MCZA020-13 - PROGRAMAÇÃO PARALELA

MAPREDUCE

Emilio Francesquini

22 de Outubro de 2018

Centro de Matemática, Computação e Cognição
Universidade Federal do ABC

UFABC

DISCLAIMER

- Estes slides foram preparados para o curso de **Programação Paralela na UFABC**.
- Este material pode ser usado livremente desde que sejam mantidos, além deste aviso, os créditos aos autores e instituições.
- Estes slides foram adaptados daqueles originalmente preparados (e gentilmente cedidos) pelo professor **Daniel Cordeiro, da EACH-USP**.

DEFINIÇÃO DO INST. NACIONAL DE PADRÕES E TECNOLOGIA DOS EUA

Computação em Nuvem
É um modelo que possibilita acesso ubíquo, de forma conveniente e sob demanda a um conjunto de recursos de computação configuráveis (por exemplo, redes, servidores, dispositivos de armazenamento, aplicações e outros serviços) que podem ser rapidamente aprovisionados e dispensados com o mínimo esforço de gestão ou interação do prestador de serviço.

`http://csrc.nist.gov/publications/PubsSPs.html#800-145`

QUATRO CLASSES DE PROBLEMAS MOTIVADORES

- Problemas “em escala da web”
- **Grandes** *data centers*
- Computação paralela e distribuída
- Aplicações web interativas

PROBLEMAS EM ESCALA DA WEB

- Características
  - Definitivamente *data-intensive*
  - Mas podem também ser *processing-intensive*
- Exemplos:
  - *Crawling*, indexação, busca, mineração de dados da web
  - Pesquisa em biologia computacional na era “pós-genômica”
  - Processamento de dados científicos (física, astronomia, etc.)
  - Redes de sensores
  - Aplicações Web 2.0
  - etc.

COMO RESOLVER PROBLEMAS TÃO GRANDES?

Estratégia simples (mas de difícil execução):

- Dividir para conquistar
- Usar mais recursos computacionais a medida que mais dados aparecerem

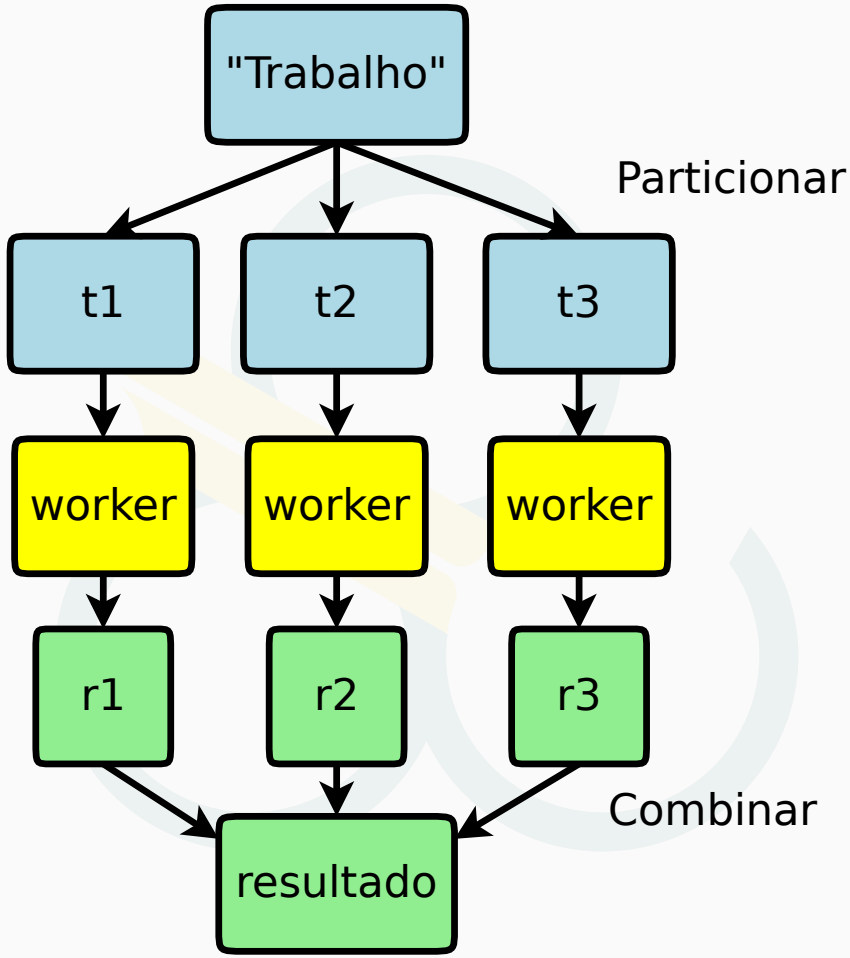
GRANDES DATA CENTERS

Fonte: `http://www.google.com/intl/pt-BR/about/datacenters/`

IDEIAS PRINCIPAIS

- Escalabilidade horizontal, não vertical
  - Existem limites para máquinas SMP e arquiteturas de memória compartilhada
- Mova o processamento para perto dos dados
  - a banda de rede é limitada
- Processe os dados sequencialmente, evite padrões de acesso aleatórios
  - *seeks* são custosos, mas a vazão (*throughput*) do disco é razoável

Divisão e conquista



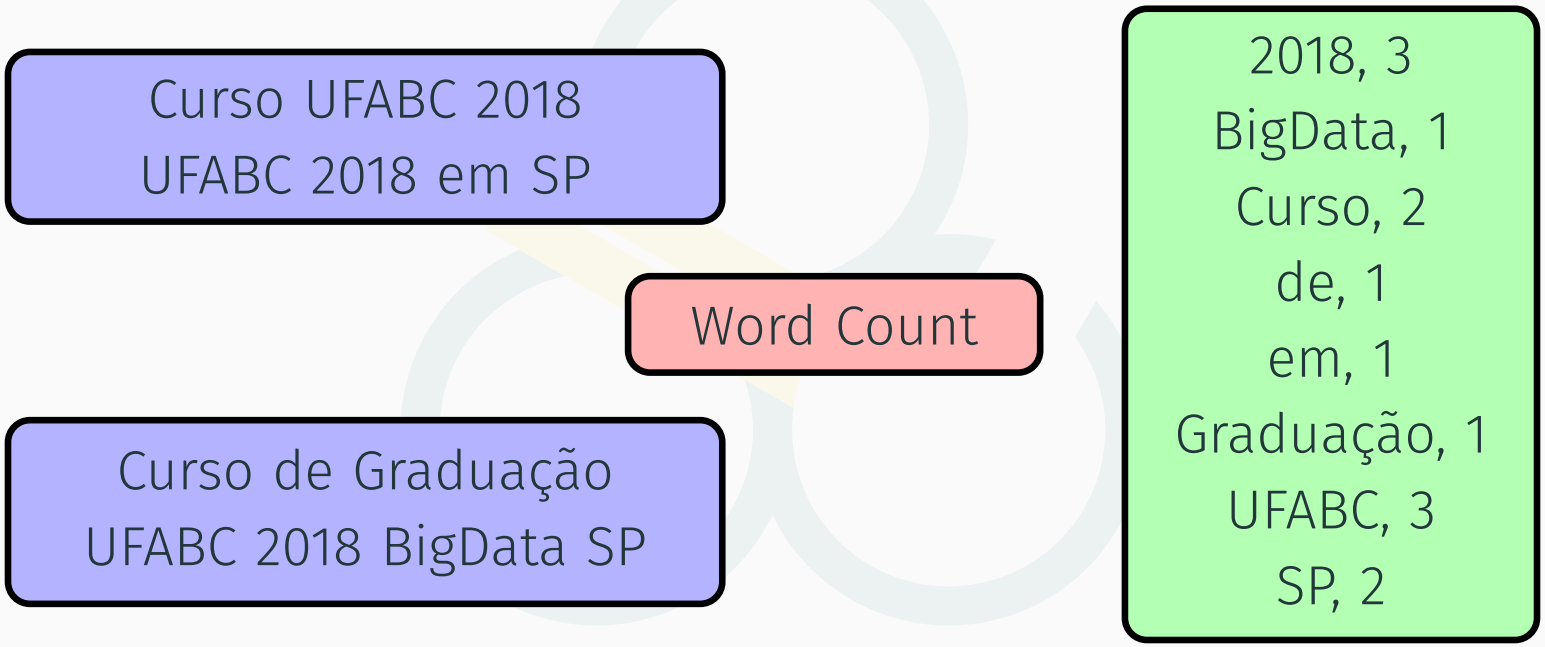
DESAFIOS DE PARALELIZAÇÃO

- Como repartir as unidades de trabalho entre os *workers*?
- O que fazer quando temos mais trabalho do que *workers*?
- E se os *workers* precisarem compartilhar resultados intermediários entre si?
- Como agregar os resultados parciais?
- O que fazer se um *worker* parar de funcionar?
- Como saber se todos os *workers* terminaram seus trabalhos?

Hadoop e o paradigma MapReduce

Word Count

Gerar uma lista de frequência das palavras em um conjunto **grande** de arquivos: ordem de *terabytes*!



EM UM MUNDO NÃO PARALELO...

Assuma que a máquina tem memória suficiente ($>$ 1 TB !)

```
word-count( ) {
  for each document d {
    for each word w in d {
      w_count[w]++
     }
   }
  save w_count to persistent storage
 }
```

Fácil, mas provavelmente a execução demorará um longo tempo, pois a entrada é da ordem de *terabytes*

... JÁ NO PARALELO

```
Mutex lock; //  protege w_count
 word-count( ) {
   for each document d in parallel {
     for each word w in d {
       lock.Lock();
        w_count[w]++
       lock.Unlock();
     }
   }
   save w_count to persistent storage
 }
```

Problemas:

- utiliza uma estrutura de dados única e global
- recursos compartilhados: seção crítica!

Então, como fazer programas que processam petabytes de dados?

- O modelo inicial proposto pelo Google apresentou conceitos para simplificar alguns problemas
- Paralelização da computação em um aglomerado de máquinas comuns (com centenas/milhares de CPUs)
- Paralelização e distribuição automática de computação deveria ser o mais simples possível
- O sistema de execução se encarrega de:
  - particionar e distribuir os dados de entrada
  - escalonar as execuções em um conjunto de máquinas
  - tratar as falhas
  - comunicação entre as máquinas

IDEIA BÁSICA DO MAPREDUCE

O modelo de programação paralela MapReduce aborda os problemas da seguinte forma:

1. Leia uma grande quantidade de dados
2. Aplique a função **MAP**: extrai alguma informação de valor!
3. Fase intermediária: Shuffle & Sort
4. Aplique a função **REDUCE**: reúne, compila, filtra, transforma, etc.
5. Grave os resultados

- A ideia do modelo de programação Map e Reduce não é nova
- Presente em linguagens funcionais há mais de 40 anos!
- No Hadoop é a parte do arcabouço responsável pelo processamento distribuído (paralelo) de grandes conjuntos de dados
- Usa padrões já conhecidos:

```
cat       | grep | sort    | uniq   > arquivo
entrada   | map  | shuffle | reduce > saída
```

Map em programação funcional

$$\texttt{map}(\{1,2,3,4\},\ (\times 2)) \rightarrow \{2,4,6,8\}$$

Todos os elementos são processados por um método e os elementos não afetam uns aos outros.

Reduce em programação funcional

$$\texttt{reduce}(\{1,2,3,4\}, (\times)) \rightarrow \{24\}$$

- Todos os elementos da lista são processados juntos
- Tanto em Map quanto em Reduce: a entrada é fixa (imutável), e a saída é uma nova lista (em geral)

CARACTERÍSTICAS DO MAPREDUCE

- Ótimo para trabalhar com grandes quantidades (petabytes) de dados
- Realiza computação “perto” dos dados
- Dados são compartilhados através de um *sistema de arquivos distribuído*

Apache Hadoop

Hadoop remove a complexidade da computação de alto desempenho

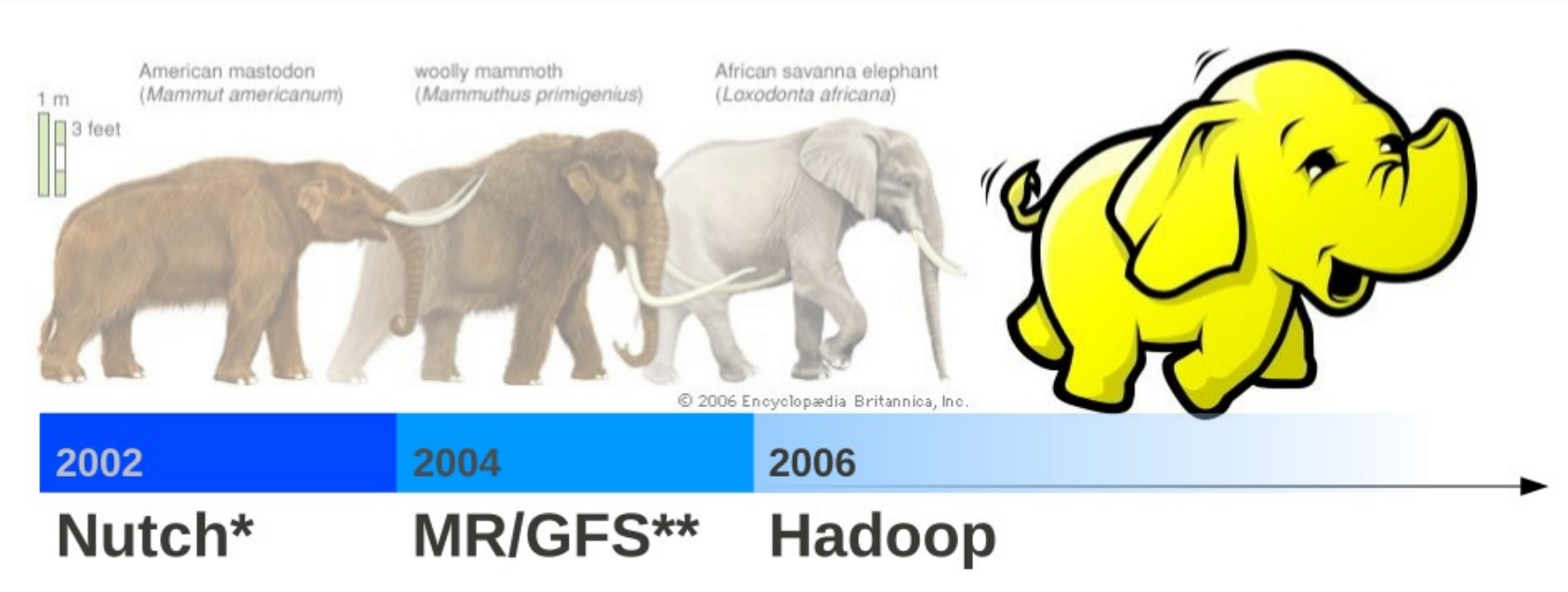
Custo eficiente

- Máquinas comuns
- Rede comum
- Tolerância a falhas automática
  - Poucos administradores
- Facilidade de uso
  - Poucos programadores

Arcabouço para processamento e armazenamento de dados em larga escala:

- Código aberto
- Implementado em Java
- Inspirado no GFS e MapReduce do Google
- Projeto *top-level* da Fundação Apache
- Tecnologia recente, porém já muito utilizada

HISTÓRICO



* http://nutch.apache.org/

** http://labs.google.com/papers/mapreduce.html
http://labs.google.com/papers/gfs.html

ORIGEM (I)

2003 Google publica artigo do GFS (SOSP'03)

2004 Google publica artigo do MapReduce (OSDI'04)

2005 Doug Cutting cria uma versão do MapReduce para o projeto Nutch

2006 Hadoop se torna um subprojeto do Apache Lucene

ORIGEM (II)

2007 Yahoo! Inc. torna-se o maior contribuidor e utilizador do projeto (aglomerado com mais de 1.000 nós)

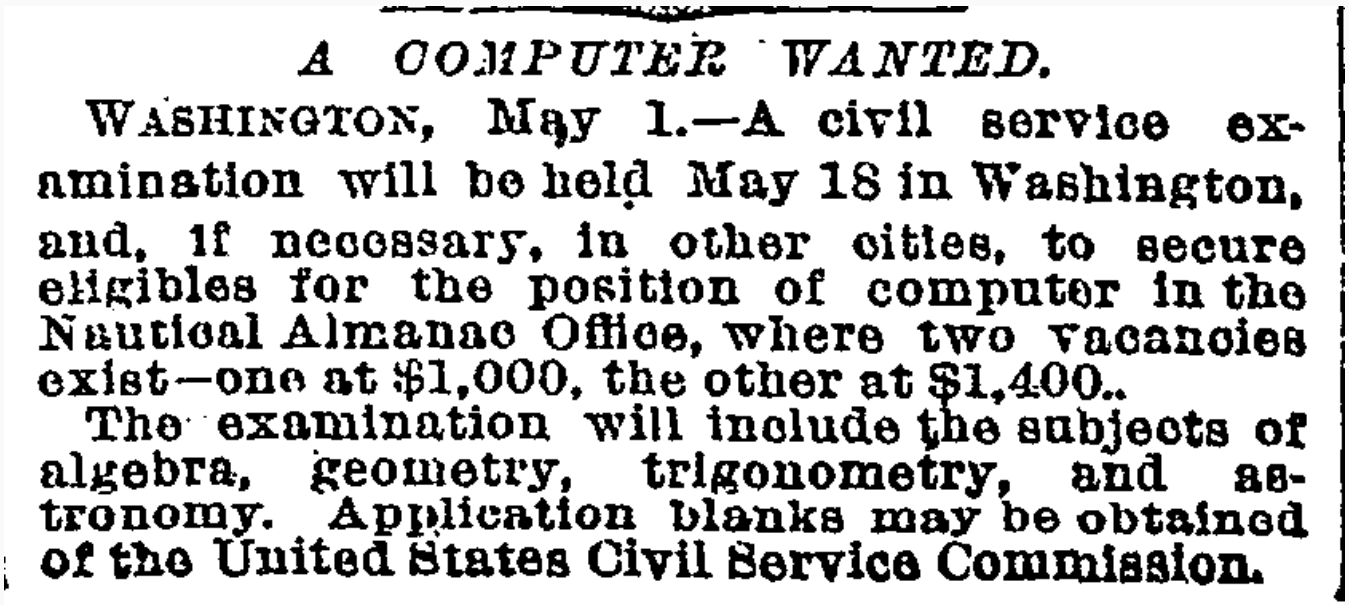
2008 Hadoop deixa a tutela do projeto Lucene e se transforma em um projeto *top-level* da Apache

2010 Facebook anuncia o maior aglomerado Hadoop do mundo (mais de 2.900 nós e 30 petabytes de dados)

2011 Apache disponibiliza a versão 1.0.0

2017 Versão atual: 2.8.0

QUEM UTILIZA?



A COMPUTER WANTED.

WASHINGTON, May 1.—A civil service examination will be held May 18 in Washington, and, if necessary, in other cities, to secure eligibles for the position of computer in the Nautical Almanac Office, where two vacancies exist—one at $1,000, the other at $1,400..

The examination will include the subjects of algebra, geometry, trigonometry, and astronomy. Application blanks may be obtained of the United States Civil Service Commission.

The New York Times

Published: May 2, 1892

http://open.blogs.nytimes.com/2007/11/01/self-service-prorated-super-computing-fun/

THE NEW YORK TIMES

- Em 2007, o jornal The New York Times converteu para PDF todos seus os artigos publicados entre 1851 e 1980
- Cada artigo é composto por várias imagens previamente digitalizadas que precisavam ser posicionadas e redimensionadas de forma coerente pra a criação do PDF
- 4 TB de imagens TIFF em 11 milhões de arquivos PDF
- 100 instâncias EC2 da Amazon foram utilizadas durante 24 horas para gerar 1,5 TB de arquivos PDF, a um custo de aproximadamente US$ 240,00

Por que o Hadoop faz tanto sucesso?

Por que usar Hadoop?

- Código aberto
- Econômico
- Robusto
- Escalável
- Foco na regra de negócio

Código aberto

- Comunidade ativa
- Apoio de grandes corporações
- Correções de erros frequentes
- Constante evolução do arcabouço

Econômico

- Software livre
- Uso de máquinas e redes convencionais
- Aluguel de serviços disponíveis na nuvem:
  - Amazon Elastic MapReduce
  - Google App Engine MapReduce
  - etc.

Robusto

- Se em 1 máquina há probabilidade de haver falhas...
  - Tempo médio entre falhas para 1 nó: 3 anos
  - Tempo médio entre falhas para 1.000 nós: 1 dia

Estratégias

- Replicação dos dados
- Armazenamento de metadados

Escalável

- Permite facilmente adicionar máquinas ao aglomerado
- Adição não implica na alteração do código-fonte
- Limitação apenas relacionada a quantidade de recursos disponíveis

Foco na regra de negócio

- Hadoop realiza todo o “trabalho duro”
- Desenvolvedores podem focar apenas na abstração do problema

Único nó mestre

- Ponto único de falha
- Pode impedir o escalonamento

Dificuldade das aplicações paralelas

- Problemas não paralelizáveis
- Processamento de arquivos pequenos
- Muito processamento em um pequeno conjunto de dados

SUPOSIÇÕES DO PROJETO (I)

Problemas

- Os dados que serão processados não cabem em um nó
- Cada nó é composto por hardware comum
- Falhas podem (e irão) acontecer

Ideias e soluções do Apache Hadoop

- Sistema de arquivos distribuído
- Replicação interna
- Recuperação de falhas automática

Suposições do projeto (II)

Problemas

- Mover dados é caro (largura de banda pequena)
- Mover computação é barato
- Programação paralela e distribuída é difícil

Ideias e soluções do Apache Hadoop

- Mover a computação para onde estão os dados
- Escrever programas que são fáceis de se distribuir
- Paralelismo de dados utilizando conceitos de linguagem funcional

- A função Map atua sobre um conjunto de entrada com chaves e valores, produzindo uma lista de chaves e valores
- A função Reduce atua sobre os valores intermediários produzidos pelo Map para, normalmente, agrupar os valores e produzir a saída

	Entrada	Saída
map	<k1, v1>	lista(<k2, v2>)
reduce	<k2, lista(v2)>	lista(<k3, v3>)

DE VOLTA AO EXEMPLO DO WORD COUNT

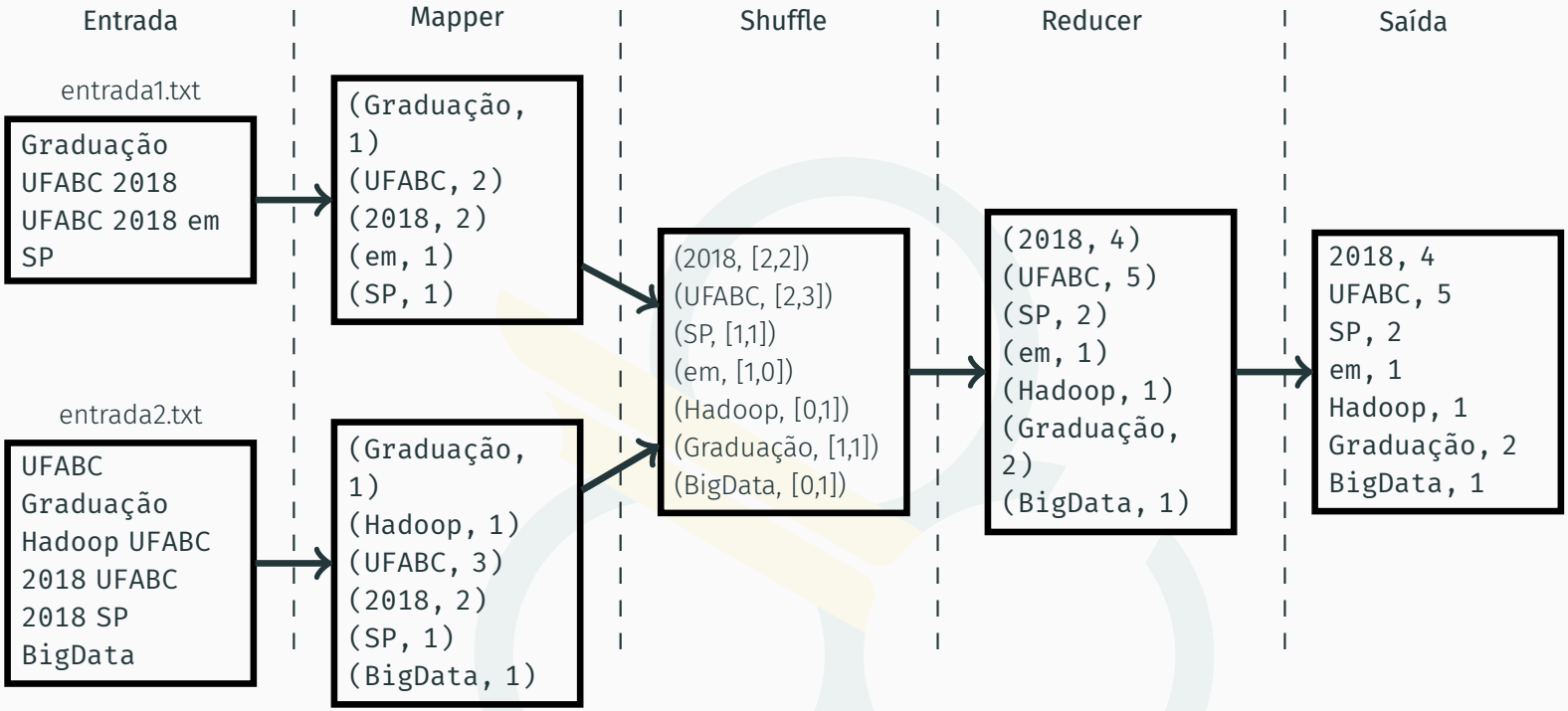
- Lê arquivos texto e conta a frequência das palavras
  - **Entrada**: arquivos texto
  - **Saída**: arquivo texto
  - **Cada linha**: palavra, separador (tab), quantidade
- **Map**: gera pares (palavra, quantidade)
- **Reduce**: para cada palavra, soma as quantidades

WORD COUNT (PSEUDO-CÓDIGO)

```
map(String key, String value):
// key: nome do documento
// value: conteúdo do documento
for each word w in value:
    EmitIntermediate(w, "1");

reduce(String key, Iterator values):
// key: uma palavra
// value: uma lista de contadores
int result = 0;
for each v in values:
    result += ParseInt(v);
Emit(key, AsString(result));
```

EXECUÇÃO DO WORD COUNT



1

[1] Errata: os pares após shuffle devem aparecer ordenados

GREP

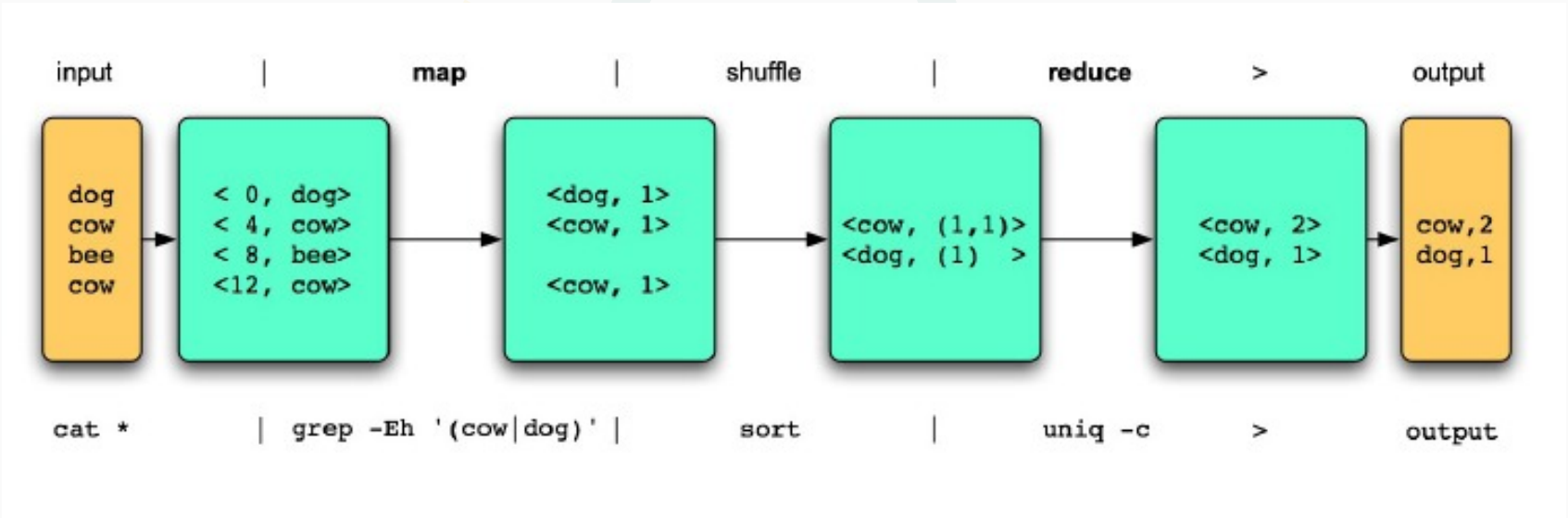
- Procura nos arquivos de entrada por um dado padrão
- **Map**: emite uma linha se um padrão é encontrado
- **Reduce**: copia os resultados para a saída

ILUSTRANDO O GREP

```
cat  |  grep  |  sort  |  uniq  >  arquivo
```

ILUSTRANDO O GREP

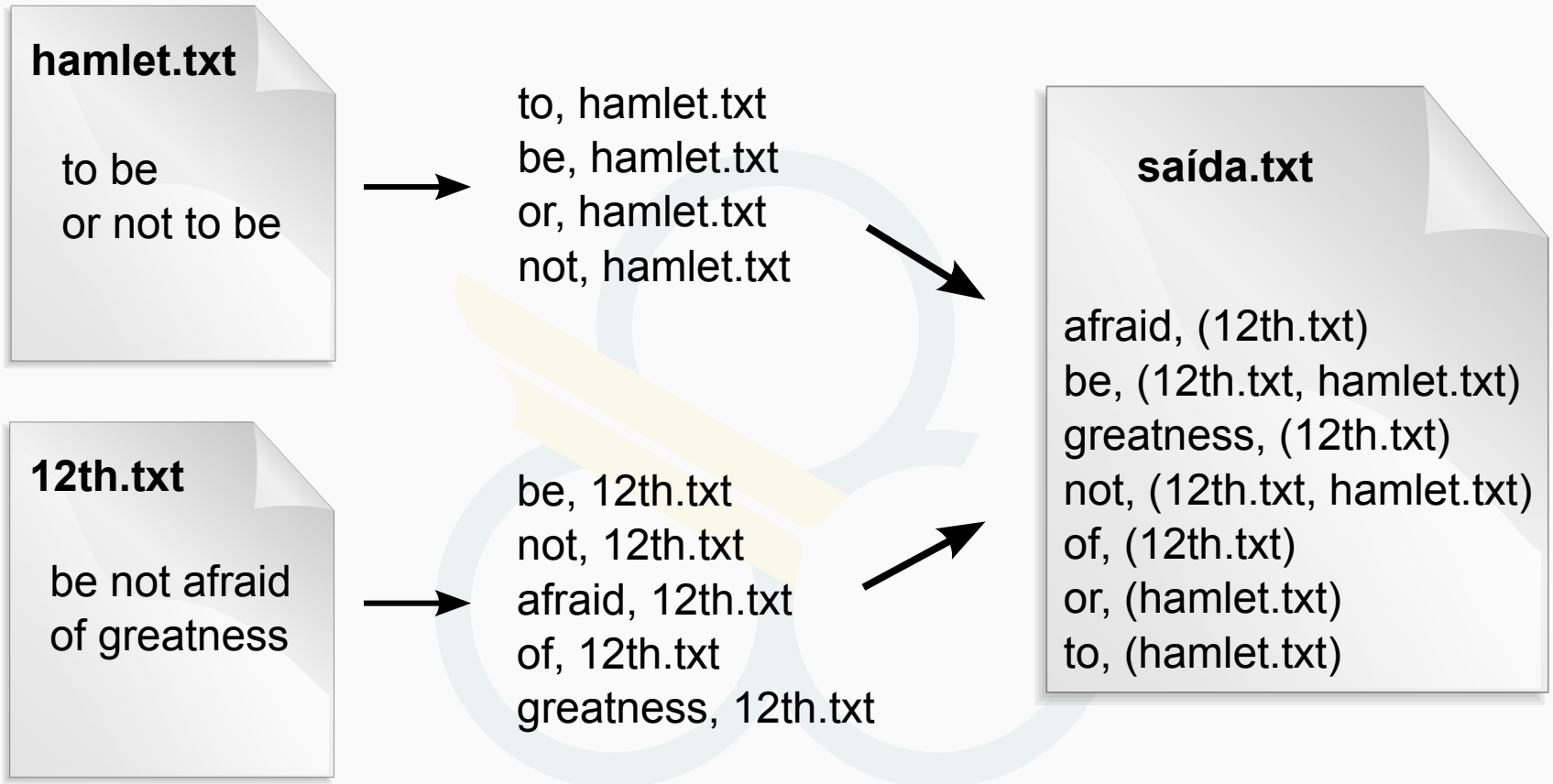
cat	|	grep	|	sort	|	uniq > arquivo
entrada	|	map	|	shuffle	|	reduce > saída



ÍNDICE INVERTIDO

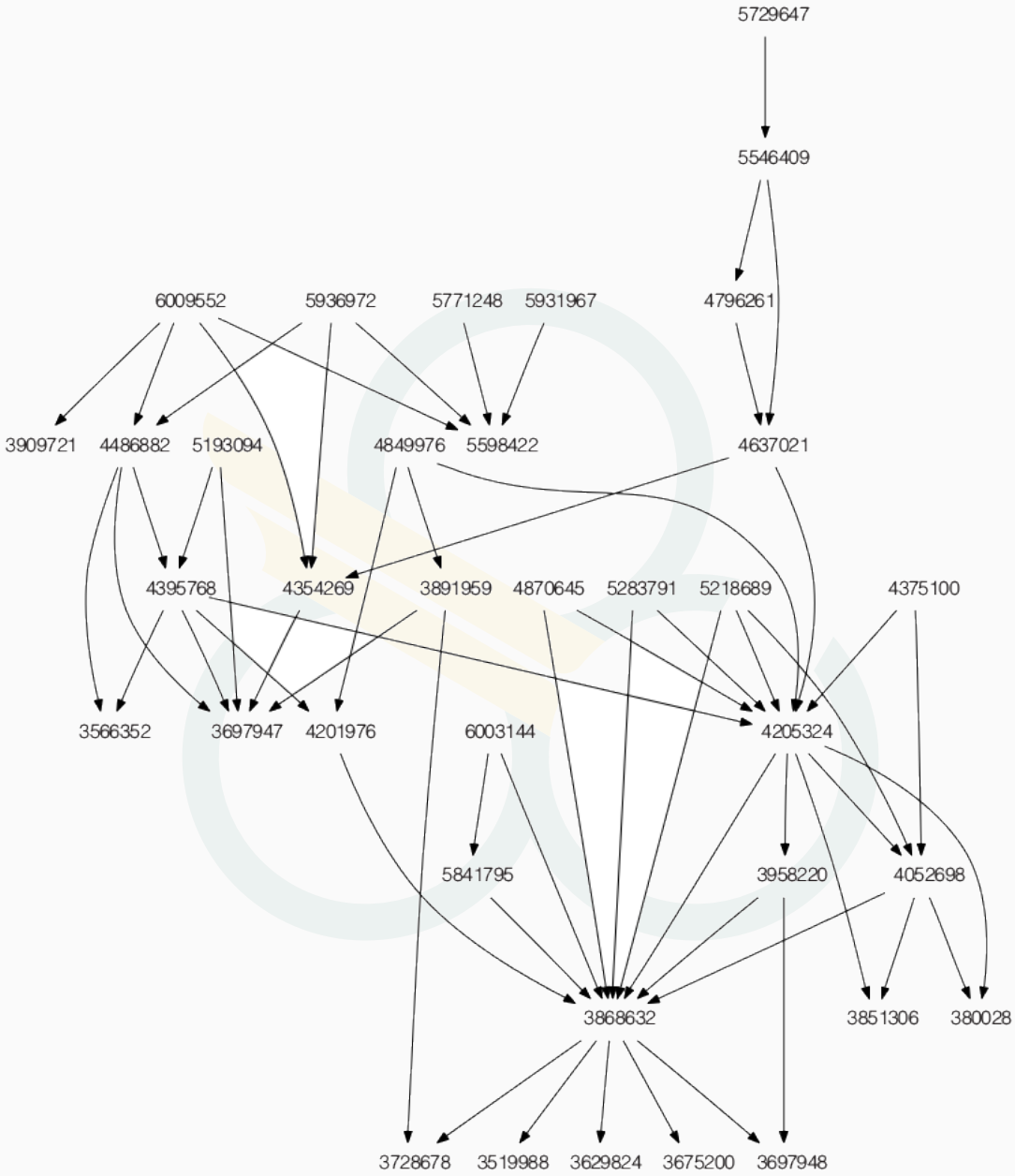
- Gerar o índice invertido das palavras de um conjunto de arquivos dado
- **Map**: faz a análise dos documentos e gera pares de (**palavra**, **docId**)
- **Reduce**: recebe todos os pares de uma palavra, organiza os valores docId, e gera um par (**palavra**, **lista(docId)**)

ILUSTRANDO O ÍNDICE INVERTIDO



Alguns exemplos de MapReduce

EXEMPLO 1: CITAÇÕES EM PATENTES



EXEMPLO 1

Entrada: pares (A,B) que indicam que a patente A cita a patente B no seu texto.

cite75_99.txt

```
"CITING", "CITED"
 3858241, 956203
 3858241, 1324234
 3858241, 3398406
 3858241, 3557384
 3858241, 3634889
 3858242, 1515701
 3858242, 3319261
 3858242, 3668705
 3858242, 3707004
        ...
```

EXEMPLO 1

- **Entrada**: todas as citações à patentes americanas feitas entre 1975 e 1999 e suas informações
- **Saída**: para cada patente, a lista de todas as patentes que a citam

EXEMPLO 1

O primeiro passo é definir o *data flow* do programa!

- Qual o formato da entrada e qual deveria ser o formato da saída?
- O que a função `Map` deve fazer?
- O que a função `Reduce` deveria fazer?

EXEMPLO 1

- Qual o formato da entrada e qual deveria ser o formato da saída?

- O que a função `Map` deve fazer?

- O que a função `Reduce` deveria fazer?

EXEMPLO 1

- Qual o formato da entrada e qual deveria ser o formato da saída?
  - A entrada são pares (A, B) – quem citou e quem foi citado – ex: `3858241,956203`
  - A saída deveria ser algo como B foi citada em $A, C, D, \ldots$ ex: `956203 3858241,5312208,4944640, ...`
- O que a função `Map` deve fazer?
- O que a função `Reduce` deveria fazer?

EXEMPLO 1

- Qual o formato da entrada e qual deveria ser o formato da saída?
  - A entrada são pares (A, B) – quem citou e quem foi citado – ex: `3858241,956203`
  - A saída deveria ser algo como B foi citada em $A, C, D, \ldots$ ex: `956203 3858241,5312208,4944640, ...`
- O que a função `Map` deve fazer?
  - Quem foi citado é o dado principal. Nesse caso, ele deve ser a *chave* e quem o citou o seu *valor*; ou seja, o `map()` deve produzir o par (B, A).
- O que a função `Reduce` deveria fazer?

EXEMPLO 1

- Qual o formato da entrada e qual deveria ser o formato da saída?
  - A entrada são pares (A, B) – quem citou e quem foi citado – ex: `3858241,956203`
  - A saída deveria ser algo como B foi citada em $A, C, D, \ldots$ ex: `956203 3858241,5312208,4944640, ...`
- O que a função `Map` deve fazer?
  - Quem foi citado é o dado principal. Nesse caso, ele deve ser a *chave* e quem o citou o seu *valor*; ou seja, o `map()` deve produzir o par (B, A).
- O que a função `Reduce` deveria fazer?
  - Juntar todos os valores B que citam A

EXEMPLO 1

Método `map()`

```
public void map(Text key, Text value,
                OutputCollector<Text, Text> output,
                Reporter reporter) throws IOException
{
    output.collect(value, key);
}
```

Método `reduce()`

```
 public void reduce(Text key, Iterator<Text> values,
                    OutputCollector<Text, Text> output,
                    Reporter reporter) throws IOException
{
      String csv = "";
      while (values.hasNext()) {
          if (csv.length() > 0) csv += ",";
          csv += values.next().toString();
      }

      output.collect(key, new Text(csv));
 }
```

Note que
O mesmo programa do exemplo poderia ser utilizado em outros contextos

Relações entre:

- “comprador” e “vendedor”
- “funcionário” e “departamento”
- “fármaco” e “princípio ativo”
- etc.

EXEMPLO 2

E se eu quisesse contar o número de patentes que citam uma patente?

- Devo mudar o `map()`? Por quê?
- Devo mudar o `reduce()`? Por quê?
- O que cada uma dessas operações deve fazer?

EXEMPLO 2

```
public void reduce(Text key, Iterator<Text> values,
                   OutputCollector<Text, IntWritable>
                      output,
                   Reporter reporter)
{
    int count = 0;
    while (values.hasNext()) {
        values.next();
        count++;
    }
    output.collect(key, new IntWritable(count));
}
```

EXEMPLO 3

Dado um arquivo com dados meteorológicos, calcular a temperatura média **por mês**.

```
Data   Precipitacao;Temperatura; Umidade Relativa;
                                 Velocidade do Vento;
01/01/1990   15.5;22.24;88;1.766667;
02/01/1990   35.9;21.2;89.75;2.333333;
...
30/09/2013   0;18.34;91.25;1.54332;
01/10/2013   6.6;19.94;80.25;2.74368
```

- O que a função `Map` deve fazer?
- O que a função `Reduce` deve fazer?

MAP

```java
public static class MonthTempMapper
     extends Mapper<Text, Text, IntWritable, FloatWritable> {

  private IntWritable mes         = new IntWritable();
  private FloatWritable temperatura = new FloatWritable();

  public void map(Text key, Text value, Context context)
       throws IOException, InterruptedException
  {
    // key contém a data (dd/mm/aaaa)
    String   chave = key.toString();
    String[] valor = value.toString().split(";");

    if(chave.charAt(0) == '#' || valor.length != 4 || valor[1].isEmpty())
      return; // linha comentada ou com valor faltando

    // mês; as datas seguem o formato dd/mm/aaaa
    int mes = Integer.parseInt(chave.substring(3,5));

    // value contém os dados meteorológicos separados por ";"
    float temperatura = Float.parseFloat(valor[1]);

    context.write(new IntWritable(mes), new FloatWritable(temperatura));
  }
}
```

REDUCE

```
public static class AverageReducer
  extends Reducer<IntWritable,FloatWritable,Text,FloatWritable> {
  private FloatWritable media = new FloatWritable();

  public void reduce(IntWritable key, Iterable<FloatWritable> values,
                     Context context
                     ) throws IOException, InterruptedException {
    float sum = 0.0f;
    int length = 0;
    for (FloatWritable val : values) {
      sum += val.get();
length += 1;
    }

    media.set(sum/length);

    String[] nomeDoMes = {"Jan", "Fev", "Mar", "Abr", "Mai", "Jun",
                          "Jul", "Ago", "Set", "Out", "Nov", "Dez"};
    Text mes = new Text(nomeDoMes[key.get()-1]);

    context.write(mes, media);
  }
}
```

EXEMPLO 4

Um anagrama é uma palavra ou frase feita com as letras de outra (ex.: as palavras asco, caos, cosa, saco, soca são anagramas de caso).

Exemplo:
Dada uma lista de palavras, descobrir quais dentre elas são anagramas.

EXEMPLO 4

Como sempre...
Qual o *data flow* do programa?

- Qual o formato da entrada e qual deveria ser o formato da saída?
- O que a função `Map` deve fazer?
- O que a função `Reduce` deveria fazer?

MAP

```
public void map(LongWritable key, Text value,
    OutputCollector<Text, Text> outputCollector,
    Reporter reporter) throws IOException {

  String word = value.toString();
  char[] wordChars = word.toCharArray();
  Arrays.sort(wordChars);
  String sortedWord = new String(wordChars);
  sortedText.set(sortedWord);
  orginalText.set(word);
  outputCollector.collect(sortedText, orginalText);
}
```

REDUCE

```
public void reduce(Text anagramKey, Iterator<Text> anagramValues,
    OutputCollector<Text, Text> results, Reporter reporter)
     throws IOException {
  String output = "";
  while(anagramValues.hasNext())
  {
    Text anagam = anagramValues.next();
    output = output + anagam.toString() + "~";
  }
  StringTokenizer outputTokenizer = new StringTokenizer(output,"~");
  if(outputTokenizer.countTokens()>=2)
  {
    output = output.replace("~", ",");
    outputKey.set(anagramKey.toString());
    outputValue.set(output);
    results.collect(outputKey, outputValue);
  }
}
```

DESVANTAGENS DE MAPREDUCE

MapReduce não é um modelo de programação adequado para:

- processamento em tempo real
- aplicações que precisam realizar comunicação entre tarefas
- processamento de fluxo contínuo de dados
- aplicações que necessitam de garantias transacionais (OLTP)
- problemas difíceis de serem expressados com a abstração proporcionada pelo modelo MapReduce

REFERÊNCIAS

- Tom White. **Hadoop: The Definitive Guide**. Yahoo Press. ISBN: 9781449311520
- Chuck Lam. **Hadoop in Action**. Manning Publications. ISBN: 9781935182191
- Alfredo Goldman *et al.* Apache Hadoop: conceitos teóricos e práticos, evolução e novas possibilidades. Em: XXXI Jornadas de Atualização em Informática. Sociedade Brasileira de Computação, 2012. `http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/jai/2012/003.pdf`