UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - SEL

FELIPE SANCHES ZANONI

AVALIAÇÃO DE ARQUITETURA PARALELA PARA
SMARTPHONES E *TABLETS* UTILIZANDO GNU/LINUX E
MPI PARA PROCESSAMENTO DE DADOS

SÃO CARLOS - SP
2013

FELIPE SANCHES ZANONI

**AVALIAÇÃO DE ARQUITETURA PARALELA PARA
SMARTPHONES E TABLETS UTILIZANDO GNU/LINUX E
MPI PARA PROCESSAMENTO DE DADOS**

Orientador: *Prof. Dr. Carlos Dias Maciel*

Área de Concentração: Sistemas Dinâmicos

Dissertação submetida à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

**SÃO CARLOS - SP
2013**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Z33a Zanoni, Felipe Sanches
Avaliação de arquitetura paralela para smartphones
e tablets utilizando GNU/Linux e MPI para processamento
de dados / Felipe Sanches Zanoni; orientador Carlos
Dias Maciel. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. cluster. 2. mpi. 3. linux. 4. android. 5.
processamento de dados. 6. smartphone. 7. núvem. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FELIPE SANCHES ZANONI**.

Título da dissertação: "Avaliação de arquitetura paralela para smartphones e tablets utilizando GNU/Linux e MPI para processamento de dados".

Data da defesa: 06/09/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Carlos Dias Maciel (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APPROVED

Prof. Dr. **José Roberto Boffino de Almeida Monteiro**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. Carlos Henrique Costa Ribeiro
(Instituto Tecnológico de Aeronáutica/ITA)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular Denis Vinicius Coury

Resumo

ZANONI, F. S. **Avaliação de arquitetura paralela para *smartphones* e *tablets* utilizando GNU/Linux e MPI para processamento de dados.** 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

A versatilidade e principalmente o poder de processamento dos atuais celulares, mais conhecidos como *smartphones*, e também dos *tablets*, impulsionam a computação de algoritmos complexos nesses dispositivos. Cada celular ou *tablet* pode fazer parte de uma grande rede de computadores com capacidade para processar uma enorme quantidade de dados com um consumo muito baixo de energia se comparado aos computadores convencionais. Um outro grande motivador é que muitos desses celulares possuem o sistema operacional Android, o qual é baseado no núcleo Linux. Isso facilita a migração de projetos já desenvolvidos em computadores para essa nova plataforma móvel, uma vez que é possível executar um sistema operacional completo GNU/Linux nesses dispositivos. O objetivo desse trabalho é avaliar e comparar o desempenho de um *cluster* híbrido formado por dispositivos móveis e computadores, mostrando que é possível desenvolver aplicativos utilizando MPI para processamento paralelo em celulares da mesma forma com que se desenvolve aplicativos para computadores em GNU/Linux. Os resultados mostram qual é a diferença de poder computacional entre os computadores de arquitetura x86 e os dispositivos móveis de tecnologia ARM.

Palavras-chave: computação em cluster, mpi, linux, Android, processamento de dados, smartphone, computação em núvem.

Abstract

ZANONI, F. S. **Evaluation of parallel architecture for smartphones and tablets using GNU/Linux and MPI for data processing.** 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Versatility and mainly processing power of nowadays smartphones and tablets boost complex algorithms computation on these devices. Each cellphone or tablet can be part of a big computer network capable of processing a huge amount of data with low power consumption compared to personal computers. A great motivator also is that these devices have the Android operational system that is based on Linux kernel, what facilitates developed projects to migrate easily to this new platform. The goal of this project is to evaluate and compare a hybrid cluster performance formed by mobile devices and computers, showing that is possible to develop software using MPI for parallel processing over smartphones and tablets the same way as for GNU/Linux computers. The results show what is the processing power difference between x86 architecture computers and mobile devices using ARM architecture.

Keywords: cluster computing, mpi, linux, Android, data processing, smartphone, cloud computing.

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Objetivo	22
1.2	Organização da Dissertação	22
2	Fundamentos Teóricos	25
2.1	Arquitetura x86	25
2.2	Arquitetura ARM	27
2.3	Processadores com múltiplos núcleos	30
2.4	CUDA	31
2.5	OPENCL	33
2.6	GNU/Linux	35
2.7	Ubuntu Linux	36
2.8	Android	37
2.9	Linux no Android	38
2.10	Programação Paralela	38
2.10.1	Lei de Amdahl	40
3	Materiais e Métodos	43
3.1	Dispositivos utilizados	43
3.2	Algoritmos para avaliação	44
3.2.1	Aplicativo para cálculo de DFT em <i>cluster</i>	46
3.2.2	Aplicativo para cálculo do número π em <i>cluster</i>	51
4	Resultados e Discussão	57
4.1	Experimentos com algoritmo de DFT	57
4.2	Experimentos com cálculo do número π	60
5	Conclusão	67
	Referências Bibliográficas	71

Anexos	75
Anexo A Códigos fonte dos aplicativos de testes	77
A.1 Arquivo 'fft_mpi.c'	77
A.2 Arquivo 'data/DataProcessor.h'	83
A.3 Arquivo 'data/DataProcessor.c'	84
A.4 Arquivo 'filesystem/DataReader.h'	85
A.5 Arquivo 'filesystem/DataReader.c'	85
A.6 Arquivo 'filesystem/DataWriter.h'	86
A.7 Arquivo 'filesystem/DataWriter.c'	87
A.8 Arquivo 'filesystem/WindowReader.h'	87
A.9 Arquivo 'filesystem/WindowReader.c'	88
A.10 Arquivo 'pi_mpi.c'	90
Anexo B Manual de Compilação e Uso dos Aplicativos	95

Lista de Figuras

2.1	Processador 8086 fabricado pela Intel em 1978. Fonte: (DAS, 2010).	27
2.2	Um dos processadores Core 2 Quad fabricado pela Intel. O lançamento dessa família de processadores foi em 2006. Fonte: (WASSON, 2008).	27
2.3	Processadores Am386 fabricado pela AMD. O processador já estava pronto para lançamento em 1991, mas por batalha judicial com a Intel alegando que não havia licenciado a arquitetura x86 para a AMD, foi lançado apenas em 1992. Fonte: (LILLY, 2009).	28
2.4	Um dos processadores Phenom II X4 fabricado pela AMD. O lançamento dessa família de processadores foi em 2007. Fonte: (AMD, 2013).	28
2.5	Imagem do silício de um processador AMD Phenom II X6, de 6 núcleos. É possível identificar cada núcleo separadamente. Fonte: (HUMPHRIES, 2010).	31
2.6	Código simples do tipo " <i>Hello World!</i> " exemplificando o processamento paralelo utilizando MPI	33
2.7	Código exemplificando o uso da interface MPI em conjunto com os comandos CUDA.	33
2.8	Ilustração de como o MPI é executado em um <i>cluster</i> com CUDA. O parâmetro <i>-np</i> indica quantos processos serão executados em paralelo, no caso 4 (KRAUS, 2013).	34
2.9	Ilustração mostrando a arquitetura de memória quando utilizado o sistema CUDA sem (esquerda) e com (direita) memória unificada. A memória unificada favorece a implementação MPI transparente para o programador.(KRAUS, 2013).	34
2.10	Do lado esquerdo da imagem, um código tradicional compondo um loop finito do tipo <i>for</i> . Do lado direito esse mesmo código é reescrito paralelizado e adaptado para o padrão OpenCL (ROSENBERG, 2011).	34

2.11	Modelagem da organização da memória em sistemas OpenCL. As memórias privadas, em azul, são apenas acessadas por cada item de trabalho. A memória local, em verde, é compartilhada dentro do mesmo grupo de trabalho. A memória global, em laranja, é acessível por todos os grupos de trabalho. Por último, a memória do <i>Host</i> é apenas acessível pela CPU(ROSENBERG, 2011).	35
2.12	Gráfico da Lei de Amdahl calculando o <i>speedup</i> para vários números diferentes de processadores e porcentagens de código paralelizável. É possível perceber que a limitação teórica de <i>speedup</i> é definida pela porção paralelizável do código.	42
3.1	Dispositivos utilizados na avaliação de desempenho do <i>cluster</i> híbrido . . .	44
3.2	Representação de uma organização de X dispositivos com Y processadores e Z núcleos de processamento. Os dispositivos estão interligados em rede. .	45
3.3	Esboço representando um sinal com duas janelas temporais retangulares e observações para a distância entre as janelas e o tamanho de cada janela. Quando essa janela temporal é feita no espaço discreto, esse valores de distância são medidos em amostras e não mais no tempo.	46
3.4	Diagrama de sequência das trocas de mensagens entre os nós do <i>cluster</i> . O nó mestre é responsável por distribuir o trabalho entre os outros nós do <i>cluster</i> . Com essa arquitetura é possível adicionar N nós para executar a tarefa em conjunto sem alteração no algoritmo.	48
3.5	Trecho de código em linguagem C mostrando o envio da mensagem de fim de processamento de um nó escravo por interface MPI.	48
3.6	Sequência de uso dos processadores do experimento 1. O processo servidor é executado no dispositivo Galaxy Note II. O dispositivo Galaxy S II é o responsável por complementar o processamento do <i>cluster</i> . Para cada configuração (de 1 a 6) são repetidas 10 medições.	49
3.7	Sequência de uso dos processadores do experimento 2. O processo servidor é executado no dispositivo Galaxy S II. O dispositivo Galaxy Note II é o responsável por complementar o processamento do <i>cluster</i> . Para cada configuração (de 1 a 6) são repetidas 10 medições.	50
3.8	Sequência de uso dos processadores do experimento 3. O processo servidor é executado no dispositivo HP Pavilion e apenas ele faz parte do <i>cluster</i> . Para cada configuração (de 1 a 4) são repetidas 10 medições.	50
3.9	Espectrograma do sinal de som utilizado na avaliação.	51
3.10	Sequência de uso dos processadores do experimento 4. O processo servidor é executado no dispositivo HP Pavilion e os dispositivos Galaxy Note II e Galaxy S II complementam o <i>cluster</i> . Para cada configuração (de 1 a 10) são repetidas 10 medições.	51

- 3.11 Exemplo de integração numérica pelo método dos retângulos. As áreas dos infinitos retângulos são somadas para resultar no total da área do gráfico. Quanto maior o número de retângulos, mais próximo do valor exato é o resultado. 53

Lista de Tabelas

2.1	Histórico de ano de lançamento dos processadores Intel desde o primeiro processador 8086 até a família Core-2 Quad (DAS, 2010).	26
2.2	Histórico de ano de lançamento dos processadores AMD desde o primeiro processador Am386 até a família Phenom II de 6 núcleos.	28
2.3	Lançamentos e tecnologias dos processadores ARM desde a primeira versão de 1985 até a versão 7 de 2005.	30
3.1	Especificação dos dispositivos utilizados nos experimentos	44
4.1	Dez medições de tempo de execução do experimento 1 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 6 processos concorrentes.	59
4.2	Dez medições de tempo de execução do experimento 2 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 6 processos concorrentes.	59
4.3	Dez medições de tempo de execução do experimento 3 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 4 processos concorrentes.	61
4.4	Dez medições de tempo de execução do experimento 4 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 5 processos concorrentes.	61
4.5	Dez medições de tempo de execução do experimento 4 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 6 a 10 processos concorrentes.	62
4.6	Dez medições de tempo de execução do experimento 5 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 6 processos concorrentes.	62
4.7	Dez medições de tempo de execução do experimento 6 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 6 processos concorrentes.	63

4.8	Dez medições de tempo de execução do experimento 7 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 4 processos concorrentes.	63
4.9	Dez medições de tempo de execução do experimento 8 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 5 processos concorrentes.	65
4.10	Dez medições de tempo de execução do experimento 8 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 6 a 10 processos concorrentes.	65

Lista de Siglas

AMD	<i>Advanced Micro Devices</i>
ARM	<i>Acron RISC Machine</i>
CGA	<i>Color Graphics Adapter</i>
CMP	<i>Chip Multiprocessor</i>
CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
JVM	<i>Java Virtual Machine</i>
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
PC	<i>Personal Computer</i>

Introdução

Alta capacidade de processamento sempre foi necessária em computação científica, engenharia, simulações e outras áreas. Normalmente apenas um computador somente, mesmo sendo este um super computador, não supre essa demanda. O poder de processamento pode ser um fator limitante para alguns algoritmos mais complexos ou por uma grande quantidade de dados, levando até mesmo anos para serem executados (FOSTER et al., 2008).

Uma das soluções é a computação concorrente. Há computadores com mais de um processador, usando memória compartilhada, que possibilitam a computação multi tarefa real, executando dois processos diferentes ao mesmo tempo, e não a multi tarefa simulada, em que é feito o escalonamento de tarefas no mesmo processador para aparentar que os processos são executados simultaneamente. Há também aglomerados de computadores, chamados de *clusters*, que são computadores interligados em rede capazes de trocar informações entre si por interfaces de programação como o MPI, do inglês *Message Passing Interface*, para, organizadamente, executar tarefas de forma paralela em sistemas que não compartilham memória entre os processos (LIN et al., 2006).

Com o avanço da tecnologia, as fabricantes de processadores como Intel e AMD chegaram em um limite da frequência de *clock* que permite a tecnologia eletrônica atual.

Com esse limite o caminho encontrado foi desenvolver processadores de múltiplos núcleos, possibilitando a execução de tarefas concorrentes nos computadores pessoais a um custo relativamente baixo. É possível criar *cluster* de computadores que possuem vários processadores e que, por sua vez, podem possuir vários núcleos, garantindo um grande poder de processamento para aplicações especialmente desenvolvidas (CHAI; GAO; PANDA, 2007).

Mesmo assim, essa configuração pode não ter o melhor custo benefício. O mercado de jogos digitais trouxe a demanda por processadores gráficos (GPU) cada vez mais poderosos. Esses processadores podem processar uma grande quantidade de dados em paralelo. Inicialmente desenvolvidos apenas para processamento gráfico, atualmente estão sendo usados para processamento de dados gerais. Isso foi possível com o desenvolvimento das interfaces CUDA e OpenCL. A primeira foi criada pela NVIDIA, fabricante de processadores gráficos, e apenas suas GPUs são suportadas. A segunda é um padrão aberto que pode ser usado para programar CPUs, GPUs ou outros dispositivos compatíveis, de diversos fabricantes diferentes. Há diversos laboratórios que possuem *cluster* de GPUs com interface CUDA para processamento de grandes quantidades de dados ou algoritmos mais complexos (SU et al., 2012).

Outro mercado que se expandiu foi o de dispositivos móveis, que abrange *smartphones* e *tablets*. Esses dispositivos demandam baixo consumo energético, uma vez que operam com baterias, e alto poder de processamento, principalmente para fluidez na experiência de uso e também para executar jogos cada vez mais elaborados visualmente. A arquitetura mais difundida para esses dispositivos é a ARM com os núcleos da série Cortex-A. Assim como no segmento de computadores, os primeiros processadores dessa arquitetura possuíam apenas um núcleo. Atualmente há processadores com até 8 núcleos, fabricado pela Samsung com o nome de Exynos 5 Octa (SAMSUNG, 2013).

O avanço dessa arquitetura foi bastante rápido, devido ao grande sucesso desses dispositivos e à disputa de mercado dos grandes fabricantes. Já é possível comparar o desempenho desses processadores aos de computadores pessoais.

Há vários sistemas operacionais disponíveis para *smartphones*. Entre eles estão iOS, desenvolvido pela Apple, Windows Phone, desenvolvido pela Microsoft, Android, forne-

cido pela Google, entre outros. A vantagem do Android é que, por ser de código aberto, permite que modificações sejam feitas para melhorias ou mesmo para adicionar funções extras. Por ser um sistema que utiliza o kernel Linux como base e pelo alto poder de processamento dos atuais *smartphones*, é possível executar um sistema completo GNU/Linux nesses dispositivos.

Um aplicativo para Android chamado *Complete Linux Installer*, disponível na loja de aplicativos Play, da Google, no endereço https://play.google.com/store/apps/details?id=com.zpwebsites.linuxonandroid&hl=pt_BR, oferece algumas distribuições Linux para instalação. O Ubuntu 12.04 LTS, distribuição muito comum em computadores pessoais, com mais de 20 milhões de pessoas utilizando, segundo seus fornecedores, é uma das distribuições disponíveis (UBUNTU, 2013). O alto poder de processamento desses dispositivos e a possibilidade de se instalar um sistema GNU/Linux completo permite compará-los aos computadores.

O ambiente GNU/Linux possibilita criar um *cluster* de celulares e executar aplicativos com computação concorrente. Esse *cluster* pode ser formado não apenas por dispositivos móveis, mas também por computadores, formando um *cluster* de arquitetura híbrida. A biblioteca OpenMPI disponível para GNU/Linux implementa a interface para programação concorrente MPI. Esta é uma interface para troca de mensagens entre processos para organizar o tratamento dos dados em computação concorrente.

A venda de *smartphones* já supera a venda de celulares convencionais e cresce a cada ano (EXAME.COM, 2013). Utilizar o seu processamento em períodos de ociosidade do usuário e quando estiver conectado à rede elétrica para efetuar o recarregamento da bateria possibilitaria agrupar esses dispositivos em um gigantesco *cluster* para processar grandes quantidades de dados em um período de tempo bastante baixo.

Uma das vantagens dos *smartphones* é a alta eficiência energética e a não necessidade de refrigeração ativa, como ventiladores utilizados em computadores para dissipar o calor produzido pelos processadores, diminuindo ruído e espaço.

Com essa enorme capacidade de processamento nos dispositivos móveis atuais e com a grande necessidade de processamento de dados cada vez mais numerosos e mais complexos, esses dispositivos poderiam contribuir nesse processamento, se cada dispositivo fosse capaz

de executar uma relativamente pequena quantidade de dados.

1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho é propor e avaliar uma arquitetura para processamento de dados, usando dispositivos móveis que utilizam sistema operacional Android como base e com a distribuição Ubuntu Linux 12.04 LTS instalada. A vantagem de se utilizar o sistema operacional GNU/Linux é que a portabilidade de aplicativos já desenvolvidos para computadores é facilitada. O mesmo código criado para computadores x86 pode ser compilado para dispositivos móveis ARM sem qualquer alteração necessária na maioria dos casos. O conhecimento dos programadores também é aproveitado, diminuindo tempo e custo para a migração de plataforma. Também possibilita a fácil implantação de *clusters* híbridos, mesclando diferentes arquiteturas, como celulares, tablets e computadores, já que o mesmo código fonte pode ser utilizado nas diferentes arquiteturas.

Outro fator importante da arquitetura proposta é poder fazer uso de recursos avançados que os celulares oferecem, como serviços de GPS, conectividade 3G, Bluetooth, entre outros, contribuindo para algoritmos mais inteligentes e mais complexos.

Também será comparado o desempenho dos processadores ARM de dispositivos móveis com processadores x86 de computadores para avaliar qual a diferença de processamento entre os diferentes sistemas e se há vantagens ao inserir nós de *smartphones* em um *cluster* formado inicialmente por computadores.

1.2 Organização da Dissertação

Na seção 2 será apresentada toda a teoria estudada para alcançar os objetivos desse trabalho. A história da arquitetura x86 e da arquitetura ARM mostrarão a evolução dos computadores nas últimas décadas e quais as vantagens e desvantagens de cada arquitetura. Na seção 3 serão propostos os experimentos para avaliar o desempenho dos dispositivos móveis em um *cluster*. Também serão apresentadas todas as ferramentas computacionais usadas para desenvolver os algoritmos de avaliação e quais equipamentos foram utilizados nos experimentos. A seção 4 trará todos os resultados obtidos com a

execução dos experimentos propostos. A seção 5 discutirá todos os resultados obtidos, mostrando as vantagens e desvantagens da arquitetura proposta. A conclusão do trabalho e os próximos passos também serão apresentados nesta seção. Por último, na seção 6, todas as referências desse estudo são listadas.

Fundamentos Teóricos

2.1 *Arquitetura x86*

A arquitetura x86 teve início com a fabricante de semicondutores Intel, em 1978, quando foi anunciado o microprocessador 8086. Ele tinha barramento interno e externo de 16 bits. Em 1979 foi lançado o 8088, também com barramento interno de 16 bits, mas com barramento externo de 8 bits apenas. Essa versão era mais barata e possuía maior compatibilidade com os dispositivos na época (DAS, 2010).

Em 1981 a IBM escolheu o 8088 para ser o processador da sua linha de computadores pessoais. Esse fato ajudou a Intel a crescer no mercado e a investir cada vez mais nessa arquitetura. O nome desse computador era IBM 5150 e foi criado por uma equipe de 12 pessoas (DAS, 2010). Possuía um processador 8088, 64KBytes de memória RAM que poderia ser expandida para até 256KBytes, uma unidade de disco flexível usada para inicializar o sistema com uma versão do MS-DOS e um adaptador de vídeo monocromático ou até mesmo CGA, do inglês *Color Graphics Adapter*, que foi o primeiro adaptador de vídeo colorido para computadores, capaz de exibir até 16 cores e uma resolução máxima de 640x200 pontos (DAS, 2010).

O próximo processador da família x86 foi o 80186, mas que não foi utilizado em

computadores pessoais, apesar de ser encontrado em algumas aplicações embarcadas.

Um outro avanço nos computadores foi o lançamento do 80286 que trouxe o conceito de memória virtual e operações de modo protegido. Essas características foram herdadas pelos sucessores da família x86.

Em 1985 foi lançado o 80386 com unidade de processamento de 32 bits. Também era capaz de acessar periféricos em 32 bits. Desde então todos os processadores possuíam unidade de processamento de 32 bits, mas com o lançamento da linha Pentium, o acesso externo era feito com barramento de 64 bits (DAS, 2010).

Um breve histórico dos processadores Intel e suas respectivas datas de lançamento podem ser vistas na tabela 2.1. Como curiosidade pode-se observar a figura 2.1, do processador 8086 de 1978, e compará-la com a figura 2.2, do processador Core 2 Quad de 2006.

Tabela 2.1: Histórico de ano de lançamento dos processadores Intel desde o primeiro processador 8086 até a família Core-2 Quad (DAS, 2010).

<i>Processador Intel x86</i>	<i>Ano de lançamento</i>
8086	1978
8088	1979
80186	1982
80286	1982
80386	1985
80486	1989
Pentium	1993
Pentium Pro	1995
Pentium-2	1997
Pentium-3	1999
Pentium-M	2002
Pentium-4	2004
Pentium-D	2005
Core-2	2006
Core-2 Quad	2007

Outra grande fabricante de processadores, *Advanced Micro Devices* (AMD), fundada em 1969 com sede em *Sunnyvale, California*, introduziu seu primeiro semicondutor em 1970, um contador lógico chamado AM2501. Em 1982 a IBM entrou em acordo com a AMD para que ela fosse uma fornecedora alternativa à Intel de processadores para os PCs IBM. Em 1995 a AMD lançou o processador AMD-K5, primeiro projeto independente,

Figura 2.1: Processador 8086 fabricado pela Intel em 1978. Fonte: (DAS, 2010).

Figura 2.2: Um dos processadores Core 2 Quad fabricado pela Intel. O lançamento dessa família de processadores foi em 2006. Fonte: (WASSON, 2008).

compatível com o *socket* padrão x86 e foi um forte concorrente frente ao Pentium e Pentium Pro da Intel. Em 1997 foi lançado seu sucessor, o AMD-K6. Esse processador ajudou a diminuir os preços dos PCs para abaixo dos mil dólares pela primeira vez, tornando os computadores mais acessíveis ao consumidores. Em 2004 a AMD demonstrou o primeiro processador de arquitetura x86 de dois núcleos e em 2005 lançaria o Athlon 64 X2, processador de 64-bit com dois núcleos para computadores pessoais (AMD, 2013).

Os principais lançamentos de processadores para computadores de mesa fabricados pela AMD está detalhado na Tabela 2.2. A Figura 2.3 mostra o processador AM386 fabricado pela AMD em 1992 e a Figura 2.4 mostra o Phenom II X4, também da AMD, lançado em 2007.

2.2 Arquitetura ARM

O primeiro processador ARM foi desenvolvido pela *Acron Computers Limited* de Cambridge, Inglaterra entre os anos de 1983 e 1985. Estavam à procura de um processador para computador de mesa da próxima geração e descobriram que não existia nenhum

Tabela 2.2: Histórico de ano de lançamento dos processadores AMD desde o primeiro processador Am386 até a família Phenom II de 6 núcleos.

<i>Processador AMD x86</i>	<i>Ano de lançamento</i>
Am386	1991
Am486	1993
AMD-K5	1995
AMD-K6	1997
AMD Athlon	1999
AMD Athlon MP	2001
AMD Athlon 64	2003
AMD Athlon 64 X2	2005
AMD Phenom X4	2007
AMD Phenom II X4	2009
AMD Phenom II X6	2010

Figura 2.3: Processadores Am386 fabricado pela AMD. O processador já estava pronto para lançamento em 1991, mas por batalha judicial com a Intel alegando que não havia licenciado a arquitetura x86 para a AMD, foi lançado apenas em 1992. Fonte: (LILLY, 2009).

Figura 2.4: Um dos processadores Phenom II X4 fabricado pela AMD. O lançamento dessa família de processadores foi em 2007. Fonte: (AMD, 2013).

no mercado que atendesse suas especificações. Primeiro porque esses processadores eram mais lentos que as memórias da época, e segundo, porque as instruções de máquina eram complexas, com algumas levando vários ciclos para serem terminadas, aumentando a latência no atendimento às interrupções (CHATTOPADHYAY, 2013).

Apesar disso, sabiam que desenvolver um processador novo não era uma tarefa trivial. Mesmo empresas com conhecimento em desenvolvimento de processadores levariam anos para desenvolver um novo processador bastante complexo. A solução foi usar o projeto *Berkley RISC 1* que provou que o era possível construir um processador simples, mas capaz de ter desempenho comparável ou melhor que de um excelente processador CISC da época (CHATTOPADHYAY, 2013).

A *Acron* desenvolveu seu primeiro processador de 26-bit chamado *Acron RISC Machine (ARM)* em 1985, baseado no projeto *Berkley*. Ele usava 25000 transistores a menos que o processador 80286 da Intel, porém com desempenho igual ou melhor. Essa arquitetura foi então chamada de ARM versão 1. A versão 2 foi lançada em 1987 com suporte a co-processador. Na versão 3, em 1992, foi introduzido memória cache no próprio *chip* e também possuía endereçamento de 32-bit e Unidade de Gerenciamento de Memória (MMU), além de instruções de multiplicação-adição de 64-bit (CHATTOPADHYAY, 2013).

A *Apple*, em 1990, se interessou pelos processadores e desenvolveu seu PDA *Newton* utilizando essa arquitetura. Desde então a ARM entrou no mercado de dispositivos móveis. A quarta geração dos processadores ARM, lançada em 1996, teve a introdução de um conjunto de instruções de 16-bit, chamada *THUMB*. Essa nova tecnologia é um pouco menos eficiente, mas ocupa cerca de 40% menos espaço no *chip*. Esse processador foi bastante utilizado em dispositivos móveis, como nos *iPods* da *Apple*, inclusive no *iPod* com tocador de vídeo (CHATTOPADHYAY, 2013).

Os últimos processadores ARM possuem várias instruções para processamento de dados multimídia. A Tabela 2.3 resume a história dos processadores ARM desde a versão 1 até a versão 7 de 2005.

Tabela 2.3: Lançamentos e tecnologias dos processadores ARM desde a primeira versão de 1985 até a versão 7 de 2005.

<i>Versão</i>	<i>Ano</i>	<i>Características</i>	<i>Implementação</i>
v1	1985	Primeiro processador RISC comercial (26-bit)	ARM1
v2	1987	Suporte a co-processador	ARM2, ARM3
v3	1992	32-bit, MMU e 64-bit MAC	ARM6, ARM7
v4	1996	THUMB	ARM7TDMI, ARM8, ARM9TDMI, StrongARM
v5	1999	Extensões DSP e <i>Jazelle</i>	ARM10, XScale
v6	2001	SIMD, THUMB-2, TrustZone, Multiprocessing	ARM11, ARM11 MPCore
v7	2005	NEON, VFP	Cortex-R, Cortex-A

2.3 Processadores com múltiplos núcleos

A indústria de microprocessadores chegou a um limite tecnológico no desenvolvimento de processadores de apenas um núcleo cada vez mais velozes. Tornou-se impossível aumentar a frequência do *clock* sem aumentar consideravelmente o consumo energético e a dissipação de calor. Para resolver esse problema as grandes fabricantes de microprocessadores mudaram o paradigma de desenvolvimento. Passaram então a fabricar os *chip* multiprocessados, do inglês *chip multiprocessor*, CMP (OLUKOTUN et al., 2007). A Figura 2.5 mostra o silício de um processador de 6 núcleos.

Processadores do tipo CMP tem um menor esforço de engenharia para cada geração de novos processadores. Em alguns momentos é apenas necessário melhorar um núcleo, replicá-lo um determinado número de vezes e então fazer algumas alterações nas interconexões dos núcleos para diminuir a latência e melhorar a eficiência. Não necessariamente será preciso remodelar toda a lógica de *pipeline* do processador, que é bastante complexa (COMPUTER... ,).

Além disso a interface do processador com a placa mãe tem poucas alterações entre uma geração e outra de processadores, já que externamente os CMP são muito semelhantes. As conexões externas normalmente precisam de melhorias de velocidade de barramento para memória e periféricos. Alteradas maiores são necessárias apenas quando há novos padrões de entrada e saída (KECKLER; OLUKOTUN; HOFSTEE, 2009).

O esforço de engenharia pode ser amortizado já que pode-se criar uma família de processadores com a mesma interface externa, mas com diferentes números de núcleos disponíveis e várias frequências de *clock*, variando o preço e desempenho conforme necessidades do mercado (OLUKOTUN et al., 2007).

Obviamente essa nova arquitetura de processadores fez com que os programadores usassem um novo paradigma de programação. Antes os programas eram escritos para funcionar de forma sequencial, mas para aproveitar todo o poder de processamento dessa nova arquitetura, é necessário fazer uso de *threads*, dividindo as tarefas em vários processos que podem ser executados paralelamente em núcleos diferentes. (KECKLER; OLUKOTUN; HOFSTEE, 2009). Outra possibilidade é utilizar técnicas disponíveis para *cluster* de computadores, como MPI.

Figura 2.5: Imagem do silício de um processador AMD Phenom II X6, de 6 núcleos. É possível identificar cada núcleo separadamente. Fonte: (HUMPHRIES, 2010).

2.4 CUDA

Introduzido em 2006, criado e exclusivo da NVIDIA, CUDA é uma plataforma de computação paralela e modelo de programação que aumenta o desempenho computacional utilizando todo o potencial de unidades gráficas de processamento (GPU). Desde então tem sido usado em milhares de aplicações e é alvo de vários artigos de pesquisas. Há uma base instalada de mais de 300 milhões de GPUs habilitadas para o sistema CUDA

entre *notebooks*, estações de trabalho, *cluster* de computadores e supercomputadores. É utilizado em diversas aplicações, como astronomia, biologia, química, física, finanças, manufatura, entre outras (NVIDIA, 2013).

O sistema CUDA é suportado em diversos sistemas operacionais, incluindo Windows 7, Windows XP, Linux e Mac OS, todos em versão de 32-bit ou 64-bit. O CUDA oferece compatibilidade com OpenACC, um padrão aberto da indústria com diretivas de compilação para códigos escritos em C ou Fortran para gerar códigos para sistemas de multi-CPU e acelerados por GPU. Esse padrão possibilita que o código seja compatível também com sistemas que possuem apenas uma simples CPU, sem ter de reescrevê-lo (NVIDIA, 2013).

Com o CUDA também é possível utilizar o paralelismo oferecido pelo MPI. Pode-se utilizar implementações MPI que não são integradas ao CUDA, mas há outras implementações que já são compatíveis com esse padrão de computação, como as implementações MVAPICH2 1.8 e 1.9b, OpenMPI 1.7, CRAY MPI 5.6.2 e IBM Platform MPI 8.3 (NVIDIA, 2013).

Um exemplo de código para processamento paralelo utilizando MPI pode ser observado no código da Figura 2.6:

Considerando que a implementação MPI não seja integrada ao sistema CUDA de processamento, seria necessário executar um segundo comando, *cudaMemcpy* quando fosse enviar dados entre um nó e outro da rede que possuíssem códigos sendo executados nos processadores gráficos (NVIDIA, 2013).

Utilizar uma implementação MPI integrada ao CUDA traz melhor desempenho e maior compatibilidade do código com *clusters* híbridos que integram computadores que não possuem GPU habilitada para o sistema CUDA. Para isso é necessário que o sistema de endereçamento virtual unificado esteja disponível. Esse sistema foi introduzido na versão CUDA 4.0 e faz com que o computador possa endereçar a memória do sistema e a memória de todas as GPUs conectadas nos barramentos PCI-e como se fosse uma única faixa de endereços, como pode ser observado na figura 2.9.

```

1  #include <mpi.h>
2  #include <stdio.h>
3  #include <string.h>
4
5  int main(int argc, char *argv[])
6  {
7      char message[20];
8      int myrank, tag=99;
9      MPI_Status status;
10
11     /* Initialize the MPI library */
12     MPI_Init(&argc, &argv);
13     /* Determine unique id of the calling process of all processes participating
14        in this MPI program. This id is usually called MPI rank. */
15     MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &myrank);
16
17     if (myrank == 0) {
18         strcpy(message, "Hello, there");
19         /* Send the message "Hello, there" from the process with rank 0 to the
20            process with rank 1. */
21         MPI_Send(message, strlen(message)+1, MPI_CHAR, 1, tag, MPI_COMM_WORLD);
22     } else {
23         /* Receive a message with a maximum length of 20 characters from process
24            with rank 0. */
25         MPI_Recv(message, 20, MPI_CHAR, 0, tag, MPI_COMM_WORLD, &status);
26         printf("received \"%s\n", message);
27     }
28
29     /* Finalize the MPI library to free resources acquired by it. */
30     MPI_Finalize();
31     return 0;
32 }

```

Figura 2.6: Código simples do tipo "Hello World!" exemplificando o processamento paralelo utilizando MPI

```

1  //MPI rank 0
2  cudaMemcpy(s_buf_h, s_buf_d, size, cudaMemcpyDeviceToHost);
3  MPI_Send(s_buf_h, size, MPI_CHAR, 1, 100, MPI_COMM_WORLD);
4
5  //MPI rank 1
6  MPI_Recv(r_buf_h, size, MPI_CHAR, 0, 100, MPI_COMM_WORLD, &status);
7  cudaMemcpy(r_buf_d, r_buf_h, size, cudaMemcpyHostToDevice);

```

Figura 2.7: Código exemplificando o uso da interface MPI em conjunto com os comandos CUDA.

2.5 OPENCL

OpenCL é um padrão aberto, multi plataforma, para programação paralela de processadores modernos encontrados em computadores pessoais, servidores e dispositivos móveis e embarcados. Do inglês *Open Computing Language*, o OpenCL melhora o desempenho de uma grande variedade de aplicativos em diversas áreas do mercado, indo desde os jogos e entretenimento ao *software* científico e médico (KHRONOS, 2013).

Esse padrão é especificado por um grupo de várias grandes empresas, sendo que a NVIDIA lidera e a Apple é quem edita as especificações (ROSENBERG, 2011).

Figura 2.8: Ilustração de como o MPI é executado em um *cluster* com CUDA. O parâmetro *-np* indica quantos processos serão executados em paralelo, no caso 4 (KRAUS, 2013).

Figura 2.9: Ilustração mostrando a arquitetura de memória quando utilizado o sistema CUDA sem (esquerda) e com (direita) memória unificada. A memória unificada favorece a implementação MPI transparente para o programador.(KRAUS, 2013).

O grande diferencial dessa tecnologia é o seu modelo de execução. Define-se um domínio computacional de N dimensões e um código é executado em cada ponto do domínio computacional. A diferença de como o código é escrito para fazer essa transformação de um código tradicional em processadores convencionais para um código em OpenCL pode ser observado na figura 2.10.

<pre>void trad_mul(int n, const float *a, const float *b, float *c) { int i; for (i=0; i<n; i++) c[i] = a[i] * b[i]; }</pre>		<pre>kernel void dp_mul(global const float *a, global const float *b, global float *c) { int id = get_global_id(0); c[id] = a[id] * b[id]; } // execute over "n" work-items</pre>
--	--	---

Figura 2.10: Do lado esquerdo da imagem, um código tradicional compoendo um loop finito do tipo *for*. Do lado direito esse mesmo código é reescrito paralelizado e adaptado para o padrão OpenCL (ROSENBERG, 2011).

O modelo de arquitetura desse padrão de computação é composto por uma CPU, o *Host*, e um ou mais dispositivos de computação. Cada dispositivo de computação é composto por uma ou mais unidades de computação. Cada unidade de computação é dividida em um ou mais elemento de processamento. O *Host* fica encarregado de enviar os trabalhos para os dispositivos de computação (ROSENBERG, 2011).

O gerenciamento de memória deve ser totalmente explícito. Os dados devem ser movidos do *host* para o global, do global para a memória local e então voltar. (ROSENBERG, 2011).

Figura 2.11: Modelagem da organização da memória em sistemas OpenCL. As memórias privadas, em azul, são apenas acessadas por cada item de trabalho. A memória local, em verde, é compartilhada dentro do mesmo grupo de trabalho. A memória global, em laranja, é acessível por todos os grupos de trabalho. Por último, a memória do *Host* é apenas acessível pela CPU (ROSENBERG, 2011).

O OpenCL fornece uma arquitetura com grande poder de processamento, com algumas alterações nos códigos já escritos para poder utilizar o máximo de desempenho do *hardware* disponível. Sua vantagem é que é um padrão aberto e está disponível tanto em GPU NVIDIA quanto AMD, as duas maiores fabricantes de dispositivos gráficos do mercado. (KHRONOS, 2013).

2.6 GNU/Linux

O GNU/Linux é um sistema operacional compatível com Unix e totalmente livre. O Projeto GNU teve início em 1984 e seu objetivo era desenvolver um sistema operacional

livre similar ao Unix. O projeto visava desenvolver todas as ferramentas básicas e até avançadas para compor um sistema operacional completo e funcional totalmente livre (SYSTEM, 2013).

Em 1989 um estudante Finlandês chamado Linux Torvalds iniciou o desenvolvimento de um núcleo operacional de computador o qual hoje é conhecido como Linux. Em 1991 foi lançada a primeira versão final desse núcleo que juntamente com o Projeto GNU formava um sistema operacional totalmente livre. Depois de duas décadas o sistema está bem mais maduro e o núcleo está na versão 3.

As vantagens do GNU/Linux é que é um sistema totalmente aberto e livre para modificações e uso e também é portado para várias arquiteturas computacionais, como x86, x86_64, PowerPC, Arm, MIPS, entre outros.

O GNU/Linux está disponível em distribuições que facilitam sua instalação e manutenção. Dentre as mais famosas estão Debian, Gentoo, Fedora, openSUSE, Ubuntu, entre outros.

2.7 *Ubuntu Linux*

A distribuição Ubuntu Linux é bastante conhecida atualmente. A palavra *Ubuntu* é de origem africana e é uma filosofia dos povos da África que define o relacionamento das pessoas umas com as outras. Uma tentativa de tradução para o português pode significar "sou o que sou pelo que nós somos" (UBUNTU, 2013).

O Linux se consolidou como arquitetura para servidores em 2004. Mas para computadores pessoais ainda estava distante de se tornar popular, principalmente pela dificuldade de instalação e uma interface não muito intuitiva, direcionado para uso de programadores ou usuários mais experientes.

Mark Shuttleworth quis modificar essa imagem que o Linux possuía e reunindo alguns poucos desenvolvedores de uma outra famosa distribuição Linux chamada Debian criou o Ubuntu (UBUNTU, 2013). A ideia principal era criar um sistema bastante amigável com o usuário.

As distribuições Linux anteriores ao Ubuntu normalmente eram divididas em uma versão comercial, paga, principalmente adotadas por empresas, e uma versão grátis, para

os usuários domésticos. A versão grátis não era bem acabada como a versão paga. O Ubuntu também tem as duas versões, mas diferente das demais, o sistema é o mesmo para as duas versões e de alta qualidade. A diferença é que a versão paga possui suporte diferenciado da Canonical, fornecedora de serviços para o sistema Ubuntu Linux.

A primeira versão lançada oficialmente do Ubuntu foi a 4.10, com codinome *Warty Warhog*, em Outubro de 2004 (UBUNTU, 2013). Atualmente está em sua versão 13.04, lançada em 2013 e terá suporte por 9 meses. A versão anterior, 12.04 LTS, será suportada até Abril de 2017 (UBUNTU, 2013).

2.8 Android

O sistema Android é a plataforma móvel mais popular no mundo (GOOGLE, 2013). Desenvolvido pela gigante de software Google, é uma plataforma móvel para *smartphones* e *tablets*. É baseado no núcleo Linux, mas com algumas modificações para o sistema móvel (ANDERSON, 2012).

As aplicações são baseadas na linguagem de programação Java, mas a máquina virtual que fará a execução do binário é uma modificação da Máquina Virtual Java (JVM), chamada de Dalvik. A Dalvik é uma máquina virtual mais integrada ao *hardware* de nova geração com melhor desempenho e possibilita a execução de várias máquinas virtuais paralelas, já que cada aplicação em Android é executada em uma máquina virtual separada, por motivos de segurança e estabilidade do sistema (PEREIRA; SILVA, 2009). É otimizada para trabalhar em processadores de menor frequência de *clock*, pouca memória RAM e sistema operacional sem espaço de *Swap*. A Dalvik executa arquivos de extensão *.DEX* (*Dalvik Executable*). Esses arquivos são classes Java compiladas com um *bytecode* diferente do JVM, pela ferramenta DX, distribuída com o SDK do Android. Essa máquina virtual especial baseia-se no *kernel* do Linux para funcionalidades subjacentes como o gerenciamento em baixo nível de memória RAM (PEREIRA; SILVA, 2009).

Foi escolhido utilizar máquina virtual para aumentar a portabilidade e a compatibilidade dos aplicativos com a grande variedade de dispositivos Android disponíveis no mercado, inclusive de diferentes fabricantes e arquiteturas de processamento.

O *kernel* Linux é utilizado para os serviços centrais do sistema, como gerenciamento de

processos, gerenciamento de memória, pilha de protocolos de rede e *drivers* de dispositivos e periféricos. Por controlar os dispositivos, ele é responsável pelo gerenciamento de energia em baixo nível, principalmente escolhendo a melhor frequência de funcionamento do *clock* da CPU para um melhor rendimento da bateria dos *smartphones*. (PEREIRA; SILVA, 2009)

Há milhares de aplicativos desenvolvidos para Android para as mais diversas áreas de interesse. A distribuição dos aplicativos é feita por uma loja *online* de aplicativos chamada de *Google Play*. Essa loja reúne aplicativos, filmes, livros e música para qualquer dispositivo Android. (GOOGLE, 2013)

2.9 *Linux no Android*

Na *Google Play* há um aplicativo que facilita a instalação do GNU/Linux em um dispositivo Android. Essa aplicação chama-se *Complete Linux Installer*. Desenvolvido pelo projeto Linux On Android (ANDROID, 2012), ele tem por objetivo utilizar o próprio núcleo de processamento (*kernel*) do Android para a execução do sistema GNU/Linux em um *smartphone* ou *tablet*, possibilitando que o GNU/Linux seja executado através do Android, sem a necessidade de reiniciar o dispositivo ou apagar todos os dados do usuário. Todo o sistema operacional GNU é armazenado na memória do dispositivo em um arquivo de imagem, como acontece similarmente às instalações de sistemas operacionais em máquinas virtuais, como o VirtualBox da Oracle (<https://www.virtualbox.org/>). Isso permite independência dos dados e arquivos Android e GNU/Linux, evitando que qualquer problema no ambiente Linux cause danos ao sistema Android.

As distribuições Linux disponíveis para instalação são: Ubuntu, Debian, Backtrack. ArchLinux, openSUSE e Fedora estão em fase de testes e o projeto prevê que mais distribuições estarão disponíveis em breve (ANDROID, 2012).

2.10 *Programação Paralela*

A programação paralela é uma técnica que permite que vários cálculos sejam executados simultaneamente em vários processadores, partindo do pressuposto que os problemas

mais complexos podem ser divididos em problemas mais simples e que podem ser resolvidos de forma concorrente para obter uma solução (ALMASI; GOTTLIEB, 1989).

Os programas de programação paralela são mais difíceis de serem escritos em relação aos serializados. A concorrência entre os processos introduz uma série de potenciais problemas no código, como por exemplo a condição de corrida. Dois processos podem tentar acessar o mesmo recurso simultaneamente e corromper os dados. Comunicação e sincronização entre os diferentes processos são normalmente os maiores obstáculos para um bom desempenho de um programa paralelo (HENNESSY, 1998).

Para avaliar qual o ganho de desempenho entre uma aplicação serializada e outra paralelizada, pode-se calcular o chamado *speedup*. Considerando o tempo total de execução de um programa serial com a melhor solução possível para resolver um dado problema como sendo T_s e o tempo total de um programa paralelo para resolver o mesmo problema sendo T_p , tem-se o *speedup* dado por Sp na equação 2.1.

$$Sp = \frac{T_s}{T_p} \quad (2.1)$$

O valor de Sp determina qual o ganho ou perda entre o processamento serial e o paralelo. Um programa com *speedup* linear deve ter $Sp = p$, sendo p o número de processos, ou seja, dobrando o número de processos, dobra a velocidade. Normalmente $Sp \leq p$, uma vez que se um problema é resolvido em tempo T_s , dividindo essa tarefa entre p processos, ela será realizada em um tempo T_s/p . Mas há alguns casos em que $Sp > p$. Isso pode acontecer quando um trabalho realizado por um algoritmo serial é maior que sua formulação paralela, como é o caso de algoritmos de busca. Pode acontecer também quando algumas características do *hardware* coloca o algoritmo serial em desvantagem, como, por exemplo, o tamanho dos dados ser muito grande para ser colocado totalmente na memória cache. Esses casos são chamados de *speedup* superlineares (KADAM, 2007).

Outro índice para comparar algoritmos serializados e paralelizados é o cálculo da eficiência. Em programas paralelos não se atinge o comportamento ideal, pois cada elemento de processamento não consegue estar sempre 100% do tempo computando o algoritmo. Esse índice mede quanto tempo cada processador está sendo aplicado de forma útil. Ele é dado pela equação 2.2 (KADAM, 2007).

$$Ep = \frac{Sp}{p} = \frac{Ts}{p * Tp} \quad (2.2)$$

Em um programa paralelo ideal, a eficiência é dada por $Ep = 1$ e o *speedup* é dado por $Sp = p$. Na prática a eficiência é dada por $0 \leq Ep \leq 1$ e o *speedup* é dado por $Sp < 1$.

Considerando um algoritmo paralelo não ideal, a diferença de tempo entre o tempo de execução do algoritmo serial (Ts) e o tempo de execução do algoritmo paralelo (Tp) é o tempo de *overhead* do algoritmo (To). Esse cálculo é dado pela equação 2.3.

$$To = p * Tp - Ts \quad (2.3)$$

Dessa forma, a eficiência do algoritmo também pode ser escrita conforme equação 2.4.

$$Ep = \frac{1}{1 + \frac{To}{Ts}} \quad (2.4)$$

A função de *overhead* é proporcional a p , que é o número de processos paralelos. Dado um certo problema, o valor de Ts é sempre constante em repetidas execuções. Aumentando o número de elementos de processamento, o To aumenta. Dessa forma a eficiência do algoritmo paralelo cai. Isso acontece em todos os algoritmos paralelos.

Pela equação 2.3, To é dependente do tamanho do problema Ts , e também do número de elementos de processamento p . Em vários casos To pode aumentar sublinearmente em relação ao Ts . Nesses casos, aumentando o problema e mantendo p constante, aumenta-se a eficiência. Para manter a eficiência constante, pode-se simultaneamente aumentar o problema e o número de elementos de processamento. Esses sistemas são chamados de sistemas paralelos escalonáveis.

2.10.1 Lei de Amdahl

Em 1967, na *AFIPS Spring Joint Computer Conference*, o arquiteto de computação Gene Amdahl apresentou sua formulação da lei que leva seu nome; lei de Amdahl. Essa lei descreve como encontrar a máxima melhoria esperada de um sistema quando apenas parte desse sistema é otimizado. Geralmente essa lei é utilizada em computação paralela para calcular o máximo *speedup* teórico usando múltiplos processos (KADAM, 2007).

Dado $p \in \mathbb{N}$ o número de processos paralelos, $B \in [1..0]$ sendo a fração do algoritmo que é estritamente serial, então o tempo $T(p)$ que um algoritmo leva para ser executado completamente em p threads de execução é dado pela equação 2.5:

$$T(p) = T(1) \left(B + \frac{(1-B)}{p} \right) \quad (2.5)$$

Sendo assim, a equação de *speedup* 2.1 pode ser rescrita na forma dada pela equação 2.6.

$$S(p) = \frac{T(1)}{T(p)} = \frac{T(1)}{T(1) \left(B + \frac{(1-B)}{p} \right)} = \frac{1}{B + \frac{(1-B)}{p}} \quad (2.6)$$

Pelo uso da lei de Amdahl é possível determinar se um dado algoritmo é um forte candidato à paralelização.

Tome como exemplo um determinado algoritmo em que 73% pode ser paralelizado, ou seja, $B = 0,27$. Considerando dividir o processamento em 4 processadores ($p = 4$) e substituindo os valores na equação 2.6, obtem-se a equação 2.7.

$$S(4) = \frac{1}{0,27 + \frac{(1-0,27)}{4}} \quad (2.7)$$

Calculando a equação 2.7, chega-se ao valor de $S(4) \approx 2,2099$, o que equivale a dizer que o algoritmo exemplificado, usando 4 processadores, teria uma melhoria de desempenho teórica de 220,99%. Se $p \rightarrow \infty$, então $S(4) \approx 3,7037$, ou 370,37% em relação ao algoritmo serial. Essa lei mostra que o ganho de desempenho em paralelizar o algoritmo vai ser limitado pela porção de código que pode ser paralelizada. O gráfico 2.12 mostra qual o *speedup* para diferentes números de processadores e diferentes porcentagens de paralelização do algoritmo. Percebe-se que a 95% de paralelização de código, a limitação de 20x de *speedup* é alcançada com aproximadamente 4 mil processadores. E quando apenas 50% do código for paralelizável, a limitação será de 2x já com 30 processadores aproximadamente.

Figura 2.12: Gráfico da Lei de Amdahl calculando o *speedup* para vários números diferentes de processadores e porcentagens de código paralelizável. É possível perceber que a limitação teórica de *speedup* é definida pela porção paralelizável do código.

Materiais e Métodos

3.1 *Dispositivos utilizados*

Para a avaliação de desempenho foram utilizados dois *smartphones* além de um computador para fins comparativos de resultado. Ambos os celulares são da marca Samsung, sendo um deles o modelo Galaxy S II (GT-I9100) que possui *chipset Exynos 4 Dual*, fabricado pela própria Samsung e que embarca dois núcleos de processamento de arquitetura ARM Cortex-A9, com frequência de clock de 1.2GHz e 1GByte de memória RAM.

O segundo é um Galaxy Note II, o qual utiliza o *chipset Exynos 4 Quad*, com quatro núcleos de processamento com arquitetura ARM Cortex-A9, com frequência de clock de 1.8GHz e 2GBytes de memória RAM.

O computador utilizado no comparativo é equipado com processador AMD Phenom II X4 830, com frequência de clock de 2.8GHz e 4GBytes de memória RAM.

Os três equipamentos estão utilizando a distribuição Linux Ubuntu 12.04 LTS como sistema operacional. A diferença entre os dispositivos móveis e o computador é que os celulares estão com o sistema Android como base, o que pode reduzir os recursos disponíveis para o Linux, como memória e processador. Mas para fins da análise isso não terá impacto algum, visto que essas são as condições normais de operação dos *smartphones*.

Tabela 3.1: Especificação dos dispositivos utilizados nos experimentos

Dispositivo	Arquitetura	Processador	Núcleos	Frequência (GHz)	Memória (Gbytes)
Galaxy S II	ARM	Cortex-A9	2	1.2	1
Galaxy Note II	ARM	Cortex-A9	4	1.8	2
HP Pavilion	x86_64	Phenom II X4 830	4	2.8	4

Os dispositivos móveis foram ligados ao computador por meio de cabos USB e foi emulada uma rede ethernet por esse cabo para diminuir a latência na transmissão dos dados. Portanto a interferência da rede sem fio é descartada nesses experimentos.

(a) *Smartphone* Samsung Galaxy S II. Possui processador ARM Cortex-A9 de dois núcleos com frequência de *clock* de 1.2GHz

(b) *Smartphone* Samsung Galaxy Note II. Possui processador ARM Cortex-A9 de 4 núcleos com frequência de *clock* de 1.8 GHz

(c) Computador HP Pavilion. Possui processador AMD Phenom II X4 830 de 4 núcleos com frequência de *clock* de 2.8 GHz

Figura 3.1: Dispositivos utilizados na avaliação de desempenho do *cluster* híbrido

3.2 Algoritmos para avaliação

Para avaliar o desempenho desse *cluster* híbrido foram escritos dois códigos em linguagem C com computação concorrente. Esse processamento paralelo funciona tanto

internamente ao processador para troca de informação entre os processos sendo executados em cada núcleo, como também em rede, entre os dispositivos e seus processadores com seus múltiplos núcleos. Sendo assim, os códigos desenvolvidos podem ser executados em um processador de N núcleos ou em um *cluster* de X dispositivos com Y processadores e Z núcleos de forma transparente.

Figura 3.2: Representação de uma organização de X dispositivos com Y processadores e Z núcleos de processamento. Os dispositivos estão interligados em rede.

Para viabilizar a programação concorrente foi utilizada a biblioteca *OpenMPI*, a qual implementa o padrão MPI e é capaz de suportar *cluster* híbridos, ou seja, que possuem dispositivos de diferentes arquiteturas executando o mesmo programa, que é o caso do *cluster* de avaliação (OPENMPI, 2013). Do inglês *Message Passing Interface*, MPI é um padrão para troca de mensagens entre processos em programação paralela baseado no Fórum MPI, formado por 40 organizações participantes, incluindo pesquisadores, desenvolvedores de software, usuários e fornecedores. O objetivo do MPI é estabelecer uma padronização para troca de mensagens entre aplicações que seja portátil, eficiente e flexível (OPENMPI, 2013). Ele não é por si só uma biblioteca, mas sim uma especificação de como codificar aplicações que sejam compatíveis com implementações desse padrão. Seu início deu-se entre 1992 e 1994, com o esforço de inúmeros grupos de colaboradores que na década de 1980 e começo de 1990 perceberam que era necessário estabelecer um padrão em troca de mensagens em computação paralela para melhorar desempenho, portabilidade, custo financeiro e funcionalidades. Apesar de já estar disponível a versão MPI-3.0 do padrão MPI, a versão utilizada nesse projeto é a MPI-2.0, pois é a versão disponível no Ubuntu Linux 12.04 para todos os dispositivos e já atende aos requisitos da avaliação.

3.2.1 Aplicativo para cálculo de DFT em cluster

O primeiro código desenvolvido faz o cálculo da Transformada Discreta de Fourier (DFT) de um sinal de áudio. O algoritmo para cálculo de DFT utilizado foi da biblioteca FFTW (*Fastest Fourier Transform in the West*) que é otimizada para várias arquiteturas de processadores, incluindo a x86 de 32 e 64 bits e também a ARM, oferecendo um desempenho semelhante em qualquer arquitetura escolhida (FFTW, 2013). O FFTW é uma biblioteca livre para linguagem de programação C para o cálculo de da DFT em uma ou mais dimensões, de tamanho arbitrário, e com números reais ou complexos. Ela também contempla as transformadas seno e cosseno (DCT e DST). Pela sua facilidade de uso, alto desempenho e portabilidade para diferentes arquiteturas, foi escolhida para os testes realizados neste projeto (FFTW, 2013).

O código de avaliação consiste em ler um arquivo de áudio digital, no formato WAV, com um canal apenas e processar a sua Transformada Discreta de Fourier usando janelas retangulares. É possível determinar qual a distância em amostras entre uma janela e outra no sinal de entrada. A Figura 3.3 mostra um esboço de como o sinal é recortado em janelas amostrais e quais as referências para mostrar a distância entre janelas em amostras e também o tamanho das janelas. Com o sinal quebrado em janelas amostrais, o processamento é dividido entre os núcleos e nós do *cluster*. O nó mestre, ou servidor, é responsável por distribuir as janelas para cada processador, ou nó escravo, que está aguardando processamento. O nó mestre também processa dados enquanto faz uma varredura periódica para identificar qual processador está livre para receber mais dados.

Figura 3.3: Esboço representando um sinal com duas janelas temporais retangulares e observações para a distância entre as janelas e o tamanho de cada janela. Quando essa janela temporal é feita no espaço discreto, esse valores de distância são medidos em amostras e não mais no tempo.

Para a avaliação do desempenho é calculado o tempo total de processamento dos dados, desde o início da distribuição das janelas, até que o último nó do *cluster* termine os cálculos. Os sincronismos para iniciar o processamento e também para finalizá-lo são feitos pela função `MPI_Barrier()`, que faz com que o código só continue a execução quando todos os processos do *cluster* atingirem essa mesma parte do código. O diagrama de sequência da comunicação entre os nós do *cluster* pode ser observado na Figura 3.4.

Para que os nós escravos façam o processamento dos dados é necessário que cada nó envie para o nó servidor uma mensagem com o texto "ready", indicando que o processamento dos dados previamente selecionados já terminou e que está pronto para o processamento de um novo conjunto de dados. Para enviar mensagens bloqueantes a função `MPI_Send()` é utilizada pelo nó que está enviando e a função `MPI_Recv()` deve ser utilizada pelo nó que receberá a mensagem.

Assim que o nó mestre detecta que um nó escravo enviou uma mensagem desse tipo, ele verifica se há mais janelas disponíveis aguardando processamento e envia um intervalo de janelas para que esse nó inicie um novo lote de execução. Esse intervalo é pré-definido em tempo de compilação do código, mas pode ser facilmente modificado para ser definido em tempo de execução, possibilitando algoritmos adaptativos para melhor escolher o tamanho das janelas dependendo do poder de processamento do nó que faz a requisição.

Dessa forma o processamento é dividido entre todos os nós configurados no *cluster* de forma automática, não havendo necessidade de qualquer configuração extra.

Para o cálculo do tempo de execução há uma função do sistema operacional GNU/Linux chamada *gettimeofday*. Essa função retorna uma estrutura com o tempo atual do sistema em segundos e microssegundos. A resolução do relógio do sistema não é especificada. Armazenando o valor retornado por essa função no início de execução do código e depois feita a diferença com o valor retornado no final da execução é possível computar o tempo total de execução em microssegundos.

O objetivo da avaliação através desse código é computar o tempo total de processamento quando for executado um número arbitrário de processos em paralelo. Somando todos os dispositivos disponíveis há um total de 10 núcleos de processamento. Será criado no máximo 1 processo para cada núcleo. Portanto serão executados no máximo 10

Figura 3.4: Diagrama de sequência das trocas de mensagens entre os nós do *cluster*. O nó mestre é responsável por distribuir o trabalho entre os outros nós do *cluster*. Com essa arquitetura é possível adicionar N nós para executar a tarefa em conjunto sem alteração no algoritmo.

```

1 // Envia uma mensagem para o nó SERVER_NODE com a string "ready"
2 MPI_Send("ready", 6, MPI_CHAR, SERVER_NODE, 5, MPI_COMM_WORLD);

```

Figura 3.5: Trecho de código em linguagem C mostrando o envio da mensagem de fim de processamento de um nó escravo por interface MPI.

processos concorrentes no *cluster*.

Os testes foram divididos em 4 experimentos. O experimento de número 1 testará o *cluster* com os dois dispositivos móveis conectados. O processo servidor será executado no dispositivo Galaxy Note II, de 4 núcleos. Assim que todos os seus núcleos estiverem ocupados, o segundo dispositivo, Galaxy S II, será utilizado para complementar o processamento. A Figura 3.6 mostra a ordem de uso dos processadores para cada configuração. Serão executadas 10 repetições para cada configuração.

Figura 3.6: Sequência de uso dos processadores do experimento 1. O processo servidor é executado no dispositivo Galaxy Note II. O dispositivo Galaxy S II é o responsável por complementar o processamento do *cluster*. Para cada configuração (de 1 a 6) são repetidas 10 medições.

O experimento de número 2 também fará a avaliação utilizando apenas os dois dispositivos móveis conectados. Porém o processo servidor será executado no dispositivo Galaxy S II, de apenas 2 núcleos. O Galaxy Note II será utilizado para os últimos 4 processos concorrentes. A Figura 3.7 mostra como foram utilizados os processadores para cada configuração. Também serão executadas 10 repetições para cada configuração.

O experimento de número 3 utiliza apenas o computador como dispositivo para execução do algoritmo. A Figura 3.8. O objetivo é avaliar qual a capacidade de processamento de um computador em relação aos dispositivos móveis selecionados para o trabalho.

Para os experimentos 1, 2 e 3 foram utilizadas as mesmas configurações para o aplicativo de avaliação: janela retangular de 512 amostras e distância entre janelas de 128 amostras.

O arquivo utilizado foi criado para esse propósito e é chamado *SoundTest-Linear.wav*. Este arquivo contém um sinal de áudio que varre as frequências de 0Hz a 22050Hz. O

Figura 3.7: Sequência de uso dos processadores do experimento 2. O processo servidor é executado no dispositivo Galaxy S II. O dispositivo Galaxy Note II é o responsável por complementar o processamento do *cluster*. Para cada configuração (de 1 a 6) são repetidas 10 medições.

Figura 3.8: Sequência de uso dos processadores do experimento 3. O processo servidor é executado no dispositivo HP Pavilion e apenas ele faz parte do *cluster*. Para cada configuração (de 1 a 4) são repetidas 10 medições.

espectrograma desse sinal de áudio pode ser visto na Figura 3.9.

O experimento 4 fará uso de todos os 3 dispositivos conectados no mesmo *cluster*. O objetivo é avaliar qual a influência dos processadores dos dispositivos móveis em relação aos processadores dos computadores. Para esse experimento os parâmetros foram alterados para que fosse necessário um maior número de janelas para processar o arquivo de áudio, aumentando o tempo de execução e diminuindo o erro das medições. A distância entre as janelas foi definida para 5 amostras. Para esse experimento o computador é o servidor que distribui as tarefas para o *cluster*. A Figura 3.10 mostra a sequência de uso dos processadores nas diferentes configurações do experimento.

Figura 3.9: Espectrograma do sinal de som utilizado na avaliação.

Figura 3.10: Sequência de uso dos processadores do experimento 4. O processo servidor é executado no dispositivo HP Pavilion e os dispositivos Galaxy Note II e Galaxy S II complementam o *cluster*. Para cada configuração (de 1 a 10) são repetidas 10 medições.

3.2.2 Aplicativo para cálculo do número π em cluster

O segundo aplicativo desenvolvido para a avaliação do desempenho da arquitetura proposta calcula o número π utilizando o método da integração. Para isso utilizou-se a

definição de arco tangente. A função de arco tangente pode ser representada pela integral da equação 3.1.

Sabe-se, também, que a função arco tangente de 1 é dada pela equação 3.2.

Definindo $z=1$ na equação 3.1, obtem-se a equação 3.3.

Igualando as equações 3.2 e 3.3, obtem-se a equação 3.4.

Isolando π , obtem-se a equação 3.5 que é a equação utilizada pelo algoritmo dos próximos experimentos.

$$\arctg(z) = \int_0^z \frac{1}{1+x^2} dx \quad (3.1)$$

$$\arctg(1) = \pi/4 \quad (3.2)$$

$$\arctg(1) = \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx \quad (3.3)$$

$$\int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx = \pi/4 \quad (3.4)$$

$$\pi = 4 * \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx \quad (3.5)$$

Para o cálculo dessa integral deve-se recorrer ao cálculo numérico de integrais definidas. Por definição uma integral definida pode ser expressa da seguinte forma:

$$S = \int_a^b f(x) dx = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^N f(x_i) \Delta x \quad (3.6)$$

Onde:

$$\Delta x = \frac{b-a}{N} \quad (3.7)$$

A integral da função $f(x)$ pode ser representada pela soma de pequenos retângulos de base dx e altura $f(x)$, em que o produto deles é a área deste retângulo. Somando todas estas áreas infinitesimais obtem-se a área total abaixo da curva da função. A equação 3.7

define o comprimento dos intervalos infinitesimais que dividirão o intervalo $(b-a)$.

Para calcular a equação 3.5 pode-se expressar o somatório:

$$\pi = 4 * \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx = 4 * \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^N \frac{1}{1+x^2} \Delta x \quad (3.8)$$

Onde:

$$\Delta x = \frac{1-0}{N} \quad (3.9)$$

Quanto maior for N para a divisão do intervalo, mais preciso será o resultado. Mas isso também aumenta o custo computacional. Um exemplo de integração numérica por retângulos pode ser visto na Figura 3.11.

Figura 3.11: Exemplo de integração numérica pelo método dos retângulos. As áreas dos infinitos retângulos são somadas para resultar no total da área do gráfico. Quanto maior o número de retângulos, mais próximo do valor exato é o resultado.

O objetivo da avaliação não é a precisão do cálculo, mas quanto maior for a necessidade de grande processamento, melhor para a análise dos resultados. Por isso deve-se escolher o maior valor possível para N .

O trecho do código em linguagem C que faz o cálculo do número π é dado por:

```
1 // Numero de divisoes do intervalo de integracao.
2 // Quanto maior, melhor a precisao
3 N = 40000000;
4 // Inicializa a soma com zero
5 soma = 0.0;
6 // Calcula o delta de cada intervalo
7 delta = 1.0/N;
8
9 // Define o intervalo
10 inicio_intervalo = 1;
11 fim_intervalo = N;
12
13 // Calcula a funcao f(x) de cada intervalo e incrementa ao total da soma
```

```

14 for (i=inicio_intervalo; i<fim_intervalo; i++)
15 {
16     x = i*delta;
17     f = (1.0/(1.0 + x*x));
18     soma = soma + f;
19 }
20
21 // Multiplicando o somatorio por 4
22 soma = soma * 4;
23
24 // Obtem-se o resultado do calculo com a variavel 'soma'
25 printf("Resultado=%f\n", soma);

```

Uma vez que o algoritmo para o cálculo do número π é iterativo, é possível dividir os intervalos em diferentes processos paralelos em um *cluster* de computadores e diminuir o tempo total de processamento. No aplicativo desenvolvido para esse trabalho foi definido $N=2.000.000.000$ (dois bilhões) que é um número suficientemente grande e é possível de ser representado em uma variável de 32 bits com sinal, que representaria um intervalo máximo de $[0, 2147483647]$ para os experimentos 5, 6 e 7. Para o experimento de número 8 foi definido $N=4.000.000.000$ (quatro bilhões) que pode ser representado por uma variável de 32 bits sem sinal, que pode representar um intervalo de $[0, 4294967295]$.

A divisão dos intervalos é semelhante ao do algoritmo para o cálculo da DFT usando MPI. O nó servidor é responsável por dividir os intervalos para processamento entre os nós do *cluster* de forma transparente. Quando um nó termina o processamento de um determinado intervalo, ele requisita um novo intervalo para o servidor. Se ainda houver um intervalo que não foi computado, esse intervalo é atribuído e enviado para o nó requisitante. Se todos os intervalos já tiverem sido computados, então o servidor envia uma mensagem de fim de processamento para todos os nós e exibe o resultado computado para o usuário.

Para a avaliação do desempenho do *cluster* de dispositivos móveis mais o computador, foi computado o tempo total de processamento entre o início do cálculo até que todos os processos enviem seus resultados para o servidor. Esse tempo foi medido em milissegundos com a função *gettimeofday()* do GNU/Linux.

Foram realizados um total de 4 experimentos, nomeados de 5 a 8 para diferenciar dos experimentos anteriores do outro aplicativo de avaliação proposto. Nos 3 primeiros experimentos todos os experimentos foi atribuído $N=2.000.000.000$ e para o quarto experimento foi atribuído $N=4.000.000.000$, sendo N o número de iterações da integração numérica. Para cada experimento o aplicativo é executado primeiramente apenas com 1

processo, depois com 2 processos paralelos e assim por diante, até que a última execução seja com o número de processos paralelo igual ao número de núcleos de processamento disponíveis no *cluster*. Foram realizados 10 execuções para cada configuração em cada experimento. Ou seja, foram repetidas 10 execuções com 1 processo no experimento 1, outras 10 repetições com 2 processos no experimento 1 novamente, e assim por diante.

O experimento de número 5 testará o *cluster* com apenas os dois dispositivos móveis conectados. O processo servidor será executado no dispositivo Galaxy S 2, de 2 núcleos. Assim que todos os seus núcleos estiverem ocupados, o segundo dispositivo, Galaxy Note II, será utilizado para complementar o processamento. Serão executadas 10 repetições para cada número de processos em paralelo.

O experimento de número 6 também fará a avaliação utilizando os dois dispositivos móveis conectados. Porém o processo servidor será executado no dispositivo Galaxy S II, de apenas 2 núcleos. O Galaxy Note II será utilizado para os últimos 4 processos concorrentes. Também serão executadas 10 repetições para cada número de processos em paralelo.

O experimento de número 7 utiliza apenas o computador como dispositivo para execução do algoritmo. O objetivo é avaliar qual a capacidade de processamento de um computador em relação aos atuais dispositivos móveis.

O experimento 8 fará uso de todos os 3 dispositivos conectados no mesmo *cluster*. O objetivo é avaliar qual a influência dos processadores dos dispositivos móveis em relação aos processadores dos computadores. Para esse experimento os parâmetros foram alterados para que fosse necessário um maior número iterações para calcular o número π , melhorando a precisão do cálculo e também facilitando a diferenciação dos tempos de execução para cada número arbitrário de processos concorrentes.

Resultados e Discussão

4.1 Experimentos com algoritmo de DFT

Os experimentos de 1 a 4 são relacionados ao teste com o algoritmo da transformada de Fourier discreta.

O resultado do experimento 1 está descrito na Tabela 4.1 com as médias e suas respectivas variâncias para cada configuração mensurada. O tempo de execução serial desse algoritmo para esse experimento, com o Galaxy Note II como servidor, (T_s) foi de 63,20s em média. O tempo de cálculo com 4 processos paralelos ($T_p(4)$), os quais são todos executados no mesmo dispositivo, foi de 24,20s em média. Esse resultado representa um *speedup* de 2,61. O *overhead* para cada processo foi de 33,46s, mostrando uma eficiência de 65,39% aproximadamente. Considerando o total de 6 processos paralelos quando acrescentado o dispositivo Galaxy S II, obtem-se um tempo total de execução de $T_p(6) = 17,72$, com um *speedup* de 3,57, um *overhead* de 43,14s e uma eficiência de 59,43% aproximadamente.

O experimento 2 tem seu resultado com detalhes mostrados na Tabela 4.2. Neste caso, os dois primeiros processos são executados no dois núcleos do processador do Galaxy S II. Quando há 3 ou mais processos o Galaxy Note II de quatro núcleos complementa o

processamento. O tempo de execução serial para esse dispositivo foi de $Ts = 97,90s$. Utilizando os dois núcleos com um processo cada, obteve-se $Tp(2) = 75,03s$. Isso representa um *speedup* de 1,30 aproximadamente. O tempo de *overhead* foi de 52,16s, mostrando uma eficiência de 65,24% aproximadamente. Já quando um segundo dispositivo é adicionado, no caso do Galaxy Note II, tem-se um total de tempo de execução $Tp(6) = 18,13s$. Nesse caso o tempo de *overhead* foi de 10,88s apenas, mostrando uma eficiência de 90,00%.

Comparando os experimentos 1 e 2, nos quais a diferença de configuração é apenas de qual dispositivo é o servidor, nota-se que se um dispositivo de maior capacidade de processamento é adicionado ao *cluster*, a eficiência aumenta significativamente.

No experimento 3 todos os processos foram executados no processador do computador, Phenom II X4 de quatro núcleos. Na Tabela 4.3 é possível verificar o tempo de execução de cada rodada com 1 a 4 processos concorrentes e suas respectivas médias e intervalo de confiança de 95%. Nesse experimento, o tempo de execução serializada do algoritmo foi de $Ts = 10,08s$ em média e o tempo de execução em paralelo para 4 processos foi de $Tp = 2,63s$ em média. Isso demonstra um tempo de *overhead* de 0,46s e uma eficiência de 95,64%.

As tabelas 4.4 e 4.5 mostram em detalhes o tempo de processamento de cada rodada do experimento 4 com 1 a 10 processos em paralelo. Os quatro primeiros processos são executados no processador Phenom II X4, os processos cinco e seis são executados no Cortex-A9 de dois núcleos e os processos sete, oito, nove e dez são executados no Cortex-A9 de quatro núcleos. O tempo de execução do processo serial é dado pela média de $Ts = 255,05s$. Considerando o total de 10 processos simultâneos sendo executados em 3 dispositivos do *cluster*, o tempo de *overhead* é aproximadamente de 332,45s. A eficiência nesse experimento foi de $Ep = 43,41\%$.

A eficiência nesse experimento ficou bastante baixa em relação aos outros experimentos. Isso acontece porque o tempo de execução para apenas um processo é dado por um processador bem mais veloz que os processadores dos dispositivos adicionados ao *cluster*. Pode-se notar essa diferença nos experimentos 1 e 2. No experimento 1, no qual o processo único é executado no processador de maior capacidade, a eficiência foi de 59,43% e no experimento 2, no qual o processo único foi executado no processador de menor capacidade,

Tabela 4.1: Dez medições de tempo de execução do experimento 1 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 6 processos concorrentes.

Experimento 1 (Tempo em segundos)						
Execução	Número de processos paralelos					
	1	2	3	4	5	6
1	63,50	36,62	28,09	23,89	20,90	17,58
2	62,80	37,47	27,36	24,04	20,34	17,81
3	62,82	37,21	27,43	23,89	20,22	17,83
4	63,35	36,61	27,06	24,11	20,37	17,49
5	64,74	36,72	27,00	25,23	20,44	17,84
6	63,15	36,38	28,14	24,21	20,74	17,50
7	62,47	36,96	27,78	24,38	19,77	17,89
8	63,31	36,83	26,71	24,11	20,05	17,72
9	63,11	36,54	27,11	24,05	20,79	17,92
10	62,78	37,10	27,71	24,04	20,42	17,67
Média	63,20±0,39	36,84±0,21	27,44±0,30	24,20±0,24	20,40±0,21	17,73±0,10

Tabela 4.2: Dez medições de tempo de execução do experimento 2 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 6 processos concorrentes.

Experimento 2 (Tempo em segundos)						
Execução	Número de processos paralelos					
	1	2	3	4	5	6
1	97,69	76,28	38,89	26,11	20,97	17,57
2	98,20	73,19	39,24	25,78	20,13	17,66
3	98,53	71,22	39,42	26,73	19,97	18,63
4	97,09	74,82	40,17	25,58	20,85	17,87
5	99,30	77,36	38,31	26,70	20,89	18,85
6	95,93	78,71	37,91	26,67	19,89	17,82
7	96,71	78,37	39,51	27,03	20,66	18,38
8	98,75	78,49	38,95	25,94	20,82	18,51
9	98,11	67,59	39,08	26,50	20,76	17,45
10	98,70	74,31	38,07	26,85	20,54	18,55
Média	97,90±0,65	75,03±2,24	38,96±0,43	26,39±0,31	20,55±0,25	18,13±0,31

a eficiência foi de 90,00%, um valor significativamente maior que o primeiro.

4.2 Experimentos com cálculo do número π

Os experimentos de 5 a 8 estão relacionados com o algoritmo para cálculo do número π pelo método da integração.

No experimento 5, com os resultados detalhados na Tabela 4.6, o processador Cortex-A9 de dois núcleos é responsável pelos dois primeiros processos. Os próximos quatro processos são repassados para o Cortex-A9 de quatro núcleos presente no Galaxy Note II. O tempo de execução serial desse experimento é em média 87,49s. O tempo de execução para 2 processos é de $Tp(2) = 46,95s$ de média. Esses valores correspondem a um tempo de *overhead* de $To = 6,41s$ e uma eficiência de 93,17%. Considerando todos os 6 processos paralelos e os 2 dispositivos em *cluster*, o tempo de *overhead* foi de 10,31s e a eficiência é de aproximadamente 89,46%.

No experimento 6 é trocada a ordem dos dispositivos, portanto, os 4 primeiros processos são executados no Galaxy Note II, enquanto que os processos 5 e 6 são executados no Galaxy S II. O resultado pode ser observado na Tabela 4.7. Nesse experimento o tempo de execução serial foi em média 58,70s. Utilizando os 4 processadores do dispositivo servidor, o tempo paralelo foi de $Tp(4) = 15,79s$ na média. Um tempo de *overhead* de 4,46s e eficiência de $Ep(4) = 92,94\%$. Quando são executados 6 processos paralelos, o tempo de execução cai para $Tp(6) = 13,33s$ em média. Dessa forma, o tempo de *overhead* sobe para 21,28s e a eficiência cai para $Ep(6) = 73,39\%$.

Na Tabela 4.8 encontram-se os resultados do experimento 7. Todos os quatro processos são executados no processador Phenom II X4 de quatro núcleos. O tempo de execução serial foi de $Ts = 37,84s$. O tempo total para a execução de 4 processos paralelos nos quatro núcleos disponíveis foi de 9,62s em média. O tempo de *overhead* foi de 0,64s e a eficiência do algoritmo nesse experimento foi de 98,34%.

O experimento de número 8 tem os resultados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10. Os primeiros 4 processos são executados no computador, enquanto que os próximos 4 processos são executados no Galaxy Note II. Por último, os processos 9 e 10 são executados no Galaxy S II. Neste último experimento o tempo total de um único processo fazendo

Tabela 4.3: Dez medições de tempo de execução do experimento 3 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 4 processos concorrentes.

Experimento 3 (Tempo em segundos)				
Execução	Número de processos paralelos			
	1	2	3	4
1	10,16	5,30	3,44	2,81
2	10,12	5,15	3,48	2,58
3	10,20	5,14	3,44	2,67
4	10,27	5,13	3,42	2,62
5	10,05	5,32	3,52	2,62
6	10,04	5,16	3,44	2,62
7	9,98	5,19	3,50	2,60
8	10,00	5,14	3,43	2,60
9	10,03	5,14	3,46	2,60
10	9,91	5,13	3,46	2,62
Média	10,08±0,07	5,18±0,05	3,46±0,02	2,63±0,04

Tabela 4.4: Dez medições de tempo de execução do experimento 4 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 5 processos concorrentes.

Experimento 4 - Parte 1 (Tempo em segundos)					
Execução	Número de processos paralelos				
	1	2	3	4	5
1	260,01	129,98	87,43	67,12	64,75
2	253,53	130,61	88,38	65,58	65,78
3	257,49	129,45	87,16	66,49	64,63
4	257,17	131,02	87,13	67,10	63,72
5	252,88	130,72	86,53	66,10	64,90
6	251,91	130,46	87,54	66,06	64,18
7	254,26	133,49	88,02	65,78	64,63
8	255,32	132,51	87,60	65,27	65,93
9	252,90	133,81	87,09	65,89	64,50
10	255,07	132,92	88,76	67,18	66,20
Média	255,05±1,56	131,50±0,96	87,56±0,41	66,26±0,42	64,92±0,50

Tabela 4.5: Dez medições de tempo de execução do experimento 4 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 6 a 10 processos concorrentes.

Experimento 4 - Parte 2 (Tempo em segundos)					
Execução	Número de processos paralelos				
	6	7	8	9	10
1	63,64	62,01	60,79	60,46	57,22
2	63,35	62,62	59,77	60,05	57,86
3	64,56	62,39	60,36	60,34	58,74
4	64,25	63,25	60,58	59,62	57,51
5	64,37	62,75	60,31	58,68	58,75
6	64,29	62,38	61,39	59,87	59,80
7	63,90	62,73	60,82	59,97	59,54
8	63,93	62,41	61,31	59,70	58,95
9	64,20	61,90	61,12	59,79	59,79
10	64,28	62,10	59,96	59,92	59,33
Média	64,08±0,23	62,45±0,25	60,64±0,34	59,84±0,30	58,75±0,58

Tabela 4.6: Dez medições de tempo de execução do experimento 5 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 6 processos concorrentes.

Experimento 5 (Tempo em segundos)						
Execução	Número de processos paralelos					
	1	2	3	4	5	6
1	87,60	48,34	32,95	24,11	19,70	16,94
2	87,20	47,09	34,20	23,87	19,29	16,19
3	87,08	46,69	31,96	23,88	18,95	16,14
4	87,41	46,81	31,69	23,63	18,84	16,24
5	87,17	46,74	32,04	23,98	18,85	16,11
6	88,11	46,52	31,95	23,82	19,35	16,24
7	87,42	47,37	32,15	23,85	19,14	16,22
8	87,66	46,88	31,84	23,74	19,26	16,28
9	87,52	46,39	32,02	24,10	18,94	16,24
10	87,72	46,67	31,80	24,37	19,22	16,39
Média	87,49±0,19	46,95±0,35	32,26±0,47	23,94±0,13	19,15±0,17	16,30±0,15

Tabela 4.7: Dez medições de tempo de execução do experimento 6 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 6 processos concorrentes.

Experimento 6 (Tempo em segundos)						
Execução	Número de processos paralelos					
	1	2	3	4	5	6
1	58,73	30,97	20,92	16,23	14,95	13,86
2	58,82	29,82	19,99	15,72	14,52	13,44
3	58,60	29,81	19,95	16,35	14,68	13,30
4	58,93	29,88	19,95	15,30	14,39	13,19
5	58,93	29,85	19,96	15,47	14,39	13,06
6	58,55	29,79	20,03	15,72	14,81	13,12
7	58,75	29,77	19,93	15,90	14,45	13,20
8	58,59	29,80	19,94	15,60	14,51	13,30
9	58,53	30,52	19,94	15,37	14,34	13,45
10	58,54	29,77	20,03	16,20	14,45	13,36
Média	58,70±0,10	30,00±0,25	20,06±0,19	15,79±0,23	14,55±0,12	13,33±0,14

Tabela 4.8: Dez medições de tempo de execução do experimento 7 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 4 processos concorrentes.

Experimento 7 (Tempo em segundos)				
Execução	Número de processos paralelos			
	1	2	3	4
1	37,79	19,13	12,71	9,55
2	38,23	19,16	12,70	9,56
3	37,75	19,16	12,85	9,64
4	37,83	19,25	12,80	9,59
5	37,79	19,16	12,85	9,59
6	38,25	19,03	12,79	9,66
7	37,39	18,95	12,78	9,79
8	37,74	19,13	12,77	9,66
9	37,39	19,03	12,74	9,55
10	38,24	19,22	12,78	9,60
Média	37,84±0,20	19,12±0,06	12,77±0,03	9,62±0,05

o cálculo foi de $Ts = 81,01s$ em média. O tempo para 10 processos paralelos sendo executados nos 3 dispositivos do *cluster* foi de $Tp(10) = 14,64s$. O tempo de *overhead* desse experimento foi de 65,39s em média e a eficiência foi de apenas $Ep(10) = 55,33\%$.

Novamente o baixo índice de eficiência já era esperado, mas o experimento 8 foi mais eficiente que o experimento 4 porque o cálculo do número π não depende do acesso ao disco, como no caso do cálculo da FFT de um dado sinal.

Tabela 4.9: Dez medições de tempo de execução do experimento 8 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 1 a 5 processos concorrentes.

Experimento 8 - Parte 1 (Tempo em segundos)					
Execução	Número de processos paralelos				
	1	2	3	4	5
1	80,43	41,44	27,61	20,76	18,94
2	81,84	41,28	27,48	20,64	19,36
3	80,36	41,12	27,45	20,67	19,16
4	80,30	40,91	27,56	20,62	19,15
5	81,17	41,27	27,46	20,70	19,50
6	81,79	41,17	27,37	20,85	19,24
7	81,77	41,18	27,49	20,70	19,46
8	80,32	40,92	27,61	20,70	19,02
9	81,81	41,35	27,56	20,79	18,94
10	80,32	41,09	27,52	20,71	19,28
Média	81,01±0,45	41,17±0,11	27,51±0,05	20,71±0,04	19,21±0,13

Tabela 4.10: Dez medições de tempo de execução do experimento 8 com suas respectivas médias e intervalos de confiança de 95% para processamento com 6 a 10 processos concorrentes.

Experimento 8 - Parte 2 (Tempo em segundos)					
Execução	Número de processos paralelos				
	6	7	8	9	10
1	18,75	17,59	15,65	15,80	13,79
2	18,41	17,04	15,77	14,86	14,24
3	18,42	17,06	16,41	15,87	15,01
4	17,55	16,84	16,54	15,44	15,24
5	17,83	16,83	15,81	15,29	14,72
6	18,13	16,54	16,72	15,36	14,72
7	18,42	17,54	15,51	14,86	14,75
8	18,04	16,73	15,55	14,94	13,77
9	17,64	16,41	15,56	15,11	14,94
10	17,30	16,99	15,78	15,09	15,23
Média	18,05±0,29	16,96±0,24	15,93±0,28	15,26±0,22	14,64±0,33

Conclusão

A arquitetura proposta, formando um *cluster* híbrido de computadores e dispositivos móveis se mostrou factível. Com o mesmo código fonte e com o auxílio da interface MPI foi possível o processamento paralelo com arquiteturas diferentes e mesclando computadores com celulares e *tablets*.

Analisando os resultados obtidos nas avaliações, observa-se que os processadores ARM dos dispositivos móveis ainda são limitados em poder de processamento se comparados aos processadores dos computadores pessoais de arquitetura x86_64, porém mostram que tem influência significativa no processamento de dados paralelo.

As grandes fabricantes mundiais de processadores e dispositivos móveis estão interessadas no mercado de celulares e *tablets*. Com a concorrência acirrada, a tendência é que novos e melhores processadores sejam lançados no mercado, assim como ocorreu com os processadores para computadores na disputa entre Intel e AMD. Já há disponível no mercado processadores ARM de 64 bit, o *chip* A7 da Apple e que equipa o *smartphone* iPhone 5S.

A Intel, grande fabricante de processadores para computadores, principalmente, se interessou no grande mercado que é esse de plataformas móveis e colocou esforços no desenvolvimento de processadores para essa linha. *Atom* é uma plataforma com arquitetura

x86 com baixo consumo de energia projetado para computação móvel. Outra fabricante de processadores gráficos, NVIDIA, também aderiu a esse novo mercado com o desenvolvimento dos *chipsets* Tegra com arquitetura ARM. A Apple, fabricante da linha de celulares iPhone e *tablets* iPad, nos últimos modelos começou a desenvolver seus próprios *chipsets* em arquitetura ARM para seus dispositivos para ter uma maior integração entre hardware e software. O primeiro *chipset* desenvolvido pela Apple foi o A4, equipando iPhone 4 e iPhone 4S, além do iPad de primeira geração. A Samsung expandiu seu desenvolvimento de *chipsets* com arquitetura ARM para atender esse mercado, principalmente equipando seus próprios dispositivos.

Em um futuro próximo espera-se que esses processadores poderão atingir níveis de processamento bastante satisfatórios para processamento de dados e algoritmos complexos, haja vista a concorrência entre os grande fabricantes de processadores.

O fato de o sistema Android ser capaz de executar um sistema GNU/Linux completo em paralelo mostrou que migrar um *cluster* de computadores para um *cluster* de celulares inteligentes e *tablets* é transparente e factível. O código deve apenas ser recompilado para funcionar em uma arquitetura de processador que é utilizada no dispositivo.

A arquitetura proposta pode trazer grandes ganhos em espaço físico, uma vez que os dispositivos móveis são bastante pequenos em tamanho; baixo consumo de energia, por serem plataformas móveis que operam com baterias; e poder de processamento satisfatórios se comparados aos computadores, devido ao grande avanço tecnológico dos processadores para *smartphones* impulsionado pela concorrência das grandes fabricantes no mercado.

Neste trabalho a avaliação de desempenho dos dispositivos móveis foi feita com códigos escritos em linguagem C, que pode ser considerada de baixo nível se comparada com linguagens mais modernas como Perl, Python, Ruby, entre outras. Uma vez que a arquitetura proposta utiliza o sistema GNU/Linux, todos os recursos desse sistema operacional podem ser utilizados, inclusive linguagens de mais alto nível.

Um software interessante disponível na internet é o BOINC. É uma plataforma aberta para a chamada computação voluntária e também a computação em grid. Na computação voluntária as pessoas (voluntários) disponibilizam seus recursos computacionais para o processamento de dados de projetos. A diferença para a computação em grid é que

os dados de processamento de voluntários não são confiáveis, exigindo processamento replicado, além de que na computação em grid o ambiente de processamento é mais controlado. O BOINC está disponível em diversas plataformas, como Windows, Mac, Linux e, recentemente, Android.

Um próximo passo para esse trabalho é utilizar a arquitetura proposta como base para outros trabalhos mais complexos, usando, por exemplo, a biblioteca oferecida pelo projeto IPython (PéREZ; GRANGER, 2007). O IPython oferece uma rica arquitetura para computação interativa, em que o programador pode testar o seu código de forma rápida pelo fato de o código poder ser alterado enquanto é executado. Ele também oferece suporte à programação paralela. Há vários projetos que estão sendo desenvolvidos utilizando essa ferramenta e eles poderiam ser migrados para a arquitetura proposta por este trabalho de forma transparente na grande maioria dos casos.

Referências Bibliográficas

ALMASI, G. S.; GOTTLIEB, A. *Highly Parallel Computing*. Redwood City, CA, USA: Benjamin-Cummings Publishing Co., Inc., 1989. ISBN 0-8053-0177-1.

AMD. *AMD History*. 2013. Disponível em:
<<http://www.amd.com/us/aboutamd/corporate-information/Pages/timeline.aspx>>.

ANDERSON, B. *Android Kernel versus the Linux Kernel*. 2012. Disponível em:
<<http://www.all-things-android.com/content/android-kernel-versus-linux-kernel>>.

ANDROID, L. on. *What is Linux On Android*. 2012. Disponível em:
<<http://linuxonandroid.org/what-is-linuxonandroid/>>.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. *UML : guia do usuário*. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2006. ISBN 8535217843 (broch.).

CHAI, L.; GAO, Q.; PANDA, D. Understanding the impact of multi-core architecture in cluster computing: A case study with intel dual-core system. In: *Cluster Computing and the Grid, 2007. CCGRID 2007. Seventh IEEE International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 471–478.

CHATTOPADHYAY, S. *Embedded System Design*. PHI Learning, 2013. ISBN 9788120347304. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=HVdbKHt0mQC>>.

COMPUTER System Architecture. Prentice-Hall Of India Pvt. Limited. ISBN 9788120335943. Disponível em:
<<http://books.google.com.br/books?id=gnirrHCWUlsC>>.

DAS, L. B. *The X86 Microprocessors: Architecture And Programming (8086 To Pentium)*. Pearson Education, 2010. ISBN 9788131732465. Disponível em:
<<http://books.google.com.br/books?id=zWrZY1OgTPsC>>.

EXAME.COM. *Venda de smartphones supera a de celulares pela primeira vez*. 2013. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/noticias/venda-de-smartphones-supera-a-de-celulares-pela-primeira-vez>>.

FFTW. *Introduction - Fastest Fourier Transform in the West*. 2013. Disponível em:
<<http://www.fftw.org/>>.

FOSTER, I. et al. Cloud computing and grid computing 360-degree compared. In: *Grid Computing Environments Workshop, 2008. GCE '08*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–10.

- GOOGLE. *About Android*. 2013. Disponível em: <<http://www.android.com/about/>>.
- GROPP, W. *MPI: the complete reference. The MPI-2 extensions*. The MIT Press, 2003. (Scientific and Engineering Computation, v. 2). ISBN 9780262571234. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=uK3nr41r8zMC>>.
- HENNESSY, J. *Computer organization and design : the hardware/software interface*. San Francisco, Calif: Morgan Kaufmann Publishers, 1998. ISBN 1558604286.
- HUMPHRIES, M. *AMD updates 6-core Phenom II, TDP now just 95W*. 2010. Disponível em: <<http://www.geek.com/chips/amd-updates-6-core-phenom-ii-tdp-now-just-95w-1267196>>.
- KADAM, S. S. *Performance metrics for parallel systems*. 2007. Disponível em: <<http://www.iacs.res.in/PerformanceMetrics.pdf>>.
- KECKLER, S.; OLUKOTUN, O.; HOFSTEE, H. *Multicore Processors and Systems*. Springer London, Limited, 2009. (Integrated circuits and systems). ISBN 9781441902634. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=aLaRfJq-59sC>>.
- KERNIGHAN, B.; RITCHIE, D. *The C Programming Language*. 2nd. ed. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice Hall Inc., 1988.
- KHRONOS. *The open standard for parallel programming of heterogeneous systems*. 2013. Disponível em: <<http://www.khronos.org/opencl>>.
- KRAUS, J. *An Introduction to CUDA-Aware MPI*. 2013. Disponível em: <<https://developer.nvidia.com/content/introduction-cuda-aware-mpi>>.
- LILLY, P. *A Brief History of CPUs: 31 Awesome Years of x86*. 2009. Disponível em: <<http://www.geek.com/chips/amd-updates-6-core-phenom-ii-tdp-now-just-95w-1267196>>.
- LIN, W. et al. Implementations of grid-based distributed parallel computing. In: *Computer and Computational Sciences, 2006. IMSCCS '06. First International Multi-Symposiums on*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 1, p. 312–317.
- NVIDIA. *CUDA FAQ*. 2013. Disponível em: <<https://developer.nvidia.com/cuda-faq>>.
- OLUKOTUN, K. et al. *Chip Multiprocessor Architecture: Techniques to Improve Throughput and Latency*. Morgan & Claypool Publishers, 2007. (G - Reference, Information and Interdisciplinary Subjects Series). ISBN 9781598291223. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=spZZDwuAgUYC>>.
- OPENMPI. *Frequently Asked Questions - OpenMPI*. 2013. Disponível em: <<http://www.open-mpi.org/faq/>>.
- PEREIRA, L.; SILVA, M. da. *Android para Desenvolvedores*. [S.l.]: BRASPORT, 2009. ISBN 9788574524054.
- PÉREZ, F.; GRANGER, B. E. IPython: a System for Interactive Scientific Computing. *Comput. Sci. Eng.*, v. 9, n. 3, p. 21–29, maio 2007. Disponível em: <<http://ipython.org>>.

ROSENBERG, O. *The open standard for parallel programming of heterogeneous systems*. 2011. Disponível em: <<http://www.khronos.org/assets/uploads/developers/library/overview/opencl-overview.pdf>>.

SAMSUNG. *Samsung Exynos 5 Octa Product Overview*. 2013. Disponível em: <<http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/minisite/Exynos/products5octa.html>>.

SU, C.-L. et al. Overview and comparison of opencl and cuda technology for gpgpu. In: *Circuits and Systems (APCCAS), 2012 IEEE Asia Pacific Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 448–451.

SYSTEM, G. O. *Linux and the GNU System*. 2013. Disponível em: <www.gnu.org/gnu/linux-and-gnu.html>.

TANENBAUM, A. S. *Sistemas operacionais modernos*. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. ISBN 978-85-7605-237-1.

UBUNTU. *Meet Ubuntu*. 2013. Disponível em: <<http://www.ubuntu.com/desktop>>.

WASSON, S. *Intel's Core 2 Quad Q9300 processor*. 2008. Disponível em: <<http://techreport.com/review/14573/intel-core-2-quad-q9300-processor>>.

Anexos

Códigos fonte dos aplicativos de testes

A.1 Arquivo 'fft_mpi.c'

```
1  /*
2   * main.c
3   *
4   * Created on: 24/03/2013
5   * Author: Felipe S. Zanoni
6   */
7
8  #include <stdio.h>
9  #include <stdlib.h>
10 #include <string.h>
11 #include <mpi.h>
12 #include <fftw3.h>
13 #include <sys/time.h>
14 #include <math.h>
15
16 #include "filesystem/WindowReader.h"
17 #include "filesystem/DataReader.h"
18 #include "data/DataProcessor.h"
19 #include "filesystem/DataWriter.h"
20
21 // Comment/Uncomment this line for debugging
22 //#define DEBUG
23
24 // Defines
25 #define SERVER_NODE 0
26 //#define DEBUG
27 #define SERVER_PROCESSING_STEPS 10
28 #define CLIENT_PROCESSING_STEPS 200
29
30 // Macros
31 #define GET_TIME(timeval, time_ret) { gettimeofday(&timeval, NULL);\
32     time_ret = Get_Time(timeval);\
33 }
34
35 #ifndef DEBUG
36 #define DEBUG_PRINT(...) fprintf( stderr, __VA_ARGS__ )
```

```

37 #else
38 #define DEBUG_PRINT(...) do{ } while (0)
39 #endif
40
41 // Functions prototypes
42 void Show_Server_Init_Message(void);
43 void Show_Client_Init_Message(void);
44
45 long int Get_Time(struct timeval timeval);
46 void Get_Time_Diff(long int time_init, long int time_end, int *minutes, int *seconds,
47                  int *milliseconds);
48 void PrintUsage(void);
49
50 /**
51  * @brief Main code.
52  */
53 int main (int argc, char** argv)
54 {
55     int node, arg, init_error, seek, total_nodes;
56     fftw_complex *in_buff, *out_buff;
57     int idx;
58     int window_steps = 0;
59     int windows_processed = 0;
60     int Write_to_disc_flag;
61
62     int res;
63     double *data = NULL;
64     double *complex_output = NULL;
65     char *filename = NULL;
66
67     struct timeval time_value;
68     long int process_time_aux = 0;
69     long int process_start_time;
70     long int process_final_time;
71     long int total_start_time;
72     long int total_final_time;
73     int min, sec, milli;
74     int total_windows_processed;
75
76     // Initialize MPI
77     MPI_Init(&argc, &argv);
78     MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &node);
79     MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &total_nodes);
80     // Wait all processes
81     MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
82
83     GET_TIME(time_value, total_start_time);
84
85     if (argc < 6)
86     {
87         PrintUsage();
88         return -1;
89     }
90
91     Write_to_disc_flag = 0;
92
93     for (arg = 1; arg < argc; arg++)
94     {
95         if (strcmp(argv[arg], "-w") == 0)
96         {
97             if ((arg + 1) < argc)
98             {
99                 arg++;
100                 filename = argv[arg];
101             }
102         }
103         else if (strcmp(argv[arg], "-ws") == 0)
104         {
105             if ((arg + 1) < argc)
106             {
107                 arg++;
108                 window_steps = atoi(argv[arg]);
109             }
110         }
111         else if (strcmp(argv[arg], "-enable_output") == 0)
112         {

```



```

112     Write_to_disc_flag = 1;
113 }
114 }
115
116 init_error = 0;
117
118 // Load process window
119 WindowReader__ClearData();
120 res = WindowReader__ReadWindowFile(filename);
121 switch (res)
122 {
123 case -1:
124     printf("[%d] Processing window file not found. Abort.\n", node);
125     init_error = 1;
126     break;
127
128 case -2:
129     printf("[%d] Wrong format of processing window file. Abort.\n", node);
130     init_error = 1;
131     break;
132
133 case -3:
134     printf("[%d] Insufficient memory. Abort.\n", node);
135     init_error = 1;
136     break;
137
138 default:
139 case 0:
140     printf("[%d] Processing window loaded.\n", node);
141     break;
142 }
143
144 // Load file to process
145 if (DataReader__OpenFile(argv[argc-1]) != 0)
146     init_error = 2;
147
148
149
150 if (init_error == 0)
151 {
152     int window_number, total_windows;
153     int window_size = WindowReader__GetWindowSize();
154     char out_filename[255];
155     double *window_data;
156
157     in_buff = DataProcessor__AllocateBuffer(window_size);
158     sprintf(out_filename, "output_node_%d.dat", node);
159     window_data = (double *) malloc (sizeof(double) * window_size);
160
161     WindowReader__GetWindowData(&window_data);
162
163     total_windows_processed = 0;
164
165     // Server Mode
166     if (node == SERVER_NODE)
167     {
168         Show_Server_Init_Message();
169
170         total_windows = DataReader__GetTotalSize();
171         total_windows /= window_steps;
172
173         printf("Total Windows to process: %d\n", total_windows);
174
175         if (in_buff != NULL)
176         {
177             if (Write_to_disc_flag)
178                 DataWriter__OpenFile(out_filename);
179
180             windows_processed = 0;
181             process_time_aux = 0;
182
183             // Fill the buffer
184             data = (double *) malloc (sizeof(double) * window_size);
185             complex_output = (double *) malloc (sizeof(double) * window_size/2);
186
187

```

```

188 while (windows_processed < total_windows)
189 {
190     MPI_Status status;
191     int ready;
192     char char_buff[6];
193     int int_buff[2];
194
195     DEBUG_PRINT("%.2f%% complete\n",
196                 ((float)windows_processed/(float)total_windows)*100.0);
197
198     for(idx = 1; idx < total_nodes; idx++)
199     {
200         MPI_Iprobe(idx, 5, MPI_COMM_WORLD, &ready, &status);
201         if (ready)
202         {
203             MPI_Recv((char*)char_buff, 6, MPI_CHAR, idx, 5, MPI_COMM_WORLD, &status);
204             if (strcmp(char_buff, "ready") == 0)
205             {
206                 if (windows_processed >= total_windows)
207                 {
208                     int_buff[0] = int_buff[1] = 0;
209                     MPI_Send((int*)int_buff, 2, MPI_INT, idx, 1, MPI_COMM_WORLD);
210                     DEBUG_PRINT("Sending terminate to [%d]\n", idx);
211                 }
212                 else
213                 {
214                     int_buff[0] = windows_processed;
215                     windows_processed += CLIENT_PROCESSING_STEPS;
216                     if (windows_processed > total_windows)
217                     {
218                         windows_processed = total_windows;
219                     }
220                     int_buff[1] = windows_processed;
221                     MPI_Send((int*)int_buff, 2, MPI_INT, idx, 1, MPI_COMM_WORLD);
222                     DEBUG_PRINT("Sending data to [%d] - %d-%d\n", idx, int_buff[0],
223                                 int_buff[1]);
224                 }
225             }
226         }
227
228         int_buff[0] = windows_processed;
229         windows_processed += SERVER_PROCESSING_STEPS;
230         if (windows_processed > total_windows)
231         {
232             windows_processed = total_windows;
233         }
234         int_buff[1] = windows_processed;
235
236         total_windows_processed += int_buff[1] - int_buff[0];
237         for (window_number = int_buff[0]; window_number < int_buff[1]; window_number++)
238         {
239             seek = window_number * window_steps;
240             DataReader__GetDoubleData(&data, seek, window_size);
241
242             for (idx = 0; idx < window_size; idx++)
243             {
244                 in_buff[idx][0] = data[idx] * window_data[idx];
245                 in_buff[idx][1] = 0;
246             }
247
248             // Process the buffer
249             GET_TIME(time_value, process_start_time);
250             DataProcessor__ProcessBuffer();
251             GET_TIME(time_value, process_final_time);
252
253             process_time_aux += process_final_time - process_start_time;
254
255             out_buff = DataProcessor__GetResultBuffer();
256
257             for (idx = 0; idx < window_size/2; idx++)
258             {
259                 complex_output[idx] = sqrt(out_buff[idx][0] * out_buff[idx][0] +
260                                             out_buff[idx][1] * out_buff[idx][1]);
261             }

```

```

261         // Write to disc
262         if (Write_to_disc_flag)
263             DataWriter__AppendData(complex_output, window_size/2, window_number);
264     }
265 }
266 }
267 }
268 }
269
270 DEBUG_PRINT("%d/%d\n", windows_processed, total_windows);
271 printf("100.00 complete!\n");
272 for(idx = 1; idx < total_nodes; idx++)
273 {
274     int int_buff[2];
275     int_buff[0] = int_buff[1] = 0;
276     DEBUG_PRINT("Send terminate to %d node from total %d\n", idx, total_nodes);
277     MPI_Send((int*)int_buff, 2, MPI_INT, idx, 1, MPI_COMM_WORLD);
278 }
279
280 #ifdef DEBUG
281     // Print total time on screen
282     Get_Time_Diff(0, process_time_aux, &min, &sec, &milli);
283     printf("Node %d Only Processing Time: \t%dm%02ds%03d\n", node, min, sec,
284           milli);
285
286     Get_Time_Diff(total_start_time, total_final_time, &min, &sec, &milli);
287     printf("Node %d Total Processing Time:\t%dm%02ds%03d\n", node, min, sec,
288           milli);
289 #endif
290 }
291 else
292 {
293     // Client Node
294     Show_Client_Init_Message();
295
296     if (in_buff != NULL)
297     {
298         int int_buff[2];
299         int Running;
300         MPI_Status status;
301
302         if (Write_to_disc_flag)
303             DataWriter__OpenFile(out_filename);
304
305         // Fill the buffer
306         data = (double *) malloc (sizeof(double) * window_size);
307         complex_output = (double *) malloc (sizeof(double) * window_size/2);
308
309         int_buff[0] = int_buff[1] = 0;
310         Running = 1;
311
312         process_time_aux = 0;
313
314         while(Running)
315         {
316             int new_msg;
317
318             MPI_Iprobe(SERVER_NODE, 1, MPI_COMM_WORLD, &new_msg, &status);
319             if (new_msg == 0)
320             {
321                 // Request new message
322                 DEBUG_PRINT("%d - Sending READY message\n", node);
323                 MPI_Send("ready", 6, MPI_CHAR, SERVER_NODE, 5, MPI_COMM_WORLD);
324                 DEBUG_PRINT("%d - receiving data\n", node);
325                 MPI_Recv((int*)int_buff, 2, MPI_INT, SERVER_NODE, 1, MPI_COMM_WORLD, &status);
326
327                 if ((int_buff[0] == 0) && (int_buff[1] == 0))
328                 {
329                     // End processing
330                     Running = 0;
331                 }
332             }
333             else
334             {

```

```

335 // OK
336 total_windows_processed += int_buff[1] - int_buff[0];
337
338 for (window_number = int_buff[0]; window_number < int_buff[1];
339     window_number++)
340 {
341     seek = window_number * window_steps;
342     DataReader__GetDoubleData(&data, seek, window_size);
343
344     for (idx = 0; idx < window_size; idx++)
345     {
346         in_buff[idx][0] = data[idx];
347         in_buff[idx][1] = 0;
348     }
349
350     // Process the buffer
351     GET_TIME(time_value, process_start_time);
352     DataProcessor__ProcessBuffer();
353     GET_TIME(time_value, process_final_time);
354
355     process_time_aux += process_final_time - process_start_time;
356
357     out_buff = DataProcessor__GetResultBuffer();
358
359     for (idx = 0; idx < window_size/2; idx++)
360     {
361         complex_output[idx] = sqrt(out_buff[idx][0] * out_buff[idx][0] +
362                                   out_buff[idx][1] * out_buff[idx][1]);
363     }
364
365     // Write to disc
366     if (Write_to_disc_flag)
367         DataWriter__AppendData(complex_output, window_size/2, window_number);
368 }
369 }
370 }
371
372 DataReader__CloseFile();
373 if (Write_to_disc_flag)
374     DataWriter__CloseFile();
375 DataProcessor__DestroyBuffer();
376 free(data);
377 }
378
379 // Print total time on screen
380 Get_Time_Diff(0, process_time_aux, &min, &sec, &milli);
381 printf("[%d]Time: \t%dm%02ds%03d\n[%d]Windows: \t%d\n\n", node, min, sec, milli, node,
382        total_windows_processed);
383 fflush(stdout);
384
385 MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
386 GET_TIME(time_value, total_final_time);
387
388 if (node == SERVER_NODE)
389 {
390     Get_Time_Diff(total_start_time, total_final_time, &min, &sec, &milli);
391     printf("-----\n");
392     printf("Total Processing Time:\t%dm%02ds%03d\n", min, sec, milli);
393     printf("-----\n");
394 }
395
396 MPI_Finalize();
397
398 return 0;
399 }
400
401 /*****
402  * @brief Shows the initial message on server application
403  */
404 void Show_Server_Init_Message(void)
405 {
406     int size;
407
408     MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);

```

```

408
409     printf("\n-----\n");
410     printf("| MPI FFT Signal Analysis\n");
411     printf("| \n");
412     printf("| Author: Felipe S Zanoni\n");
413     printf("| Date: February 2013\n");
414     printf("| \n");
415     printf("| CPUs: %d total\n", size);
416     printf("-----\n");
417 }
418
419 /*****
420  * @brief Shows the message for client side
421  */
422 void Show_Client_Init_Message(void)
423 {
424     // no message
425 }
426
427 /*****
428  * @brief Returns the timestamp in microseconds of current time
429  */
430 long int Get_Time(struct timeval time)
431 {
432     long int timestamp;
433
434     timestamp = time.tv_sec * 1000 * 1000;
435     timestamp += time.tv_usec;
436
437     return timestamp;
438 }
439
440 /*****
441  * @brief Returns the time diff in minutes, seconds and milliseconds.
442  * @param time_init The initial time in milliseconds
443  * @param time_end The final time in milliseconds
444  * @param minutes The pointer to return the minutes
445  * @param seconds The pointer to return the seconds
446  * @param milliseconds The pointer to return the milliseconds
447  * @return The time diff
448  */
449 void Get_Time_Diff(long int time_init, long int time_end, int *minutes, int *seconds,
450                   int *milliseconds)
451 {
452     long int diff;
453
454     diff = time_end - time_init;
455
456     *milliseconds = (diff / 1000) % 1000;
457     *seconds = diff / 1000 / 1000;
458     *seconds = *seconds % 60;
459     *minutes = diff / 1000 / 1000;
460     *minutes = *minutes / 60;
461 }
462 void PrintUsage(void)
463 {
464     printf("Wrong parameters.\n");
465     printf("\nUsage:\n\n");
466     printf("\tfft -w <window_file.dat> -ws <window_step> <file.wav>\n\n");
467 }

```

A.2 Arquivo 'data/DataProcessor.h'

```

1  /*
2  * DataProcessor.h
3  *
4  * Created on: 29/03/2013
5  * Author: Felipe S. Zanoni
6  */
7

```

```

8  #include <fftw3.h>
9
10 #ifndef DATAPROCESSOR_H_
11 #define DATAPROCESSOR_H_
12
13
14 fftw_complex * DataProcessor__AllocateBuffer(int size);
15 void DataProcessor__DestroyBuffer(void);
16 fftw_complex * DataProcessor__GetResultBuffer(void);
17
18 void DataProcessor__ProcessBuffer(void);
19
20
21 #endif /* DATAPROCESSOR_H_ */

```

A.3 Arquivo 'data/DataProcessor.c'

```

1  /*
2   * DataProcessor.c
3   *
4   * Created on: 29/03/2013
5   * Author: Felipe S. Zandoni
6   */
7
8  #include <fftw3.h>
9  #include "DataProcessor.h"
10
11 fftw_complex *InputBuffer = NULL;
12 fftw_complex *OutputBuffer = NULL;
13 fftw_plan ProcessPlan;
14
15 /**
16  * Allocates the input and output complex buffer with requested size.
17  * @param size The number of values to allocate the buffer
18  *
19  * @returns -1 No memory available
20  *          -2 Buffer already allocated
21  *          0 Success
22  */
23 fftw_complex * DataProcessor__AllocateBuffer(int size)
24 {
25     if (InputBuffer != NULL)
26         fftw_free(InputBuffer);
27     if (OutputBuffer != NULL)
28         fftw_free(OutputBuffer);
29
30     InputBuffer = (fftw_complex *) fftw_malloc(sizeof(fftw_complex) * size);
31     if (InputBuffer == NULL)
32         return NULL;
33
34     OutputBuffer = (fftw_complex *) fftw_malloc(sizeof(fftw_complex) * size);
35     if (OutputBuffer == NULL)
36     {
37         fftw_free(InputBuffer);
38         return NULL;
39     }
40
41     ProcessPlan = fftw_plan_dft_1d(size, InputBuffer, OutputBuffer, FFTW_FORWARD,
42                                     FFTW_ESTIMATE);
43
44     return InputBuffer;
45 }
46
47 /**
48  * Frees input and output buffers
49  */
50 void DataProcessor__DestroyBuffer(void)
51 {
52     fftw_destroy_plan(ProcessPlan);
53
54     if (InputBuffer != NULL)

```

```

54     fftw_free(InputBuffer);
55
56     if (OutputBuffer != NULL)
57         fftw_free(OutputBuffer);
58 }
59
60
61 /**
62  * Returns the pointer to the output buffer
63  * @return Pointer to the output buffer
64  */
65 fftw_complex * DataProcessor__GetResultBuffer(void)
66 {
67     return OutputBuffer;
68 }
69
70 /**
71  * Process the input buffer and the result goes to the output buffer.
72  * Need to read the output buffer after the processing
73  */
74 void DataProcessor__ProcessBuffer(void)
75 {
76     fftw_execute(ProcessPlan);
77 }

```

A.4 Arquivo 'filesystem/DataReader.h'

```

1  /*
2   * DataReader.h
3   *
4   * Created on: 24/03/2013
5   * Author: Felipe S. Zanoni
6   */
7
8  #ifndef DATAREADER_H_
9  #define DATAREADER_H_
10
11 int DataReader__OpenFile(char *filename);
12 void DataReader__CloseFile();
13 int DataReader__GetTotalSize(void);
14
15 int DataReader__GetDoubleData(double **data, int seek, int size);
16
17 #endif /* DATAREADER_H_ */

```

A.5 Arquivo 'filesystem/DataReader.c'

```

1  /*
2   * DataReader.c
3   *
4   * Created on: 24/03/2013
5   * Author: Felipe S. Zanoni
6   */
7
8  #include <stdio.h>
9  #include <sndfile.h>
10
11 #include "DataWriter.h"
12
13 //!
14 SNDFILE *Sound_File = NULL;
15 //!
16 SF_INFO Sound_File_Info;
17
18 /**
19  * Opens a sound file to process.

```

```

20  * @param filename The full path of the file to open
21  */
22  int DataReader__OpenFile(char *filename)
23  {
24      Sound_File_Info.format = 0;
25
26      Sound_File = sf_open(filename, SFM_READ, &Sound_File_Info);
27
28      if (Sound_File != NULL)
29          return 0;
30      else
31          return -1;
32  }
33
34  /**
35   * Returns the number of frames, representing the size of the data file
36   * @return number of frames
37   */
38  int DataReader__GetTotalSize(void)
39  {
40      return Sound_File_Info.frames;
41  }
42
43  /**
44   * Closes a file after process to free memory.
45   */
46  void DataReader__CloseFile()
47  {
48      if (Sound_File != NULL)
49          sf_close(Sound_File);
50      Sound_File = NULL;
51  }
52
53
54  /**
55   * Reads data from audio file returning data as double.
56   * @param data Pointer to return the read data
57   * @param seek The sample position on file to start reading
58   * @param size Number of samples to read from file
59   *
60   * @return The number of samples read
61   */
62  int DataReader__GetDoubleData(double **data, int seek, int size)
63  {
64      if ((Sound_File != NULL) && ((size % Sound_File_Info.channels) == 0))
65      {
66          sf_seek(Sound_File, seek, SEEK_SET);
67          size = sf_read_double(Sound_File, *data, size);
68
69          return size;
70      }
71      else
72      {
73          return 0;
74      }
75  }

```

A.6 Arquivo 'filesystem/DataWriter.h'

```

1  /*
2   * DataWriter.h
3   *
4   * Created on: 24/03/2013
5   * Author: Felipe S. Zanoni
6   */
7
8  #ifndef DATAWRITTER_H_
9  #define DATAWRITTER_H_
10
11  int DataWriter__OpenFile(char *filename);
12  int DataWriter__AppendData(double *data, int size, int window);

```



```

13 void DataWriter__CloseFile(void);
14
15 #endif /* DATAWRITER_H_ */

```

A.7 Arquivo 'filesystem/DataWriter.c'

```

1  /*
2   * DataWriter.c
3   *
4   * Created on: 24/03/2013
5   * Author: Felipe S. Zanoni
6   */
7
8
9 #include <stdio.h>
10 #include <stdlib.h>
11 #include "DataWriter.h"
12
13 FILE *DataWriter_File;
14
15 /**
16  * @brief Opens file as output to write processed data
17  * @param filename The filename of the file to write data
18  * @return -1 on error
19  *         0 on success
20  */
21 int DataWriter__OpenFile(char *filename)
22 {
23     DataWriter_File = fopen(filename, "w+");
24
25     if (DataWriter_File == NULL)
26         return -1;
27     else
28         return 0;
29 }
30
31 /**
32  * @brief Appends data to the end of output file
33  * @param data Data to write to a text file
34  * @param size The amount of numbers in data vector
35  * @return The number of data written. On success should be the same as parameter size.
36  */
37 int DataWriter__AppendData(double *data, int size, int window)
38 {
39     int count;
40
41     for (count = 0; count < size; count++)
42     {
43         fprintf(DataWriter_File, "%d\t%d\t%f\n", window, count, data[count]);
44     }
45
46     return count;
47 }
48
49 /**
50  * @brief Closes the output file if open
51  */
52 void DataWriter__CloseFile(void)
53 {
54     if (DataWriter_File != NULL)
55         fclose(DataWriter_File);
56 }

```

A.8 Arquivo 'filesystem/WindowReader.h'

```

1  /*

```

```

2  * WindowReader.h
3  *
4  * Created on: 19/03/2013
5  * Author: Felipe S. Zanoni
6  */
7
8  #ifndef WINDOWREADER_H_
9  #define WINDOWREADER_H_
10
11 int WindowReader__ReadWindowFile(char *filename);
12 int WindowReader__GetWindowData(double **data);
13 int WindowReader__GetWindowSize(void);
14 void WindowReader__ClearData(void);
15
16 #endif /* WINDOWREADER_H_ */

```

A.9 Arquivo 'filesystem/WindowReader.c'

```

1  /*
2  * WindowReader.c
3  *
4  * Created on: 19/03/2013
5  * Author: Felipe S. Zanoni
6  */
7
8  #include <stdio.h>
9  #include <string.h>
10 #include <stdlib.h>
11
12 //***** PRIVATE VARIABLES
13 static FILE *Window_File = NULL;
14 static double *Data = NULL;
15 static int Data_Size = 0;
16
17 //***** PRIVATE FUNCTIONS
18 int OpenWindowFile(char *filename);
19
20 //***** PUBLIC FUNCTIONS
21 /**
22  * @brief Reads a file containing the window to process the data
23  *
24  * @param filename Is the file to open
25  *
26  * @returns 0 on success
27  *          -1 on file not found
28  *          -2 on wrong file
29  *          -3 on insufficient memory
30  */
31 int WindowReader__ReadWindowFile(char *filename)
32 {
33     double value;
34     int i;
35     char header[20];
36
37     if (OpenWindowFile(filename) == 0)
38     {
39         fscanf(Window_File, "%20s\n", header);
40         if (strcmp(header, "FFT_WINDOW") == 0)
41         {
42             fscanf(Window_File, "%d\n", &Data_Size);
43             Data = (double*)malloc(Data_Size * sizeof(double));
44             if (Data != NULL)
45             {
46                 for (i=0; i<Data_Size; i++)
47                 {
48                     fscanf(Window_File, "%lf\n", &value);
49                     Data[i] = value;
50                 }
51             }
52             else
53             {

```

```

54         // Cannot allocate memory
55         return -3;
56     }
57 }
58 else
59 {
60     // File incorrect header
61     return -2;
62 }
63 }
64 else
65 {
66     // Cannot open file
67     return -1;
68 }
69
70 // Success
71 return 0;
72 }
73
74 /**
75  * @brief Returns the data read from a file to compose a window of processing
76  * @return Data read from file
77  */
78 int WindowReader__GetWindowData(double **data)
79 {
80     *data = Data;
81
82     return Data_Size;
83 }
84
85 /**
86  * @brief Returns the size of the window to process
87  * @return Window size
88  */
89 int WindowReader__GetWindowSize(void)
90 {
91     return Data_Size;
92 }
93
94 /**
95  * @brief Clears read data when will not be used anymore
96  */
97 void WindowReader__ClearData(void)
98 {
99     if (Data != NULL)
100     {
101         free(Data);
102         Data_Size = 0;
103         Data = NULL;
104     }
105 }
106
107
108 //*****
109 /**
110  * @brief Opens a file containing the window to process the data
111  *
112  * @param filename Is the file to open
113  */
114 int OpenWindowFile(char *filename)
115 {
116     if (Window_File != NULL)
117         fclose(Window_File);
118
119     Window_File = fopen(filename, "r");
120     if (Window_File != NULL)
121     {
122         return 0;
123     }
124     else
125     {
126         return -1;
127     }
128 }

```

A.10 Arquivo 'pi_mpi.c'

```

1  /*
2  * main.c
3  *
4  * Created on: 24/03/2013
5  * Author: Felipe S. Zanoni
6  */
7  #include <stdio.h>
8  #include <stdlib.h>
9  #include <string.h>
10 #include <mpi.h>
11 #include <sys/time.h>
12 #include <math.h>
13
14 // Comment/Uncomment this line for debugging
15 //#define DEBUG
16
17 // Defines
18 #define SERVER_NODE    0
19
20 //#define DEBUG
21 #define SERVER_PROCESSING_STEPS 1000
22 #define CLIENT_PROCESSING_STEPS 100000
23
24 // Macros
25 #define GET_TIME(timeval, time_ret) { gettimeofday(&timeval, NULL);\
26                                     time_ret = Get_Time(timeval);\
27                                     }
28
29 #ifdef DEBUG
30 #define DEBUG_PRINT(...) fprintf( stderr, __VA_ARGS__ )
31 #else
32 #define DEBUG_PRINT(...) do{ } while (0)
33 #endif
34
35 // Functions prototypes
36 void Show_Server_Init_Message(void);
37 void Show_Client_Init_Message(void);
38
39 long int Get_Time(struct timeval timeval);
40 void Get_Time_Diff(long int time_init, long int time_end, int *minutes, int *seconds,
41                  int *milliseconds);
42
43 /**
44  * @brief Main code.
45  */
46 int main (int argc, char** argv)
47 {
48     int node, total_nodes;
49     unsigned int idx;
50     unsigned int windows_processed;
51
52     struct timeval time_value;
53     long int total_start_time;
54     long int total_final_time;
55     int min, sec, milli;
56     unsigned int total_windows_processed;
57
58     double mypi, pi;
59
60     // Initialize MPI
61     MPI_Init(&argc, &argv);
62     MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &node);
63     MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &total_nodes);
64     // Wait all processes
65     MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
66
67     GET_TIME(time_value, total_start_time);
68
69     {
70         unsigned int window_number;

```

```

70 unsigned int total_windows = 4294000000; //4294967295;
71 double h, sum;
72
73 total_windows_processed = 0;
74
75 h = 1.0 / (double)total_windows;
76
77 // Server Mode
78 if (node == SERVER_NODE)
79 {
80     Show_Server_Init_Message();
81
82     printf("Total samples to process: %u\n", total_windows);
83
84     {
85         windows_processed = 0;
86         mypi = 0.0;
87         sum = 0.0;
88
89         while (windows_processed < total_windows)
90         {
91             MPI_Status status;
92             int ready;
93             char char_buff[6];
94             unsigned int int_buff[2];
95
96             for(idx = 1; idx < total_nodes; idx++)
97             {
98
99                 MPI_Iprobe(idx, 5, MPI_COMM_WORLD, &ready, &status);
100                 if (ready)
101                 {
102                     MPI_Recv((char*)char_buff, 6, MPI_CHAR, idx, 5, MPI_COMM_WORLD, &status);
103                     if (strcmp(char_buff, "ready") == 0)
104                     {
105                         if (windows_processed >= total_windows)
106                         {
107                             int_buff[0] = int_buff[1] = 0;
108                             MPI_Send((unsigned int*)int_buff, 2, MPI_UNSIGNED, idx, 1,
109                                     MPI_COMM_WORLD);
110                         }
111                         else
112                         {
113                             int_buff[0] = windows_processed;
114                             windows_processed += CLIENT_PROCESSING_STEPS;
115                             if (windows_processed > total_windows)
116                             {
117                                 windows_processed = total_windows;
118                             }
119                             int_buff[1] = windows_processed;
120                             MPI_Send((unsigned int*)int_buff, 2, MPI_UNSIGNED, idx, 1,
121                                     MPI_COMM_WORLD);
122                         }
123                     }
124                 }
125
126                 int_buff[0] = windows_processed;
127                 windows_processed += SERVER_PROCESSING_STEPS;
128                 if (windows_processed > total_windows)
129                 {
130                     windows_processed = total_windows;
131                 }
132                 int_buff[1] = windows_processed;
133
134                 total_windows_processed += int_buff[1] - int_buff[0];
135
136                 // Process data
137                 for (window_number = int_buff[0]; window_number < int_buff[1]; window_number++)
138                 {
139                     double x = h * ((double>window_number - 0.5);
140                     sum += (4.0/(1.0 + x*x));
141                 }
142             }
143

```

```

144     mypi += h * sum;
145
146     printf("100.00 complete!\n");
147     for(idx = 1; idx < total_nodes; idx++)
148     {
149         int int_buff[2];
150         int_buff[0] = int_buff[1] = 0;
151         MPI_Send((unsigned int*)int_buff, 2, MPI_UNSIGNED, idx, 1, MPI_COMM_WORLD);
152     }
153
154 }
155 else
156 {
157
158     // Client Node
159     Show_Client_Init_Message();
160
161     {
162         unsigned int int_buff[2];
163         int Running;
164         MPI_Status status;
165
166         int_buff[0] = int_buff[1] = 0;
167         Running = 1;
168         mypi = 0.0;
169         sum = 0.0;
170
171         while(Running)
172         {
173             int new_msg;
174
175             MPI_Iprobe(SERVER_NODE, 1, MPI_COMM_WORLD, &new_msg, &status);
176             if (new_msg == 0)
177             {
178                 // Request new message
179                 MPI_Send("ready", 6, MPI_CHAR, SERVER_NODE, 5, MPI_COMM_WORLD);
180             }
181             MPI_Recv((unsigned int*)int_buff, 2, MPI_UNSIGNED, SERVER_NODE, 1,
182                     MPI_COMM_WORLD, &status);
183
184             if ((int_buff[0] == 0) && (int_buff[1] == 0))
185             {
186                 // End processing
187                 Running = 0;
188             }
189             else
190             {
191                 total_windows_processed += int_buff[1] - int_buff[0];
192
193                 // Process data
194                 for (window_number = int_buff[0]; window_number < int_buff[1];
195                     window_number++)
196                 {
197                     double x = h * ((double)window_number - 0.5);
198                     sum += (4.0/(1.0 + x*x));
199                 }
200             }
201
202             mypi += h * sum;
203         }
204     }
205
206     printf("Rank %d = %.18f\n", node, mypi);
207     MPI_Reduce(&mypi, &pi, 1, MPI_DOUBLE, MPI_SUM, SERVER_NODE, MPI_COMM_WORLD);
208
209     MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
210     GET_TIME(time_value, total_final_time);
211
212     if (node == SERVER_NODE)
213     {
214         Get_Time_Diff(total_start_time, total_final_time, &min, &sec, &milli);
215         printf("-----\n");
216         printf("PI = %.18f\n", pi);
217         printf("Total Processing Time:\t%dm%02ds%03d\n", min, sec, milli);

```

```

218     printf("-----\n");
219 }
220
221 MPI_Finalize();
222
223 return 0;
224 }
225
226 /*****
227  * @brief Shows the initial message on server application
228  */
229 void Show_Server_Init_Message(void)
230 {
231     int size;
232
233     MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &size);
234
235     printf("\n-----\n");
236     printf("| MPI Pi Calculation using Monte Carlo Method\n");
237     printf("| \n");
238     printf("| Author: Felipe S Zanoni\n");
239     printf("| Date: June 2013\n");
240     printf("| \n");
241     printf("| CPUs: %d total\n", size);
242     printf("-----\n");
243 }
244
245 /*****
246  * @brief Shows the message for client side
247  */
248 void Show_Client_Init_Message(void)
249 {
250     int rank;
251
252     MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &rank);
253
254     printf("Rank %d started\n", rank);
255 }
256
257 /*****
258  * @brief Returns the timestamp in microseconds of current time
259  */
260 long int Get_Time(struct timeval time)
261 {
262     long int timestamp;
263
264     timestamp = time.tv_sec * 1000 * 1000;
265     timestamp += time.tv_usec;
266
267     return timestamp;
268 }
269
270 /*****
271  * @brief Returns the time diff in minutes, seconds and milliseconds.
272  * @param time_init The initial time in milliseconds
273  * @param time_end The final time in milliseconds
274  * @param minutes The pointer to return the minutes
275  * @param seconds The pointer to return the seconds
276  * @param milliseconds The pointer to return the milliseconds
277  * @return The time diff
278  */
279 void Get_Time_Diff(long int time_init, long int time_end, int *minutes, int *seconds,
280                    int *milliseconds)
281 {
282     long int diff;
283
284     diff = time_end - time_init;
285
286     *milliseconds = (diff / 1000) % 1000;
287     *seconds = diff / 1000 / 1000;
288     *seconds = *seconds % 60;
289     *minutes = diff / 1000 / 1000;
290     *minutes = *minutes / 60;
291 }

```

Manual de Compilação e Uso dos Aplicativos

Nesta parte do documento será descrito como compilar e executar ambos aplicativos de testes.

Para compilar códigos com a biblioteca MPI é necessário fazer uso do compilador **mpicc**. Ele fará a inclusão de todas as bibliotecas necessárias para compilar o código com MPI.

Os dois aplicativos tem dependência da biblioteca matemática **math**. Para o aplicativo de cálculo da DFT, será necessária a inclusão outras duas bibliotecas: **libsndfile** para trabalhar com arquivos do tipo *wav*; **fftw3** para trabalhar com Transformadas Discretas de Fourier.

Para compilar o código do aplicativo de cálculo de DFT usa-se a seguinte linha de comando:

```
mpicc -o fft-mpi main.c data/DataProcessor.c  
filesystem/DataReader.c filesystem/DataWriter.c  
filesystem/WindowReader.c -lm -lsndfile -lfftw3
```

Após a compilação será criado o aplicativo **fft-mpi**.

Para compilar o código do aplicativo de cálculo do número π deve-se entrar com o seguinte comando:

```
mpicc -o pi-mpi main.c -lm
```

Após a compilação será criado o aplicativo **pi-mpi**

Para fazer a execução de códigos com a biblioteca MPI algumas configurações são necessárias. É recomendado que se siga a configuração da implementação MPI desejada. Nesse trabalho foi utilizada o Open-MPI. Para configurar o *cluster* com essa implementação é necessário criar um arquivo com os dispositivos que fazem parte da rede de processamento. O arquivo deve conter o nome ou endereço IP do dispositivo, seguido do número de núcleos de processamento disponíveis nesse dispositivo, separado por dois pontos, como dado no exemplo seguinte:

```
<HOSTNAME>:<PROCESSADORES>
192.168.1.2:4
192.168.1.3:4
192.168.1.4:2
```

O comando para executar o código no *cluster* deve ser da seguinte forma:

```
mpirun -n <numero_processos> --machinefile <arquivo_dispositivos>
    <aplicativo> [<parametros>]
```

Sendo as configurações definidas na tabela abaixo:

<numero_processos>	Número de processos que serão executados em paralelo no <i>cluster</i>
<arquivo_dispositivos>	Arquivo de configuração com os dispositivos do <i>cluster</i>
<aplicativo>	Aplicativo que será executado em MPI
<parametros>	Parâmetros do aplicativo executado

Um exemplo de linha de comando para execução do *software* **fft_mpi** é dada por:

```
mpirun -n 6 --machinefile dispositivos.txt ./fft\_mpi -w
    window_file.dat -ws 512 sound_test.wav
```

Para executar o aplicativo **pi_mpi** pode ser executada a linha de comando seguinte:

```
mpirun -n 6 --machinefile dispositivos.txt ./pi\_mpi
```

Os resultados dos tempos de processamento serão exibidos na tela onde os aplicativos foram executados.