Classes do Escalonador Implementado.

Como pode ser observado na Figura 5.3, para a implementação desse sistema de comunicação no BioNimbuZ, desenvolveu-se a classe abstrata *CppSched* que herda de *SchedPolicy*, responsável por fazer a inicialização do programa C++ e pelo *handshake* entre os processos C++ e Java, permitindo que futuros escalonadores em C++ não precisem repetir este processo. Da classe *CppSched* herda o método *GetSchedPolicy*, utilizado para informar qual escalonador C++ deve ser utilizado.

O programa C++ é composto pela classe Comunicador, que inicializa seu *socket* e inicia a conversa com o processo Java, cuja porta de comunicação é recebida pela linha de comando. Durante o *handshake* é definido qual filho da classe virtual Escalonador será usado. Em prol da simplicidade e performance, buscou-se minimizar a comunicação entre os processos C++ e Java. Assim, após a inicialização, o processo C++ se comporta similarmente à um servidor DNS[69], ficando em espera por solicitações de escalonamento, e responde às requisições sem manter estado internamente.

5.3 Uso de GPU no BioNimbuZ

Para os testes foi escolhido o programa XMR-Stak[70], um programa de mineração de criptomoedas, que são artefatos digitais desenvolvidos como meio de troca, que utilizam criptografia para prover segurança e integridade às transações[71]. Esse software de mineração, em específico, foi escolhido pelo fato de ser software livre e por isso ter seu código fonte disponível publicamente, além de ser multiplataforma e ser capaz de minerar tanto em CPU quanto em GPU.

A mineração de criptomoedas é a atividade de buscar *nouces*, isto é, uma sequência aleatória de bytes, que quando inserido junto de um possível futuro bloco de uma *blockchain*, que é uma lista distribuída para armazenamento de registros, numa função de *hash* criptográfico, gera um *hash* que atenda a algum critério de dificuldade, geralmente um valor específico no início. Quando é encontrado um *digest*, uma saída da função de *hash*, que atende ao critério, tal bloco é adicionado na *blockchain*, e o responsável pela máquina que encontrou a resposta é recompensado em criptomoeda.

Referências

- [1] Alves, Tiago Henrique Costa Rodrigues: *Uma arquitetura baseada em containers para workflows de bioinformática em nuvens federadas*. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, 2017. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/30994>. ix, 10
- [2] Google: *Quem somos / google*. https://www.google.com.br/intl/pt-BR_br/about/?utm_source=google.com&utm_medium=referral&utm_campaign=hp-footer&fg=1, 2018. Online, acessado em 29 de Março de 2018. 1
- [3] Microsoft: *Microsoft official homepage*. <https://www.microsoft.com/>, 2018. Online, acessado em 29 de Março de 2018. 1
- [4] Demchenko, Y., M. X. Makkes, R. Strijkers e C. de Laat: *Intercloud architecture for interoperability and integration*. Em *4th IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science Proceedings*, páginas 666–674, Dec 2012. 1, 7
- [5] Buyya, Rajkumar, Rajiv Ranjan e Rodrigo N. Calheiros: *Intercloud: Utility-oriented federation of cloud computing environments for scaling of application services*. Em *Proceedings of the 10th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing - Volume Part I, ICA3PP'10*, páginas 13–31, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer-Verlag, ISBN 3-642-13118-2, 978-3-642-13118-9. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13119-6_2. 1, 6
- [6] Bacelar, Breno Rodrigues Moura; Deric Lima: *Política para armazenamento de arquivos no zoonimbus*. Biblioteca de monografias da UnB, 2013. Monografia (Licenciatura em Ciência da Computação). 2, 8
- [7] Hugo Saldanha, Edward de Oliveira Ribeiro, Maristela Holanda Aleteia PF Araujo Genaína Nunes Rodrigues Maria Emilia Telles Walter Jo btxfnamespacelong ao Carlos Setubal Alberto MR Dávila: *A cloud architecture for bioinformatics workflows*. CLOSER, 11:477, 2011. 2
- [8] Lima, D., B. Moura, G. Oliveira, E. Ribeiro, A. Araujo, M. Holanda, R. Togawa e M. E. Walter: *A storage policy for a hybrid federated cloud platform: A case study for bioinformatics*. Em *2014 14th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing*, páginas 738–747, May 2014. 2, 8
- [9] Saldanha, Hugo, Edward Ribeiro, Carlos Borges, Aletéia Araújo, Ricardo Gallon, Maristela Holanda, Maria Emilia Walter, Roberto Togawa e Jo btxfnamespacelong ao Carlos Setubal: *Towards a hybrid federated cloud platform to efficiently execute bioinformatics workflows*. Em Pérez-Sánchez, Horacio (editor):

- Bioinformatics*, capítulo 05. InTech, Rijeka, 2012. <http://dx.doi.org/10.5772/50289>. 2
- [10] Oliveira, G. S. S. de, E. Ribeiro, D. A. Ferreira, A. P. F. Araújo, M. T. Holanda e M. E. M. T. Walter: *Acosched: A scheduling algorithm in a federated cloud infrastructure for bioinformatics applications*. Em *2013 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine*, páginas 8–14, Dec 2013. 2, 8, 13
 - [11] Barreiros Júnior, Willian de Oliveira: *Escalonador de tarefas para o plataforma de nuvens federadas bionimbuz usando beam search iterativo multiobjetivo*. <http://bdm.unb.br/handle/10483/13146>, 2016. Monografia (Bacarelado em Engenharia da Computação). 2, 8, 9, 13
 - [12] Borges, C. A. L., H. V. Saldanha, E. Ribeiro, M. T. Holanda, A. P. F. Araujo e M. E. M. T. Walter: *Task scheduling in a federated cloud infrastructure for bioinformatics applications*. Em *Proceedings of the 2nd International Conference on Cloud Computing and Services Science - Volume 1: CLOSER*, páginas 114–120. INSTICC, SciTePress, 2012, ISBN 978-989-8565-05-1. 2, 8
 - [13] Saldanha, Hugo Vasconcelos: *Bionimbus: uma arquitetura de federação de nuvens computacionais híbrida para a execução de workflows de bioinformática*. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, 2013. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/12046>. 2, 8, 9
 - [14] Vaquero, Luis M., Luis Rodero-Merino, Juan Caceres e Maik Lindner: *A break in the clouds: Towards a cloud definition*. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 39(1):50–55, dezembro 2008, ISSN 0146-4833. <http://doi.acm.org/10.1145/1496091.1496100>. 3, 4
 - [15] Mell, Peter e Timothy Grance: *The nist definition of cloud computing*. Relatório Técnico 10.6028/NIST.SP.800-145, National Institute of Standards and Technology: U.S. Department of Commerce, Sep 2011. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>. 3, 4, 5
 - [16] Coutinho, Emanuel Ferreira, Flávio Rubens de Carvalho Sousa, Paulo Antonio Leal Rego, Danielo Gonçalves Gomes e José Neuman de Souza: *Elasticity in cloud computing: a survey*. annals of telecommunications - annales des télécommunications, 70(7):289–309, Aug 2015, ISSN 1958-9395. <https://doi.org/10.1007/s12243-014-0450-7>. 4
 - [17] Oracle: *Infrastructure as a Service / Oracle Cloud*. <https://cloud.oracle.com/iaas>, 2018. [Online; acessado em 23 de Fevereiro de 2018]. 4
 - [18] Services, Amazon Web: *Amazon EC2 Instance Types - Amazon Web Services(AWS)*. <https://aws.amazon.com/ec2/instance-types/>, 2017. [Online; acessado em 21 de Novembro de 2017]. 4
 - [19] Plataforma, Google Cloud: *Google Compute Engine Pricing / Compute Engine Documentation / Google Cloud Plataforma*. <https://cloud.google.com/compute/pricing>, 2017. [Online; acessado em 21 de Novembro de 2017]. 4

- [20] Google: *Google Docs - create and edit documents online, for free*. <https://www.google.com/docs/about/>, 2018. [Online; acessado em 6 de Fevereiro de 2018]. 5
- [21] Celesti, A., F. Tusa, M. Villari e A. Puliafito: *How to enhance cloud architectures to enable cross-federation*. Em *2010 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing*, páginas 337–345, July 2010. 5
- [22] Chen, H., B. An, D. Niyato, Y. C. Soh e C. Miao: *Workload factoring and resource sharing via joint vertical and horizontal cloud federation networks*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(3):557–570, March 2017, ISSN 0733-8716. 5, 6
- [23] Calheiros, Rodrigo N., Adel Nadjaran Toosi, Christian Vecchiola e Rajkumar Buyya: *A coordinator for scaling elastic applications across multiple clouds*. *Future Gener. Comput. Syst.*, 28(8):1350–1362, outubro 2012, ISSN 0167-739X. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2012.03.010>. 6
- [24] Garg, Saurabh Kumar, Christian Vecchiola e Rajkumar Buyya: *Mandi: a market exchange for trading utility and cloud computing services*. *The Journal of Supercomputing*, 64(3):1153–1174, Jun 2013, ISSN 1573-0484. <https://doi.org/10.1007/s11227-011-0568-6>. 6
- [25] Venugopal, S., X. Chu e R. Buyya: *A negotiation mechanism for advance resource reservations using the alternate offers protocol*. Em *2008 16th International Workshop on Quality of Service*, páginas 40–49, June 2008. 6
- [26] Toosi, A. N., R. N. Calheiros, R. K. Thulasiram e R. Buyya: *Resource provisioning policies to increase iaas provider's profit in a federated cloud environment*. Em *2011 IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications*, páginas 279–287, Sept 2011. 6
- [27] Margheri, A., M. S. Ferdous, M. Yang e V. Sassone: *A distributed infrastructure for democratic cloud federations*. Em *2017 IEEE 10th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*, páginas 688–691, June 2017. 6
- [28] Alansari, S., F. Paci e V. Sassone: *A distributed access control system for cloud federations*. Em *2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, páginas 2131–2136, June 2017. 6
- [29] Gallico, D., M. Biancani, C. Blanchet, M. Bedri, J. F. Gibrat, J. I. A. Baranda, D. Hacker e M. Kourkouli: *Cyclone: A multi-cloud federation platform for complex bioinformatics and energy applications (short paper)*. Em *2016 5th IEEE International Conference on Cloud Networking (Cloudnet)*, páginas 146–149, Oct 2016. 7
- [30] OpenNaaS: *Opennaas*. <http://opennaas.org/>, 2018. Online, acessado em 2 de Maio de 2018. 7
- [31] Foundation, OpenStack: *Open source software for creating private and public clouds*. <https://www.openstack.org/>, 2018. Online, acessado em 2 de Maio de 2018. 7

- [32] Slawik, M.: *The trusted cloud transfer protocol*. Em *2013 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing Technology and Science*, volume 2, páginas 203–208, Dec 2013. 7
- [33] Jrad, Foued, Jie Tao e Achim Streit: *A broker-based framework for multi-cloud workflows*. Em *Proceedings of the 2013 International Workshop on Multi-cloud Applications and Federated Clouds*, MultiCloud '13, páginas 61–68, New York, NY, USA, 2013. ACM, ISBN 978-1-4503-2050-4. <http://doi.acm.org/10.1145/2462326.2462339>. 7
- [34] Mashayekhy, L., M. M. Nejad e D. Grosu: *Cloud federations in the sky: Formation game and mechanism*. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 3(1):14–27, Jan 2015, ISSN 2168-7161. 7
- [35] A. Marosi, G. Kecskemeti, A. Kertesz P. Kacsuk: *Fcm: an architecture for integrating iaas cloud systems*. The Second International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization, páginas 7–12, 2011. http://www.intercloudtestbed.org/uploads/2/1/3/9/21396364/fcm_-_an_architecture_for_integrating_iaas_cloud_systems.pdf. 7
- [36] Zant, B. El e M. Gagnaire: *New pricing policies for federated cloud*. Em *2014 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, páginas 1–6, March 2014. 7
- [37] Vergara, Guilherme Fay: *Arquitetura de um controlador de elasticidade para nuvens federadas*. 2017. 8
- [38] Project, The Linux Information: *Vendor lock-in definition by the linux information project (linfo)*. http://www.linfo.org/vendor_lockin.html, 2018. Online, acessado em 3 de Maio de 2018. 8
- [39] Foundation, The Apache Software: *Apache Zookeeper - Home*. <https://zookeeper.apache.org/>, 2017. [Online; acessado em 24 de Novembro de 2017]. 8, 9, 20
- [40] Lin, Kwei Jay e J. D. Gannon: *Atomic remote procedure call*. *IEEE Transactions on Software Engineering*, SE-11(10):1126–1135, Oct 1985, ISSN 0098-5589. 8
- [41] Foundation, The Apache Software: *Welcome to Apache Avro!* <https://avro.apache.org/>, 2017. [Online; acessado em 24 de Novembro de 2017]. 8, 9
- [42] Azevedo, Diego Rodrigues; Freitas Júnior, Tarcúcio Batista de: *Biocirrus : uma nova política de armazenamento para a plataforma bionimbuz de nuvem federada*. <http://bdm.unb.br/handle/10483/13199>, 2015. Online, acessado em 28 de Março de 2018. 9
- [43] Ramos, Vinícius de Almeida: *Um sistema gerenciador de workflows científicos para a plataforma de nuvens federadas bionimbuz*. <http://bdm.unb.br/handle/10483/13145>, 2016. Online, acessado em 28 de Março de 2018. 9

- [44] Santos, Lucas Facundo Neiva: *Novo serviço de armazenamento na plataforma de nuvem federada bionimbuz*. <http://bdm.unb.br/handle/10483/16668>, 2016. Online, acessado em 28 de Março de 2018. 9
- [45] Foundation, The Apache Software: *Welcome to Apache Software Foundation!* <https://apache.org/>, 2017. [Online; acessado em 15 de Dezembro de 2017]. 9
- [46] Dorigo, Marco e Christian Blum: *Ant colony optimization theory: A survey*. Theoretical Computer Science, 344(2):243 – 278, 2005, ISSN 0304-3975. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304397505003798>. 13
- [47] Harvey, William D. e Matthew L. Ginsberg: *Limited discrepancy search*. Em *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 1*, IJCAI'95, páginas 607–613, San Francisco, CA, USA, 1995. Morgan Kaufmann Publishers Inc., ISBN 1-55860-363-8, 978-1-558-60363-9. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1625855.1625935>. 13
- [48] Ullman, J.D.: *Np-complete scheduling problems*. Journal of Computer and System Sciences, 10(3):384 – 393, 1975, ISSN 0022-0000. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022000075800080>. 14
- [49] Tanenbaum, Andrew Stuart: *Modern Operating Systems*. Pearson Prentice Hall, 2009. 14
- [50] AMD: *Ryzen™ Threadripper™ Processors*. <http://www.amd.com/en/products/ryzen-threadripper>, 2017. [Online; acessado em 21 de Novembro de 2017]. 15
- [51] Dimitrov, Martin, Mike Mantor e Huiyang Zhou: *Understanding software approaches for gpgpu reliability*. Em *Proceedings of 2Nd Workshop on General Purpose Processing on Graphics Processing Units*, GPGPU-2, páginas 94–104, New York, NY, USA, 2009. ACM, ISBN 978-1-60558-517-8. <http://doi.acm.org/10.1145/1513895.1513907>. 16
- [52] Yang, Yi, Ping Xiang, Jingfei Kong e Huiyang Zhou: *A gpgpu compiler for memory optimization and parallelism management*. SIGPLAN Not., 45(6):86–97, junho 2010, ISSN 0362-1340. <http://doi.acm.org/10.1145/1809028.1806606>. 16
- [53] Gouasmi, T., W. Louati e A. H. Kacem: *Cost-efficient distributed mapreduce job scheduling across cloud federation*. Em *2017 IEEE International Conference on Services Computing (SCC)*, páginas 289–296, June 2017. 16
- [54] Dean, Jeffrey e Sanjay Ghemawat: *Mapreduce: Simplified data processing on large clusters*. Commun. ACM, 51(1):107–113, janeiro 2008, ISSN 0001-0782. <http://doi.acm.org/10.1145/1327452.1327492>. 16
- [55] Nguyen, P. D. e N. Thoai: *Drbcf: A differentiated ratio-based approach to job scheduling in cloud federation*. Em *2016 10th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS)*, páginas 31–37, July 2016. 16

- [56] Jennings, Brendan e Rolf Stadler: *Resource management in clouds: Survey and research challenges*. J. Netw. Syst. Manage., 23(3):567–619, julho 2015, ISSN 1064-7570. <http://dx.doi.org/10.1007/s10922-014-9307-7>. 16
- [57] Kumrai, T., K. Ota, M. Dong, J. Kishigami e D. K. Sung: *Multiobjective optimization in cloud brokering systems for connected internet of things*. IEEE Internet of Things Journal, 4(2):404–413, April 2017, ISSN 2327-4662. 17
- [58] Mostajeran, E., B. I. Ismail, M. F. Khalid e H. Ong: *A survey on sla-based brokering for inter-cloud computing*. Em *2015 Second International Conference on Computing Technology and Information Management (ICCTIM)*, páginas 25–31, April 2015. 17
- [59] Arpaci-Dusseau, Remzi H.; Arpaci-Dusseau, Andrea C.: *Scheduling: The multi-level feedback queue*. <http://pages.cs.wisc.edu/~remzi/OSTEP/cpu-sched-mlfq.pdf>, 2014. Online, acessado em 20 de Março de 2018. 17
- [60] cn.opensolaris.org: *Comparasion between solaris, linux and freebsd kernels*. https://web.archive.org/web/20080807124435/http://cn.opensolaris.org/files/solaris_linux_bsd_cmp.pdf, 2008. Online, acessado em 20 de Março de 2018. 17
- [61] Oracle: *Runtime (java plataform se 7)*. <https://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/java/lang/Runtime.html>, 2018. Online, acessado em 18 de Abril de 2018. 22
- [62] Oracle: *Process (java plataform se 7)*. <https://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/java/lang/Process.html>, 2018. Online, acessado em 18 de Abril de 2018. 22
- [63] JavaWorld: *Java tip 17: Integrating java with c++*. <https://www.javaworld.com/article/2077513/learn-java/java-tip-17--integrating-java-with-c--.html>, 2018. Online, acessado em 18 de Abril de 2018. 22
- [64] Overflow, Stack: *Wrapping c/c++ inside java - stack overflow*. <https://stackoverflow.com/questions/4664899/wrapping-c-c-inside-java>, 2018. Online, acessado em 18 de Abril de 2018. 22
- [65] Institute, Information Sciences: *Rfc 791 - internet protocol*. <https://tools.ietf.org/html/rfc791>, 2018. Online, acessado em 19 de Abril de 2018. 22
- [66] Society, The Internet: *Rfc 2460 - internet protocol, version 6 (ipv6) specification*. <https://tools.ietf.org/html/rfc2460>, 2018. Online, acessado em 19 de Abril de 2018. 22
- [67] Institute, Information Sciences: *Rfc 793 - transmission control protocol*. <https://tools.ietf.org/html/rfc793>, 2018. Online, acessado em 19 de Abril de 2018. 22
- [68] Postel, J.: *Rfc 768 - user datagram protocol*. <https://tools.ietf.org/html/rfc768>, 2018. Online, acessado em 19 de Abril de 2018. 22

- [69] Group, Network Working: *Rfc 1035 - domain names - implementation and specification*. <https://tools.ietf.org/html/rfc1035>, 2018. Online, acessado em 19 de Abril de 2018. 23
- [70] uk, psychocrypt fireice: *Github - fireice-uk/xmr-stak: Unified all-in-one monero miner*. <https://github.com/fireice-uk/xmr-stak>, 2018. Online, acessado em 19 de Abril de 2018. 23
- [71] Chohan, Usman: *Cryptocurrencies: A brief thematic review*. <https://ssrn.com/abstract=3024330>, 2018. Online, acessado em 19 de Abril de 2018. 23