

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INFORMÁTICA



# Estrategias de planificación para motores de búsqueda verticales

**Danilo Fernando Bustos Pérez**

Profesor Guía: Dra. Carolina Bonacic Castro  
Profesor Co-guía: Dr. Mauricio Marín Caihuán

Trabajo de Titulación presentado en conformidad  
a los requisitos para obtener el Título de  
Ingeniero Civil Informático

SANTIAGO DE CHILE  
2014

© Danilo Fernando Bustos Pérez

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

# AGRADECIMIENTOS



*A mis seres queridos*



# RESUMEN

El procesamiento de transacciones de lecturas en motores de búsqueda demanda el uso eficiente de recursos de hardware para hacer frente a altas y dinámicas cargas de trabajo por parte de los usuarios. Estos sistemas son generalmente desplegados en grupos de procesadores. A medida que la Web crece, los motores de búsqueda toman mayor importancia en la búsqueda de información dentro de grandes cantidades de datos.

En el presente trabajo se abordan diferentes estrategias de procesamiento y de planificación de transacciones de lectura enfocados principalmente en (1) el acceso a grandes índices invertidos para obtener el conjunto de los mejores  $K$  documentos para una consulta utilizando el algoritmo Wand, y (2) el uso de predictores de eficiencia para transacciones de lectura con el objetivo de reducir el tiempo de procesar lotes de consultas.

Los resultados obtenidos muestran...

**Palabras Claves:** recuperación de información, motores de búsqueda, Wand .

# ABSTRACT

Abstract—Processing queries in Web search engines demands the efficient use of hardware resources to cope with the scale and dynamics of user traffic. These systems are usually deployed on dedicated clusters of processors. As the Web becomes bigger, search engines are becoming increasingly important to find information in large amounts of data.

This work discusses different query processing and scheduling strategies, focused mainly on (1) access to large inverted index data structure to obtain the top  $K$  most pertinent results for any query, using Wand algorithm, and (2) the use of different efficiency predictors for queries in order to process batches of queries.

The results show...

**Keywords:** information retrieval, search engines, Wand .



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de Figuras	iv
Índice de Tablas	vi
Índice de Algoritmos	viii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes y motivación . . . . .	1
1.2. Descripción del problema . . . . .	4
1.3. Solución propuesta . . . . .	5
1.3.1. Características de la solución . . . . .	5
1.3.2. Propósito de la solución . . . . .	6
1.3.3. Alcances de la solución . . . . .	7
1.4. Objetivos del proyecto . . . . .	7
1.4.1. Objetivo general . . . . .	7
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	8
1.5. Metodología y herramientas a utilizar . . . . .	8
1.5.1. Metodología . . . . .	8
1.5.2. Herramientas a utilizar . . . . .	9
1.5.2.1. Herramientas de <i>software</i> . . . . .	10
1.5.2.2. Herramientas de <i>hardware</i> . . . . .	10
1.6. Organización del documento . . . . .	11
<b>2. Marco teórico</b>	<b>12</b>
2.1. Motores de búsqueda verticales . . . . .	12

<i>ÍNDICE DE CONTENIDOS</i>	ii
2.2. Índice invertido . . . . .	14
2.3. Estrategias de evaluación de transacciones de lectura . . . . .	15
2.3.1. <i>Term at a time</i> . . . . .	15
2.3.2. <i>Document at a time</i> . . . . .	16
2.4. Funciones de <i>Ranking</i> . . . . .	16
2.4.1. TF-IDF . . . . .	17
2.4.2. BM25 . . . . .	18
2.5. Operaciones sobre listas invertidas . . . . .	19
2.5.1. <i>OR</i> . . . . .	20
2.5.2. <i>AND</i> . . . . .	20
2.5.3. <i>Wand</i> . . . . .	21
2.5.4. <i>Block Max Wand</i> . . . . .	23
2.6. Predicción de tiempo de respuestas de transacciones de lecturas . . . . .	25
2.7. Scheduling en motores de búsqueda . . . . .	26
2.7.1. Trabajo relacionado . . . . .	29
<b>3. <i>Wand multi-threaded</i></b>	<b>31</b>
3.1. <i>Wand</i> con <i>heaps</i> locales . . . . .	33
3.2. <i>Wand</i> con <i>heap</i> compartido . . . . .	36
3.3. <i>Block max wand</i> . . . . .	38
<b>4. Métodos de predicción de rendimiento</b>	<b>43</b>
4.1. Método de predicción multilineal . . . . .	44
4.2. Método de predicción neuronal . . . . .	46
<b>5. Estrategias de planificación de consultas</b>	<b>48</b>
5.1. Estrategias por bloques . . . . .	49
5.1.1. Estrategia FR . . . . .	51

---

5.1.2. Estrategia Times . . . . .	53
5.1.3. Estrategia TimesRanges . . . . .	56
5.2. Estrategia <i>1TQ</i> . . . . .	58
5.3. Estrategia unidades de trabajo . . . . .	60
<b>6. Evaluación experimental</b>	<b>65</b>
6.1. Hardware y conjunto de datos . . . . .	65
6.2. Wand multithreaded . . . . .	66
6.2.1. Esquema LH . . . . .	66
6.2.2. Esquema SH . . . . .	69
6.2.3. Resultados obtenidos . . . . .	70
6.3. Predicción de tiempos . . . . .	73
6.4. Estrategias de scheduling . . . . .	73
<b>7. Conclusiones</b>	<b>75</b>
<b>Referencias</b>	<b>76</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Arquitectura típica de un motor de búsqueda. . . . .	13
2.2. Índice invertido. . . . .	15
2.3. Proceso de <i>scoring</i> de documento. . . . .	17
2.4. Operación OR. . . . .	20
2.5. Operación AND. . . . .	21
2.6. Ejemplo de ejecución de algoritmo Wand. . . . .	23
2.7. Ejemplo del proceso <i>Block-Max-Wand</i> . . . . .	24
2.8. Arquitectura de un sistema de recuperación de información con réplicas. . . . .	28
3.1. Diseño de clases para Wand y Block Max Wand. . . . .	32
3.2. Esquema de ejecución de algoritmo WAND con <i>heaps</i> locales. . . . .	33
3.3. Diagrama de clases para el esquema LH. . . . .	34
3.4. Esquema de ejecución de algoritmo WAND con <i>heap</i> compartido. . . . .	37
3.5. Diagrama de clases para el esquema SH. . . . .	38
3.6. Ejemplo de cómo opera la función <code>getNewCandidate()</code> . . . . .	41
5.1. Enfoque de planificación para estrategias por bloques. . . . .	50
5.2. Ejemplo de procesamiento de la estrategia FR. . . . .	53
5.3. Ejemplo de procesamiento de la estrategia Times. . . . .	56
5.4. Ejemplo de procesamiento estrategia 1TQ. . . . .	58
5.5. Ejecución en paralelo de <i>small jobs</i> . . . . .	59
5.6. Ejecución en paralelo de <i>large jobs</i> . . . . .	60
5.7. Procesamiento de consultas utilizando unidades de trabajo. . . . .	61
5.8. Esquema de ejecución estrategia unidades de procesamiento. . . . .	62

---

5.9. Diagrama de clases del ejecutador de unidades de procesamiento. . . . .	64
5.10. Diagrama de clases del planificador de unidades de procesamiento. . . . .	64
6.1. Esquema de ejecución enfoque LH. . . . .	68
6.2. Esquema de ejecución enfoque SH. . . . .	71
6.3. Tiempos promedios de las consultas. . . . .	72
6.4. Eficiencias para Wand con heaps compartido y locales. . . . .	73

# ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Resumen de los estadísticos para la predicción multilineal . . . . .	47
---	----



# ÍNDICE DE ALGORITMOS

3.1.	$BMW(\theta, L, docID) : BlockMaxWand$	42
5.1.	$schedulerFR :: assignQuery(L, Q) : Planificación de consulta$	52
5.2.	$schedulerTimes :: assignQuery(L, Q) : Planificación de consulta$	55
5.3.	$schedulerTimesRanges :: assignQuery(L, Q) : Planificación de consulta$	57



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

La *World Wide Web* es conocida como una gran telaraña mundial en la que existen millones de computadores conectados y la que desde el año 1993 crece exponencialmente, a tal punto que es incapaz de detectar sus propios cambios. A medida que pasa el tiempo y la Web sigue creciendo, los motores de búsqueda se convierten en una herramienta cada vez más usada e importante para los usuarios. Estas máquinas ayudan a los usuarios a buscar contenido dentro de la Web, puesto que conocen en cuáles documentos de ella aparecen qué palabras. Si estas máquinas no existieran, los usuarios estarían obligados a conocer los localizadores de recursos uniformes (*URL*) de cada uno de los sitios a visitar. Además, los motores de búsquedas en cierto modo conectan la Web, ya que existe un gran número de páginas que no tienen referencia desde otras, siendo el único modo de acceder a ellas a través de un motor de búsqueda (Baeza-Yates et al., 2008).

La tendencia actual es incluir lo que han llamado búsqueda en tiempo real, que consiste en incluir en los resultados de las búsquedas documentos actualizados en el pasado muy reciente, por ejemplo, en una ventana de tiempo de minutos. Esto permite incluir en los resultados de las búsquedas a sistemas muy activos respecto de publicación de nuevos documentos, tales como *Twitter*<sup>1</sup>. Esto presenta desafíos importantes para los motores de búsqueda puesto que no solo deben procesar eficientemente a decenas de miles de consultas por segundo, sino que también

---

<sup>1</sup><http://www.twitter.com>

deben permitir que sus índices invertidos (Zobel & Moffat, 2006) sean actualizados de manera concurrente con las consultas que llegan al sistema. Por lo tanto, es relevante diseñar estrategias que permitan administrar a decenas de miles de consultas de usuarios concurrentes por segundo y a la vez ser eficientes.

Típicamente, un motor de búsqueda de gran escala como *Google*<sup>2</sup> o *Yahoo!*<sup>3</sup>, recibe del orden de decenas de miles de consultas por segundo, a lo cual hay que sumarle la cantidad de actualizaciones a los datos en el índice. Esto genera cargas de trabajo que deben ser servidas por muchos procesadores organizados de manera de satisfacer dos métricas de eficiencias relevantes:

1. El tiempo de respuesta por operación. Este debe ser del orden de las pocas decenas de milisegundos en cada servicio, con el fin de poder responder al usuario en tiempos del orden de la fracción de segundo.
2. El número de transacciones de lectura y/o escrituras servidas por segundo (*throughput*), el cual no debe verse afectado con la intensidad de tráfico de operaciones que llegan al motor de búsqueda.

Los motores de búsquedas verticales hacen distinciones de tópicos específicos, estos son sometidos a la misma intensidad de trabajo que un motor de búsqueda horizontal como *Yahoo!*, la diferencia más importante entre ambos es que estos últimos poseen un índice invertido muy grande, es decir, que cada lista invertida tiene un tamaño lo suficientemente grande como para sustentar de manera eficiente el paralelismo. Por el contrario, esto no ocurre en el caso de motores de búsqueda verticales, donde la cantidad de documentos a ser indexados es menor que los que existen en la Web mundial.

Por otra parte, los procesadores actuales tienden a aumentar cada vez más la cantidad de núcleos, lo cual permite incrementar la cantidad de hilos o hebras de ejecución disponibles para procesar consultas. Un enfoque tradicional para realizar el procesamiento de consultas es

---

<sup>2</sup><http://www.google.com>

<sup>3</sup><http://www.yahoo.com>

asignar una hebra para resolver una consulta individual, aquí el paralelismo se logra procesando muchas consultas individuales en diferentes núcleos, una por cada hebra y se maximiza el número de consultas resolviéndose al mismo tiempo; sin embargo, esto hace que eventualmente una consulta se demore mucho tiempo en ser resuelta. Un enfoque alternativo es utilizar todos los hilos de ejecución disponibles en una máquina para resolver cada transacción de lectura que llega al sistema, de esta forma se minimizaría el tiempo de resolución por consulta, sin embargo, esta resolución es secuencial. Quizás sea mejor un punto intermedio en que se pueda resolver consultas a un tiempo considerable y a la vez paralelizar el procesamiento de transacciones de lectura.

Hoy en día los motores de búsquedas junto con sus centros de datos consumen el 2 % de la energía mundial, y se espera que en los próximos años esta cifra aumente alrededor del 30 %, puesto que la Web se duplica cada ocho meses y el número de nuevos usuarios que se conectan a esta crece año a año, para lo cual se hace casi inevitable el aumento de máquinas (*hardware*) en los centros de procesamiento de datos. Es por esto que se hace imprescindible diseñar e implementar algoritmos que trabajen en paralelo, para de esta forma mejorar el *throughput* de los motores de búsqueda, así se podrá resolver transacciones de manera más rápida en períodos de altas cargas de trabajo y apagar aquellos servidores que fueron prendidos durante estos períodos. Llegar a soluciones que aporten a mejorar el tiempo de respuesta de una transacción de lectura y el *throughput* de un motor de búsqueda, requiere conocimientos de diferentes áreas de la ciencia de la computación como por ejemplo: Recuperación de información, computación paralela, compresión de datos, *scheduling*, entre otras.

Los desafíos expuestos anteriormente hace que exista una comunidad activa intentando encontrar soluciones eficientes para sistemas de recuperación de información como los motores de búsqueda.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para proporcionar un tiempo de respuesta adecuado a cada una de las consultas de los usuarios, los motores de búsquedas garantizan una cota superior de tiempo para la respuesta a una consulta (Jeon et al., 2014). Para un motor de búsqueda es muy importante reducir el tiempo de ejecución de aquellas consultas que tomarán mucho tiempo en ser resueltas, esto es muchas veces más importante que reducir el tiempo medio de respuesta (Dean & Barroso, 2013). Por lo anteriormente descrito, se plantea la siguiente pregunta que guía el presente trabajo: “¿Es posible diseñar un modelo de procesamiento y de planificación de transacciones de lectura que (1) asegure una cota superior de tiempo de respuesta para las consultas de los usuarios, y (2) minimice el tiempo en procesar lotes de consultas?”.

Los motores de búsqueda utilizan un método multihilo llamado Wand para obtener el conjunto de los mejores documentos (conjunto *top-K*) para una transacción de lectura, el cual posee dos enfoques: (1) Con *heap* locales, en el que cada hebra procesa una parte del índice invertido y obtiene su propio conjunto *top-K*, posteriormente la hebra maestra hace la combinación de resultados para obtener el conjunto final; (2) Con *heap* compartido, en el que cada hebra procesa una parte del índice invertido y cada vez que ella encuentra un documento que debe estar dentro del conjunto *top-K* final, se pide acceso exclusivo al *heap* compartido y se inserta. Existen trabajos en donde se estudia ambos enfoques (Rojas et al., 2013), sin embargo, aún no es posible ser categórico en decir cuál enfoque es mejor que otro. Por lo tanto, para poder crear un modelo eficiente de procesamiento y de planificación de transacciones de lectura, primero se debe analizar ambos enfoques y decidir cuál se ajusta de mejor forma al presente contexto.

Decidir si utilizar una o todas las hebras de una máquina para resolver una transacción de lectura dependerá de los objetivos del sistema de recuperación de información, generalmente estos dos enfoques son limitados. Encontrar un punto medio en donde se pueda cumplir con

(1) una cota superior aceptable de tiempo para responder a cada consulta y (2) tener un buen *throughput*, es un desafío importante para un motor de búsqueda. Por lo tanto, a través del presente trabajo se intenta encontrar una forma de asignación eficiente de hebras a consultas de manera tal que se cumplan los dos requerimientos mencionados anteriormente.

## 1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta en este trabajo consta del diseño e implementación de estrategias de planificación de transacciones de lectura para motores de búsqueda vertical. A su vez, la estrategia generada como solución tiene como foco principal una sola máquina, en donde el procesamiento de consultas debe explotar el paralelismo liviano.

### 1.3.1 Características de la solución

La solución propuesta incluye la implementación de un método de predicción de tiempo de respuesta a transacciones de lectura para la asignación eficiente de hilos de ejecución, con el objetivo de reducir el tiempo de procesamiento de las consultas.

Se implementaron dos modelos de procesamiento paralelo de consulta basado en el método Wand: Con *heap* compartido y *heaps* locales. De esta manera el sistema es flexible para trabajar con una o más hebras.

Se diseñó una estrategia capaz de reordenar dinámicamente las transacciones que llegan

al procesador.

Finalmente, se reunió en un solo esquema las mejores soluciones anteriormente descritas, y mediante experimentación se evaluó el rendimiento y efectividad de esta nueva estrategia. Se encontró el esquema óptimo de solución con las implementaciones descritas.

La métrica a optimizar es el número de consultas resueltas por unidad de tiempo, garantizando un tiempo de respuesta individual menor a una cota superior establecida y el tiempo medio en resolver conjuntos de transacciones. Por lo tanto, si se diseña una estrategia de procesamiento de consultas que le permita a cada máquina alcanzar una mayor tasa de resolución, la recompensa puede ser una reducción del total de nodos desplegados en producción.

### 1.3.2 Propósito de la solución

El primer propósito de la solución es asegurar una cota superior de tiempo en las respuestas de las consultas que llegan al motor de búsqueda, esto implica entregar al usuario tiempos aceptables en sus búsquedas.

Un segundo propósito de la solución es reducir el tiempo de procesamiento de lotes de transacciones de lectura. Esto traería como beneficio alcanzar un uso más eficiente de los recursos asignados a las operaciones de un motor de búsqueda en un centro de datos, ya que los procesadores serán utilizados de manera más eficiente, esto implicaría que un motor de búsqueda vertical estará preparado de mejor forma para resolver flujos grandes de transacciones y los tiempos en resolver cada transacción será menor.

Finalmente, se espera proveer un modelo de procesamiento y planificación de transacciones de lectura para un motor de búsqueda que sea flexible a la actualización concurrente de su índice invertido. De esta forma se permitirá incluir en las respuestas de las consultas de contenido

creado en el pasado muy reciente.

### **1.3.3 Alcances de la solución**

En la solución propuesta no se considera un sistema distribuido de procesamiento de consultas en donde existe un costo de comunicación entre las máquinas, sino que la resolución de consultas se llevará a cabo en una máquina distribuyendo la carga en sus unidades de procesamiento.

## **1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar, desarrollar, comparar y evaluar estrategias de procesamiento y planificación de transacciones de lectura para motores de búsqueda verticales para la Web. Estas deben ser capaces de resolver de manera eficiente el problema de procesar decenas de miles de consultas, asegurando una cota superior de tiempo de respuesta en cada operación.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Desarrollar algoritmos paralelos de procesamiento de transacciones de lectura que sean eficientes.
- Obtener estrategias *online* que permitan realizar la gestión eficiente de hebras a través de algoritmos que se ajusten a los tamaños de las estructuras de datos involucrados en el procesamiento de las transacciones de lectura.
- Obtener estrategias de reordenamiento dinámico de transacciones de lectura que lleguen a un procesador con múltiples núcleos.
- Obtener un modelo de costo que permita analizar la eficiencia y escalabilidad de las estrategias diseñadas en motores de búsqueda verticales.

## 1.5 METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS A UTILIZAR

### 1.5.1 Metodología

El presente trabajo posee un enfoque investigativo, en donde en primera instancia se busca en la literatura las estrategias de planificación de carácter teórico que existen, se genera un diseño adaptado al entorno de un motor de búsqueda para ser implementado. Luego estas



estrategias son evaluadas, y en base a observación y experimentación, se buscan oportunidades de mejora de ellas, para posteriormente compararlas bajo ciertos parámetros establecidos.

Antes de comenzar la investigación de las diferentes estrategias de planificación, se construye el entorno de un motor de búsqueda, esto implica (1) el diseño, desarrollo y evaluación de diferentes métodos de procesamiento de transacciones de lectura, y (2) implementación y evaluación de métodos predictores de eficiencia para transacciones de lectura.

Bajo dicha perspectiva de trabajo, el método científico es particularmente útil para guiar la totalidad del trabajo. Adicionalmente para las etapas del presente trabajo en donde se requiera la construcción de *software*, se utilizará una metodología que consta de cuatro fases: (1) Concepción, en donde se estudian las variables involucradas y se establecen los requerimientos principales; (2) Elaboración, en la cual se diseña los modelos y componentes involucrados; (3) Construcción, en donde se implementa lo definido en la fase de elaboración; (3) Transición, etapa en la cual se reúne los resultados obtenidos y se hacen ajustes si es necesario.

### 1.5.2 Herramientas a utilizar

Las herramientas a utilizar se dividen en herramientas de *software* y *hardware*, a continuación se describe las utilizadas en el desarrollo del trabajo.

*1.5.2.1 Herramientas de software*

Para la escritura de documento se utilizan las siguientes herramientas:

1. Sistema operativo OS X Yosemite 10.10.
2. Texmaker.
3. Apache OpenOffice 4.0.1.
4. Gnuplot 4.2.

Para el desarrollo de los experimentos:

1. Fedora 13 (goddard).
2. GCC 4.4.5.
3. Editor de texto VIM.

*1.5.2.2 Herramientas de hardware*

El desarrollo y ejecución se lleva a cabo en una máquina del laboratorio *Yahoo! Research* Santiago de Chile con las siguientes características:

1. Intel Xeon E5620 2.4 GHz, el cual consiste de 8 núcleos físicos y tecnología *hyperthreading*.
2. 90Gb de RAM.

## 1.6 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El presente documento se divide en 7 capítulos. En el primer capítulo se presenta la problemática y la solución respectiva; además se muestran los objetivos y la metodología a utilizar. En el segundo capítulo se expone los conceptos teóricos involucrados. Durante el tercer capítulo se aborda los métodos de procesamiento de transacciones de lectura utilizados, explicando en detalle cómo funciona cada uno de ellos y presentando el diseño creado para su posterior implementación. En el cuarto capítulo se muestran los métodos predictores de eficiencia para transacciones de lectura implementados. En el quinto capítulo se presenta el diseño y esquemas de ejecución para cada una de las estrategias de planificación abordadas. En el capítulo seis se explica la fase de experimentación y se muestra los resultados obtenidos para las diferentes estrategias de planificación bajo diferentes métodos de procesamiento de consultas y diferentes conjunto de datos. Finalmente en el capítulo siete se exponen las respectivas conclusiones obtenidas a partir del presente trabajo.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los conceptos teóricos del presente trabajo de tesis. Primero se explica qué es un motor de búsqueda vertical. Luego se definen las estrategias de evaluación de transacciones de lectura, también conocidas como consultas o *queries*. Posteriormente se describen las diferentes operaciones sobre listas invertidas. Finalmente se explica el concepto de *ranking*.

### 2.1 MOTORES DE BÚSQUEDA VERTICALES

Un motor de búsqueda está construido por diversos componentes, su arquitectura típica se puede ver en la Figura 2.1. Existe un proceso denominado *crawling*, éste posee una tabla con los documentos iniciales en los que se extrae el contenido de cada uno de ellos. A medida que el *crawler* comienza a encontrar enlaces a otros documentos, la tabla de documentos a visitar crece. El contenido que se extrae en el procedimiento de *crawling* es enviado al proceso de indexamiento, este se encarga de crear un índice de los documentos ya visitados por el *crawler* (Croft et al., 2009).

Dado el volumen de datos involucrado en el procesamiento, se debe tener una estructura de datos que permita encontrar cuáles documentos contienen las palabras presentes en la búsqueda que llega al sistema. Todo esto dentro de un período de tiempo aceptable. El índice invertido (Zobel & Moffat, 2006) es una estructura de datos que contiene un diccionario con todas las palabras que el proceso de *crawling* ha encontrado, asociado a cada palabra se tiene una lista de

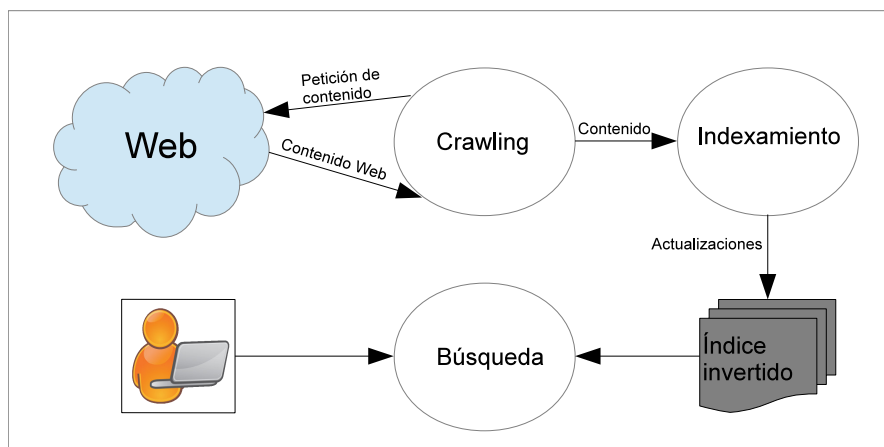


FIGURA 2.1: Arquitectura típica de un motor de búsqueda.

todos los documentos en donde esta palabra aparece mencionada (conocida como lista invertida de un término). El motor de búsqueda construye esta estructura con el objetivo de acelerar el proceso de las búsquedas que llegan al sistema. El proceso de búsqueda es el encargado de recibir las transacciones de lectura, generar un *ranking* de los documentos que contienen las palabras de la consulta y finalmente generar una respuesta. Las diversas formas de calcular la relevancia de un documento será explicado en secciones posteriores.

En un motor de búsqueda se pueden encontrar diversos servicios tales como (a) cálculo de los mejores documentos para una cierta consulta; (b) construcción de la página Web en la que se mostrará al usuario los resultados; (c) publicidad relacionada con las transacciones de lectura; (d) sugerencias en el momento que el usuario está escribiendo la consulta en el sistema; entre muchos otros servicios.

En los sistemas de recuperación de información como los motores de búsqueda, lo que se hace hoy en día es agrupar computadores para procesar una transacción y obtener la respuesta para ésta. Este conjunto de computadores recibe el nombre de *cluster* (Dean, 2009).

La diferencia entre un motor de búsqueda vertical y uno general, es que el primero se centra solo en un contenido específico de la Web (Gil-Costa et al., 2013). El *crawler* debe extraer contenido solo de aquellas páginas Web que están dentro del dominio permitido. Al

ser un dominio acotado, los documentos a procesar serán menos y por lo tanto, la lista de los términos del índice invertido serán eventualmente de menor tamaño. Sin embargo, en un motor de búsqueda vertical las actualizaciones al índice invertido ocurren con mayor frecuencia.

## 2.2 ÍNDICE INVERTIDO

Es una estructura de datos que contiene todos los términos (palabras) encontrados por el *crawler*. A cada uno de los términos está asociado una lista invertida de documentos (páginas Web) que contienen dicho término. Adicionalmente, se almacena información que permita realizar el *ranking* de documentos para generar la respuesta a las consultas que llegan al sistema, por ejemplo, el número de veces que aparece el término en el documento.

Para construir un índice invertido (Baeza-Yates & Ribeiro-Neto, 2011; Salton & McGill, 2003) se debe procesar cada palabra que existe en un documento, registrando su posición y la cantidad de veces que éste se repite. Cuando se procesa el término con la información asociada correspondiente, se almacena en el índice invertido (ver Figura 2.2).

El tamaño del índice invertido crece rápido y eventualmente la memoria RAM se agota antes de procesar toda la colección de documentos. Cuando la memoria RAM se agota, se almacena en disco el índice parcial, se libera la memoria y se continúa con el proceso. Además, se debe hacer un *merge* de los índices parciales uniéndolos las listas invertidas de cada uno de los términos involucrados. Es por esto que se han desarrollado algunas técnicas de compresión con el objetivo de guardar de una manera más eficiente el índice invertido (Arroyuelo et al., 2013; Baeza-Yates & Ribeiro-Neto, 2011; Yan et al., 2009).

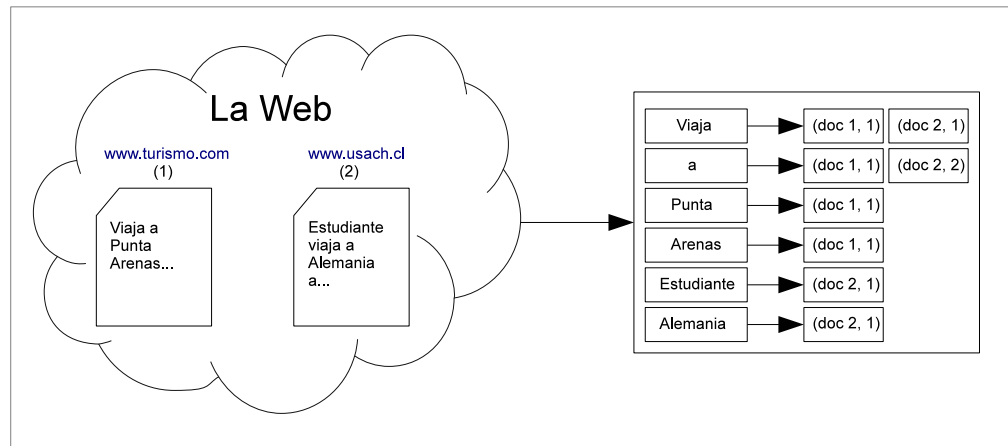


FIGURA 2.2: Índice invertido.

## 2.3 ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN DE TRANSACCIONES DE LECTURA

Una de las tareas que un motor de búsqueda debe hacer para resolver una consulta es calcular el puntaje o *score* para aquellos documentos relevantes en la consulta y así poder extraer los mejores  $K$  documentos. Existen dos principales estrategias para recorrer las listas invertidas y calcular el puntaje de los documentos para una determinada consulta. Estas son (a) *term-at-a-time* (Buckley & Lewit, 1985; Turtle & Flood, 1995) y (b) *document-at-a-time* (Broder et al., 2003; Turtle & Flood, 1995).

### 2.3.1 *Term at a time*

Abreviada TAAT, este tipo de estrategia procesa los términos de las consultas una a una y acumula el puntaje parcial de los documentos. Las listas invertidas asociadas a un término

son procesadas secuencialmente, esto significa que todos los documentos presentes en la lista invertida del término  $t_i$  obtienen un puntaje parcial antes de comenzar el procesamiento del término  $t_{i+1}$ . La secuencialidad en este caso es con respecto a los términos contenidos en la transacción de lectura.

### 2.3.2 *Document at a time*

Abreviada DAAT, en este tipo de estrategias se evalúa la contribución de todos los términos de la transacción de lectura con respecto a un documento antes de evaluar el siguiente. Las listas invertidas de cada término de la consulta son procesadas en paralelo, de modo que el puntaje del documento  $d_j$  se calcula considerando todos los términos de la transacción de lectura al mismo tiempo. Una vez que se obtiene el puntaje del documento  $d_j$  para la consulta completa, se procede al procesamiento del documento  $d_{j+1}$ . Este tipo de estrategia posee dos grandes ventajas: (a) Requieren menor cantidad de memoria para su ejecución, ya que el puntaje parcial por documento no necesita ser guardado y (b) Explotan el paralismo de entrada y salida (I/O) más eficientemente procesando las listas invertidas en diferentes discos simultáneamente.

## 2.4 FUNCIONES DE *RANKING*

Los sistemas de recuperación de información como los motores de búsqueda deben ejecutar un proceso el cual asigna puntaje a documentos con respecto a una determinada transacción



de lectura, este proceso se denomina *ranking* (Baeza-Yates & Ribeiro-Neto, 2011). Como se puede ver en la Figura 2.3, este proceso toma como entrada la representación de las consultas y documentos, y asigna un *score* a un documento  $d_j$  dada una consulta  $q_i$ .

Un motor de búsqueda guarda billones de documentos que están formados por términos o palabras, dentro de estos términos no todos poseen la misma utilidad para describir el contenido del documento. Determinar la importancia de una palabra en un documento no es tarea sencilla, para ello se asocia un peso positivo  $w_{i,j}$  a cada término  $t_i$  del documento  $d_j$ . De esta forma, para un término  $t_i$  que no aparezca en el documento  $d_j$  se tendrá  $w_{i,j} = 0$ . La asignación de pesos a los términos permite generar un *ranking* numérico para cada documento en la colección.

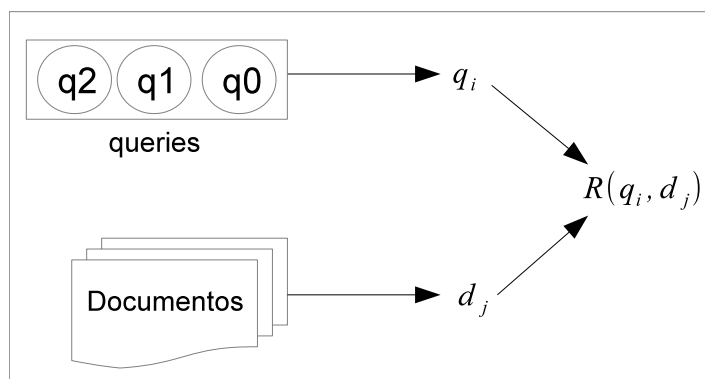


FIGURA 2.3: Proceso de *scoring* de documento.

### 2.4.1 TF-IDF

*Tf - idf* (*term frequency - inverse document frequency*) es un estadístico que tiene por objetivo reflejar cuán importante es una palabra para un documento en una colección o corpus. Este estadístico se divide en dos partes, el primero corresponde a la frecuencia del término en un documento (*tf*) y que en su versión más sencilla se utiliza la frecuencia bruta del término

$t$  en el documento  $d$  ( $f(t, d)$ ) dividido por la frecuencia de la palabra que más se repite en el documento  $d$ .

$$tf(t, d) = \frac{f(t, d)}{\max f(w, d) : w \in d} \quad (2.1)$$

El segundo término corresponde a la frecuencia inversa de documento ( $idf$ ) y se utiliza para observar si es que el término es común en el corpus. El  $idf$  se obtiene calculando el logaritmo de la división entre el número total de documentos del corpus y el número de documentos que contienen el término.

$$idf(t, D) = \log \frac{|D|}{1 + |d \in D : t \in d|} \quad (2.2)$$

De esta forma a partir de (2.1) y (2.2) se obtiene finalmente el  $tf - idf$ :

$$tf - idf(t, d, D) = tf(t, d) * idf(t, D) \quad (2.3)$$

Notar en (2.3) que el estadístico incrementa proporcionalmente al número de veces que la palabra aparece en el documento, sin embargo, es compensado por la frecuencia de la palabra en la colección completa de documentos o corpus. Esta compensación ayuda a controlar el hecho de que algunas palabras son generalmente más comunes que otras.

### 2.4.2 BM25

Es una función de *ranking* de documentos basada en los términos que aparecen en la consulta que llega al motor de búsqueda. *BM25* pertenece a una amplia gama de funciones

de puntuación y está basada en los modelos probabilísticos de recuperación de información (Baeza-Yates & Ribeiro-Neto, 2011).

Dada una consulta  $Q$  que contiene los términos  $q_1, \dots, q_n$ , el *ranking BM25* del documento  $D$  se calcula como:

$$score(D, Q) = \sum_{i=1}^n IDF(q_i) * \frac{f(q_i, D) * (k + 1)}{f(q_i, D) + k * (1 - b + b * \frac{|D|}{prom(docs)})} \quad (2.4)$$

En donde:  $f(q_i, D)$  es la frecuencia en que aparece el término  $q_i$  en el documento  $D$ ;  $|D|$  es el número de palabras o términos en el documento  $D$ ;  $prom(docs)$  es la media de número de palabras de los documentos en el corpus;  $k$  y  $b$  son constantes que depende de las características del corpus en el que se está haciendo la búsqueda, por lo general se asignan los valores de  $k = 2$  o  $k = 1.2$  y  $b = 0.75$ ; finalmente,  $IDF(q_i)$  es la frecuencia inversa de documento para el término  $q_i$ .

## 2.5 OPERACIONES SOBRE LISTAS INVERTIDAS

Cuando una consulta llega al motor de búsqueda, cada término tiene asociado una lista con todos los documentos en los cuales aparece. El sistema debe decidir qué documentos se analizarán para obtener la respuesta y entregársela al usuario. A continuación se presenta los modos de operar las listas invertidas para una cierta transacción de lectura.

### 2.5.1 OR

Este operador toma las listas invertidas de cada uno de los términos de la transacción de lectura y ejecuta la disyunción entre ellas. El resultado de este operador es una lista invertida con todos los documentos que contengan al menos un término de la consulta. Finalmente, esta lista invertida se ocupará para obtener los mejores K documentos. Un simple ejemplo se muestra en la Figura 2.4.

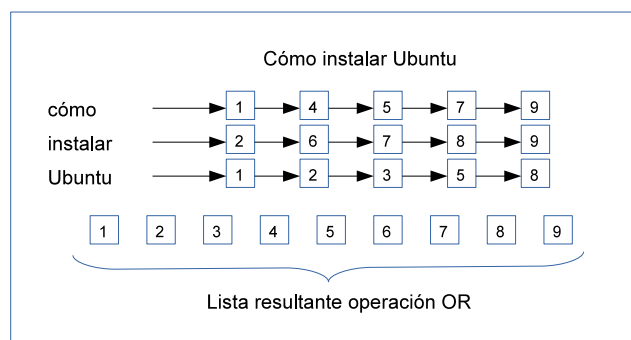


FIGURA 2.4: Operación OR.

### 2.5.2 AND

Este operador ejecuta la conjunción entre las listas invertidas de los términos de una transacción de lectura. Se obtiene una lista invertida con los documentos que contengan todos los términos de la consulta. Se debe notar que aquí se obtiene una lista resultante de menor tamaño que la obtenida en el operador OR (Ver Figura 2.5).

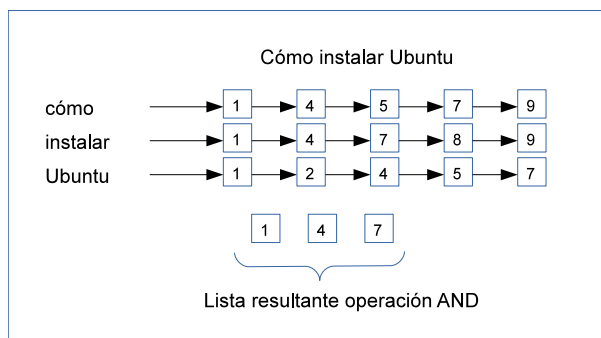


FIGURA 2.5: Operación AND.

### 2.5.3 Wand

Algoritmo de evaluación de transacciones de lectura para obtener eficientemente el conjunto de  $K$  documentos que mejor satisfacen una consulta dada. WAND (Broder et al., 2003) es un proceso menos estricto que el método *AND* y está basado en dos niveles. Dentro del proceso de evaluación de una transacción de lectura, uno de los procesos más costosos en términos de tiempo es el de *scoring*, el cual consiste en entregarle a cada uno de los documentos analizados un puntaje que representa la relevancia de estos para una transacción de lectura dada, esto se denomina evaluación completa o cálculo del puntaje exacto del documento. El objetivo de WAND es minimizar la cantidad de evaluaciones completas de los documentos ejecutando un proceso de dos niveles. En el primer nivel se intenta omitir rápidamente grandes porciones de las listas invertidas, lo que se traduce en ignorar el cálculo del puntaje exacto de grandes cantidades de documentos, debido a que en motores de búsqueda a gran escala, este es un proceso que requiere de mucho tiempo para llevarse a cabo y depende de factores como la cantidad de ocurrencia del término dentro del documento, el tamaño del documento, entre otros. A este tipo de técnicas que intenta omitir partes de lista invertida se les conoce como técnica de poda dinámica (Broder et al., 2003; Persin, 1994; Turtle & Flood, 1995).

Para llevar a cabo el algoritmo WAND y así reducir el número de documentos

completamente evaluados durante el proceso de *ranking*, se necesita calcular los valores estáticos de límite superior (*upper-bounds*), en donde para cada uno de los términos del índice invertido, se toma la lista invertida correspondiente y se extrae el puntaje máximo de contribución de algún documento con respecto al término. El cálculo de los *upper bounds* se lleva a cabo cuando se construye el índice invertido y en donde a cada término del índice se asocia el puntaje máximo que existe en la lista invertida.

WAND usa un índice invertido ordenado por los identificadores de documentos. En el primer nivel se itera sobre los documentos del índice invertido de cada término y se identifican los potenciales candidatos usando una evaluación aproximada. En el segundo nivel, aquellos documentos candidatos son completamente evaluados y su puntaje exacto es calculado. De esta forma se obtiene el conjunto final de documentos. Se utiliza un heap como estructura de datos para almacenar el conjunto de los mejores  $K$  documentos, en donde el elemento superior corresponde al documento con menor puntaje y es el que se utilizará como umbral (*threshold*) para decidir si los siguientes documentos deben ser completamente evaluados o no.

En la Figura 2.6 se puede ver un ejemplo sencillo de cómo el algoritmo Wand trabaja en la resolución de una transacción de lectura de tres términos: 'casa', 'perro' y 'gato'. Como la consulta está compuesta por tres términos, existen tres punteros que recorren cada una de las listas invertidas (notar que cada puntero recorre una lista invertida diferente). Lo primero que se hace es ordenar las listas invertidas de acuerdo a los identificadores de documentos que se están apuntando, razón por la cual en la Figura 2.6 la lista invertida de 'casa' (puntero referenciando al documento con identificador 125), aparece primero que la lista invertida de 'perro' (puntero haciendo referencia al documento con identificador 503). Luego se suma los *upper bounds* de los términos en orden hasta que se obtiene un valor mayor o igual al *threshold*. De esta manera el término 'perro' es escogido como término pivote ( $2.0 + 4.4 \geq 5.7$ ) y el actual documento al cual se está apuntando es escogido como documento pivote (documento con identificador 503). Si las dos primeras listas invertidas no contienen el documento 503 entonces se procede a seleccionar

el siguiente pivote, en otro caso se calcula el puntaje completo del documento. Finalmente, si el puntaje es mayor o igual al *threshold*, se actualiza el *heap* eliminando el elemento superior y se añade el nuevo documento. Este algoritmo es repetido hasta que no hayan más documentos a procesar o hasta que no exista un documento que supere el actual *threshold*. De esta manera se evita procesar las listas completas (Blanco & Barreiro, 2010).

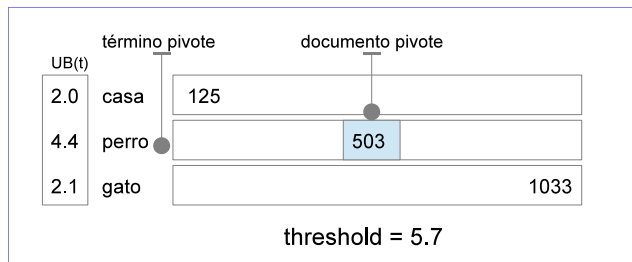


FIGURA 2.6: Ejemplo de ejecución de algoritmo Wand.

### 2.5.4 Block Max Wand

Como se explicó en la sección anterior, la diferencia entre un método exhaustivo de evaluación de documentos y el método Wand, es que este último es una técnica DAAT de poda dinámica (Moffat & Zobel, 1996) en la que se intenta omitir la mayor cantidad de evaluaciones de documentos haciendo uso de una estrategia de movimientos de punteros pivotes. Bajo la premisa que Wand tradicional es limitado por el hecho que usa los máximos puntajes de las listas invertidas (*Upper bounds*) para podar, puesto que estos pueden ser mucho más grandes que el promedio de puntaje en ellas, se propone un método llamado *Block-Max-Wand* (BMW) (Ding & Suel, 2011). Este método utiliza una estructura de datos llamada índice *Block-Max*, en donde el índice invertido estará particionado en bloques y para cada bloque se almacena la máxima contribución de algún documento dentro del bloque. En otras palabras, se tendrán

tantos *upper bounds* locales como bloques existan en la lista invertida.

Este método utiliza una variación del algoritmo Wand tradicional para que trabaje correctamente con la nueva estructura *Block-Max-Wand*. Remplazar el uso de los *upper bounds* de cada bloque por el *upper bound* global no garantiza la correctitud del algoritmo. En la Figura 2.7 se muestra un ejemplo de por qué mirar solo los *upper bounds* locales no garantiza obtener los resultados correctos, aquí no se puede concluir que el documento 4868 es el documento más pequeño que puede estar dentro del conjunto *top-K*, ya que  $2.5 + 2.0 + 3.5 \geq 7.0$  (conclusión que sí es válida utilizando Wand tradicional y *upper bounds* globales), porque es posible que el bloque siguiente al bloque del docID 275 (en la primera lista), tenga un *upper bound* local mayor. Por lo tanto, aplicar solo las máximas contribuciones por bloque no permite al algoritmo omitir documentos de forma segura.

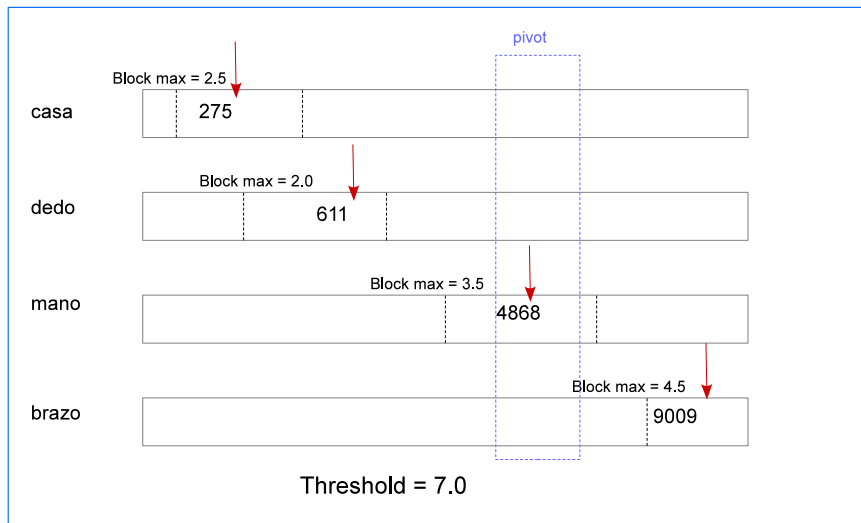


FIGURA 2.7: Ejemplo del proceso *Block-Max-Wand*.



## 2.6 PREDICCIÓN DE TIEMPO DE RESPUESTAS DE TRANSACCIONES DE LECTURAS

El rendimiento (*performance*) de una consulta puede medirse de dos formas: Efectividad y eficiencia. La efectividad tiene relación con la calidad de los documentos extraídos para una cierta consulta y la eficiencia corresponde al tiempo que conlleva procesarla. El tiempo que le toma al sistema en resolver una consulta puede variar considerablemente. Con el objetivo de retornar los resultados al usuario dentro de una cota superior de tiempo, en aquellas consultas que toman una mayor cantidad de tiempo en ser procesadas se requiere una mayor cantidad de procesadores para resolverla, de esta forma podemos asegurar esta cota de tiempo. El tener un buen predictor de la eficiencia de una transacción de lectura es muy útil, por ejemplo, si pensamos en un sistema con réplicas, podemos planificar la consulta en el servidor que se desocupará más pronto.

Existen estudios en los cuales el rendimiento es inferido usando *clarity score* (Cronen-Townsend et al., 2002), que es una forma para evaluar la pérdida de ambigüedad de una transacción con respecto a la colección. En (He & Ounis, 2004) se propone un conjunto de predictores para el rendimiento de cada consulta. Técnicas de aprendizaje de máquina también han sido estudiadas para predecir el rendimiento de transacciones de lectura (Si & Callan, 2002). Todos los estudios mencionados anteriormente se han centrado en la efectividad para hacer predicciones de rendimiento de transacciones de lectura. La eficiencia de una transacción de lectura también ha sido objeto de estudio, identificando las principales razones que tienen impacto sobre el tiempo de respuesta y evaluando estos factores para predecir el comportamiento de futuras consultas (Tonello et al., 2011). En (Macdonald et al., 2012) se propone un método de predicción de tiempo de respuesta para consultas basado en datos estadísticos disponibles en las respectivas listas invertidas de los términos. Finalmente, en (Jeon et al., 2014) además de utilizar estadísticos disponibles en las listas invertidas de los términos, se agregan estadísticos

propios de las consultas para la creación de un predictor.

## 2.7 SCHEDULING EN MOTORES DE BÚSQUEDA

Los motores de búsqueda no solo se preocupan de la calidad de los resultados de las búsquedas (efectividad), sino que también de la velocidad con la que los resultados son obtenidos (eficiencia). Existen varias estrategias para mejorar la velocidad en la obtención de los resultados, una de ellas muy utilizada es el *caching*. Consiste en guardar en memoria de acceso rápido (memoria caché) datos temporales, que luego pueden ser sobrescritos. Una opción es hacer *caching* de los resultados de las búsquedas, de esta forma cuando una consulta es encontrada en caché el motor de búsqueda puede generar la respuesta rápidamente, reduciendo considerablemente los tiempos de calculos. Otra opción es, guardar en caché la intersección de las listas invertidas de pares comunes de términos que llegan al motor de búsqueda. Por ejemplo, si llega al sistema una consulta con los términos (“casa”, “árbol”, “perro”), se puede guardar en caché la intersección de las listas de “casa” y “árbol”, para luego reutilizar esta información en otras consultas que lleguen en el futuro. Para ver más técnicas de *caching* y ver el detalle de las técnicas mencionadas, ver (Büttcher et al., 2010).

Otra estrategia para acelerar el proceso de resolución de transacciones de lectura que llegan al sistema es el uso de algoritmos de planificación (*scheduling*). Un algoritmo de *scheduling* es el proceso en el cual se cambia el orden en que llegan las consultas al motor de búsqueda con el objetivo de mejorar la eficiencia.

Existen dos clases de algoritmos de *scheduling*: estáticos y dinámicos. Los estáticos son aquellos en que se conoce el conjunto completo de tareas y las características de cada una de

ellas, como por ejemplo, el tiempo de procesamiento. Los algoritmos de *scheduling* dinámicos son aquellos en que no se conoce las tareas que llegarán en el futuro y también se desconoce el momento en que éstas llegarán. La filosofía de los algoritmos de *scheduling* dinámicos es ajustarse a los cambios que pueden haber en el sistema.

En el contexto del presente trabajo de tesis, el objetivo de hacer *scheduling* es minimizar el tiempo en que las consultas son procesadas por un motor de búsqueda. Los motores de búsqueda como *Google*<sup>1</sup> o *Yahoo!*<sup>2</sup> trabajan en un contexto *online*. Esto significa que cuando las consultas llegan al sistema (una a una), éste está obligado a tomar una decisión para planificarla sin saber cuáles transacciones de lectura llegarán en un momento posterior. A esto se le conoce como algoritmo de *scheduling online* (Albers, 2003; Borodin & El-Yaniv, 1998).

Los sistemas de recuperación de información a gran escala despliegan una arquitectura distribuída (Dean, 2009), en donde el índice invertido está particionado (Barroso et al., 2003) a lo largo de servidores (*shard servers*), los cuales están encargados de procesar las transacciones de lectura que llegan al sistema. Es fácil notar que resolver una consulta con varios *shard servers* mejoraría la eficiencia. Ahora bien, para asegurar un alto rendimiento (*throughput*) del sistema, cada uno de los *shard servers* poseen réplicas, de esta forma más consultas pueden ser procesadas en paralelo en copias idénticas del mismo *shard server*. Esto implica que el tiempo de espera de las transacciones de lectura que vienen llegando al sistema se reduce.

En un sistema con arquitectura como el de la Figura 2.8, una transacción de lectura puede ser procesada por varios *shard servers*, el *broker* debe escoger la réplica más apropiada para procesar la parte de la consulta asignada al *shard server*, con el objetivo de reducir el tiempo de espera de ésta. El *broker* podría seleccionar el *shard server* con el menor número de consultas en la cola, sin embargo, este no es un parámetro adecuado, ya que el tiempo de respuesta de las transacciones de lectura puede variar considerablemente, especialmente si se usa poda dinámica (Broder et al., 2003; Moffat & Zobel, 1996).

---

<sup>1</sup><http://www.google.com>

<sup>2</sup><http://www.yahoo.com>

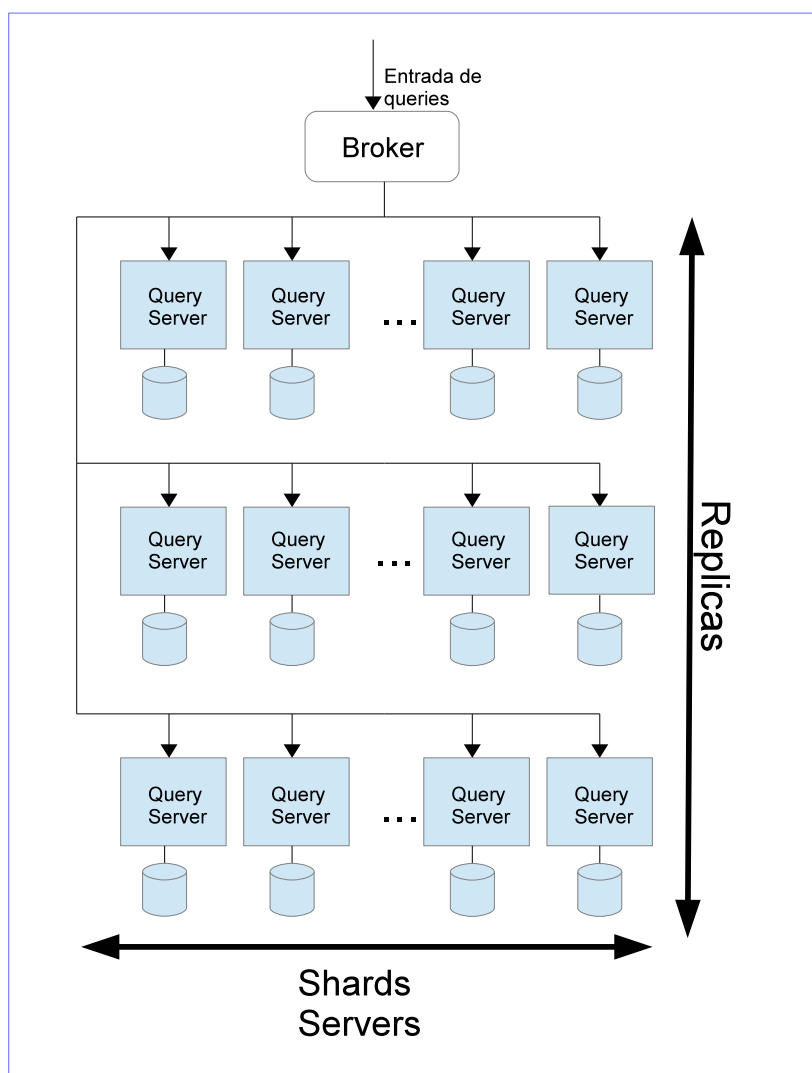


FIGURA 2.8: Arquitectura de un sistema de recuperación de información con réplicas.

### 2.7.1 Trabajo relacionado

El estudio (Broccolo et al., 2013) analiza métodos de *dropping* y *stopping* para el procesamiento de consultas bajo altas cargas de trabajo en un sistema distribuido donde existen múltiples servidores en el que cada uno resuelve una parte de la consulta para luego enviar las consultas al *broker* y éste hace el *merge* de los resultados de acuerdo al *score* de los documentos. Se define un tiempo  $T$ , en el que la suma de el tiempo de espera de la consulta para ser procesada ( $t_w$ ) y el tiempo de procesamiento de la misma ( $t_p$ ) deben ser menor a  $T$ . Si es que se sobrepasa este tiempo, se tienen dos opciones (1) la consulta es desechada y se envía al *broker* una lista vacía, (2) se detiene el procesamiento de la transacción de lectura y se envían los resultados parciales hasta el momento. Finalmente se propone un método basado en la predicción de tiempo de respuesta ( $\hat{pt}(q)$ ) de una consulta (Macdonald et al., 2012) de modo que si se cumple  $\hat{pt}(q) \leq T - wt(q)$ , entonces la consulta es desechada antes de comenzar a procesarse y se toma la siguiente desde la cola de espera. Notar que en estos métodos existe una pérdida de efectividad, puesto que eventualmente los servidores muchas veces no enviarán sus mejores documentos al *broker*, esto implica que el *broker* responderá al usuario un conjunto de  $K$  documento que no necesariamente son los mejores dentro del corpus completo.

En (Freire et al., 2012) se estudia el impacto que tiene la técnica de predicción de tiempos de respuestas para consultas, (Tonellotto et al., 2011) en sistemas de recuperación de información con réplicas. En este estudio, se llega a la conclusión que usando una buena predicción, se puede reducir el tiempo que la consulta tiene que esperar para ser procesada ( $t_w$ ), y también se puede reducir el tiempo total requerido para procesar el conjunto (*log*) completo de transacciones de lectura (*completion time*). En (Freire et al., 2013), se propone un modelo híbrido de *scheduling* de consultas a través de réplicas, en el que cuando el sistema se encuentre bajo altas cargas de trabajo, se utilice política de *scheduling* basada en la predicción de tiempo de respuesta de las consultas (Macdonald et al., 2012) y cuando el sistema se encuentre con

---

una baja carga de trabajo, se utilice una politica de *scheduling* sencilla y de menor costo como *Round Robin*.

## CAPÍTULO 3. WAND *MULTI-THREADED*

Dado que el método Wand (Broder et al., 2003) consiste en el método del estado del arte ocupado hoy en día por los motores de búsqueda para obtener eficientemente los mejores  $K$  documentos, en este trabajo se utiliza un sistema que trabaja con este método. Este algoritmo usa un *ranking* basado en una evaluación de dos niveles. En el primer nivel, usa una cota superior (*upper bound*) al puntaje de cada documento para intentar descartarlos eficientemente. En el segundo nivel se computa el puntaje real de los documentos que pasa el primer nivel. Se utiliza una estructura de datos llamada *heap* que va guardando el conjunto de los mejores  $K$  documentos hasta un determinado instante. El menor puntaje de este conjunto es usado como umbral (*threshold*) para las evaluaciones del primer nivel, de esta forma se descarta rápidamente documentos que no pueden ser parte del conjunto final de los *top-K* documentos. Esto permite un eficiente y a la vez seguro proceso de descarte que asegura que en el resultado final se encontrará el conjunto correcto y no se perderán documentos relevantes.

Existe una variación al método Wand tradicional que intenta hacer una poda más agresiva, en otras palabras, lo que se intenta es tratar de omitir una mayor cantidad de documentos a la hora de resolver una transacción de lectura. Este método llamado Block Max Wand requiere que cada una de las listas invertidas este particionada en bloques (generalmente 64 o 128 bloques), en donde se tiene un upper bound por cada bloque. La lógica es la misma que en el método original y en la primera fase también se ocupa el máximo puntaje por lista para descartar documento, sin embargo, ahora existe una tercera fase en donde se utiliza el upper bound por bloques. De esta forma se intenta omitir una mayor cantidad de documentos. Más detalle de estos métodos se pueden encontrar en las secciones 2.5.3 y 2.5.4.

Wand y Block Max Wand son métodos lógicamente parecidos en el sentido que trabajan con *upper bounds* para poder descartar documentos, es por esto que el diseño de

la implementación es como lo muestra la Figura 3.1; aquí se puede apreciar dos tipos de Wand: WandScorer y WandMaxBlock. WandScorer implementa el método tradicional utilizando el método *next*, que retornará algún documento que merezca estar en el conjunto *top-K* en ese momento. Por su parte, WandMaxBlock además de utilizar la función *next()*, usa la función *nextShallow()*, que moverá el puntero del documento actual de la lista a la posición inicial del bloque en donde debería encontrarse el documento que se le entrega como parámetro. La ventaja de este diseño es que ambas opciones son flexibles a utilizar cualquier función de *ranking* que se desee, en el diagrama se observa que se utilizará BM25.

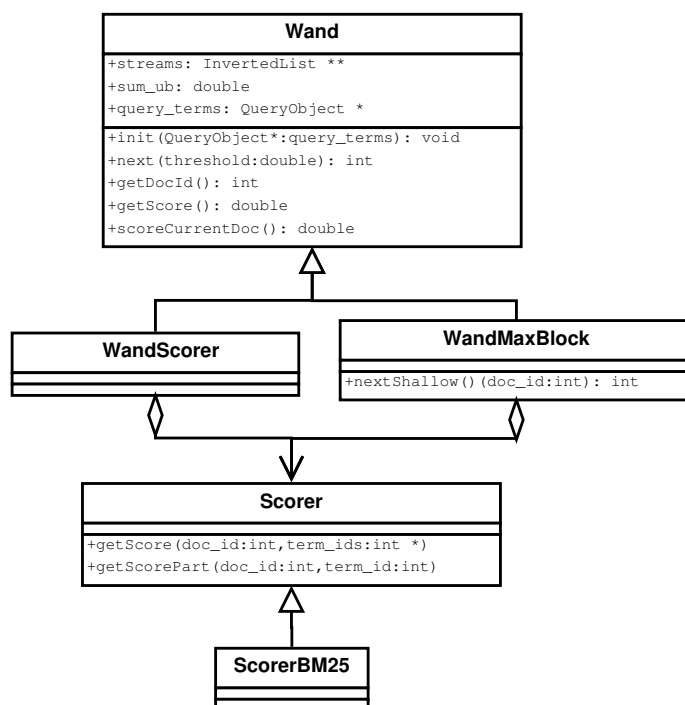


FIGURA 3.1: Diseño de clases para Wand y Block Max Wand.

Existen dos formas de implementar Wand. Una de ellas es usando *heaps* locales (LH), es decir, un *heap* por hilo de ejecución y el otro es usando *heaps* compartidos (SH). En el estudio (Rojas et al., 2013) se muestran indicios que el esquema SH es generalmente más eficiente, logrando rápidamente un óptimo valor para el *threshold*. El esquema SH posee las siguientes ventajas: (1) Se puede reducir el número de cálculos de puntajes completos y (2) se ejecutan



pocas operaciones de actualización del *heap* (reduciendo el número de *locks* que se hace a la estructura de dato). A continuación se muestra las dos formas en que se implementó Wand y también la implementación de Block Max Wand.

### 3.1 WAND CON *HEAPS* LOCALES

En el esquema LH, cada hebra procesa una parte del índice invertido mientras mantiene un *heap* local con los mejores  $K$  documentos. Al finalizar este proceso, los resultados se unen en un solo conjunto final global. Los resultados en (Rojas et al., 2013) muestran que el esquema LH es más eficiente para aquellas transacciones que toman poco tiempo en ser resueltas. En la Figura 3.2 se muestra el esquema de ejecución para *heaps* locales explicado anteriormente.

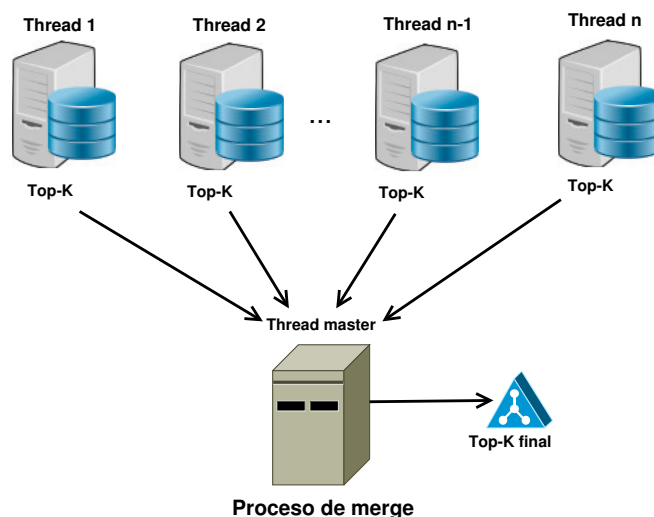


FIGURA 3.2: Esquema de ejecución de algoritmo WAND con *heaps* locales.

El diseño aplicado para implementar el esquema LH se puede ver en la Figura 3.3. La clase principal es la `TopKMultiThreadWandOperatorLocal`, que es la encargada de controlar el

paralelismo en la resolución de las transacciones. Para explicar de mejor manera cada una de las clases involucradas en la implementación, se presenta el siguiente diccionario de datos.

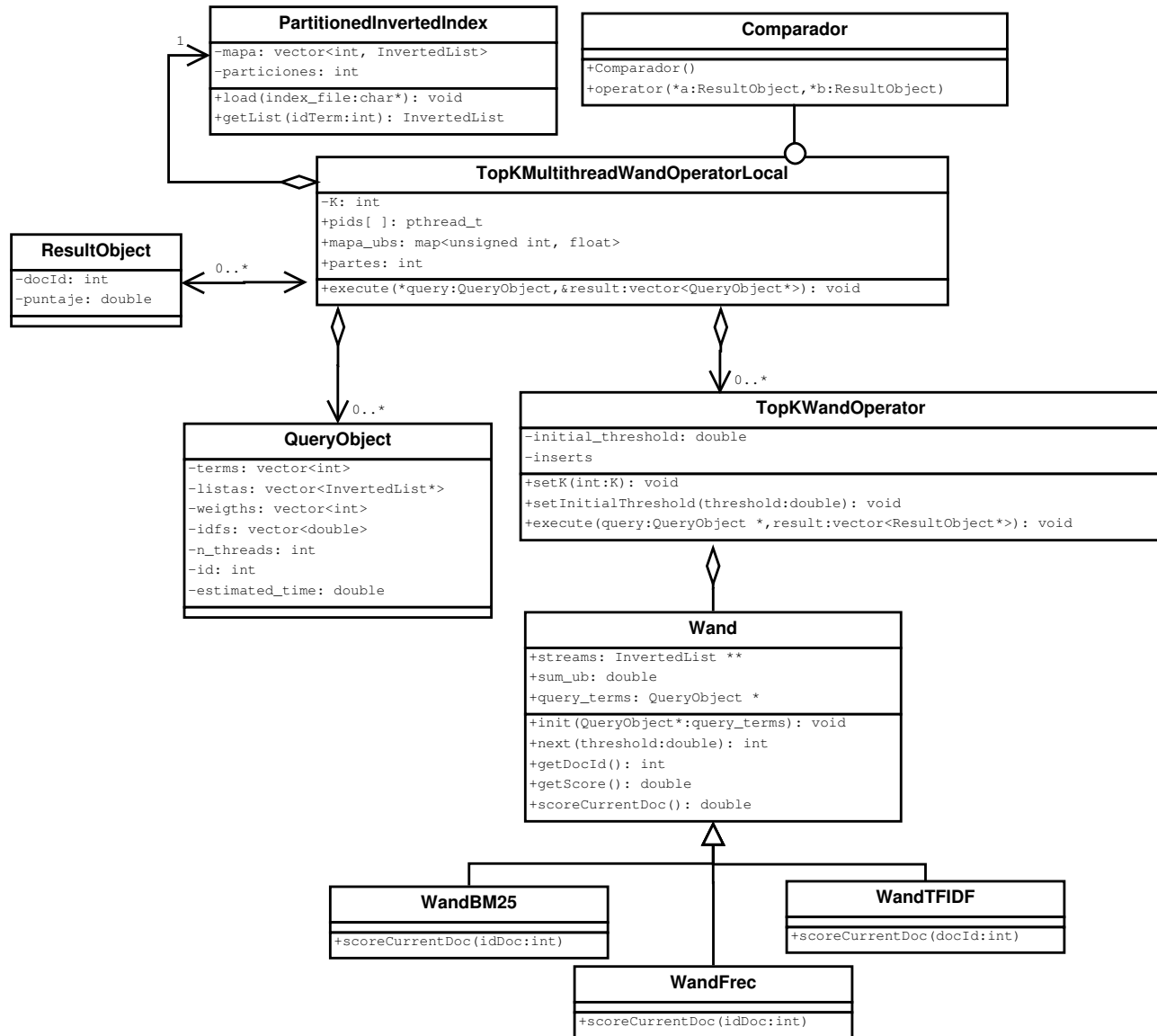


FIGURA 3.3: Diagrama de clases para el esquema LH.

**TopKMultiThreadWandOperatorLocal**. Clase encargada de devolver los mejores  $K$  documentos para una consulta dada. Si es que la consulta debe ser resuelta en forma

paralela, esta clase además debe controlar el paralelismo que se produce en la resolución de ésta, inicializando las variables correspondientes para lanzar los hilos de ejecución y luego escogiendo los mejores documentos desde todos los *heaps* creados por los diferentes hilos de ejecución (proceso de *merge*). En esta clase se define un mapa que asocia cada término del índice invertido con el puntaje del mejor documento en esa lista invertida (upper bound de la lista invertida) y además se define cuántos documentos se van a retornar al final del proceso (atributo *K*). El método *execute* inicializa las variables locales para las diferentes hebras, posteriormente hace el llamado al método *thread-execute* (en el cual se llevará a cabo la resolución de la transacción de lectura en forma paralela), finalmente se toman los resultados parciales de cada uno de los hilos de ejecución y se ejecuta el proceso que mezcla los resultados, retornando solo los mejores *K* documentos.

**PartitionedInvertedIndex.** Clase que tiene la tarea de almacenar el índice invertido y extraer desde aquí las listas invertidas de documentos para cada uno de los términos de las transacciones de lectura. El almacenamiento del índice se lleva a cabo mediante un mapa, en donde cada término tiene asociado su lista invertida correspondiente y para la extracción de estas listas se usa el método *getList*.

**TopKWandOperator.** Cada hilo tendrá su propio objeto *TopKWandOperator* encargado de obtener los mejores *K* documentos. El cálculo de este conjunto se realiza en el método *execute* con la ayuda de un objeto de tipo *Wand* asociado.

**Wand.** Clase que controla la lógica del algoritmo wand. Lleva a cabo el proceso de inserción de documentos en el *heap* y todo lo que esto conlleva. Existen diferentes tipos de objetos *Wand* que se pueden utilizar, entre ellos están *WandBM25*, *WandFrec* y *WandTFIDF*, donde la única diferencia entre ellos es el método con que se calcula el puntaje de cada documento. Por ejemplo, *WandBM25* utiliza BM25 y *WandTFIDF* utiliza tf-idf.

**ResultObject.** Clase que se utiliza para guardar los mejores  $K$  documentos.

**QueryObject.** Clase que representa una transacción de lectura. Está formada por términos y sus respectivas listas invertidas, la cantidad de hebras con las cuales se resolverá dicha transacción y el tiempo estimado de procesamiento (este tiempo se predice al momento de resolver la consulta).

## 3.2 WAND CON *HEAP* COMPARTIDO

En el esquema SH cada hebra procesa una parte del índice. Sin embargo, ahora un solo *heap* es creado y accedido por todos los hilos de ejecución. En este caso no se requiere de mezclar los resultados y el proceso de descarte tiende a ser más eficiente porque los documentos con mayor puntaje tienden a estar en el *heap*. El acceso al *heap* debe ser controlado por un *lock* o algún método similar que garantice el acceso exclusivo de los hilos al *heap*. Este esquema es más eficiente que el LH en consultas que toman mayor tiempo en ser resueltas.

El diseño implementado para este esquema posee como clase principal a `TopKMultiThreadWandOperatorLocks` y difiere del modelo implementado para el esquema LH en el sentido que ahora se debe controlar el acceso concurrente a los datos compartidos como el *heap* y el *threshold*. A continuación se presenta el diccionario de datos del esquema SH mostrado en la Figura 3.5.

**TopKMultiThreadWandOperatorLocks.** Clase encargada de inicializar las variables compartidas y de lanzar los hilos de ejecución requeridos para procesar la transacción de lectura.

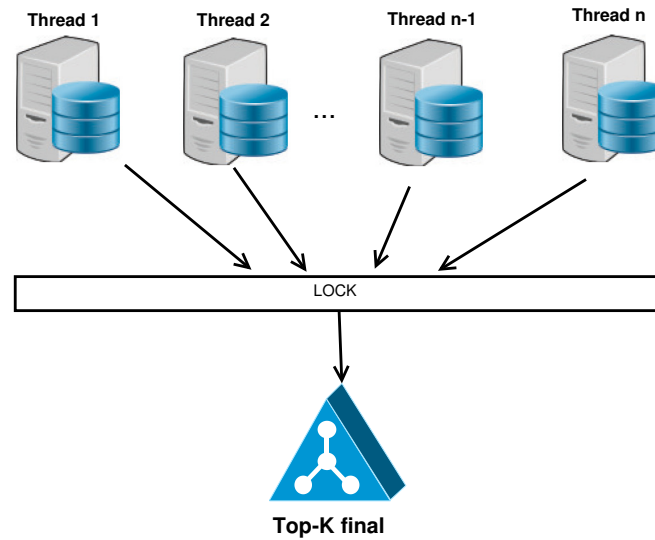


FIGURA 3.4: Esquema de ejecución de algoritmo WAND con *heap* compartido.

**WandThreadData.** Clase anidada a `TopKMultiThreadWandOperatorLocks` que contendrá todas las variables compartidas para el procesamiento de las consultas. Dentro de los atributos más importantes destaca el mutex utilizado para controlar el acceso al *heap* compartido y además al *threshold* (en este esquema es un *threshold* global y compartido por todas las hebras).

**Wand.** Al igual que en el esquema anterior, esta clase se encarga de llevar a cabo el proceso de inserción de documentos en el *heap* y de las actualizaciones del *threshold*. El método `scoreCurrentDoc` es el encargado de entregarle un puntaje a cada documento y dependerá de qué tipo de Wand se este utilizando (BM25, WandFrec, WandTFIDF).

**PartitionedInvertedIndex.** Clase encargada de almacenar el índice invertido. Posee un método llamado `getList` que recibe como parámetro el identificador de un documento y retorna la lista invertida asociada.

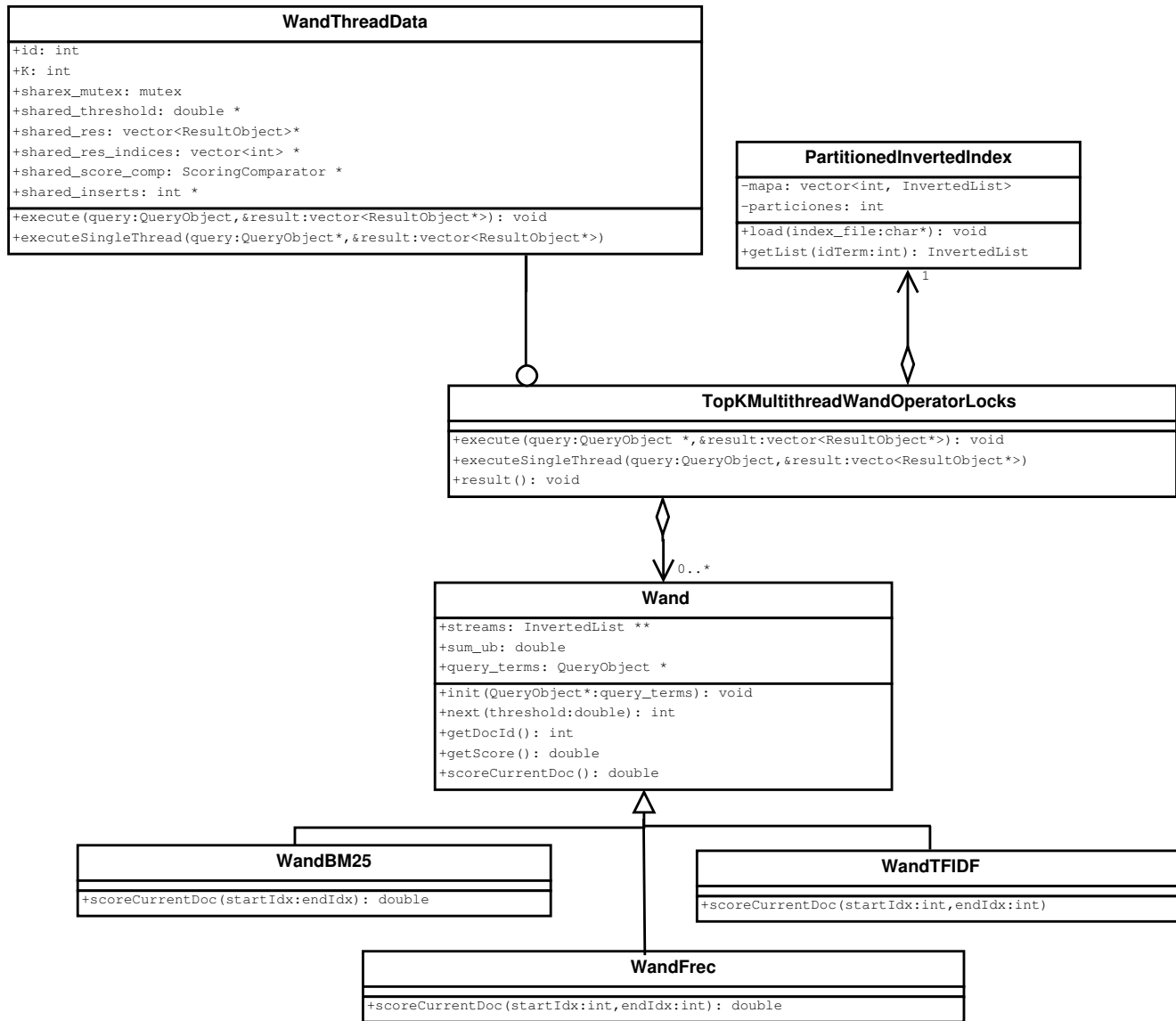


FIGURA 3.5: Diagrama de clases para el esquema SH.

### 3.3 BLOCK MAX WAND

Recordar que en el método de Wand para descartar documentos y encontrar un documento que potencialmente podría estar en el conjunto *top-K*, utiliza los *upper bounds* globales de cada lista, es decir, la máxima contribución (puntaje o *score*) de algún documento de la

lista invertida. Además, Wand tradicional es una estrategia DAAT, por lo que por cada lista invertida ocupa un puntero al documento actual que se desea evaluar; también usa un método que recibe como entrada un identificador del documento *docID* y una lista invertida *L*, y retorna el primer *docID'* que sea mayor o igual al documento *docID*. A esto se le conoce como movimiento de puntero profundo (*deep pointer movement*) debido a que generalmente implica una descompresión del bloque en el que se encuentra el documento.

Sin embargo, como se dijo anteriormente en 2.5.4, usando solo las máximas contribuciones por cada bloque no hará que el método funcione correctamente, puesto que hará que eventualmente se pierdan documentos que podrían estar en el conjunto final de los mejores *K* documentos. Como ahora se tiene las máximas contribuciones por cada bloque, BMW utiliza otra función la cual recibe como parámetro un identificador de documento *docID* y una lista invertida. Lo que se hace es mover el puntero actual al correspondiente bloque donde eventualmente se debería encontrar el documento *docID*. A esta función se le conoce como movimiento de puntero superficial (*shallow pointer movement*), por la razón que no involucra una descompresión de bloque. Se debe notar que para que esta función trabaje correctamente se requiere tener almacenada las fronteras de cada uno de los bloques de las listas invertidas.

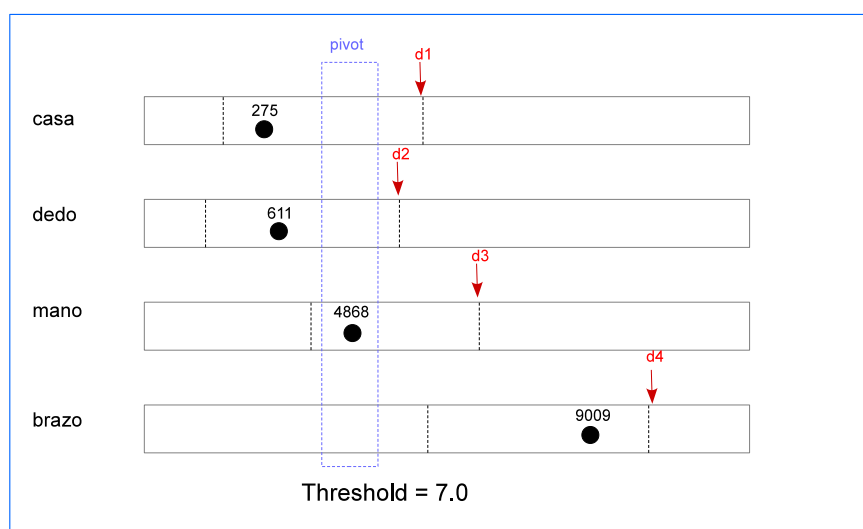
BMW utiliza dos principales ideas en su diseño: (1) Se usa los *upper bounds* globales para determinar un pivote candidato (como en Wand tradicional), para luego usar los *upper bounds* locales para determinar si es que el pivote candidato es un pivote real o no, y (2) Se intenta siempre utilizar *shallow pointer movement* por sobre *deep pointer movement*.

En el Algoritmo 3.1 se puede apreciar cómo el método *Block-Max-Wand* trabaja. Recordar que todas las listas invertidas poseen un puntero al documento actual que se desea evaluar (*currentDoc*). Lo primero que se hace es ordenar de manera creciente las listas invertidas de acuerdo a su correspondiente *currentDoc*. La función *findPivot()* es la misma que se utiliza en el método Wand tradicional (2.5.3), se itera sobre las listas invertidas y se retorna la posición de la lista en donde se cumple que la suma de los *upper bounds* globales es mayor al *threshold* ( $\theta$ ).

Luego la función *NextShallow()* se encarga de avanzar los punteros de las listas invertidas al inicio del bloque que debería contener el documento  $d$ . Posteriormente la función *isRealPivot()* verifica si es que el pivote  $p$  encontrado es un pivote real o no, para cada una de las listas desde la posición 0 hasta la posición  $p$ , se suma los *upper bounds* de los bloques en donde se encuentran los punteros (recordar que con *NextShallow()* los punteros de las listas quedaron apuntando a los bloques en donde se debería encontrar el documento  $d$ ), si la suma es mayor al *threshold* entonces retorna verdadero, de lo contrario retorna falso. El método *scoreDoc()* calcula el puntaje del documento que se le pasa por parámetro.

Cuando el método se da cuenta que  $p$  no es un pivote real, lo que se hace es buscar un nuevo candidato a través de la función *getNewCandidate()*, la cual hace avanzar los punteros de las listas invertidas hasta el bloque siguiente que contenga el mínimo *docID*. Para explicar de mejor manera esta idea se presenta la Figura 3.6, aquí se puede ver que el documento 4868 es el pivote, cuando este documento no es un pivote real (la función *isRealPivot* retorna falso), lo que se hará es escoger un documento  $d'$  tal que  $d = \min(d1, d2, d3, d4)$  en donde  $d1, d2, d3$  son la frontera del bloque actual más uno (inicio del bloque siguiente) y  $d4$  es el *currentDoc* de la cuarta lista. Notar que para hacer un descarte seguro de documentos, siempre se debe incluir a la elección del nuevo candidato el *currentDoc* de la lista inmediatamente siguiente a la lista pivote (en este caso 9009).



FIGURA 3.6: Ejemplo de cómo opera la función `getNewCandidate()`.

---

**Algoritmo 3.1:**  $BMW(\theta, L, docID) : BlockMaxWand$ 

---

**Entrada:** Un *threshold*  $\theta$ , listas invertidas  $L$  de los términos en la consulta**Salida:**  $docID$ , si existe un documento  $docID$  tal que  $score(docID) \geq \theta$ . de lo contrario

END-OF-FILE

```

1: while true do
2:    $Sort(L)$ ;
3:    $p = findPivot(L, \theta)$ ;
4:    $d = L[p] \rightarrow currentDoc$ ;
5:   if  $d == END-OF-FILE$  then
6:      $break$ ;
7:   end if
8:   for  $i = 0 \dots p$  do
9:      $NextShallow(d, L[i])$ ;
10:  end for
11:  if  $isRealPivot(\theta, p)$ ; then
12:    if  $L[0] \rightarrow currentDoc == d$  then
13:       $scoreDoc(d, p)$ ;
14:      for  $i = 0 \dots p$  do
15:         $Next(d + 1, L[i])$ ;
16:      end for
17:    else
18:      while  $List[p - 1] \rightarrow currentDoc == p$  do
19:         $p = p - 1$ ;
20:      end while
21:      for  $i = 0 \dots p$  do
22:         $Next(d, L[i])$ ;
23:      end for
24:    end if
25:  else
26:     $d' = getNewCandidate()$ ;
27:    for  $i = 0 \dots p$  do
28:       $Next(d', L[i])$ ;
29:    end for
30:  end if
31: end while

```

---

## CAPÍTULO 4. MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE RENDIMIENTO

Lograr bajos tiempos de respuestas para transacciones de lectura es uno de los objetivos principales en el diseño de un motor de búsqueda, ya que de esta forma se le puede entregar una respuesta oportuna al usuario. Aquellas transacciones de lectura que requieren una gran cantidad de tiempo en ser resueltas degradan considerablemente la satisfacción del usuario, y es por esto que las máquinas de búsqueda están optimizadas para reducir el percentil más alto de los tiempos (también llamado *tail latency*) (Jeon et al., 2014). Paralelizar el procesamiento de cada consulta es una solución promitente para reducir el tiempo de ejecución de estas (Jeon et al., 2013; Tatikonda et al., 2011), lo cual es posible gracias a los modernos procesadores que existen hoy en día que poseen múltiples núcleos, en donde se puede resolver una consulta paralelizando múltiples hilos de ejecución.

Conocer de antemano la eficiencia de una transacción de lectura es una ventaja muy importante, puesto que aquellas consultas que toman una mayor cantidad de tiempo en ser resueltas se les asigna un mayor número de hilos de ejecución para resolverla, de esta manera se reduce el tiempo de procesamiento de las consultas y se cumple con la cota superior de tiempo establecida. Que un sistema como un motor de búsqueda conozca anticipadamente cuánto tardará una consulta en ser procesada, permite implementar técnicas efectivas de planificación de transacciones de lecturas, por ejemplo, en el contexto de procesamiento paralelo de consultas por lotes (*batches*), se pueden crear grupos de consultas que posean similares tiempos de respuesta, así se tiende a disminuir tanto el desbalance de carga entre los procesadores como el tiempo en procesar el lote completo.

Existen trabajos en donde se estudia la correlación de algunos estadísticos presentes en las listas del índice invertido con el tiempo de respuesta de una transacción de lectura (Macdonald

et al., 2012; Hauff, 2010; He & Ounis, 2004). El más intuitivo es el número de documentos que hay en una lista invertida, si una consulta posee términos en que sus listas invertidas son largas (muchos documentos), mayor es el tiempo que toma en ser resuelta. A continuación se presentan los métodos de predicción implementados.

## 4.1 MÉTODO DE PREDICCIÓN MULTILINEAL

Este método predice el tiempo de respuesta de una transacción de lectura y está basado en una regresión lineal múltiple con 42 variables independientes (Macdonald et al., 2012). Como la respuesta a una consulta debe ser rápida, los estadísticos obtenidos desde las listas invertidas son previamente calculados en la fase de indexamiento, y en ningún caso es parte del proceso de resolución de la consulta. Los puntajes de los documentos son obtenidos mediante el método de *ranking* BM25.

Si bien es cierto que la regresión lineal posee 42 variables independientes, desde las listas invertidas se extraerán solo 14 estadísticos, ya que las 42 variables independientes se forman aplicando funciones de agregación sobre estos estadísticos. El estudio y el análisis estadístico de cada una de las variables involucradas en la regresión y su impacto en el tiempo está disponible en (Macdonald et al., 2012; Hauff, 2010; He & Ounis, 2004). A continuación se describe cada uno de los estadísticos  $s(t)$  calculados en el proceso de indexamiento (Croft et al., 2009) de un sistema de recuperación de información.

**Media aritmética.** La media aritmética del puntaje de los documentos.

**Media geométrica.** La media geométrica del puntaje de los documentos.

**Media armónica.** La media armónica del puntaje de los documentos.

**Máximo puntaje.** Se obtiene el puntaje máximo perteneciente a algún documento dentro de la lista invertida. En otras palabras, se obtiene el *upper bound*  $UB_t$  de la lista.

**Varianza del puntaje.** Se extrae desde la lista invertida del término  $t$ , la varianza del puntaje de los documentos.

**Número de documentos.** Largo de la lista invertida.

**Número de máximos.** Número de veces en que aparece un nuevo puntaje máximo, es decir, el número de veces en que el *upper bound* es actualizado.

**Número de documentos mayor a la media.** Número de documentos con puntaje superior al puntaje promedio.

**Número de documentos con puntaje máximo.** Número de documentos que poseen el puntaje máximo en la lista invertida del término  $t$ .

**Número de documentos dentro del 5 % más alto.** Número de documentos cuyos puntajes están dentro del 5 % superior.

**Número de documentos dentro del 5 % del umbral (*threshold*).** Número de documentos cuyos puntaje están dentro del 5 % superior o 5 % inferior al *threshold*. Recordar que el *threshold* es el puntaje más bajo dentro del conjunto de *top-K*.

**Número de inserciones en el conjunto de los mejores  $K$  documentos.** Para obtener este estadístico se asume que el término  $t$  es una consulta con un solo término, se resuelve esta consulta con el método Wand y se calcula el número de inserciones de documentos que se hizo al *heap*. Recordar que las inserciones al *heap* ocurren cuando el puntaje completo del documento, supera al *threshold*.

**Frecuencia inversa de documento del término.** Se calcula el *idf* del término  $t$  (Baeza-Yates & Ribeiro-Neto, 2011).

**Tiempo en ser procesado el término.** Tiempo que toma en ser procesado el término como si fuese una consulta de un solo término.

Los 14 estadísticos descritos anteriormente son la base para la implementación del predictor y estos son calculados por cada término del índice invertido. Adicionalmente se definen tres funciones de agregación que se usará por cada consulta: máximo, varianza y suma. El proceso es el siguiente, para cada consulta que llega al sistema, se toman los 14 estadísticos de cada uno de los términos que la conforman, luego se aplica las funciones de agregación a los estadísticos de los términos. Por ejemplo, suponga que llega dos consultas al sistema  $q_1$  y  $q_2$ , ambas tendrán asociada un vector de 14 estadísticos  $E_{q_1}$  y  $E_{q_2}$  respectivamente, las funciones de agregación para el estadísticos de la media aritmética será calculado como sigue:  $e_1 = \max\{E_{q_1}(0), E_{q_2}(0)\}$ ,  $e_2 = \text{var}\{E_{q_1}(0), E_{q_2}(0)\}$ ,  $e_3 = \text{sum}\{E_{q_1}(0), E_{q_2}(0)\}$ . De esta forma, con solo el primer estadístico (la media aritmética) se obtienen tres variables independientes. Si esto se extrapola a cada estadístico, se obtienen los 42 requeridos por el método. La Tabla 4.1 muestra un resumen de lo escrito anteriormente en donde se muestra cada uno de los estadísticos y los agregadores a utilizar.

## 4.2 MÉTODO DE PREDICCIÓN NEURONAL

Se implementa un método de predicción basado en una red neuronal *backpropagation* (Rumelhart et al., 1988). La característica de este tipo de redes es que utilizando al menos una capa oculta puede aproximar cualquier tipo de función o relación continua entre un grupo de

TABLA 4.1: Resumen de los estadísticos para la predicción multilínea

Estadísticos de términos $s(t)$
1. Media aritmética
2. Media geométrica
3. Media harmónica
4. Puntaje máximo
5. Varianza del puntaje
6. Número de documentos
7. Número de máximos
8. Número docs $>$ media
9. Número docs = máximo puntaje
10. Número docs dentro del 5 % más alto
11. Número docs dentro del 5 % del <i>threshold</i>
12. Número de inserciones al conjunto top-K
13. IDF
14. Tiempo en resolver $t$ como consulta
Agregadores $A()$
a. Máximo
b. Varianza
c. Suma

variables de entrada y salida, debido a que utiliza un método de entrenamiento en la que se propaga el error hacia atrás, de esta forma la red neuronal va generalizando una asociación entre la entrada y salida (Fausett, 1994).

Para la implementación del modelo se utilizan las mismas 42 variables independientes del esquema anterior con dos neuronas en la capa oculta, la idea es que el tiempo que toma la predicción no genere un impacto negativo en el tiempo de procesamiento de la consulta. El objetivo es minimizar el error de la estimación de tiempo.

## CAPÍTULO 5. ESTRATEGIAS DE PLANIFICACIÓN DE CONSULTAS

Los motores de búsqueda verticales son diseñados con el propósito de lidiar con cargas de trabajos dinámicas. Un ejemplo de un motor de búsqueda vertical, es un motor de publicidad que ejecuta una consulta cada vez que un usuario abre un correo electrónico en por ejemplo, el servicio de *Yahoo! mail*; de esta forma se muestra publicidad de acuerdo al contenido del correo electrónico. Eventualmente millones de usuarios concurrentes están conectados a sus correos electrónicos, por lo que la carga de trabajo esperada para el motor de búsqueda puede llegar a órdenes de las cien mil consultas por segundo (Gil-Costa et al., 2013). Adicionalmente, el hecho que las actualizaciones en un motor de búsqueda vertical ocurran con mayor frecuencia que en uno de propósito general, hace que el diseño de los algoritmos para procesar las consultas sea diferente; también se debe permitir la actualización del índice invertido.

Por lo anteriormente mencionado, se hace imperioso tener un sistema diseñado que soporte altas cargas de trabajo, y las respuestas a consultas esten en una cota de tiempo aceptable para el usuario sin mermar la calidad de los resultados obtenidos. También es necesario que las estructuras de datos y algoritmos implementados soporten la concurrencia entre las transacciones de lecturas y escrituras; ya que eventualmente el motor de búsqueda tendrá que dejar de procesar consultas para poder servir las transacciones de escritura que actualizan el índice invertido.

A continuación se muestra las diferentes estrategias de planificación de transacciones de lectura abordadas en el presente trabajo utilizando diferentes enfoques; se presentan tres enfoques diferentes: El primero consiste en crear bloques de consultas en donde previamente a cada una de ellas se le asigna el número de hebras que utilizará en su resolución, luego el bloque es procesado en paralelo por los diferentes hilos de ejecución asignados; el segundo



enfoque sirve de *baseline*, cada hilo de ejecución se hace cargo de una consulta y lleva a cabo su procesamiento, en este enfoque la competencia entre los hilos de ejecución es por las consultas; El tercer y último enfoque corresponde a unidades de trabajos, en la que a cada transacción de lectura se le asigna un número determinado de unidades de procesamiento y los hilos de ejecución compiten por ellas obteniéndolas desde una cola.

## 5.1 ESTRATEGIAS POR BLOQUES

Un sistema de planificación de un motor de búsqueda trabaja en un contexto *online*, esto significa que desconoce las transacciones que vendrán en el futuro y que cuando llega una nueva transacción de lectura, se debe tomar una decisión rápida acerca de qué hacer con ella. Adicionalmente, una transacción de lectura debe ser resuelta dentro de una cota superior de tiempo, al cual se llamará  $t_{limite}$ . En el contexto del presente trabajo, para que el planificador tome una decisión con respecto a una consulta, debe conocer de ella (1) su tiempo de ejecución y (2) el número de hebras con los que será resuelta. El tiempo de ejecución de cada consulta se obtiene utilizando los métodos de predicción de tiempos mostrados en el Capítulo 4; una vez que se predice el tiempo esperado  $t_{esperado}$  de cada consulta para 1,2,4,8 y 16 hebras, se asigna el número de hilos de ejecución tal que se cumpla que  $t_{esperado} < t_{limite}$ , de esta forma se satisface la condición de que todas las consultas deben ser resueltas en una cota superior de tiempo previamente definida.

Bajo el contexto de un motor de búsqueda en el que se debe planificar transacciones de lecturas que eventualmente serán resueltas de forma paralela por diferentes hilos de ejecución, existe una estrategia teórica llamada FR que aborda este problema (Ye & Zhang, 2007) y se

adapta a este escenario de un motor de búsqueda vertical; esta estrategia del estado del arte da pie para que en el presente trabajo de tesis se proponga dos nuevas estrategias siguiendo el mismo enfoque de FR, pero estas enfocadas principalmente en mejorar la asignación de consultas a bloques, para así reducir el tiempo ocioso de las hebras.

En la Figura 5.1 se muestra el proceso completo de este enfoque; las consultas que llegan al sistema las recibe el planificador (*scheduler*) y las envía al estimador (*estimator*), que calcula el número adecuado de hilos de ejecución para la consulta tal que ésta sea resuelta en un tiempo inferior al tiempo límite  $t_{limite}$ . Una vez que a la transacción de lectura se le predice el tiempo de ejecución y el número de hebras a utilizar, este planifica la consulta en algún bloque correspondiente dependiendo de la política que se este utilizando. A continuación se muestran las diferentes estrategias propuestas.

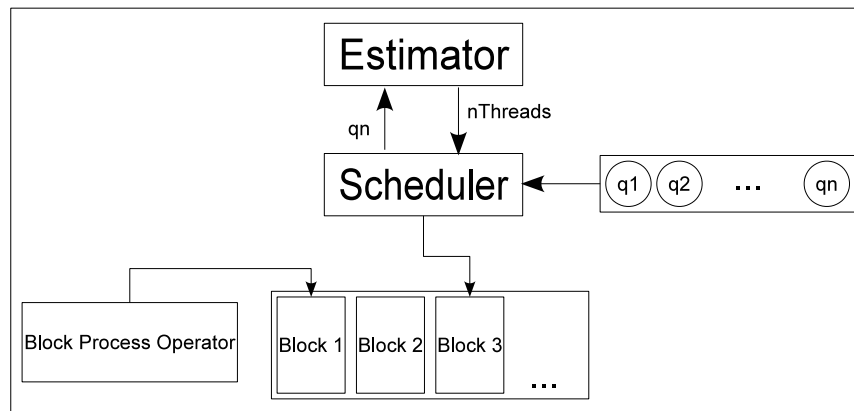


FIGURA 5.1: Enfoque de planificación para estrategias por bloques.

### 5.1.1 Estrategia FR

La estrategia FR posee como requisito que cada una de las consultas a planificar se le haya asignado el número de hebras con las cuales se resolverá; esto se hará siguiendo el esquema 5.1. Como se dijo anteriormente, a cada consulta se le asignará la cantidad mínima de hebras tal que el tiempo en resolver la consulta sea menor al tiempo límite  $t_{limite}$ .

Por lo explicado anteriormente, el algoritmo FR asume que cada consulta que llega al motor de búsqueda posee el número de hebras que debe utilizarse en su resolución. Utilizando esta información, la estrategia hace una clasificación de cada consulta entre *Big* y *Small*, con el objetivo de crear estructuras de datos denominadas *Rooms* y *Walls*, en donde cada *Wall* y cada *Room* estará formado solo por consultas de tipo *Big* y *Small* respectivamente. Ambas estructuras de datos tienen un número máximo de máquinas disponibles para procesar las transacciones de lectura. Una consulta es *Big* si el número de máquinas requeridas para procesarla es  $m$  (siendo  $m$  el número de máquinas disponibles en el sistema), de lo contrario la consulta es *Small*. La idea del algoritmo es crear bloques de consultas (*Wall* y *Room*), que serán procesadas en paralelo por el proceso que resuelve las consultas.

Como se puede ver en el Algoritmo 5.1, cuando una nueva transacción de lectura llega al sistema, esta se analiza si es de tipo *Big* o *Small*; esto se hace en el método *isBig()*, que retorna verdadero si es que el número de máquinas requeridas para procesar la consulta es igual al máximo de máquinas disponibles en el sistema, de lo contrario retorna falso y la transacción es clasificada como *Small*. Si la consulta es *Big*, entonces se crea una estructura de dato *Wall*, se planifica la consulta en el bloque y esta se inserta en la lista de planificación *SchedulingList* que contendrá todos los bloques con las consultas ya planificadas. Si se está en presencia de una transacción de lectura de tipo *Small*, se busca algún bloque de tipo *Room* para planificar esta consulta; para realizar lo anterior, el bloque debe satisfacer dos condiciones: (1) no debe estar completo, es decir, debe tener hebras disponibles, y (2) no debe haber sido

procesado aún. Por último, si eventualmente no se encuentra algún bloque disponible para planificar la consulta, entonces se crea un nuevo bloque *Room*, se planifica la consulta al bloque y este bloque es insertado en lista de *scheduling*. Cabe destacar que se dice que un bloque está abierto (*isOpen()*) cuando las consultas presentes en el bloque no han ocupado todos los hilos de ejecución disponibles o cuando el proceso de ejecución ya ha procesado el bloque. Es importante también notar que las estructuras de datos de tipo *Wall* estarán formadas solo por una transacción de lectura de tamaño máximo.

---

**Algoritmo 5.1:** *schedulerFR :: assignQuery(L, Q): Planificación de consulta*

---

**Entrada:** Una SchedulingList *L* en donde se hará la planificación, QueryObject *Q* a planificar

**Salida:** SchedulingList *L* con la nueva query planificada

```

1: if isBig(query) then
2:   block = newWall();
3:   block → addQuery(query);
4:   L → addBlock(block);
5: else
6:   asignada = false;
7:   for i = L → firstOpenBlockLocked()...L → size() do
8:     room_block = L → getBlockLocked(i);
9:     if (room_block → isOpen())&&(room_block → freeThreads() ≥ query →
```

*getThreads()*) **then**

```

10:      room_block → addQuery(query)
11:      asignada = true
12:      break;
13:   end if
14: end for
15: if !(asignada) then
16:   block = newRoom();
17:   block → addQuery(query);
18:   L → addBlockLocked(block);
19: end if
20: end if
```

---

En la Figura 5.1 se presenta un ejemplo de ejecución la estrategia FR. Han llegado al sistema consultas:  $q_0$  (2 hebras),  $q_1$  (16 hebras),  $q_2$  (4 hebras),  $q_3$  (2 hebras),  $q_4$  (2 hebras),  $q_5$  (8 hebras) y  $q_6$  (16 hebras). Se puede ver cómo se van formando las estructuras de datos

llamadas *Rooms* y *Walls*. Suponer que eventualmente arriba al sistema una nueva consulta ( $q_7$ ) que será resuelta con 8 hebras, entonces el algoritmo verifica en primera instancia la  $Room_0$ , sin embargo, en esta estructura no hay suficientes hilos de ejecución disponibles para procesar la consulta (posee solo 6 disponibles). Finalmente la planifica en la  $Room_1$ .

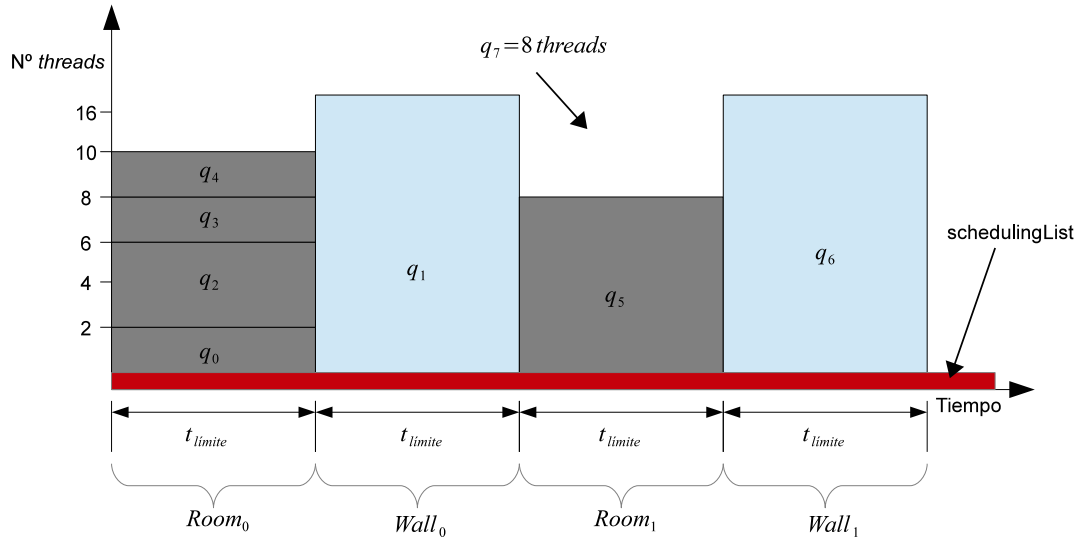


FIGURA 5.2: Ejemplo de procesamiento de la estrategia FR.

### 5.1.2 Estrategia Times

Se intuye que una de las desventajas de la estrategia FR es que al planificar una consulta en algún bloque, solo verifica si es que este posee el número de hebras desocupados suficientes tal que sea mayor o igual al número de hilos requeridos por la consulta. Esto puede generar pérdida de eficiencia importante en los procesamiento de los bloques, puesto que algunas transacciones de lecturas pueden tomar mayor tiempo en ser procesadas y los hilos de ejecución que ya han terminado su trabajo estarán ociosos esperando por otros para continuar con el siguiente

bloque. Para abordar esta posible pérdida de eficiencia, se diseña una política de planificación alternativa en donde además de tomar en cuenta el número de hebras disponible en cada bloque (como en la estrategia anterior), se toma en cuenta el tiempo esperado de la transacción de lectura.

Cada consulta  $q$  tiene asociado un número de hilos de ejecución  $NT_q$  y un tiempo  $t_{predicho}$ , que es el tiempo en que se espera que la consulta sea resuelta con  $NT_q$  hilos de ejecución. La idea de esta estrategia es separar las transacciones de lectura que tengan tiempos de procesamiento muy diferentes en bloques distintos, es decir, se crearán bloques con consultas que tengan poca diferencia de tiempo unas de otra, de esta forma se quiere reducir el tiempo que se podría perder entre un bloque y otro por el desbalance de carga de los hilos. Cada bloque  $B$  tendrá un tiempo  $t_B$ , que será el tiempo de la consulta con menor tiempo dentro del bloque. La métrica establecida para que una transacción de lectura que llega al sistema sea planificada en un bloque, es que el tiempo del bloque  $t_B$  no sea el doble del tiempo de la consulta  $t_q$  entrante, y viceversa. Si esta condición falla, entonces significa que la consulta  $q$  que se está intentando planificar posee tiempos que se escapa a los rangos de tiempo del bloque  $B$ .

El Algoritmo 5.2 muestra el funcionamiento de la estrategia *Times*, esta recibe como entrada la consulta a planificar y la lista de bloques (*SchedulingList*). El algoritmo *Times* trabaja de manera similar a la estrategia FR, la diferencia es que en esta estrategia una consulta puede ser planificada en un bloque siempre y cuando este tenga hebras disponibles suficientes para procesarla y que el tiempo de la consulta no doble al tiempo mínimo dentro del bloque perteneciente a alguna consulta ya planificada; si esta no puede ser planificada, entonces el bloque se desecha y se busca por otro bloque. Existirá un número limitado de bloques que se pueden desechar (*MAX\_BLOCKS\_CHECKED*), si eventualmente se llega a este valor, se escoge aquel bloque con la mínima diferencia de tiempo con la consulta. En el peor de los casos, ningún bloque tendrá espacio suficiente para planificar la consulta y se deberá crear uno nuevo. Notar que en esta estrategia ya no se clasifican las consultas de acuerdo al número de hilos de

ejecución que utilizan.

---

**Algoritmo 5.2:** *schedulerTimes :: assignQuery(L, Q): Planificación de consulta*

---

**Entrada:** Una SchedulingList  $L$  en donde se hará la planificación, QueryObject  $Q$  a planificar

**Salida:** SchedulingList  $L$  con la nueva query planificada

```

1: blocks_viewed = 0
2: blockValid = false;
3: best_diff = INF;
4: for  $i = L \rightarrow \text{firstOpenBlockLocked}() \dots L \rightarrow \text{size}()$  do
5:    $\text{block} = L \rightarrow \text{getBlockLocked}(i)$ ;
6:   if  $\text{block} \rightarrow \text{freeThreads}() \geq \text{query} \rightarrow \text{getThreads}()$  then
7:      $\text{tiempo\_min} = \text{block} \rightarrow \text{getMinimumTime}()$ 
8:     if  $\text{block} \rightarrow \text{isSchedulable}(\text{query})$  then
9:        $L \rightarrow \text{addQuery}(\text{query})$ ;
10:       $\text{assigned} = \text{true}$ ;
11:      break;
12:   end if
13:    $\text{blocks\_viewed}++$ ;
14:   if  $\text{blocks\_viewed} \geq \text{MAX\_BLOCKS\_CHECKED}$  then
15:     break;
16:   end if
17: end if
18: end for
19: if  $\neg(\text{assigned}) \wedge (\text{blocks\_viewed} \geq \text{MAX\_BLOCKS\_CHECKED})$  then
20:    $\text{block} = \text{newQueryBlock}()$ ;
21:    $\text{block} \rightarrow \text{addQuery}(\text{query})$ ;
22:    $L \rightarrow \text{addBlockLocked}(\text{block})$ ;
23: end if
```

---

En la Figura 5.3 se muestra un ejemplo de la estrategia *Times*, en el que una consulta llega al sistema y debe ser planificada. El estimador utilizado predijo que la transacción de lectura entrante se demorará 135 ms. con 8 hebras; en otras palabras, 8 hilos de ejecución es el número mínimo con el que se cumple que el tiempo de la consulta (135 ms.) es menor que la cota superior de tiempo (140 ms.). El algoritmo intenta planificar la consulta en primera instancia en el bloque  $B_0$ , sin embargo, el tiempo de la consulta (135 ms.) es el doble del mínimo tiempo en el bloque (55 ms.). Posteriormente, el bloque  $B_1$  no posee hebras disponibles. Finalmente la transacción de lectura  $q_7$  es planificada en el bloque  $B_2$ , ya que reúne todas las condiciones

necesarias explicadas anteriormente en el algoritmo 5.2.

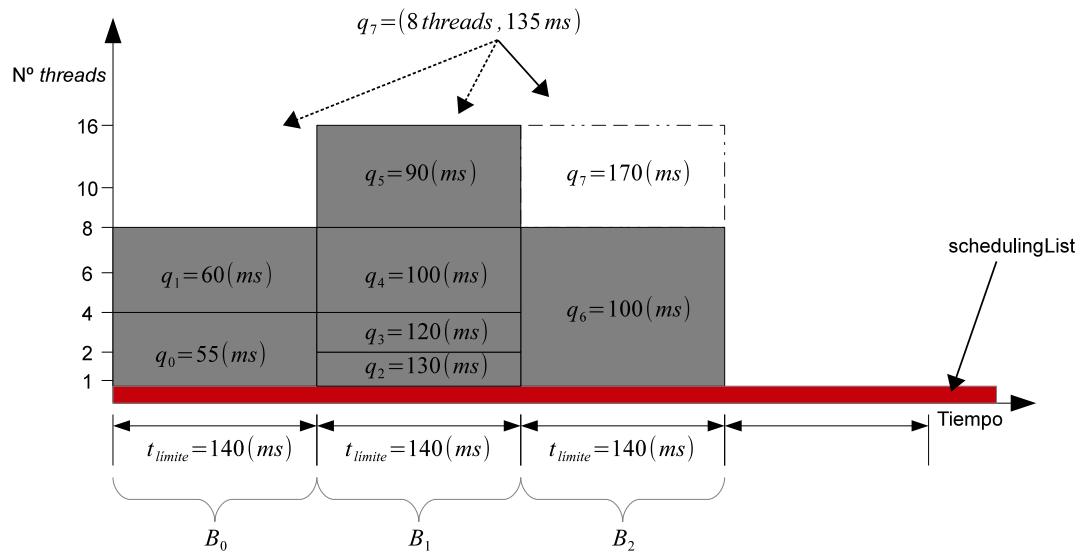


FIGURA 5.3: Ejemplo de procesamiento de la estrategia Times.

### 5.1.3 Estrategia TimesRanges

Esta estrategia también intenta disminuir la posible pérdida de eficiencia de la estrategia *FR*. La idea de *TimesRanges* es clasificar y agrupar las consultas de acuerdo a rangos de tiempos; para planificar una transacción de lectura que arriba al sistema, se debe encontrar un bloque que cumpla con: (1) número de hilos de ejecución libres suficientes, y (2) que el bloque sea del mismo rango de tiempo que la consulta. Inicialmente se define tres tipos de rangos: (1) aquellas que se demoren menos del 10 % del tiempo límite; (2) aquellas que se demoren más (o igual) del 10 % y menos del 25 % del tiempo límite; (3) aquellas que se demoren más (o igual) del 25 % y menos del 50 % del tiempo límite; y (4) aquellas que se demoren más (o igual) del 50 % del tiempo límite. De esta forma se reduce la diferencia de tiempos entre las



consultas pertenecientes a un mismo bloque, lo que significa que consultas dentro de un mismo bloque deberían ser resueltas en tiempos muy parecidos. Recordar que el tiempo límite es la cota superior de tiempo en que una consulta debe ser resuelta.

El procedimiento de la estrategia *TimesRanges* se puede ver en el algoritmo 5.3. Para que una transacción de lectura sea planificada bajo la presente estrategia, lo primero es obtener el rango de tiempo en que se encuentra la consulta entrante; posteriormente, se busca algún bloque que no haya sido procesado y que además posea un número de hebras disponibles suficiente para procesarla, y se planifica la consulta. Si no se encuentra un bloque que satisfaga las condiciones de la consulta entrante, entonces se crea uno nuevo para planificarla.

---

**Algoritmo 5.3:** *schedulerTimesRanges :: assignQuery(L, Q): Planificación de consulta*

---

**Entrada:** Una SchedulingList  $L$  en donde se hará la planificación, QueryObject  $Q$  a planificar

**Salida:** SchedulingList  $L$  con la nueva query planificada

```

1:  $range = getQueryRange(query);$ ;
2: for  $i = L \rightarrow firstOpenBlockLocked() \dots L \rightarrow size()$  do
3:    $block = L \rightarrow getBlockLocked(i);$ 
4:   if  $block \rightarrow freeThreads() \geq query \rightarrow getThreads() \&\& block\_ranges[i] == range$ 
     then
5:      $block = L \rightarrow addQuery(query);$ 
6:      $asignada = true;$ 
7:      $break;$ 
8:   end if
9: end for
10: if  $!(asignada)$  then
11:    $block = newQueryBlock();$ 
12:    $block \rightarrow addQuery(query);$ 
13:    $L \rightarrow addBlockLocked(block);$ 
14:    $block\_ranges[L \rightarrow size - 1] = range;$ 
15: end if
```

---

## 5.2 ESTRATEGIA 1TQ

Un simple camino para construir un sistema que responda a múltiples consultas simultáneamente usando múltiples hilos de ejecución, es usando estos hilos de manera independiente. Para hacer esto se debe mantener un conjunto de hilos de ejecución consumidores que trabajarán en paralelo y se encargarán de resolver las transacciones de lectura secuencialmente (una a una) desde una misma cola, esto es lo que en este trabajo se denomina estrategia de Un Thread Por Query (1TQ). En la Figura 5.4 se puede apreciar el esquema de ejecución en donde cada uno de los procesos genera una petición de alguna consulta en la cola, si quedan consultas por procesar entonces se le asigna al proceso una consulta que tendrá que resolver de manera secuencial. Se debe tener en cuenta que cada vez que un proceso genera una solicitud de consulta, se bloquea la estructura de datos que contiene las consultas a procesar y luego se procesa la solicitud, de esta forma se asegura un acceso seguro por parte de los distintos hilos de ejecución.

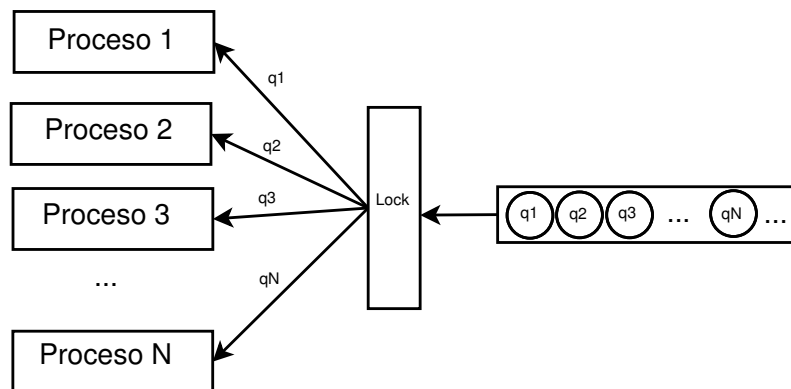
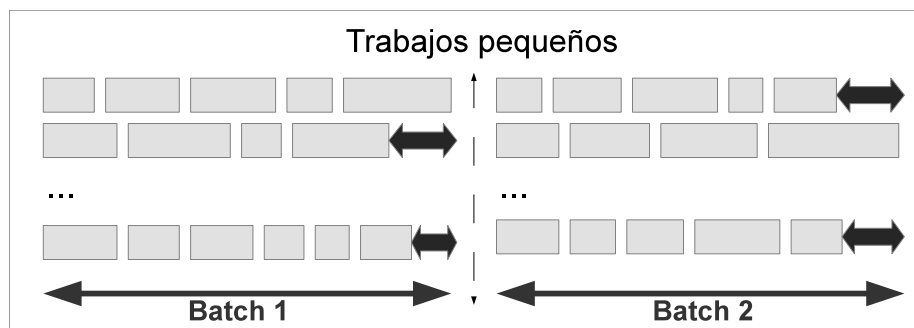
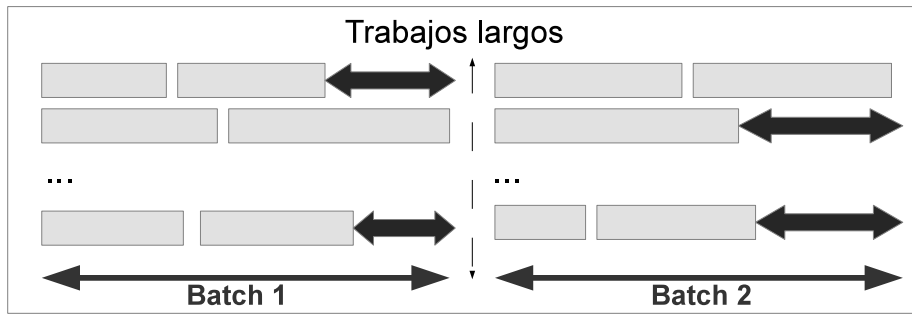


FIGURA 5.4: Ejemplo de procesamiento estrategia 1TQ.

Este esquema tiene la ventaja que es simple y fácil de implementar y controlar. Sin embargo, existen sistemas de recuperación de información como los motores de búsqueda verticales que cuando están ejecutando *batches* de consultas deben parar su ejecución porque

transacciones de escritura han llegado al sistema, y estos deben actualizar la información del índice invertido. Solo después de la fase de actualización el sistema es capaz de ejecutar el siguiente *batch* de transacciones de lectura. Al final de cada conjunto de consultas, es posible que algunos hilos de ejecución del sistema finalicen su trabajo y que no tengan más consultas para procesar, por lo que ellos tienen que esperar que los hilos restantes finalicen su trabajo antes que el sistema entre en la fase de actualización de su índice invertido o bien, se pase a la ejecución del siguiente *batch* de consultas. Sin embargo, aunque cada hilo de ejecución está secuencialmente ejecutando una transacción de lectura diferente, algunas de estas operaciones puede tomar un tiempo considerable, de esta forma se produce una importante pérdida de eficiencia, aunque la intuición nos dice que esto se puede mitigar con transacciones de lectura que requieran poca cantidad de tiempo para ser procesadas (trabajos pequeños o *small jobs*). En la Figura 5.5 queda reflejado lo dicho en el párrafo anterior. Si los trabajos que cada *thread* está ejecutando son pequeños, entonces probablemente la pérdida de trabajo al final de cada *batch* de consultas será menor al trabajo que se pierde cuando los trabajos son grandes (ver Figura 5.6).

FIGURA 5.5: Ejecución en paralelo de *small jobs*.

FIGURA 5.6: Ejecución en paralelo de *large jobs*.

### 5.3 ESTRATEGIA UNIDADES DE TRABAJO

Con respecto a los esquemas explicados hasta ahora, el esquema 1TQ tiene la ventaja que no solo requiere menos control, sino que también permite a los hilos de ejecución trabajar sin pausa mientras se resuelven transacciones de lectura por lotes; sin embargo, no se garantiza una cota superior de tiempo para cada consulta. En esta sección se propone un esquema en donde la consulta es dividida en unidades de procesamiento o de trabajo, en el que a cada unidad se le asigna la parte del índice invertido con el cual se debe trabajar. Además existe un nivel de datos compartido entre las unidades de procesamiento, como por ejemplo, el *heap* en donde se guardará el conjunto *top-K*.

En este nuevo esquema de planificación, las consultas pasan a través de una fase en la cual se predice sus tiempos de ejecución y se le asigna el mínimo número de hebras tal que se cumpla con la cota superior de tiempo establecida. Posteriormente se estima para cada consulta el número de unidades de procesamiento que se utilizará en su resolución, este número será igual al número de hilos de ejecución estimado (Ver Figura 5.7). Un conjunto de hilos consumidores extraen las unidades desde la cola y las procesan de forma independiente. Cuando

una hebra finalice el procesamiento de la unidad de trabajo actual, automáticamente extraerá la siguiente unidad de trabajo desde la cola. De esta forma se forma una competencia entre los hilos de ejecución por las unidades de trabajo de la cola, por lo que se debe controlar el acceso concurrente de los hilos al nivel compartido de datos entre las unidades de procesamiento, de tal manera que solo una hebra tenga acceso exclusivo a este objeto para poder actualizar los datos a medida que cada una de las unidades de la transacción de lectura es resuelta.

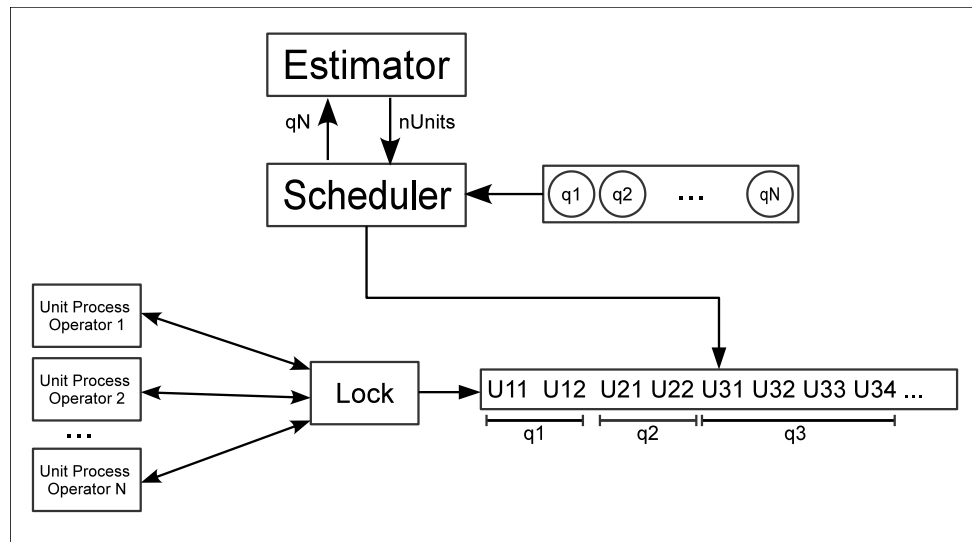


FIGURA 5.7: Procesamiento de consultas utilizando unidades de trabajo.

Se muestra un ejemplo en la Figura 5.8 en el que se resuelven cuatro consultas. La consulta 0 fue dividida en cuatro unidades de trabajo; la consulta 1 y 2 en dos unidades de trabajo; y finalmente la consulta 3, en ocho unidades de trabajo. Los hilos de ejecución competirán por la extracción de unidades de trabajo desde la lista.

El procesamiento de cada hilo de ejecución es una versión de Wand con *heap* compartido (SH), adaptado de manera tal que cada unidad de trabajo es resuelta independientemente de si existen otras unidades siendo procesadas al mismo tiempo. La única excepción es que la unidad de procesamiento que inicializa la consulta es siempre ejecutada antes del resto de las otras unidades de la misma consulta, y también la entrega de resultados se hace una vez que todas las unidades de procesamiento de la consulta han finalizado. Este enfoque híbrido permite

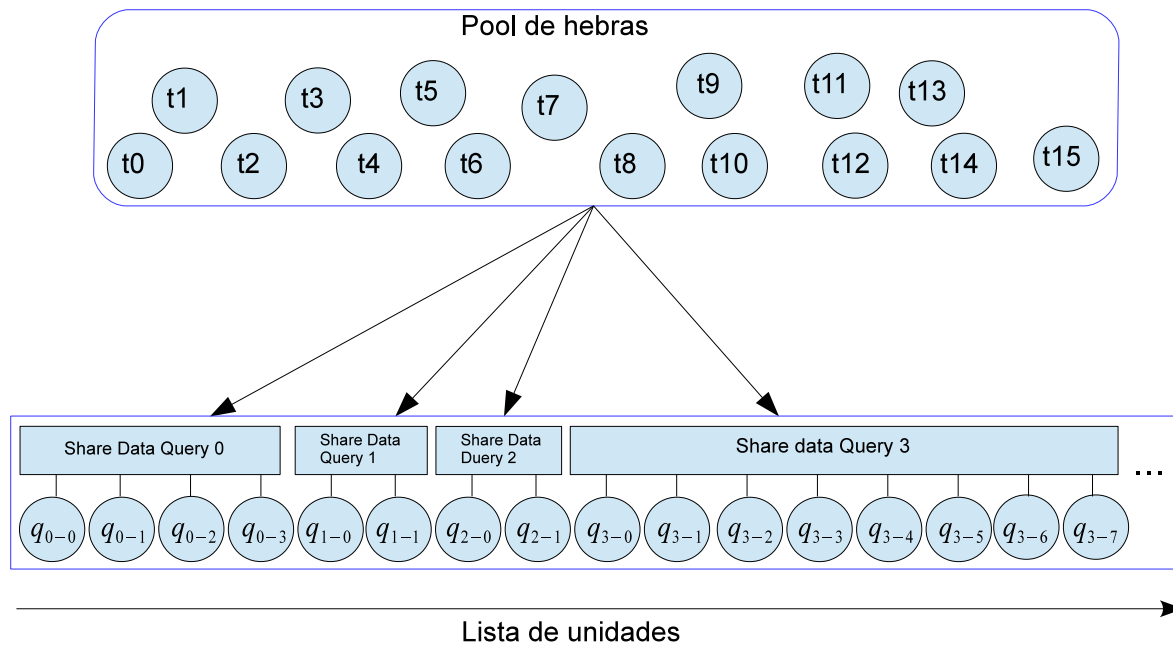


FIGURA 5.8: Esquema de ejecución estrategia unidades de procesamiento.

reducir el tiempo perdido al final de cada *batch* de consultas sin generar una importante pérdida de trabajo mientras las consultas del *batch* están siendo procesadas.

En la Figura 5.10 se presenta el diagrama de clases del planificador de unidades de procesamiento:

**TopKMultiThreadWandOperatorLocal.** Clase encargada de devolver los mejores  $K$  documentos para una transacción de lectura dada. Si es que la consulta debe ser resuelta en forma paralela, esta clase además debe controlar el paralelismo que se produce en la resolución de ésta, inicializando las variables correspondientes para lanzar los hilos de ejecución y luego escogiendo los mejores documentos desde todos los heaps creados por los diferentes hilos (proceso de *merge*). En esta clase se define un mapa que asocia cada término del índice invertido con el puntaje del mejor documento en esa lista invertida (*upper bound* de la lista invertida) y además se define cuántos documentos se van a retornar al final del proceso (atributo  $K$ ). El método *execute* inicializa las variables locales para las diferentes hebras, posteriormente hace el llamado al método *thread-execute* (en

el cual se llevará a cabo la resolución de la transacción de lectura en forma paralela), finalmente se toman los resultados parciales de cada uno de los hilos de ejecución y se ejecuta el proceso que mezcla los resultados, retornando solo los mejores  $K$  documentos.

**QueryObject.** Clase que representa las transacciones de lectura a las que se le asignará unidades de procesamiento.

**QueryUnit.** Clase que representa las unidades de procesamiento de transacciones de lectura. Cada uno de estos objetos tiene asociado un nivel de datos compartido (QueryUnitShareData) con otras unidades de procesamiento que resolverán la misma consulta.

**QueryUnitShareData.** Clase que permite la creación de datos compartidos entre las unidades de procesamiento. Todas las variables compartidas por las unidades de trabajo estarán albergadas en este objeto.

**QueryEstimator.** Clase que se encarga de estimar el número de unidades de procesamientos requeridas para una cierta consulta.

**QueryUnitScheduler.** Clase principal del planificador, esta se encarga de tomar las transacciones de lectura y asignarle a cada una de ellas el número de unidades de procesamiento adecuado. Finalmente, las unidades de trabajo se planifican en una lista.

Finalmente se diseña un diagrama de clases para el ejecutador de unidades de procesamiento (Ver Figura 5.10). Aquí se puede observar los objetos involucrados en la resolución de cada consulta; cada objeto QueryProcessingOperator es el encargado de procesar una unidad, y habrán tantos objetos de este tipo como hilos de ejecución disponibles en el sistema. Cada vez que una unidad es procesada, si es que restan unidades por resolver, el hilo de ejecución toma inmediatamente la siguiente unidad de trabajo, de lo contrario debe retornar el conjunto final de documentos que se encuentra en el *heap* compartido.

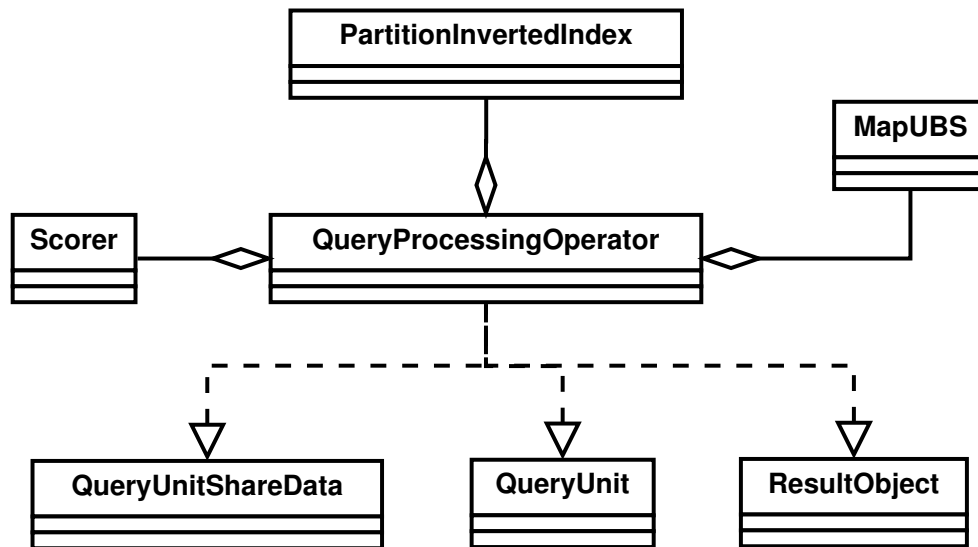


FIGURA 5.9: Diagrama de clases del ejecutor de unidades de procesamiento.

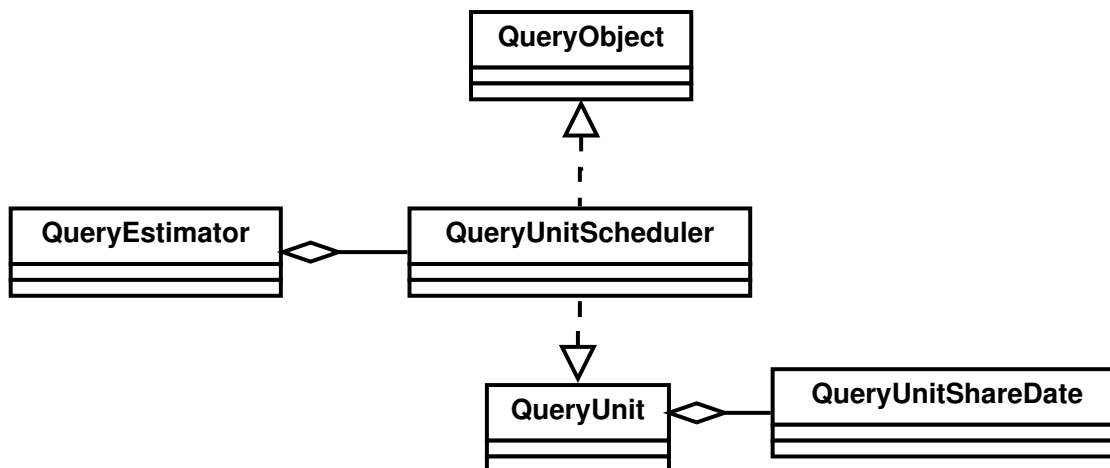


FIGURA 5.10: Diagrama de clases del planificador de unidades de procesamiento.



## CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de las diferentes implementaciones para los métodos propuestos en las secciones anteriores. Se comienza por la implementación de los métodos de procesamiento de transacciones de lectura, posteriormente se muestra los resultados obtenidos para los diferentes métodos de predicción de tiempos de respuestas para consultas y el comportamiento que tienen para diferentes conjuntos de datos. Finalmente se presenta el comportamiento de las estrategias de planificación presentadas para diferentes tipos de escenarios.

### 6.1 HARDWARE Y CONJUNTO DE DATOS

Los experimentos fueron ejecutados en un Intel Xeon E5620 2.4 *Ghz.* con 8 núcleos físicos, tecnología *hyper-threading* y 90 gigabytes de memoria de acceso aleatorio (*RAM*). Se utilizaron dos conjuntos de datos para llevar a cabo los experimentos, estos son frecuentemente usados por la comunidad del área de recuperación de información. El primero de ellos es *GOV2*, este conjunto es una colección de aproximadamente 25 millones de páginas *Web* obtenida desde los dominios *.gov* y que pesa 426 *GB*. La otra colección de datos utilizada es la *ClueWeb09*, la cual fue creada para apoyar la investigación en recuperación de la información y las tecnologías relacionadas con el lenguaje humano, consiste en alrededor de un billón de páginas en diez lenguajes diferentes y 50 millones en inglés. *ClueWeb09* pesa alrededor de 5 *TB* en forma comprimida y 25 *TB* descomprimida.

## 6.2 WAND MULTITHREADED

En esta sección se muestra la implementación de dos enfoques para el procesamiento de consultas a través del algoritmo Wand (Broder et al., 2003). El primer enfoque es el esquema de *heap* locales (LH), en el que cada hebra obtiene sus mejores documentos para una consulta dada y luego una hebra maestra se encarga de mezclar todos los resultados de cada uno de los hilos de ejecución para construir el conjunto *top-K* final; el segundo enfoque es el enfoque de *heap* compartido (SH), en el que se tiene un *heap* visible a todos los hilos de ejecución y en donde ellos compiten por el acceso a esta estructura de datos. El detalle del diseño de los enfoques LH y SH están disponibles en 3.1 y 3.2.

### 6.2.1 Esquema LH

En el esquema LH todos los hilos de ejecución tienen sus propias estructuras de datos y variables que soportan la resolución de una transacción de lectura. La clase *TopKMultithreadWandOperatorLocal* es la encargada de administrar la lógica de ejecución, además prepara las variables e inicia los hilos de ejecución. El Código 6.1 muestra la implementación, en el que existe un método llamado *execute*, este método es el encargado de llevar a cabo la resolución de la consulta, recibe como entrada la consulta a ser resuelta y un vector en el que se almacenará los resultados obtenidos. Adicionalmente, este método es el encargado de lanzar las hebras con que se resolverá cada consulta y a cada una de ellas le asigna un objeto de tipo *TopKWandOperator* (*arr\_ops[pid\_thread]*) para obtener los resultados. Todo este proceso es llevado a cabo usando *K* como tamaño del conjunto que se quiere obtener.

Además se definen variables como *mapas\_ubs*, el cual asocia a cada término los *upper bounds* con los que el método Wand trabajará y *query\_partes*, variable que define en cuántas partes la consulta debe ser dividida y está supeditada al número de hebras con que esta será resuelta.

CÓDIGO 6.1: Implementación de la clase TopKMultithreadWandOperatorLocal.h

```

1 class TopKMultithreadWandOperatorLocal {
2     private:
3         // Variable que controla el tamaño del heap
4         unsigned int k;
5         // Índice invertido particionado
6         PartitionedInvertedIndex *indice;
7
8         // Clase anidada que se utiliza para ordenar los documentos dentro del heap
9         class Comparador : public std::binary_function<const ResultObject*,
10             const ResultObject*, bool> {
11             public:
12                 Comparador(){ }
13                 inline bool operator()(const ResultObject *a, const ResultObject *b){
14                     if (a->getScore() == b->getScore()){
15                         return a->getDocId() > b->getDocId();
16                     }
17                     return a->getScore() > b->getScore();
18                 }
19             };
20
21         // Objeto Comparador
22         Comparador *comp;
23
24     public:
25         // Valor del threshold inicial. Controlara los documentos que deberian
26         // ser parte de los top-K.
27         double initial_threshold;
28
29         // Arreglo de pthread_t para los hilos de ejecucion
30         pthread_t t[max_threads];
31
32         // Arreglo donde se guardaran los identificadores de los arreglos
33         int pids[max_threads];
34
35         unsigned int *indices;
36
37         // Arreglo de operadores. Cada uno de los threads tendra un operador (1thread)
38         static TopKWandOperator **arr_ops;
39
40         // Vector en donde se guardaran los resultados por thread
41         static vector<ResultObject*> **arr_results;
42
43         // Variable que mapea cada termino t a su respectivo upper_bound global
44         static map<unsigned int, float> **mapas_ubs;
45
46         // Arreglo de punteros a cada query
47         static QueryObject ***query_terms;
48
49         // Partes en la que se dividira cada query
50         static unsigned int partes;
51
52         // Constructor
53         TopKMultithreadWandOperatorLocal(PartitionedInvertedIndex *_indice,
54             map<unsigned int, unsigned int> *_mapa_docs,

```

```

56     map<unsigned int, float> **_mapas_ubs,
57     unsigned int _k = 10,
58     unsigned int _max_terms = 128);
59
60     // Destructor
61     ~TopKMultithreadWandOperatorLocal();
62
63     // Metodo que se encarga de resolver la query. Los resultados
64     // quedaran en la variable result
65     virtual void execute(QueryObject *query, vector<ResultObject*> &result);
66 };

```

En la Figura 6.1 se ejemplifica la resolución de una consulta con cuatro hilos de ejecución. Una vez que el sistema asigna el número de hebras que se utilizará para la resolución de la consulta, esta es tomada por el objeto *TopKMultithreadWandOperatorLocal* y hace un llamado al método *execute*, en el que se hace una preparación de variables y se lanzan los hilos de ejecución; cada uno de ellos tiene asignado dos objetos: (1) *TopKWandOperator*, el cual se encarga de que cada hilo de ejecución solo resuelva la parte de la consulta que se le asignó, y (2) *Wand*, el cual se encarga de obtener los mejores *K* documentos guardándolos en un *heap*.

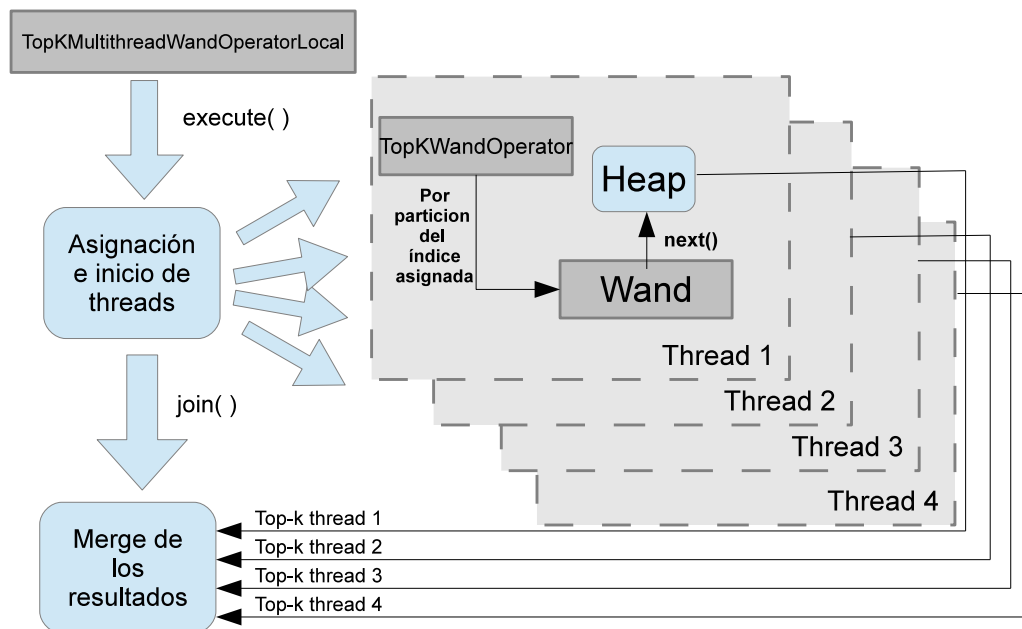


FIGURA 6.1: Esquema de ejecución enfoque LH.

### 6.2.2 Esquema SH

En el esquema SH los hilos de ejecución trabajan con variables compartidas, incluido el *heap* en donde se almacenan los resultados. La ejecución de este enfoque es llevada a cabo por la clase *TopKMultithreadWandOperatorLocks*, lo cual se puede ver en el Código 6.2; en esta implementación se puede observar la declaración de una clase anidada, la cual contiene las variables que serán compartidas por los hilos de ejecución. Dentro de las variables más importantes está el *heap*, el umbral utilizado para decidir si un documento debe estar dentro del *heap* y la variable de tipo *mutex* que permite el acceso exclusivo a las variables compartidas.

CÓDIGO 6.2: Implementación de la clase TopKMultithreadWandOperatorLocks.h

```

1 class TopKMultithreadWandOperatorLocks : public TopKMultithreadOperator{
2
3     protected:
4         // Un objeto wand para que cada hebra resuelva la consulta
5         Wand **arr_wands;
6
7     public:
8         // Clase anidada que administrar las variables compartidas
9         class WandThreadData{
10             public:
11
12                 WandThreadData(){}
13
14                 ~WandThreadData(){
15                     wands.clear();
16                 }
17
18                 unsigned int id;
19                 unsigned int k;
20
21                 // Un objeto wand para cada hebra
22                 vector<Wand*> wands;
23
24                 // Controla el acceso concurrente al heap
25                 mutex *shared_mutex;
26
27                 // Umbral que es compartido por todos los hilos
28                 double *shared_threshold;
29
30                 // Vector de resultados
31                 vector<ResultObject> *shared_res;
32                 vector<unsigned int> *shared_res_indices;
33
34                 ScoringComparator *shared_score_comp;
35             };
36
37     TopKMultithreadWandOperatorLocks(PartitionedInvertedIndex *_indice, map<unsigned int,
        unsigned int> *_mapa_docs, map<unsigned int, float> **_mapas_ubs, unsigned int _k

```

```

38         = 10);
39         virtual ~TopKMultithreadWandOperatorLocks();
40         // M todo que hara la resoluci n de la query
41         virtual void execute(QueryObject *query, vector<ResultObject*> &result);
42         virtual void executeSingleThread(QueryObject *query, vector<ResultObject*> &result);
43         virtual void reset();
44     };

```

La Figura 6.2 muestra un ejemplo de resolución de consulta utilizando cuatro hilos de ejecución y el enfoque SH. Al igual que en el esquema anterior, la clase principal inicializa variables e inicia los hilos de ejecución; el objeto *TopKWandOperator* asignará a cada hebra la parte del índice invertido con la que cada hebra resolverá la consulta. Cada vez que un hilo de ejecución utilizando el objeto Wand encuentre un documento candidato para estar en el conjunto *top-K* final, debe pedir acceso exclusivo a las estructuras de datos involucradas (*heap* y umbral), de esta forma se evita resultados erróneos en el conjunto final producto del paralelismo entre los hilos de ejecución.

### 6.2.3 Resultados obtenidos

En la Figura 6.3 se puede observar el tiempo promedio del enfoque LH y el enfoque SH en resolver un conjunto de 10,000 consultas de la colección *GOV2*. A medida que crece el número de hilos de ejecución, el enfoque de *heaps* compartidos toma ventaja por sobre el enfoque de *heaps* locales, sin embargo, cuando se utiliza un hilo de ejecución se puede observar que LH (117.486ms) requiere un tiempo menor que SH (130.591ms), esto se debe porque en LH no se usan variables compartidas que retrasen a los hilos de ejecución esperando a que otros las liberen. LH requiere menos tiempo en resolver el *log* de consultas para 2,4,8 y 16 hebras. El esquema LH puede estar muy supeditado a la distribución de documentos en las listas del índice invertido, ya que si un hilo de ejecución procesa su correspondiente parte del índice invertido

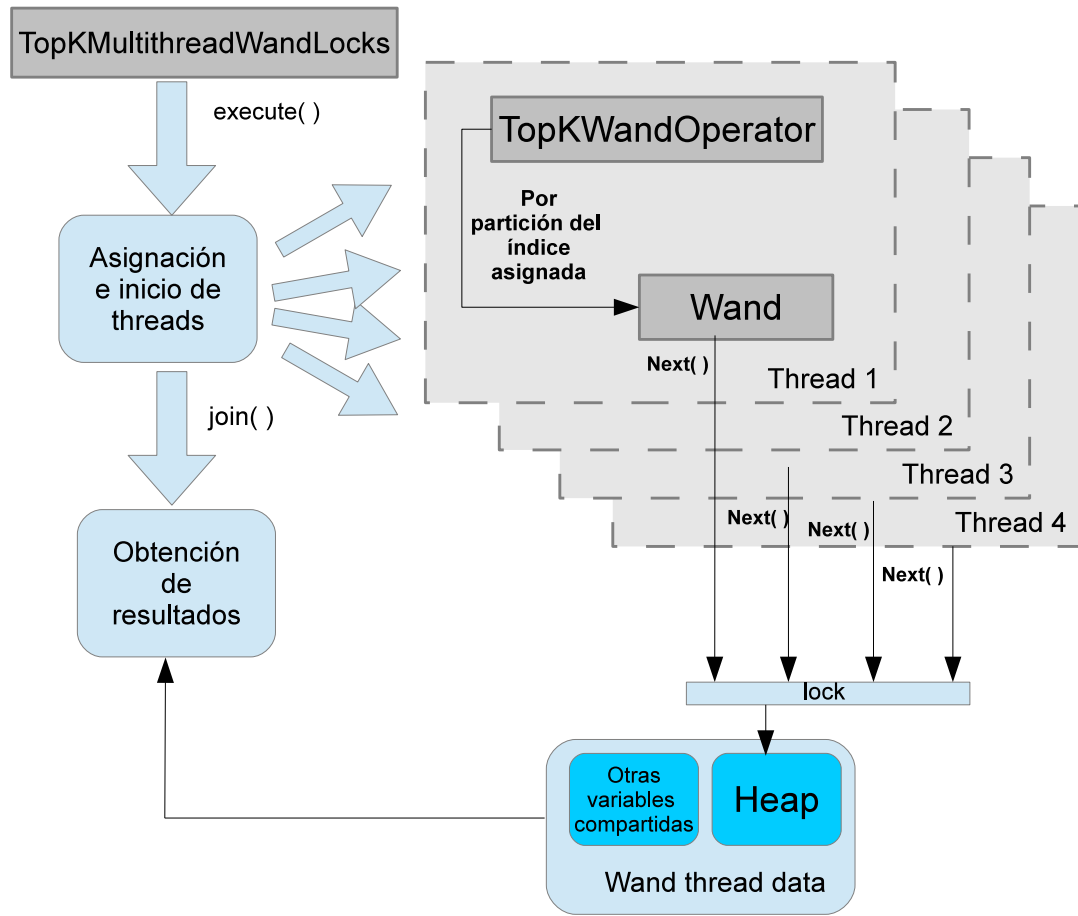


FIGURA 6.2: Esquema de ejecución enfoque SH.

en donde los mejores puntajes se encuentran al final, entonces el *heap* tendrá un umbral bajo al comienzo del proceso, eso implica un proceso de descarte de documentos menos eficiente y el tiempo de ejecución requerido será mayor, retrasando el proceso que mezcla los resultados para obtener el conjunto *top-K* final. Como el esquema SH ocupa un solo *heap* para obtener los mejores *K* documentos, el *heap* tiende a llenarse rápidamente con los mejores documentos globales, esto implica que el puntaje mínimo del *heap* (umbral) tiende a crecer rápidamente, permitiendo un mejor descarte de documentos y menor tiempo de ejecución para las hebras.

Adicionalmente en la Figura 6.4 se puede ver en forma general que con la estrategia de enfoques compartidos se obtienen mejores eficiencias que con la estrategia LH. Con SH la mejor eficiencia que se obtiene es con 4 hilos de ejecución (0.962 ms), mientras que con 2 y

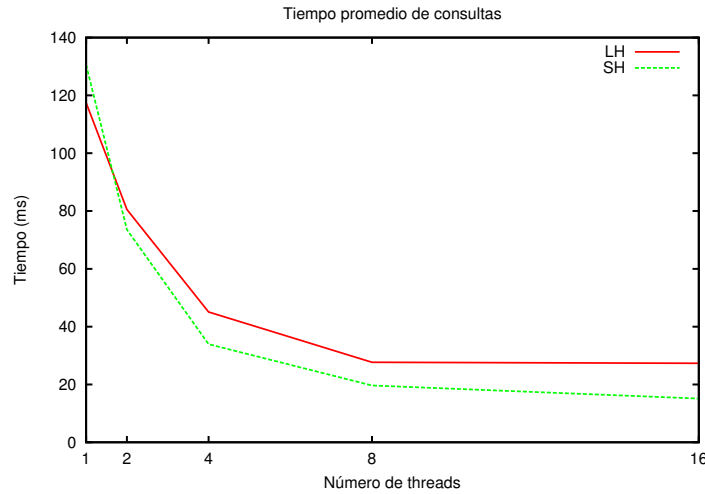


FIGURA 6.3: Tiempos promedios de las consultas.

con 8 hebras se obtiene una eficiencia de 0.887 y 0.831 milisegundos; en general se obtiene buenas eficiencias para 1,2,4 y 8 hebras, sin embargo, con 16 hilos de ejecución la eficiencia baja considerablemente (0.5403 ms) con respecto a las anteriores, esto se debe principalmente a la tecnología *hyperthreading* de la máquina utilizada. También es interesante ver que el uso exclusivo del *heap* compartido por parte de los *threads* no tiene un fuerte impacto en el rendimiento. La eficiencia baja de LH se debe porque para obtener el conjunto *top-K* final de una consulta debe haber una sincronización de todos los hilos de ejecución involucrados en que cada uno de ellos envíe sus *top-K* locales a la hebra maestra, y además porque existe un costo adicional de calcular el conjunto *top-K* final entre los  $P \times K$  documentos seleccionados (siendo  $P$  el número de procesadores).



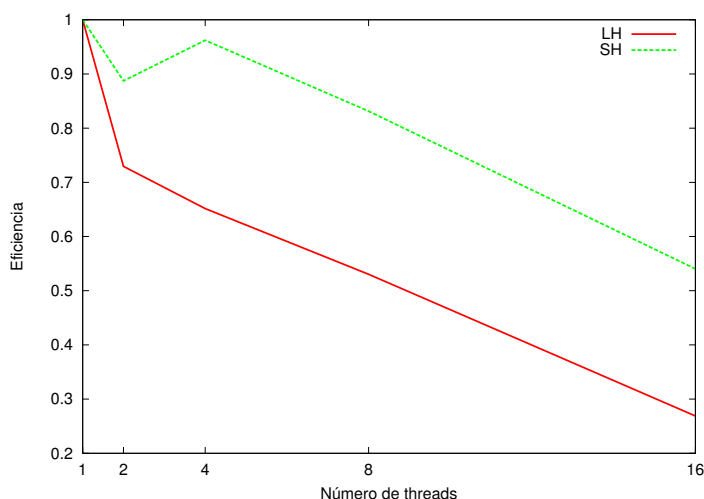


FIGURA 6.4: Eficiencias para Wand con heaps compartido y locales.

### 6.3 PREDICCIÓN DE TIEMPOS

### 6.4 ESTRATEGIAS DE SCHEDULING

Se compararon las estrategias de planificación por bloques (Ye & Zhang, 2007) usando el predictor multilíneal y además un predictor perfecto, el cual sabe de antemano el tiempo real de las consultas. Para determinar el número de hebras a ser usado para resolver cada consulta, el sistema predice el tiempo que esta tomará, y escoge el mínimo número de hebras necesarias con el que el tiempo predicho es menor o igual a la cota superior de tiempo establecida. Se experimentó con diferentes valores para fijar la cota superior y los mejores resultados fueron obtenidos con el tiempo promedio de las consultas. Se puede observar en la Figura X que un mejor predictor puede conducir a mejores tiempos de ejecución. Adicionalmente se analiza el comportamiendo que tienen estas estrategias al responder consultas divididas en conjuntos de

diferentes tamaños (1000, 500, 200, 100 and 50). En cada caso las técnicas procesaron todas las consultas con una pausa entre lotes, el tiempo de ejecución total tomado corresponde a la suma de tiempos de ejecución de los lotes. El mejor resultado fue obtenido por la estrategia Times Ranges usando el predictor perfecto.

En base a experimentación se ha encontrado que en general procesar transacciones de lectura utilizando Wand bajo un enfoque de bloques (Ye & Zhang, 2007) es menos eficiente con respecto a otros enfoques. Es por esta razón que en las siguientes experimentaciones y comparaciones solo se utiliza la estrategia *Times Ranges* con predictor perfecto.

Para observar el comportamiento de la estrategia 1TQ se utiliza una versión de la estrategia unidades de trabajo haciendo uso de una sola unidad de procesamiento por cada consulta, de esta manera las hebras trabajan de forma independiente sobre diferentes transacciones de lectura y es equivalente a la estrategia 1TQ mostrada en la sección 5.2. Adicionalmente se observa el comportamiento que tiene el enfoque de unidades de trabajo en diferentes versiones (1) Se asigna a las consultas que llegan al sistema un número fijo de unidades de trabajo, y (2) Utilizando el predictor multilíneal perfecto para predecir el número de unidades de trabajo.

Los resultados obtenidos se pueden ver en la Figura Y, en donde...

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Utilizando Wand y Gov2 Heap compartido ¿Heap global.

¿Comportamiento según Wand y Conjunto De Datos?

El beneficio de la predicción de tiempo en el esquema de un solo procesador parece no ser beneficioso. El impacto que toma predecir el tiempo...

Las estrategias diseñadas fueron pensadas en el contexto en que al final de cada lote de consultas se produce una sincronización.

Se analizó algunas de las estrategias de planificación que hay en el estado del arte, se llevó al contexto practicó desarrollando tb un estimador de threads, pero al final del día se dio cuenta que el costo de predecir y el beneficio que entrega la planificación no son muy buenos.

Se traen estrategias del estado del arte, se adaptan, se comparan y se concluye algo.

ok, entonces es mejor usar este enfoque de unidades

se analizan los resultados de cada uno de los algoritmos

Trabajo futuro, probar con diferentes K, probar reducir el modelo lineal, probar otras estrategias de planificación.

En las estrategias por bloque, un predictor mejor tiene un impacto en el tiempo de procesamiento lotes de consultas.

Mala técnica en la práctica del método teórico del estado del arte. La mejor estrategia por bloques es TimesRanges que es una modificación de la original, pero que de todas formas es muy ineficiente en contexto donde se requiere procesamiento por lotes de queries, ya que se pierde mucho tiempo al término de cada Room y Walls.

Decir que en vez de perder tiempo planificando, es mejor usar una estrategia de procesamiento simple.

## REFERENCIAS

Albers, S. (2003). Online algorithms: a survey. *Mathematical Programming*, 97(1-2), 3–26.

URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10107-003-0436-0>

Arroyuelo, D., González, S., Oyarzún, M., & Sepulveda, V. (2013). Document identifier reassignment and run-length-compressed inverted indexes for improved search performance. En *Proceedings of the 36th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '13, (pág. 173–182). New York, NY, USA: ACM.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/2484028.2484079>

Baeza-Yates, R. A., Arenas, M., Gutiez, C., Hurtado, C., Mar M., Navarro, G., Piquer, J., Rodrez, A., Ruiz-del Solar, J., & Velasco, J. (2008). *Cunciona la Web*. Centro de Investigaci la Web.

Baeza-Yates, R. A., & Ribeiro-Neto, B. (2011). *Modern Information Retrieval*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.

Barroso, L. A., Dean, J., & Hölzle, U. (2003). Web search for a planet: The google cluster architecture. *IEEE Micro*, 23(2), 22–28.

URL <http://dx.doi.org/10.1109/MM.2003.1196112>

Blanco, R., & Barreiro, A. (2010). Probabilistic static pruning of inverted files. *ACM Trans. Inf. Syst.*, 28(1), 1:1–1:33.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/1658377.1658378>

Borodin, A., & El-Yaniv, R. (1998). *Online Computation and Competitive Analysis*. New York, NY, USA: Cambridge University Press.

- Broccolo, D., Macdonald, C., Orlando, S., Ounis, I., Perego, R., Silvestri, F., & Tonellotto, N. (2013). Query processing in highly-loaded search engines. En O. Kurland, M. Lewenstein, & E. Porat (Editores) *String Processing and Information Retrieval*, vol. 8214 de *Lecture Notes in Computer Science*, (pág. 49–55). Springer International Publishing.  
URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-02432-5\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-02432-5_9)
- Broder, A. Z., Carmel, D., Herscovici, M., Soffer, A., & Zien, J. (2003). Efficient query evaluation using a two-level retrieval process. En *Proceedings of the Twelfth International Conference on Information and Knowledge Management*, CIKM '03, (pág. 426–434). New York, NY, USA: ACM.  
URL <http://doi.acm.org/10.1145/956863.956944>
- Buckley, C., & Lewit, A. F. (1985). Optimization of inverted vector searches. En *Proceedings of the 8th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '85, (pág. 97–110). New York, NY, USA: ACM.  
URL <http://doi.acm.org/10.1145/253495.253515>
- Büttcher, S., Clarke, C., & Cormack, G. V. (2010). *Information Retrieval: Implementing and Evaluating Search Engines*. The MIT Press.
- Croft, B., Metzler, D., & Strohman, T. (2009). *Search Engines: Information Retrieval in Practice*. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1st ed.
- Cronen-Townsend, S., Zhou, Y., & Croft, W. B. (2002). Predicting query performance. En *Proceedings of the 25th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '02, (pág. 299–306). New York, NY, USA: ACM.  
URL <http://doi.acm.org/10.1145/564376.564429>
- Dean, J. (2009). Challenges in building large-scale information retrieval systems: Invited

talk. En *Proceedings of the Second ACM International Conference on Web Search and Data Mining*, WSDM '09, (pág. 1–1). New York, NY, USA: ACM.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/1498759.1498761>

Dean, J., & Barroso, L. A. (2013). The tail at scale. *Commun. ACM*, 56(2), 74–80.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/2408776.2408794>

Ding, S., & Suel, T. (2011). Faster top-k document retrieval using block-max indexes. En *Proceedings of the 34th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '11, (pág. 993–1002). New York, NY, USA: ACM.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/2009916.2010048>

Fausett, L. (Ed.) (1994). *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc.

Freire, A., Macdonald, C., Tonellotto, N., Ounis, I., & Cacheda, F. (2012). Scheduling queries across replicas. En *Proceedings of the 35th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '12, (pág. 1139–1140). New York, NY, USA: ACM.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/2348283.2348508>

Freire, A., Macdonald, C., Tonellotto, N., Ounis, I., & Cacheda, F. (2013). Hybrid query scheduling for a replicated search engine. En *Proceedings of the 35th European Conference on Advances in Information Retrieval*, ECIR'13, (pág. 435–446). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36973-5\\_37](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36973-5_37)

Gil-Costa, V., Inostrosa-Psijas, A., Marin, M., & Feustein, E. (2013). Service deployment algorithms for vertical search engines. En *Proceedings of the 2013 21st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing*, PDP '13,

- (pág. 140–147). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society.  
URL <http://dx.doi.org/10.1109/PDP.2013.28>
- Hauff, C. (2010). *Predicting the Effectiveness of Queries and Retrieval Systems*. Tesis de Doctorado, University of Twente, Enschede.
- He, B., & Ounis, I. (2004). Inferring query performance using pre-retrieval predictors. En A. Apostolico, & M. Melucci (Editores) *String Processing and Information Retrieval*, vol. 3246 de *Lecture Notes in Computer Science*, (pág. 43–54). Springer Berlin Heidelberg.  
URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30213-1\\_5](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30213-1_5)
- Jeon, M., He, Y., Elnikety, S., Cox, A. L., & Rixner, S. (2013). Adaptive parallelism for web search. En *Proceedings of the 8th ACM European Conference on Computer Systems*, EuroSys '13, (pág. 155–168). New York, NY, USA: ACM.  
URL <http://doi.acm.org/10.1145/2465351.2465367>
- Jeon, M., Kim, S., Hwang, S.-w., He, Y., Elnikety, S., Cox, A. L., & Rixner, S. (2014). Predictive parallelization: Taming tail latencies in web search. En *Proceedings of the 37th International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval*, SIGIR '14, (pág. 253–262). New York, NY, USA: ACM.  
URL <http://doi.acm.org/10.1145/2600428.2609572>
- Macdonald, C., Tonellotto, N., & Ounis, I. (2012). Learning to predict response times for online query scheduling. En *Proceedings of the 35th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '12, (pág. 621–630). New York, NY, USA: ACM.  
URL <http://doi.acm.org/10.1145/2348283.2348367>
- Moffat, A., & Zobel, J. (1996). Self-indexing inverted files for fast text retrieval. *ACM Trans.*

*Inf. Syst.*, 14(4), 349–379.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/237496.237497>

Persin, M. (1994). Document filtering for fast ranking. En *Proceedings of the 17th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '94, (pág. 339–348). New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc.  
URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=188490.188597>

Rojas, O., Gil-Costa, V., & Marin, M. (2013). Efficient parallel block-max wand algorithm. En F. Wolf, B. Mohr, & D. an Mey (Editores) *Euro-Par 2013 Parallel Processing*, vol. 8097 de *Lecture Notes in Computer Science*, (pág. 394–405). Springer Berlin Heidelberg.  
URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40047-6\\_41](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40047-6_41)

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1988). Neurocomputing: Foundations of research. cap. Learning Representations by Back-propagating Errors, (pág. 696–699). Cambridge, MA, USA: MIT Press.  
URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=65669.104451>

Salton, G., & McGill, M. J. (2003). *Introduction to Modern Information Retrieval*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, Inc.

Si, L., & Callan, J. (2002). Using sampled data and regression to merge search engine results. En *Proceedings of the 25th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '02, (pág. 19–26). New York, NY, USA: ACM.  
URL <http://doi.acm.org/10.1145/564376.564382>

Tatikonda, S., Cambazoglu, B. B., & Junqueira, F. P. (2011). Posting list intersection on multicore architectures. En *Proceedings of the 34th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '11, (pág. 963–972). New



York, NY, USA: ACM.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/2009916.2010045>

Tonellotto, N., Macdonald, C., & Ounis, I. (2011). Query efficiency prediction for dynamic pruning. En *Proceedings of the 9th Workshop on Large-scale and Distributed Informational Retrieval*, LSDS-IR '11, (pág. 3–8). New York, NY, USA: ACM.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/2064730.2064734>

Turtle, H., & Flood, J. (1995). Query evaluation: Strategies and optimizations. *Inf. Process. Manage.*, 31(6), 831–850.

URL [http://dx.doi.org/10.1016/0306-4573\(95\)00020-H](http://dx.doi.org/10.1016/0306-4573(95)00020-H)

Yan, H., Ding, S., & Suel, T. (2009). Inverted index compression and query processing with optimized document ordering. En *Proceedings of the 18th International Conference on World Wide Web*, WWW '09, (pág. 401–410). New York, NY, USA: ACM.

URL <http://doi.acm.org/10.1145/1526709.1526764>

Ye, D., & Zhang, G. (2007). On-line scheduling of parallel jobs in a list. *J. of Scheduling*, 10(6), 407–413.

URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10951-007-0032-x>

Zobel, J., & Moffat, A. (2006). Inverted files for text search engines. *ACM Comput. Surv.*, 38(2).

URL <http://doi.acm.org/10.1145/1132956.1132959>