

Estudio de algoritmos de planificación para flujos de trabajo

Fernando Aguilar Reyes

Tesina para obtener el título de Ingeniero en Computación
Instituto Tecnológico Autónomo de México
Río Hondo 1, Progreso Tizapán, Del. Álvaro Obregón, 01080
México, Distrito Federal

22 de junio de 2014

Índice general

1. Introducción	4
2. Flujos de trabajo	7
2.1. Definición y ejemplos	7
2.1.1. Anotación de proteínas	7
2.1.2. Curvas de amenaza sísmica	7
2.1.3. Generación de facturas	9
2.1.4. Procesamiento de imágenes astronómicas	9
2.2. Estructura de los flujos de trabajo	10
2.3. Perspectivas de los flujos de trabajo	11
2.4. Planificación como control de flujo	12
2.5. Alcance	12
2.5.1. Grafos dirigidos acíclicos	12
2.5.2. Ejecución atómica de tareas sin fallos	12
3. Cómputo distribuido	13
3.1. Enfoques de cómputo para flujos de trabajo	13
3.1.1. Clusters	13
3.1.2. Grids	14
3.1.3. Nubes	14
3.2. Comparación de los enfoques	16
4. Planificación	17
4.1. Definición del problema	17
4.2. La complejidad de planificar	18
4.3. Planificación de flujos de trabajo	18
4.3.1. Reducción de flujos de trabajo a grafos dirigidos acíclicos	18
4.3.2. Definición del problema de planificación de flujos de trabajo	18
4.3.3. Complejidad computacional de la planificación de flujos de trabajo	19
5. Algoritmos de planificación de flujos de trabajo	21
5.1. Clasificación de los algoritmos de planificación	21
5.2. Algoritmos de mejor esfuerzo	22

5.2.1.	Algoritmos heurísticos de mejor esfuerzo	22
5.2.2.	Algoritmos metaheurísticos de mejor esfuerzo	23
5.3.	Algoritmos de calidad en el servicio	23
5.3.1.	Algoritmos restringidos por presupuesto	23
5.3.2.	Algoritmos restringidos por fechas límites	24
5.3.3.	Estimación del tiempo	24
6.	Software para la administración y ejecución de flujos de trabajo	25
6.1.	Software orientado a clusters	25
6.1.1.	HTCCondor	25
6.1.2.	SwinDew-C	26
6.2.	Software orientado a grids	26
6.2.1.	SwinDew-G	26
6.2.2.	Pegasus	26
6.3.	Software orientado a nubes	26
6.3.1.	Aneka	26
6.3.2.	Askalon	26
7.	Conclusiones	27
A.	Pseudocódigos de algoritmos de planificación de flujos de trabajo	28
A.1.	Algoritmos de menor esfuerzo	28
A.1.1.	Miope	28
A.1.2.	Definiciones para los algoritmos Max-Min y Min-min	28
A.1.3.	Min-Min	29
A.1.4.	Max-Min	29
A.1.5.	Sufragio	30
A.1.6.	HEFT	31
A.1.7.	Híbrido	31
A.1.8.	TANH	32
A.2.	Metaheurísticos	32
A.2.1.	GRASP	32

Índice de figuras

1.1. Flujo de trabajo con una tarea (C) que depende de dos tareas (A y B). . . .	6
2.1. Flujo de trabajo para la anotación de proteínas.	8
2.2. Flujo de trabajo para generar curvas de amenaza sísmica.	8
2.3. Flujo de trabajo para generar facturas electrónicas.	9
2.4. Flujo de trabajo para procesamiento de imágenes del proyecto Montage. . . .	10
3.1. Topología del cluster Aitzaloea	14
3.2. Red de fibra óptica del grid LANCAD.	15

Capítulo 1

Introducción

Cada día, utilizamos aplicaciones de cómputo más complejas que resuelven problemas más complicados, debido a que estos problemas involucran el procesamiento de grandes volúmenes de datos o también involucran la omnipresencia de contenido multimedia; así, éstas aplicaciones demandan cada vez más poder de cómputo. Por ejemplo, hay instituciones financieras que necesitan procesar millones de transacciones diariamente; así, utilizan aplicaciones que durante el día guardan las operaciones bancarias y en la noche ejecutan estas operaciones en lotes para actualizar las cuentas bancarias. En la Bolsa Mexicana de Valores, el motor de negociación transaccional, MoNeT, puede procesar hasta 100,000 transacciones por segundo [6].

Otro ejemplo son las películas de animación: cuando los diseñadores han terminado de modelar a los personajes junto con el entorno y cuando también han especificado las animaciones de los personajes sobre el entorno, se requiere generar cada fotograma de la animación para después juntarlos y proyectarlos rápidamente para crear la ilusión de movimiento y, de esta forma, crear una película. Por ejemplo, en el 2005, investigadores de la Universidad de Innsbruck en Austria generaron una animación tridimensional, primero utilizando una sola computadora y luego utilizando varias computadoras interconectadas [20]. En el primer caso, tardaron aproximadamente 6 días en procesar la animación cuya duración es de un minuto. Por otro lado, utilizando varias computadoras, la animación fue procesada en poco menos de una hora.

Un último ejemplo son los proyectos de cómputo científico: éstos requieren hacer numerosos cálculos para llegar a resultados pertinentes. Tal es el caso del descubrimiento del bosón de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN). Se estima que cada año, el detector principal del LHC genera 15 petabytes (aproximadamente 15×10^{15} bytes) de datos que requieren ser analizados [24].

¿Qué tienen en común todas estas aplicaciones? Para empezar, toman mucho tiempo en ejecutarse. Entonces, una posible solución para disminuir el tiempo de ejecución de estas aplicaciones es distribuir el gran trabajo que requieren estos proyectos entre varias computadoras. Para ello, necesitamos dividir nuestra aplicación en partes más pequeñas e independientes, algunas de ellas podrán ejecutarse de manera concurrente y paralela, otras no. De esta forma, tendríamos una solución escalable, es decir, si aumentamos el número de computadoras

disponibles para nuestra aplicación, reduciremos el tiempo de ejecución.

Lograr esta paralelización requiere un esfuerzo por parte del desarrollador de la aplicación. Existen técnicas de paralelización que permiten al desarrollador expresar la aplicación en varias partes paralelas. A continuación, enlistaremos algunas de estas técnicas:

- **Programas multiproceso.** En esta técnica, la idea principal es utilizar varios procesos para repartir el cómputo. Por ejemplo, en el modelo fork/join, un programa se invoca recursivamente a sí mismo (fork), de tal modo que cada subprograma resuelve un problema más pequeño que el problema original. Después, los resultados parciales de cada subprograma son juntados en un sólo programa (join).
- **Threads.** Un proceso, en vez de invocarse a sí mismo varias veces, también puede invocar *threads* o hilos de ejecución que, a diferencia de un proceso, éstos no son controlados por el administrador de procesos del sistema operativo, sino por el programa mismo. Por lo tanto, ocupan menos recursos del sistema. De igual modo, se pueden implementar varios modelos de programación concurrente (por ejemplo: fork/join o productor/consumidor) como se hace con los programas multiproceso.
- **MapReduce.** Este paradigma de programación especializado en procesar grandes volúmenes de datos [8] funciona de la siguiente forma: primero se define una función $map() : (k_1, A) \rightarrow list(k_2, B)$, que se aplica a todos los elementos de tipo A para asociarles una llave y transformarlos al tipo B . Luego, la función $reduce() : (k_2, list(B)) \rightarrow list(B)$, hace una operación asociativa para sumarizar los resultados.
- **MPI.** La interfaz de paso de mensajes (MPI por sus siglas en inglés) es un conjunto de definiciones de bibliotecas [16], cuyas subrutinas son utilizadas por varios procesos paralelos para que puedan comunicarse entre si enviándose mensajes de manera asíncrona.

Aunque estas técnicas de paralelización son muy efectivas, éstas son aplicadas cuando el problema a resolver ha sido bien definido y cuando sólo hay una instancia de la aplicación que resuelve el problema planteado.

Ahora bien, hay aplicaciones que involucran varios pasos que están relacionados entre sí, por ejemplo, que el programa C requiera de la salida del programa A y del programa B para que pueda funcionar, tal y como se muestra en la figura 1.1. También, es conveniente definir los grandes bloques de la aplicación, porque puede suceder que los programas A , B y C estén hechos con diferentes técnicas de paralelización y/o contruidos con diferentes plataformas y lenguajes, por lo que cada uno debe ejecutarse por separado.

En los dos casos descritos anteriormente, hay una cierta secuencia que debemos seguir y, dentro de dicha secuencia, hay algunos pasos que podemos resolver de manera concurrente y otros pasos se resuelven de manera secuencial. De esta forma, los pasos de la aplicación representan un *modelo* de nuestro problema. Este modelo también es llamado *flujo de trabajo*. De manera muy abstracta, un flujo de trabajo es un conjunto de pasos que modelan la ejecución de un proceso. La utilidad de este sencillo concepto ha sido probado en varias

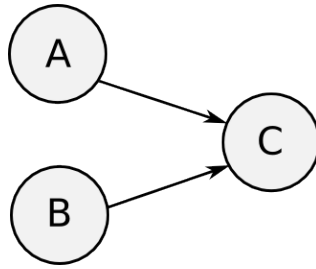


Figura 1.1: Flujo de trabajo con una tarea (C) que depende de dos tareas (A y B).

áreas, de las cuales mencionaremos dos aplicaciones: en el ámbito de los negocios y en el ámbito científico.

- En el ámbito de los negocios, se puede definir un flujo de trabajo para modelar el proceso de fabricación de un producto. También, es posible expresar un flujo de trabajo con un diagrama dibujado con los bloques y reglas del *Lenguaje de Ejecución de Procesos de Negocio* para después simular su ejecución en una computadora.
- En el ámbito científico, los flujos de trabajo son utilizados para modelar aplicaciones que analizan resultados de experimentos diversos. Por ejemplo, la NASA utiliza una aplicación llamada Montage para generar una gran imagen de la bóveda celeste a partir de imágenes más pequeñas tomadas en diferentes observatorios.

En cualquiera de los dos casos anteriores, es deseable distribuir la ejecución de éstos flujos de trabajo entre varias computadoras. Si bien es posible paralelizar algunos pasos de la ejecución de nuestro flujo de trabajo utilizando las técnicas antes mencionadas, hay restricciones de orden que se deben respetar, por lo cual, es indispensable *planificar* la ejecución del flujo de trabajo entre las múltiples computadoras.

Definimos la *planificación* como una función que asigna a cada tarea del flujo de trabajo un servicio que contiene los recursos para ejecutar dicha tarea, con el fin de completar la ejecución de todas las tareas de manera satisfactoria, cumpliendo ciertas restricciones [30], por ejemplo, restricciones de orden de ejecución. Con ello, se desea encontrar una forma óptima de hacer esta planificación para reducir el tiempo de ejecución total del flujo de trabajo. Sin embargo, con la aparición del cómputo en la nube, es posible ejecutar nuestro flujo de trabajo con otras restricciones, como minimizar el presupuesto necesario para la ejecución del flujo afectando el tiempo de ejecución.

En este trabajo se hace un estudio de los principales algoritmos de planificación de flujos de trabajo, con énfasis en los algoritmos utilizados en cómputo distribuido, en especial en cómputo en la nube. En el capítulo 2 se provee un estudio detallado del concepto de flujos de trabajo y su aplicación en computación. El capítulo 3 trata los principales enfoques de cómputo distribuido para ejecutar estos flujos. En el capítulo 4 se hace un estudio de los principales algoritmos de planificación de los flujos de trabajo. Finalmente, en el capítulo 6 discutiremos algunas conclusiones sobre el análisis de estos algoritmos.

Capítulo 2

Flujos de trabajo

2.1. Definición y ejemplos

Un flujo de trabajo es un conjunto de pasos que modelan la ejecución de un proceso [11]. En particular, en esta tesina se estudian a los flujos de trabajo utilizados para vislumbrar la ejecución de un proceso de cómputo. A continuación, se muestran algunos ejemplos de estos flujos de trabajo.

2.1.1. Anotación de proteínas

En el proyecto *e-Protein*, realizado por la Escuela Imperial de Londres, se realizó un flujo de trabajo para la anotación de proteínas. El objetivo del proyecto [21] era la identificación y anotación de partes de proteínas que expliquen su estructura y su función. En la figura 2.1 se muestra el flujo de trabajo desarrollado, donde las cajas representan los programas que son ejecutados para cada paso del proceso de anotación, y las líneas que conectan a las cajas representan las dependencias de datos entre los programas, es decir, si una caja tiene una línea que apunta a ella, significa que dicho programa depende de otro programa determinado por el otro extremo de la flecha.

2.1.2. Curvas de amenaza sísmica

Otro notable ejemplo es el proceso para generar curvas de amenaza sísmica que describen las probabilidades de que ocurra un temblor en una determinada área. Para elaborar estas curvas, los científicos del Centro de Terremotos del Sur de California (SCEC por sus siglas en inglés) tienen que realizar una gran cantidad de simulaciones para que sus resultados puedan ser combinados y expresados en la curva de amenaza [9]. El flujo de trabajo para generar la curva de amenaza se muestra en la figura 2.2.

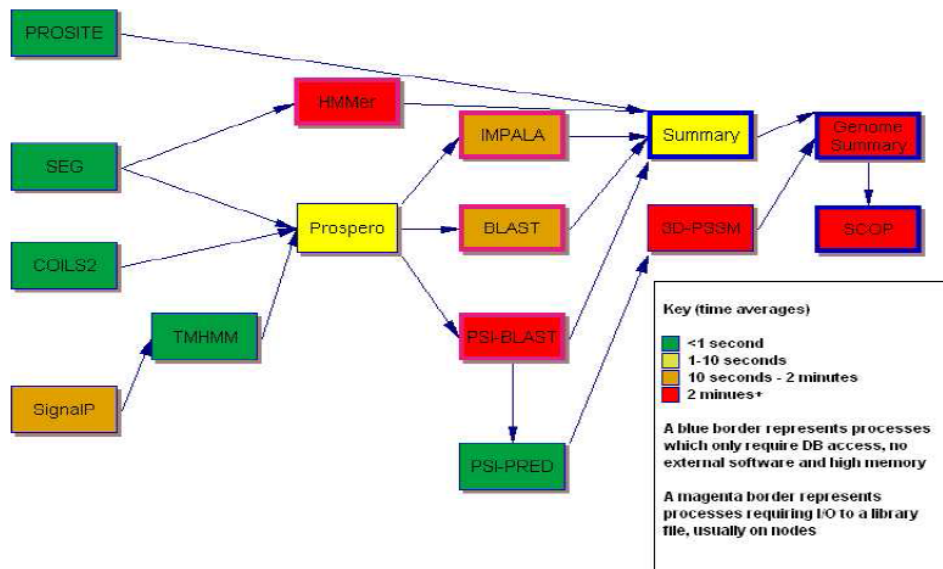


Figura 2.1: Flujo de trabajo para la anotación de proteínas.

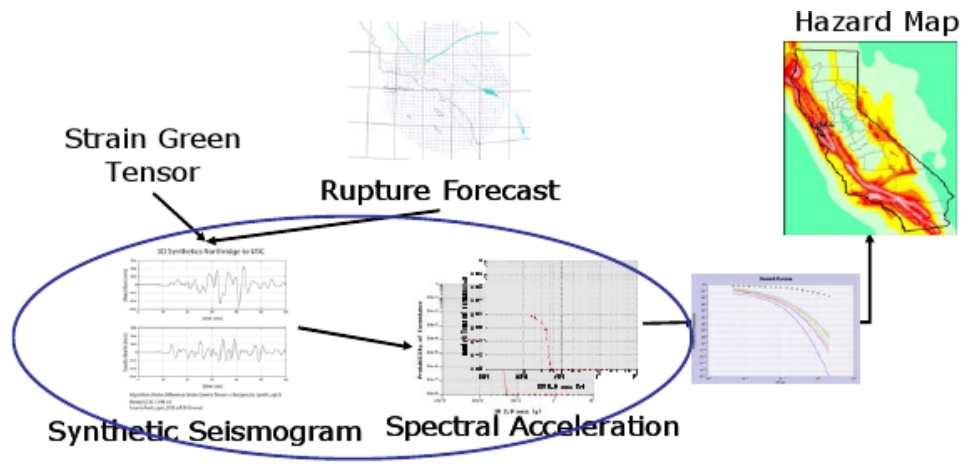


Figura 2.2: Flujo de trabajo para generar curvas de amenaza sísmica.

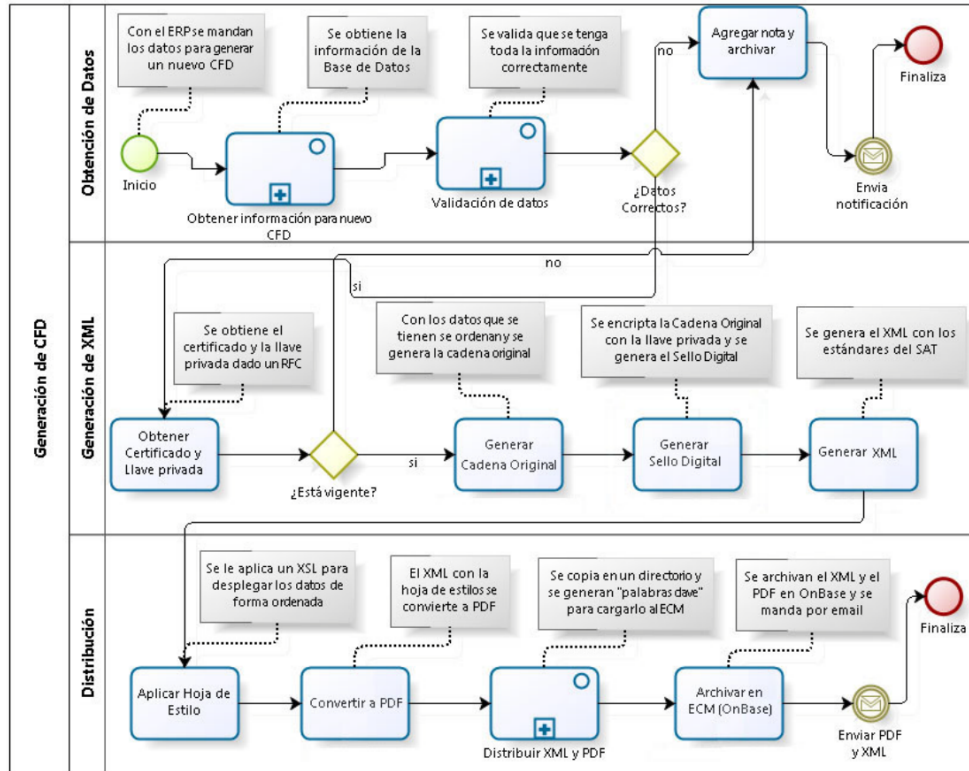


Figura 2.3: Flujo de trabajo para generar facturas electrónicas.

2.1.3. Generación de facturas

Recientemente en México, el Sistema de Administración Tributaria emitió los lineamientos para que las operaciones de compra-venta entre personas físicas y morales puedan ser registradas por medio de facturas electrónicas. Para generar estos Comprobantes Fiscales Digitales, las empresas tienen que hacer procesos de validaciones de RFC y encriptar el contenido de la factura con un mecanismo de llave privada. Naturalmente, este proceso de generación de factura requiere de varias actividades. En la figura 2.3 se muestra el flujo de trabajo que utiliza una empresa para generar sus facturas. Este flujo se encuentra documentado en una tesina presentada por Alcerreca [5].

2.1.4. Procesamiento de imágenes astronómicas

La NASA elaboró un software que permite crear una gran imagen del espacio exterior a partir de varias imágenes mosaico tomadas desde distintos telescopios. Esta aplicación, llamada Montage, utiliza un flujo de trabajo para generar la gran imagen. En la fase inicial de procesamiento, cada una de las imágenes mosaico puede ser procesada de manera independiente. En la figura 2.4 se puede observar que el flujo de trabajo del proyecto Montage inicia con varias actividades en paralelo, donde el color de las actividades representan la fase

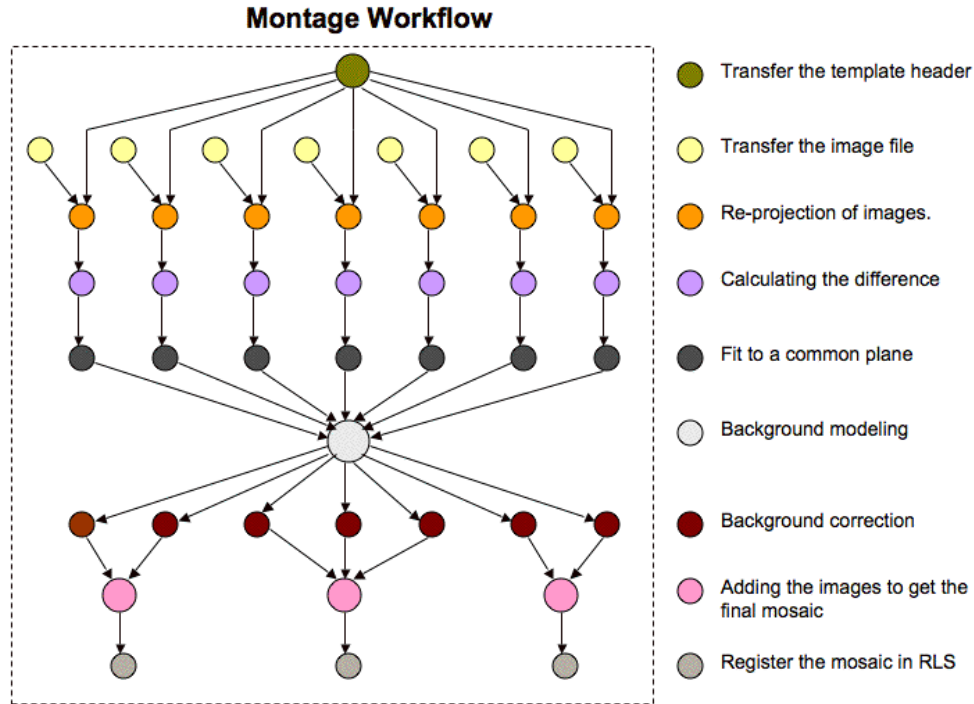


Figura 2.4: Flujo de trabajo para procesamiento de imágenes del proyecto Montage.

de procesamiento de la imagen. Luego, en la actividad de color gris, todas las imágenes son juntadas para generar la imagen de fondo común para todas las imágenes mosaico.

2.2. Estructura de los flujos de trabajo

Como hemos visto en los tres ejemplos anteriores, los flujos de trabajo presentados describen los *pasos* que se necesitan para calcular la solución de un problema. En éstos, no se ha hablado sobre los detalles para hacer los cálculos necesarios para cada flujo. En los flujos de trabajo tampoco se han definido las plataformas de cómputo en que se ejecutan estos flujos. Tan sólo se han definido los grandes pasos para solucionar el problema y las dependencias que tienen estos pasos.

Ahora, es muy común que estas dependencias estén dictadas por los datos que requiere cada paso para funcionar. Sin embargo, hay situaciones en los que los pasos del flujo no requieren los datos del paso anterior para funcionar, sino que las dependencias están marcadas por el orden temporal que deben seguir estos pasos. Así, se puede notar una ambigüedad en la definición de un flujo de trabajo.

2.3. Perspectivas de los flujos de trabajo

En la sección 2.2 se argumentó que un flujo de trabajo puede representar varias cosas, a saber: el orden temporal de las tareas o las dependencias de datos entre cada tarea, produciendo una ambigüedad en la interpretación de un flujo de trabajo. Debido a esta ambigüedad del significado de un flujo de trabajo, es posible interpretar un flujo de trabajo desde varias perspectivas. En el trabajo de Van der Aalst et al. [28] se identifican una serie de perspectivas identificadas en las definiciones de las especificaciones de un flujo de trabajo utilizadas en los sistemas que administran la ejecución de flujos de trabajo. Las cuatro perspectivas se enuncian a continuación:

- **Perspectiva de control de flujo.** Describe las relaciones de las actividades (pasos) con estructuras de control, tales como: secuencia, decisión, ejecución de actividades en paralelo y punto de sincronización conjunta. El flujo de trabajo para la generación de facturas es un buen ejemplo de un flujo de trabajo visto desde la perspectiva de control de flujo porque, al observar la figura 2.3, se pueden notar que hay actividades, simbolizadas con un rombo, que determinan si se ejecutan o no ciertas tareas.
- **Perspectiva de datos.** En ella, los flujos de trabajo describen las entradas y salidas de datos, tanto de ejecución como de control, que se tienen en cada actividad del flujo. También se toman en cuenta los datos locales a cada actividad; es decir, que sólo son necesarios dentro del contexto de ésta. En el ejemplo del flujo de trabajo para la anotación de proteínas, mostrado en la figura 2.1, podemos ver que esta perspectiva describe adecuadamente la estructura del flujo, ya que el orden de ejecución de las actividades están definidas por los datos que requieren cada una de las actividades.
- **Perspectiva de recursos.** Muestra cuáles son los recursos con los que se cuentan para ejecutar el flujo de trabajo y la forma en que estos recursos se encuentran organizados. Estos recursos pueden ser desde entidades de cómputo hasta roles con responsabilidades específicas cumplidas por actores humanos. El flujo de trabajo para generar curvas de amenaza sísmica de la figura 2.2 es un ejemplo de esta perspectiva, porque los elementos necesarios para generar las curvas de amenaza son provistos por geólogos.
- **Perspectiva operacional.** Aquí se detallan las operaciones elementales necesarias en cada actividad para ejecutar el flujo de trabajo. Estos detalles incluyen las transferencias de datos entre las operaciones y su correspondencia en programas. El flujo de trabajo del proyecto Montage, mostrado en la figura 2.4 ejemplifica esta perspectiva, ya que los colores utilizados en el flujo de trabajo son las actividades específicas que se aplican a cada imagen a procesar.

Cabe aclarar que estas perspectivas están relacionadas entre sí de modo que el control de flujo es la base en la que descansan las demás perspectivas. Esto es porque la perspectiva de datos requiere que el control de flujo tenga los datos de entrada y salida como prueba de que se cumplieron las pre y post-condiciones de cada actividad, respectivamente; la perspectiva de recursos define con qué se ejecutarán y almacenarán los datos del flujo de trabajo;

mientras que la perspectiva operacional trata los detalles sobre cómo se utilizan físicamente los recursos, los datos y los programas a lo largo del flujo de trabajo.

2.4. Planificación como control de flujo

El hecho de que la perspectiva de control de flujo sea la base de las demás perspectivas indica que la forma en que controla la ejecución del flujo determina de manera fundamental el rendimiento de la ejecución total de una instancia del flujo de trabajo. Por lo tanto, es de vital importancia encontrar métodos de planificación que permitan encontrar correspondencias entre recursos y actividades que cumplan con los requisitos dictados en las especificaciones examinadas en la perspectiva del control del flujo y que también maximicen el rendimiento de la ejecución de todo el flujo en general.

2.5. Alcance

En este trabajo, se establecerán las siguientes consideraciones para definir el alcance de este estudio de los algoritmos de planificación, a saber: la utilización de grafos dirigidos acíclicos y la suposición de que no habrá errores en la ejecución atómica de las tareas de los flujos de trabajo. En las siguientes se explicarán la importancia de estas suposiciones.

2.5.1. Grafos dirigidos acíclicos

Los flujos de trabajo están representados como *grafos dirigidos acíclicos*, con el objetivo de simplificar el estudio. Se utilizan estos grafos porque son una estructura de datos que representa intuitivamente las dependencias entre tareas. Se requiere que estos grafos sean dirigidos porque esta característica representa el orden de ejecución de las tareas. Además, el hecho de que no existan ciclos en los grafos implica que no se necesita ningún mecanismo de control de flujo condicional; es decir, si la ejecución de las tareas de un flujo de trabajo dependiera de las salidas de otras tareas del flujo, no se podría saber apriori cuál es el orden de ejecución de las tareas, y los algoritmos de planificación tendrían que especular cuál sería el posible orden de ejecución.

2.5.2. Ejecución atómica de tareas sin fallos

Las tareas (o actividades) de los flujos de trabajo son consideradas *atómicas*, i.e., una tarea no puede ejecutarse incompletamente ni incorrectamente. Algunos sistemas de administración de ejecución de flujos de trabajo tienen mecanismos para lidiar con estos errores, pero el estudio de éstos queda fuera del alcance de este trabajo, debido a la complejidad que representa diseñar e implementar sistemas distribuidos tolerantes a fallos. Un ejemplo de un sistema de administración de flujos de trabajo se encuentra en el trabajo de Kandaswamy et al. [12], en el cual describe que utilizan sobreprovisionamiento de recursos y migración de recursos para mitigar las fallas.

Capítulo 3

Cómputo distribuido

Los flujos de trabajo requieren de recursos de cómputo para su ejecución. En los flujos de trabajo de ejemplo del capítulo 2 se mencionaron aplicaciones científicas que, por su naturaleza, requieren un alto poder de cómputo para llevarse a cabo. Por otro lado, también existen aplicaciones de negocio que, si bien son computacionalmente sencillas, se requiere ejecutar una gran cantidad de instancias de estos flujos de trabajo. Por ello, ejecutar cualquiera de estos flujos de trabajo en una sola computadora resulta prohibitivo. Por lo tanto, comúnmente se hace uso de varias computadoras para distribuir la carga computacional necesaria para correr estos procesos.

Dependiendo de cómo estén organizados estas computadoras, se definen los enfoques para correr los flujos de trabajo con cómputo distribuido.

3.1. Enfoques de cómputo para flujos de trabajo

Diversos enfoques se han aplicado para distribuir la ejecución de un flujo de trabajo entre varias computadoras. De acuerdo a Buyya et al., los enfoques de cómputo más importantes para los flujos de trabajo son los *clusters*, los *grids* y las *nubes* [7]. A continuación, explicaremos cada uno de los enfoques.

3.1.1. Clusters

Los *clusters* son sistemas distribuidos, paralelos, compuestos de varias computadoras conectadas entre sí que funcionan como un único recurso de cómputo [7].

Un ejemplo de un cluster se puede encontrar en la Universidad Autónoma Metropolitana, campus Iztapalapa. El cluster, llamado *Aitzaloo*, está compuesto por 270 nodos de cómputo, cada uno equipado con dos procesadores Intel Xeon Quad-Core y 16GB en RAM; los nodos están conectados entre sí por medio de switches Ethernet e Infiniband. El cluster también cuenta con un sistema de archivos distribuido basado en Lustre. La capacidad real de cómputo del cluster Aitzaloo es de 18.4 teraFLOPS [3].

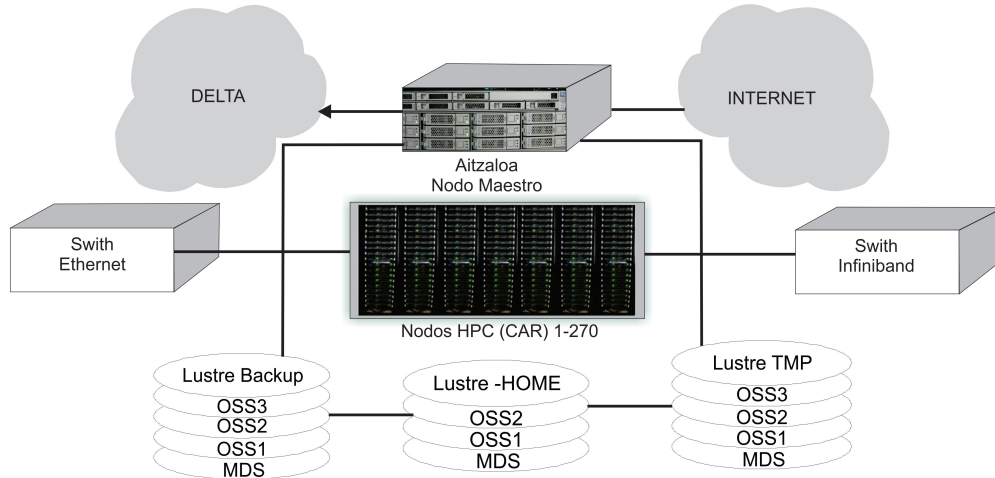


Figura 3.1: Topología del cluster Aitzaloo

El detalle de la topología del cluster se puede apreciar en la figura 3.1, en donde podemos apreciar que los switches son los puntos de conexión entre el nodo maestro, el sistema de almacenamiento distribuido y los nodos de cómputo.

3.1.2. Grids

Los *grids* son sistemas distribuidos, paralelos, compuestos de computadoras autónomas y geográficamente distribuidas que pueden trabajar en conjunto o de manera independiente de acuerdo a los objetivos, políticas y mecanismos de uno o varios administradores del sistema, es decir, un grid puede ser compartido entre varias instituciones [7].

El proyecto *LANCAD*¹ es un buen ejemplo, pues une el cluster *Aitzaloo* de la UAM, el cluster de la UNAM *KamBalam*, y el cluster *Xiuhcoatl* del CINVESTAV por medio de una red de fibra óptica instalada en las estaciones del Sistema de Transporte Colectivo Metro. La suma de la potencias reales de cada *nodo robusto* del grid es de 48.55 teraFLOPS [1].

En la figura 3.2 se muestra los tramos de línea de Metro que cuentan con fibra óptica para conectar cada uno de las supercomputadoras (clusters) de las tres instituciones.

3.1.3. Nubes

Las *nubes* (clouds) son sistemas distribuidos, paralelos, compuestos de computadoras o máquinas virtuales interconectadas que son aprovisionadas para usarse como uno o varios recursos de cómputo, de acuerdo a un contrato de nivel de servicio acordado entre el proveedor de la nube y el cliente [7].

Empresas nuevas y existentes proveen servicios de cómputo en la nube, tales como Go-Grid, Rackspace, Amazon, Microsoft, IBM, Oracle, entre otras. La forma en que operan

¹Laboratorio Nacional de Cómputo de Alto Rendimiento

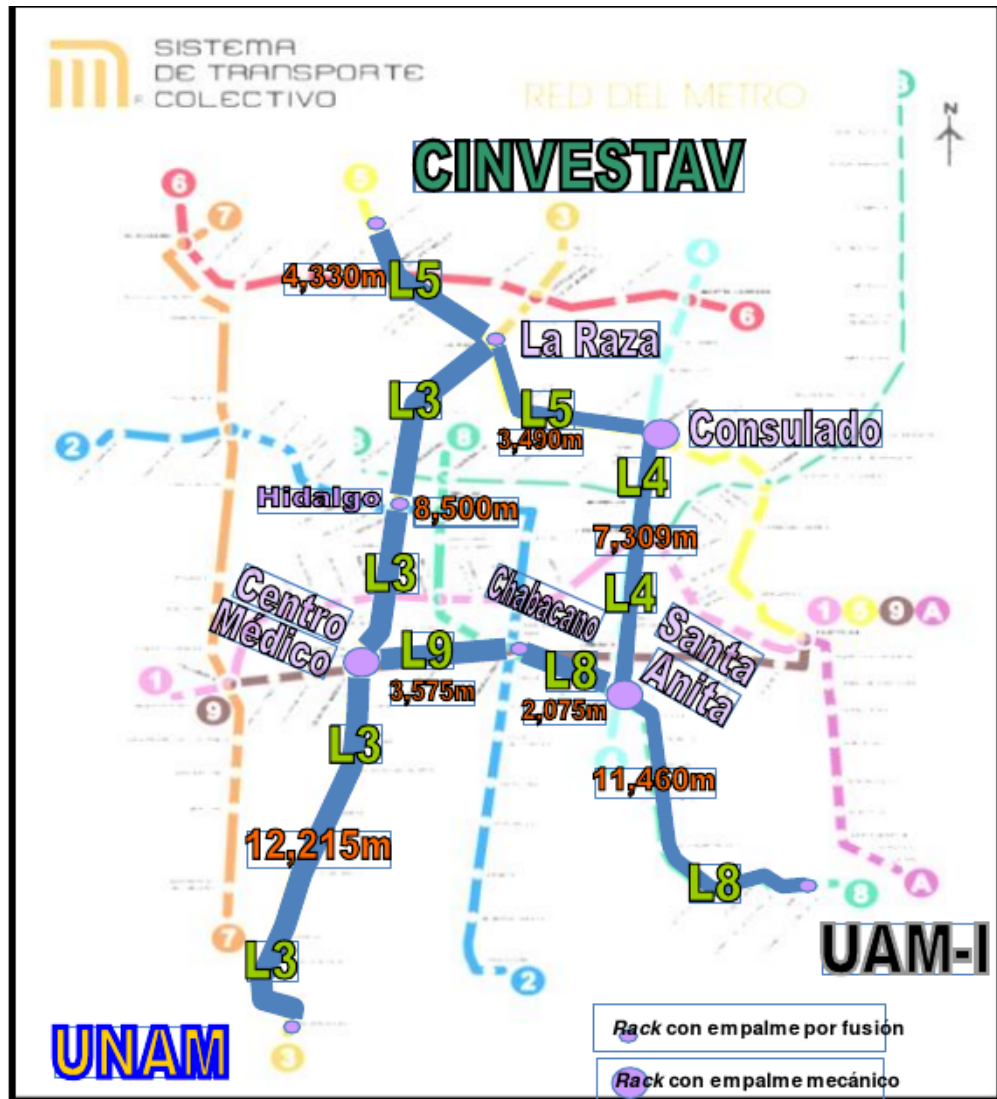


Figura 3.2: Red de fibra óptica del grid LANCAD.

es la siguiente: se paga cierta cantidad por utilizar servicios de cómputo o almacenamiento durante determinado tiempo. Así, los clientes no tienen que invertir grandes cantidades de dinero para contar con una gran infraestructura como en el caso de los clusters y los grids.

3.2. Comparación de los enfoques

Si bien estos enfoques difieren, principalmente, en la forma en que están organizadas las unidades de cómputo, podemos enumerar algunas observaciones.

Primero, es natural ver que los grids están compuestos de clusters, pero también podría verse a un grid como un gran cluster. Hasta cierto punto este razonamiento parece correcto. Sin embargo, la diferencia importante entre clusters y grids radica en el hecho de que el grid es comúnmente administrado por varios técnicos de varias instituciones que, pueden tener objetivos y necesidades diversas, mientras que un cluster requiere de menos administradores y se asume una mayor flexibilidad para enfrentar fallos. [7]

Segundo, tanto los grids como las nubes son físicamente muy similares: ambos consisten de varios clusteres interconectados y distribuidos geográficamente. Entonces, ¿cuál es la diferencia? Lo que distingue a las nubes de los grids son dos características: (1) en una nube, se utilizan *máquinas virtuales* para distribuir el recurso. El usuario tiene la vista de una parte del grid como si fuera una computadora dedicada exclusivamente para éste. Por otro lado, en los grids, es común que el usuario acceda a él con una cuenta asignada por un administrador, de tal suerte que se tiene una vista de una gran máquina que es compartida entre varios usuarios. Muchos de los administradores de grids en el mundo administran los trabajos encargados por los usuarios de tal modo que se ejecuten lo más rápido posible con los recursos disponibles en un tiempo dado. Los usuarios, en algunos casos obtienen acceso al grid y trabajan sus proyectos de manera gratuita o, en caso contrario, pagan una cuota por un tiempo fijo de cómputo. Pero, en el caso de las nubes, se agrega un modelo económico para acceder a los recursos llamado *pay as you go*, en donde el usuario paga una cuota por los recursos utilizados, sin alguna limitación mas que el presupuesto. Así, el usuario podría pagar una gran cantidad para que su flujo de trabajo se ejecute en el menor tiempo posible o también podría pagar una menor cantidad sacrificando el tiempo total de ejecución del flujo.

Capítulo 4

Planificación

La planificación es el proceso de asignación de recursos a tareas, de tal modo que se define un orden de ejecución de las tareas, teniendo lugar diferentes combinaciones de recursos y tareas. En este capítulo se define de la forma más elemental el problema de la planificación para estudiar sus propiedades y también se explica la relación de este problema fundamental con los flujos de trabajo.

4.1. Definición del problema

De acuerdo a Ullman et al. [27], el problema de la planificación se define de la siguiente manera:

Definición 1. *El problema de la planificación consiste en:*

1. *Un conjunto de tareas $S = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$*
2. *Un ordenamiento parcial \prec sobre S*
3. *Una función de costo $U : S \mapsto \mathbb{Z}^+$, la cual indica el tiempo que tarda en completarse cada una de las tareas en S*
4. *Un número de computadoras (procesadores) k*
 - *El objetivo del problema de la planificación es minimizar el tiempo total de ejecución, denotado por t_{max} , respetando el orden parcial definido por \prec , asignando tareas de S a los k procesadores.*

Es importante notar que se asume que cuando una computadora ejecuta una tarea, ésta es ejecutada completamente, sin errores o interrupciones.

4.2. La complejidad de planificar

Como puede notarse, hay varias maneras de acomodar las k computadoras para que se ejecuten todas las tareas de S . Sin embargo, Ullman et al. han demostrado que este problema pertenece a la categoría NP-completo [27].

Esto significa que no se ha encontrado un algoritmo que pueda resolver el problema en tiempo polinomial. Entonces, la solución ingenua de probar ordenadamente todas las posibles asignaciones de tareas a computadoras resulta computacionalmente muy costoso.

Así, la forma de atacar estos problemas NP-completos es utilizar métodos de aproximación [13] que obtengan soluciones subóptimas o utilizar heurísticas que resuelvan este problema sumando ciertas restricciones.

4.3. Planificación de flujos de trabajo

Hasta ahora, se ha mencionado el problema básico de planificación con restricciones. Con ello, se pretende plantear el problema de la planificación de flujos de trabajo y apoyarse en la definición del problema básico de planificación para enumerar propiedades sobre este problema.

Para plantear el problema de la planificación de flujos de trabajo, primero se mostrará que bajo ciertas condiciones, un flujo de trabajo puede ser reducido a un grafo dirigido acíclico haciendo las transformaciones adecuadas. Luego, se utilizará la definición del problema básico de planificación con restricciones y su semejanza para flujos de trabajo. Finalmente, se hará una descripción de la complejidad de planificar flujos de trabajo.

4.3.1. Reducción de flujos de trabajo a grafos dirigidos acíclicos

En el trabajo de de Mair et al. [18] proponen un formato para una representación intermedia de flujos de trabajo, con el fin de transformar una especificación de un flujo de trabajo detallada –escrita en un lenguaje basado en XML llamado AGWL– a una representación intermedia basada en grafos dirigidos acíclicos.

Aunque no existe un consenso general sobre cuál es una definición completa de un flujo de trabajo [28], el lenguaje AGWL es una especificación suficiente para una gran cantidad de flujos de trabajo de ámbito científico, porque con las construcciones *if*, *while*, *for*, *parallel*, *sequence* son adecuadas para expresar vastos flujos.

El hecho importante a recalcar es que los grafos dirigidos acíclicos sirven como representación para utilizarlos en los algoritmos de planificación.

4.3.2. Definición del problema de planificación de flujos de trabajo

Una vez que se ha establecido a los grafos dirigidos acíclicos como nuestra representación básica de flujos de trabajo, se definirá el problema que conlleva asignar recursos a las tareas del flujo.

Con el fin de no perder generalidad, tomaremos la definiciones de Wieczorek-Prodan [29] para definir el problema de la planificación de flujos de trabajo:

Definición 2. Un **flujo de trabajo** es un grafo dirigido $w \in \mathcal{W}$, $w = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, compuesto de un conjunto de nodos \mathcal{V} que representan tareas $\tau \in \mathcal{T}$ y un conjunto de aristas \mathcal{E} que representan transferencias de datos $\rho \in \mathcal{D}$.

Hay que notar que en la definición anterior que la forma en que se relacionan las tareas y las transferencias de datos con los nodos y aristas del grafo está determinada por la representación *concreta* del flujo de trabajo.

Ahora, se definirán los recursos de cómputo en donde se ejecuta el flujo.

Definición 3. Un **servicio** es una entidad de cómputo que puede ejecutar una tarea $\tau \in \mathcal{T}$. El conjunto de todos los servicios disponibles para ejecutar el flujo de trabajo está denotado por \mathcal{S} .

De este modo, la planificación es definida como una función:

Definición 4. La **planificación de un flujo de trabajo** w es una función $f : \mathcal{T} \mapsto \mathcal{S}$ que asigna servicios a las tareas del flujo. El conjunto que contiene todas las posibles calendarizaciones de w es denotado por \mathcal{F} .

Cada posible planificación determina un costo de ejecución. A continuación, definiremos el modelo de costo determinado por la utilización de los servicios.

Definición 5. Un **modelo de costos** es un conjunto de criterios $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ que determinan las restricciones en las que se debe ejecutar una planificación, por ejemplo, un límite en el tiempo de ejecución, en el costo monetario o la tolerancia a fallos, entre otros.

Definición 6. Para cada criterio $c_i \in C$, existe una **función de costo parcial** $\Theta_i : \mathcal{S} \mapsto \mathbb{R}$, en la que a cada servicio disponible para ejecutar el flujo de trabajo se le asocia un costo por ejecutar dicho servicio con las restricciones dictadas con el criterio c_i .

Definición 7. Para cada criterio $c_i \in C$, existe una **función de costo total** $\Delta_i : \mathcal{W} \times \mathcal{F} \mapsto \mathbb{R}$, que asigna un flujo de trabajo w calendarizado por f un costo basado en los costos parciales determinados por los servicios utilizados para ejecutar las tareas del flujo.

El objetivo del problema de la planificación de flujos de trabajo es encontrar la planificación f que minimice las funciones de costo total Δ_i , $1 \leq i \leq n$.

4.3.3. Complejidad computacional de la planificación de flujos de trabajo

Ahora, se hará una analogía con el problema básico de planificación para poder estudiar su complejidad computacional. La analogía es la siguiente:

1. El conjunto de tareas \mathcal{S} equivale a las tareas \mathcal{T} descritas por el flujo de trabajo.

2. El ordenamiento parcial \prec está representado tanto por las dependencias de datos \mathcal{D} y las aristas \mathcal{E} que representan el control de flujo que debe respetarse para ejecutar el flujo.
3. Las k computadoras equivalen al conjunto de servicios \mathcal{S} disponibles para ejecutar el flujo.
4. La función de costo U tiene una equivalencia implícita. El problema básico asume que conocemos apriori el tiempo de ejecución de una tarea. Sin embargo, es muy frecuente que sólo tengamos una estimación del tiempo de ejecución. Por otro lado, podemos establecer una función auxiliar que relacione las tareas con los servicios. Dicha relación es la función de planificación f . En efecto, ejecutar una tarea en un servicio genera un costo, determinado por las funciones parciales y totales. Por lo pronto, estableceremos una relación proporcional entre costo y tiempo, con el fin de mostrar que existe una equivalencia entre la función de costo W del problema básico y el modelo de costo de un flujo de trabajo.

Con lo anterior, se ha mostrado que el problema de la planificación de flujos de trabajo es equivalente al problema básico de planificación. Entonces, se puede inferir que el problema de la planificación de flujos de trabajo pertenece a la categoría de problemas NP-completo.

Capítulo 5

Algoritmos de planificación de flujos de trabajo

En el capítulo anterior definimos el problema de planificar flujos de trabajo. También se vio que dicho problema pertenece a la categoría de los problemas NP-completos, lo cual significa que la complejidad –o tiempo de ejecución– para resolver este problema no está acotada por una función polinomial. Por ello, diversos algoritmos se han propuesto para atacar, ya sea de manera total o parcial, el objetivo principal de la planificación: optimizar los costos, definidos como tiempo total de ejecución o un presupuesto.

Ahora, con los enfoques de cómputo propuestos en el capítulo 2, se crean diversos algoritmos para diferentes necesidades. Mientras que en los clusters y los grids se asumen que estos recursos son compartidos, los algoritmos de planificación para estos recursos asumen que los flujos deben ser ejecutados lo más pronto posible, con el fin de hacer que el recurso esté ocupado la mayor parte del tiempo. Por otro lado, el enfoque de nubes permite diseñador de flujos de trabajo elegir entre ejecutar el flujo con todos los recursos a costa de un elevado presupuesto o, reducir dicho presupuesto tolerando a costa de un tiempo de ejecución más elevado.

5.1. Clasificación de los algoritmos de planificación

Como han aparecido numerosos algoritmos para planificar flujos de trabajo, es natural observar que surjan clasificaciones [26] [33] para tener una mejor idea de los avances logrados en este tema y los puntos clave con los que trabajan los algoritmos.

De acuerdo a Yu et al. [33], se pueden clasificar los algoritmos de planificación los algoritmos de flujos de trabajo ejecutados en grids en dos grandes niveles: los algoritmos de Mejor Esfuerzo y los algoritmos de Calidad en el Servicio¹. Al primer grupo pertenecen aquellos algoritmos que tratan de minimizar el tiempo total de ejecución², haciendo uso de todos los recursos disponibles. El segundo grupo, los algoritmos tratan de obtener una planificación

¹En la literatura especializada se conoce a este término como *Quality of Service*

²También conocido como *makespan*

que cumpla las restricciones especificadas como una medida de calidad, con la posibilidad de elegir soluciones que tomen un tiempo de ejecución subóptimo. A su vez, cada grupo tiene ramas de clasificación que esbozaremos a continuación.

A continuación, mostraremos los algoritmos descritos en la clasificación de Yu et al. con los ajustes en notación necesarios para que coincidan con las definiciones de flujo de trabajo establecidas en el capítulo anterior.

5.2. Algoritmos de mejor esfuerzo

Este tipo de algoritmos tratan de minimizar algún criterio, que en muchos casos es el tiempo total de ejecución o *makespan*. Cabe aclarar que para los siguientes algoritmos, se asumirá que el grafo del flujo de trabajo tiene una correspondencia biyectiva entre los nodos \mathcal{V} y las tareas \mathcal{T} , es decir, cada nodo del grafo representa una tarea del flujo de trabajo. Las aristas del grafo representan *dependencias entre tareas*.

También, los algoritmos de mejor esfuerzo se pueden dividir en algoritmos guiados por heurísticas y en algoritmos guiados por metaheurísticas. El primer subgrupo debe su nombre a que las soluciones están basadas en ideas que resuelven de manera aproximada el problema de la planificación bajo ciertas condiciones [33]. El segundo subgrupo contiene a los algoritmos que utilizan algún método para elegir o generar planificaciones que se acerquen al óptimo.

5.2.1. Algoritmos heurísticos de mejor esfuerzo

Los algoritmos heurísticos se pueden dividir en cuatro grandes tipos:

1. algoritmo inmediato,
2. algoritmos basados en lista,
3. clusterización de tareas y
4. duplicación de tareas.

El primer grupo corresponde al algoritmo miope, que sólo asigna tareas a recursos conforme se va necesitando. Los algoritmos basados en lista ordenan las tareas de acuerdo a algún criterio (fase de priorización) y seleccionan las tareas de acuerdo a cierto criterio (fase de selección). Los algoritmos de clusterización de tareas crean grupos que, al inicio, crean un grupo para cada tarea; después, con un paso de mezcla se van uniendo grupos hasta que quede un número de grupos igual al número de recursos disponibles; finalmente se ordenan las tareas de cada grupo para ejecutarse en cada grupo. Finalmente, los algoritmos de duplicación de tareas calendarizan una tarea en varios recursos con el fin de reducir el costo por comunicación entre recursos; cada uno de estos algoritmos se caracteriza por la manera en que eligen los algoritmos a planificar.

5.2.2. Algoritmos metaheurísticos de mejor esfuerzo

Los algoritmos metaheurísticos son clasificados de acuerdo a la metaheurística que utilizan. Para esta clasificación, vamos a describir tres tipos de heurísticas:

1. algoritmos genéticos,
2. búsqueda aleatoria adaptativa dirigida –GRASP– y
3. recocido simulado.

Los algoritmos genéticos simulan el proceso de selección natural con posibles calendarizaciones e introducen mutaciones para evitar enfocarse en una solución local; con la ayuda de una función de evaluación (*fitness*) se mide la calidad de la planificación y se eligen aquellas soluciones que resulten mejor evaluadas. El algoritmo GRASP³ genera aleatoriamente soluciones y con un procedimiento glotón⁴ elige las soluciones óptimas locales. El recocido simulado, como su nombre lo indica, emula el proceso de formación de cristales donde en cada iteración se va creando una solución más óptima.

5.3. Algoritmos de calidad en el servicio

En estos algoritmos, se definen un conjunto de restricciones que debe respetar la planificación. Principalmente, estas restricciones tienen que ver con un presupuesto global limitado y un límite en los tiempos de ejecución total del flujo de trabajo. También es posible definir límites de tiempo de ejecución o límites de presupuesto para cada tarea particular del flujo.

De acuerdo a la forma que trabajan estos algoritmos, pueden dividirse en: restringidos por presupuesto o restringidos por fecha límite. Los primeros son algoritmos que utilizan el presupuesto para cumplir con restricciones de calidad del servicio. Los algoritmos restringidos por fecha límite buscan calendarizaciones que cumplan con fechas proporcionadas. Ambos grupos se subdividen en heurísticos y metaheurísticos. A continuación, hablaremos de estas subdivisiones.

5.3.1. Algoritmos restringidos por presupuesto

Los algoritmos restringidos por presupuesto se dividen en:

1. heurísticos y
2. metaheurísticos.

³GRASP son las siglas en inglés de *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*

⁴Greedy

En la primera división se encuentran los algoritmos que trabajan con una idea base que genera soluciones que no están garantizadas que sean óptimas. En este grupo de algoritmos se encuentran un ejemplo importante: el algoritmo LOSS/GAIN, propuesto por Tsiakkouri et al. [23]. Los algoritmos metaheurísticos generan soluciones aleatoriamente y utilizan la información de iteraciones pasadas para refinar las soluciones. En el trabajo de Yu et al. [32] proponen un algoritmo genético cuya función de evaluación valora mejor a las calendarizaciones que cumplan con el presupuesto con un tiempo de ejecución mínimo.

5.3.2. Algoritmos restringidos por fechas límites

Los algoritmos restringidos por fechas límites también se dividen en:

1. heurísticos y
2. metaheurísticos.

En el primer grupo se encuentran el algoritmo BackTracking, propuesto por Menascé et al. [19], y el algoritmo de distribución de fechas límite, propuesto por Yu et al. [34]. En el segundo grupo se encuentra un algoritmo genético basado en el algoritmo del grupo anterior [32], cuya función fitness valora mejor a aquellas soluciones que cumplan con la fecha límite, con un presupuesto mínimo.

5.3.3. Estimación del tiempo

En los algoritmos vistos en esta sección, se asume que se conoce el tiempo de ejecución de una tarea. Sin embargo, en la etapa de diseño de un flujo de trabajo, es complicado conocer la duración de las tareas, debido a que son muchos los factores que influyen el tiempo total de ejecución del flujo, como el rendimiento de la plataforma de cómputo, la cantidad de datos a procesar, el tiempo de comunicación entre nodos de cómputo, entre otros. Para mitigar este problema, se han hecho algoritmos basados en series de tiempo que estiman el tiempo de ejecución de cada una de las tareas de un flujo de trabajo. Estos algoritmos utilizan información histórica de ejecuciones de flujos de trabajo para realizar las predicciones [15].

Capítulo 6

Software para la administración y ejecución de flujos de trabajo

En el capítulo anterior se extendió la clasificación de algoritmos de calendarización elaborada por Yu et al. [33]. Sin duda, estos algoritmos han sido probados en simulaciones e implementados en sistemas que administran la ejecución de los flujos de trabajo. De acuerdo a Yy et al. [33], un sistema de administración de flujos de trabajo¹ se encarga de definir, coordinar y ejecutar los flujos de trabajo en los recursos de cómputo.

Para este trabajo, clasificaremos los sistemas de administración de flujos de trabajo de acuerdo a su enfoque de cómputo, enumerando las siguientes características: año de aparición, proyecto, utilización, autores y los algoritmos de calendarización utilizados en estos sistemas.

6.1. Software orientado a clusters

6.1.1. HTCondor

HTCondor [25] es un sistema para administrar flujos de trabajo que necesitan ser ejecutados en entornos de cómputo distribuido. Desde 1983 [2], HTCondor es desarrollado y mantenido por la Universidad de Wisconsin en Madison. Éste tiene un módulo llamado DAGMan que se encarga de calendarizar tareas de un flujo de trabajo, expresadas como grafos dirigidos acíclicos. El algoritmo de calendarización utilizado por DAGMan es el algoritmo miope.

HTCondor presenta al usuario un único recurso de cómputo, formado de varias computadoras interconectadas entre sí. Esta es la razón por la que este sistema de administración de flujos de trabajo cae dentro de la clasificación de software orientado a clusters.

¹En la literatura académica, estos sistemas son conocidos como *workflow management software systems*

6.1.2. SwinDew-C

6.2. Software orientado a grids

6.2.1. SwinDew-G

SwinDew-G [31] es un sistema de administracion de flujos de trabajo cuya característica especial es que trabaja con redes de computadoras P2P. En la primera version de SwinDew, el proceso de calendarizacion es estático [31], i.e., que en la fase de preparacion de la ejecucion se crea el plan de ejecucion del flujo y se aplica sin ninguna modificacion a lo largo del tiempo. Varios esfuerzos se han hecho para mejorar el mecanismo de calendarizacion, como el algoritmo CTC [14] diseñado especialmente para flujos de trabajo que son intensivos en instancias pero que contienen pocas tareas simples, como los flujos de trabajo utilizados en los bancos y empresas.

Tambien, existen versiones especificas de SwinDew para grids y nubes. En este caso, citamos la versión para grids llamada SwinDew-G. La primera versión de SwinDew-G aparece en publicaciones aceptadas en el 2006. Finalmente, SwinDew y sus variantes fueron desarrollados en la Universidad de Swinburne, en Australia.

6.2.2. Pegasus

Pegasus [10] fue desarrollado en la Universidad del Sur de California. Al igual que SwinDew-G, se puede utilizar Pegasus para trabajar con grids y con nubes. Pegasus implementa max-min, min-min y Sufragio como algoritmos de planificación. Las principales aplicaciones de Pegasus son los flujos de trabajo científicos. Los primeros trabajos publicados que reportan el uso de Pegasus datan del 2003 [4]. El módulo encargado de calendarizar el flujo de trabajo es el Mapper.

6.3. Software orientado a nubes

6.3.1. Aneka

URL: <http://www.manjrasoft.com/products.html>

Aneka utiliza un mecanismo de negociación mediante agentes que buscan *cerrar* los mejores tratos con los proveedores de los servicios de la nube, que mejor satisfagan los requisitos de calidad en el servicio.

6.3.2. Askalon

URL: <http://www.dps.uibk.ac.at/projects/askalon/>

Askalon implementa HEFT para calendarizar flujos que requieran reducir tiempo de ejecución y algoritmos genéticos para trabajar flujos de trabajo con restricciones de calidad en el servicio.

Capítulo 7

Conclusiones

En este trabajo hemos revisado el problema de calendarizar flujos de trabajo. Primero se describió el concepto de flujo de trabajo, ilustrándolo con algunos ejemplos de aplicación. También vimos que la descripción de las tareas y las dependencias entre ellas juegan un papel muy importante a la hora de planear y administrar los recursos asignados a cada tarea del flujo de trabajo.

Más adelante, se estableció que los flujos de trabajo son ejecutados en sistemas de cómputo distribuido, los cuales clasificamos en clusters, grids y nubes, de acuerdo a la forma en trabajan para un objetivo común.

Después se estudió la complejidad de calendarizar flujos de trabajo comparando este problema con otro problema de calendarización más general. Como este problema es NP-completo, se han propuesto varias soluciones heurísticas y metaheurísticas que resuelven el problema bajo ciertas circunstancias.

También, con el objetivo de comprender las diferentes heurísticas propuestas para calendarizar flujos de trabajo, se propuso un modelo para describir de la forma más general posible un flujo de trabajo, basados en el trabajo de Wieckzorek et al..

Con el modelo establecido, se realizó una clasificación de los algoritmos de calendarización, la cual está basada en el trabajo de Yu et al.; la aportación de este trabajo fue dar otro punto de vista sobre la forma de clasificar las metaheurísticas, ya que éstas, dependiendo de cómo son programadas, pueden hacer optimizaciones estilo mejor esfuerzo o buscar soluciones que cumplan con restricciones de calidad en el servicio.

Finalmente, se describieron algunos sistemas de administración de flujos de trabajo y los algoritmos de calendarización que utilizan estos sistemas, clasificandolos de acuerdo a la orientación que tienen los algoritmos para calendarizar. Esto es, si la calendarización está pensada para utilizarse en clusters, grids o nubes. Como se puede notar, en estos sistemas puede verse claramente la unión de las dos teorías sobre enfoques de cómputo distribuidos y algoritmos de calendarización.

Apéndice A

Pseudocódigos de algoritmos de planificación de flujos de trabajo

A.1. Algoritmos de menor esfuerzo

A.1.1. Miope

Este es el más simple de todos los algoritmos. Lo único que hace es buscar un recurso disponible que pueda ejecutar la tarea y asignarle dicha tarea. No toma en cuenta otra característica a optimizar. Este algoritmo fue propuesto por Ramamritham et al. [22]. El algoritmo [33] presentado en este trabajo se encuentra en la sección A.1.1 del Apéndice.

Entrada: Un grafo de flujo de trabajo $w = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$

Salida: Una calendarización f

- 1: **while** $\exists v \in \mathcal{V}$ no completada **do**
- 2: $t \leftarrow$ Obtener una tarea lista, no calendarizada, con padres calendarizados;
- 3: $r \leftarrow$ Obtener un recurso que pueda resolver la tarea en el menor tiempo;
- 4: Calendarizar t en r , i.e., $f(r) = t$;
- 5: **end while**

A.1.2. Definiciones para los algoritmos Max-Min y Min-min

Los algoritmos min-min y max-min utilizan las siguientes estimaciones:

- $EET(t, r)$ – **Tiempo estimado de ejecución:** Tiempo que el recurso (servicio) r tomará en ejecutar la tarea t , desde que la tarea es ejecutada en el recurso
- $EAT(t, r)$ – **Tiempo estimado de disponibilidad:** Tiempo en el que el recurso r estará disponible para ejecutar la tarea t
- $FAT(t, r)$ – **Tiempo de archivo disponible:** Tiempo más pronto en que todos los archivos requeridos por la tarea t están disponibles en el recurso r

- $ECT(t, r)$ – **Tiempo estimado de terminación:** Tiempo estimado en cual la tarea t terminará su ejecución en el recurso r :

$$ECT(t, r) = EET(t, r) + \max(EAT(t, r), FAT(t, r))$$

- $MCT(t)$ – **Tiempo mínimo estimado de terminación:** ECT mínimo para la tarea t sobre todos los recursos disponibles, es decir:

$$MCT(t) = \min_{r \in \mathcal{S}} ECT(t, r)$$

A.1.3. Min-Min

El algoritmo min-min está basado en la heurística de terminar las tareas más cortas en el menor tiempo posible. Para ello, hace una estimación del tiempo de ejecución tomando en cuenta el tiempo de preparación de las tareas en los servicios –o recursos– para tener el tiempo y los archivos necesarios disponibles para el recurso en cuestión. El algoritmo fue presentado por Maheswaran et al. [17]. El pseudocódigo está descrito en el listado A.1.3.

Entrada: Un grafo de flujo de trabajo $w = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$

Salida: Una calendarización f

```

1: while  $\exists v \in \mathcal{V}$  no completada do
2:    $t \leftarrow$  Obtener conjunto de tareas listas, no calendarizadas, con padres calendarizados;
3:   SCHED( $tasks$ );
4: end while
5: procedure SCHED( $availTasks$ )
6:   while  $\exists t \in availTasks$  no calendarizadas do
7:     for  $t \in availTasks$  do
8:        $res \leftarrow$  Obtener recursos disponibles para  $t$ ;
9:       for  $r \in res$  do
10:        Calcular  $ECT(t, r)$ ;
11:      end for
12:       $R_T \leftarrow \arg \min_{r \in res} ECT(t, r)$ ;
13:    end for
14:     $T \leftarrow \arg \min_{t \in availTasks} ECT(t, R_T)$ ;
15:    Calendarizar  $T$  en  $R_T$ ;
16:    Remover  $T$  de  $availTasks$ ;
17:    Actualizar  $EAT(R_T)$ ;
18:  end while
19: end procedure

```

A.1.4. Max-Min

El algoritmo max-min –también propuesto Maheswaran et al. [17]– es muy similar al algoritmo min-min. La diferencia radica en que éste calendariza tareas cuyo tiempo mínimo de ejecución es el mayor, de tal modo que se ejecutan las tareas más *largas*.

El único cambio que se necesita hacer al algoritmo A.1.3 es cambiar la siguiente línea (14):

$$T \leftarrow \arg \min_{t \in availTasks} ECT(t, r);$$

por

$$T \leftarrow \arg \max_{t \in availTasks} ECT(t, r);$$

Así, el algoritmo modificado puede verse en el pseudocódigo A.1.4.

Entrada: Un grafo de flujo de trabajo $w = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$

Salida: Una calendarización f

```

1: while  $\exists v \in \mathcal{V}$  no completada do
2:    $t \leftarrow$  Obtener conjunto de tareas listas, no calendarizadas, con padres calendarizados;
3:   SCHED( $tasks$ );
4: end while
5: procedure SCHED( $availTasks$ )
6:   while  $\exists t \in availTasks$  no calendarizadas do
7:     for  $t \in availTasks$  do
8:        $res \leftarrow$  Obtener recursos disponibles para  $t$ ;
9:       for  $r \in res$  do
10:        Calcular  $ECT(t, r)$ ;
11:      end for
12:       $R_T \leftarrow \arg \min_{r \in res} ECT(t, r)$ ;
13:    end for
14:     $T \leftarrow \arg \max_{t \in availTasks} ECT(t, R_T)$ ;
15:    Calendarizar  $T$  en  $R_T$ ;
16:    Remover  $T$  de  $availTasks$ ;
17:    Actualizar  $EAT(R_T)$ ;
18:  end while
19: end procedure

```

A.1.5. Sufragio

El algoritmo Sufragio¹ [17] es una variación del algoritmo Min-min, el cual considera el valor del sufragio para hacer la calendarización. Dicho valor es la diferencia entre el menor tiempo de ejecución para una tarea t sobre un conjunto de recursos disponibles y el segundo menor. Se calendariza a la tarea que tenga el valor del sufragio más alto, por el hecho de que las tareas que son muy sensibles a los cambios de los recursos deben ser calendarizadas primero. El algoritmo se encuentra en la sección A.1.5 del Apéndice.

Entrada: Un grafo de flujo de trabajo $w = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$

Salida: Una calendarización f

```

1: while  $\exists v \in \mathcal{V}$  no completada do
2:    $t \leftarrow$  Obtener conjunto de tareas listas, no calendarizadas, con padres calendarizados;

```

¹También conocido como *Sufferage*

```

3:   SCHED(tasks);
4: end while
5: procedure SCHED(availTasks)
6:   while  $\exists t \in \text{availTasks}$  no calendarizadas do
7:     for  $t \in \text{availTasks}$  do
8:        $res \leftarrow$  Obtener recursos disponibles para  $t$ ;
9:       for  $r \in res$  do
10:        Calcular  $ECT(t, r)$ ;
11:      end for
12:       $R_t^1 \leftarrow \arg \min_{r \in res} ECT(t, r)$ ;
13:       $R_t^2 \leftarrow \arg \min_{r \in res, r \neq R_t^1} ECT(t, r)$ ;
14:       $suft_t \leftarrow ECT(t, R_t^2) - ECT(t, R_t^1)$ ;
15:    end for
16:     $T \leftarrow \arg \max_{t \in \text{availTasks}} suft_t$ ;
17:    Calendarizar  $T$  en  $R_T^1$ ;
18:    Remover  $T$  de availTasks;
19:    Actualizar  $EAT(R_T)$ ;
20:  end while
21: end procedure

```

A.1.6. HEFT

El algoritmo HEFT² fue propuesto por Topcuoglu et al. [26]

Entrada: Un grafo de flujo de trabajo $w = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$

Salida: Una calendarización f

- 1: Calcular *Tiempo de Ejecución Promedio* (1) para cada tarea $v \in \mathcal{V}$;
- 2: Calcular *Tiempo de Transferencia de Datos Promedio* (2) entre tareas y sus sucesores;
- 3: Calcular *Rango* para cada tarea, de acuerdo a (3) (4);
- 4: Ordenar las tareas por *Rango*, en orden decreciente en una lista Q ;
- 5: **while** $Q \neq \emptyset$ **do**
- 6: $t \leftarrow$ Remover la primera tarea de Q ;
- 7: $r \leftarrow$ Encontrar un recurso que pueda ejecutar r en el menor tiempo;
- 8: Calendarizar t en r ;
- 9: **end while**

A.1.7. Híbrido

Entrada: Un grafo de flujo de trabajo $w = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$

Salida: Una calendarización f

- 1: Calcular *Peso* de cada tarea y arista, de acuerdo a (1)(2);
- 2: Calcular *Rango* para cada tarea, de acuerdo a (3) (4);

²Heterogeneous Earliest-Finish Time


```

3: Ordenar las tareas por Rango, en orden decreciente en una lista  $Q$ ;
4:  $i \leftarrow 0$ 
5: Crear un grupo  $G_i$ ;
6: while  $Q \neq \emptyset$  do
7:    $t \leftarrow$  Remove la primera tarea de  $Q$ ;
8:   if  $t$  tiene una dependencia con una tarea en  $G_i$  then
9:      $i \leftarrow i + 1$ ;
10:    Crear un grupo  $G_i$ ;
11:   end if
12:   Agregar  $t$  a  $G_i$ ;
13: end while
14:  $j \leftarrow 0$ ;
15: while  $j \leq i$  do
16:   Calendarizar tareas en  $G_i$  usando un algoritmo batch;
17:    $j \leftarrow j + 1$ ;
18: end while

```

A.1.8. TANH

Entrada: Un grafo de flujo de trabajo $w = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$

Salida: Una calendarización f

```

1: Calcular Parámetros para cada nodo tarea;
2: Agrupar tareas del flujo de trabajo;
3: if Número de clusters  $\geq$  Número de recursos disponibles then
4:   Reducir el Número de clusters al Número de recursos disponibles;
5: else
6:   Ejecutar duplicación de tareas;
7: end if

```

A.2. Metaheurísticos

A.2.1. GRASP

Entrada: Un grafo de flujo de trabajo $w = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$

Salida: Una calendarización f

```

1: while Criterio de terminación no satisfactorio do
2:    $sched \leftarrow$  CREATESCHEDULE( $w$ );
3:   if  $sched$  es mejor que  $bestSched$  then
4:      $bestSched \leftarrow sched$ ;
5:   end if
6: end while
7: procedure CREATESCHEDULE( $workflow$ )

```

```

8:    $solution \leftarrow \text{CONSTRUCTSOLUTION}(workflow);$ 
9:    $nSolution \leftarrow \text{LOCALSEARCH}(solution);$ 
10:  if  $nSolution$  es mejor que  $solution$  then
11:    return  $nSolution$ ;
12:  end if
13:  return  $solution$ ;
14: end procedure
15: procedure  $\text{CONSTRUCTSOLUTION}(workflow)$ 
16:   while calendarización no completada do
17:      $T \leftarrow$  Obtener tareas listas sin asignar;
18:     Crear RCL para cada  $t \in T$ ;
19:      $subSolution \leftarrow$  Seleccionar un recurso aleatoriamente para cada  $t \in T$  de su RCL;
20:      $solution \leftarrow solution \cup subSolution$ ;
21:     Actualizar información para futuros RCL;
22:   end while
23:   return  $solution$ ;
24: end procedure
25: procedure  $\text{LOCALSEARCH}(solution)$ 
26:    $nSolution \leftarrow$  Encontrar una solución local óptima;
27:   return  $nSolution$ ;
28: end procedure

```

Bibliografía

- [1] Cluster Híbrido de Supercómputo — Xiuhcoatl — Cinvestav. <http://clusterhibrido.cinvestav.mx/>. Consultado el 10 de noviembre de 2013.
- [2] HTCondor - Home. <http://research.cs.wisc.edu/htcondor/>. Consultado el 22 de junio de 2014.
- [3] Laboratorio de Supercómputo y Visualización en Paralelo. <http://supercomputo.izt.uam.mx/infraestructura/aitzaloa.php>. Consultado el 10 de noviembre de 2013.
- [4] Pegasus | Publications. <https://pegasus.isi.edu/publications/>. Consultado el 22 de junio de 2014.
- [5] Sebastian Alcerreca Alcocer. Emisión de Comprobantes Fiscales Digitales (CFD) - Desarrollo del sistema de emisión, distribución y almacenamiento de CFD de la corporación Montecito. Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Autónomo de México, 2013.
- [6] Grupo BMV. Informe anual 2012. Technical report, Bolsa Mexicana de Valores, 2012.
- [7] Rajkumar Buyya, Chee Shin Yeo, Srikumar Venugopal, James Broberg, and Ivona Brandic. Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. *Future Generation computer systems*, 25(6):599–616, 2009.
- [8] Jeffrey Dean and Sanjay Ghemawat. Mapreduce: simplified data processing on large clusters. *Communications of the ACM*, 51(1):107–113, 2008.
- [9] Ewa Deelman, Scott Callaghan, Edward Field, Hunter Francoeur, Robert Graves, Nitin Gupta, Vipin Gupta, Thomas H Jordan, Carl Kesselman, Philip Maechling, et al. Managing large-scale workflow execution from resource provisioning to provenance tracking: The cybershake example. In *e-Science and Grid Computing, 2006. e-Science'06. Second IEEE International Conference on*, pages 14–14. IEEE, 2006.
- [10] Ewa Deelman, Gurmeet Singh, Mei-Hui Su, James Blythe, Yolanda Gil, Carl Kesselman, Gaurang Mehta, Karan Vahi, G Bruce Berriman, John Good, et al. Pegasus: A framework for mapping complex scientific workflows onto distributed systems. *Scientific Programming*, 13(3):219–237, 2005.

- [11] J Octavio Gutierrez-Garcia and Kwang Mong Sim. Agent-based cloud workflow execution. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 19(1):39–56, 2012.
- [12] Gopi Kandaswamy, Anirban Mandal, and Daniel A Reed. Fault tolerance and recovery of scientific workflows on computational grids. In *Cluster Computing and the Grid, 2008. CCGRID'08. 8th IEEE International Symposium on*, pages 777–782. IEEE, 2008.
- [13] Charles E Leiserson, Ronald L Rivest, Clifford Stein, and Thomas H Cormen. *Introduction to algorithms*. The MIT press, 2001.
- [14] Ke Liu, Hai Jin, Jinjun Chen, Xiao Liu, Dong Yuan, and Yun Yang. A compromised-time-cost scheduling algorithm in swindow-c for instance-intensive cost-constrained workflows on a cloud computing platform. *International Journal of High Performance Computing Applications*, 24(4):445–456, 2010.
- [15] Xiao Liu, Zhiwei Ni, Dong Yuan, Yuanchun Jiang, Zhangjun Wu, Jinjun Chen, and Yun Yang. A novel statistical time-series pattern based interval forecasting strategy for activity durations in workflow systems. *Journal of Systems and Software*, 84(3):354–376, 2011.
- [16] Ewing Lusk, S Huss, B Saphir, and M Snir. Mpi: A message-passing interface standard, 2009.
- [17] Muthucumaru Maheswaran, Shoukat Ali, HJ Siegal, Debra Hensgen, and Richard F Freund. Dynamic matching and scheduling of a class of independent tasks onto heterogeneous computing systems. In *Heterogeneous Computing Workshop, 1999.(HCW'99) Proceedings. Eighth*, pages 30–44. IEEE, 1999.
- [18] Michael Mair, Jun Qin, Marek Wieczorek, and Thomas Fahringer. Workflow conversion and processing in the ASKALON grid environment. In *2nd Austrian Grid Symposium*, pages 67–80. Citeseer, 2007.
- [19] Daniel A Menasce and Emiliano Casalicchio. A framework for resource allocation in grid computing. In *MASCOTS*, pages 259–267, 2004.
- [20] Francesco Nerieri, Mumtaz Siddiqui, Juergen Hofer, Alex Villazon, Radu Prodan, and Thomas Fahringer. Using a heterogeneous service-oriented grid infrastructure for movie rendering. In *1st Austrian Grid Symposium, Schloss Hagenberg, Austria*. Citeseer, 2005.
- [21] Angela O'Brien, Steven Newhouse, and John Darlington. Mapping of scientific workflow within the e-protein project to distributed resources. In *UK e-Science All Hands Meeting*, pages 404–409, 2004.
- [22] Krithi Ramamritham, John A. Stankovic, and P-F Shiah. Efficient scheduling algorithms for real-time multiprocessor systems. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 1(2):184–194, 1990.

- [23] Rizos Sakellariou, Henan Zhao, Eleni Tsiakkouri, and Marios D Dikaiakos. Scheduling workflows with budget constraints. In *Integrated Research in GRID Computing*, pages 189–202. Springer, 2007.
- [24] Jamie Shiers. The worldwide lhc computing grid (worldwide lcg). *Computer physics communications*, 177(1):219–223, 2007.
- [25] Douglas Thain, Todd Tannenbaum, and Miron Livny. Distributed computing in practice: the condor experience. *Concurrency - Practice and Experience*, 17(2-4):323–356, 2005.
- [26] Haluk Topcuoglu, Salim Hariri, and Min-you Wu. Performance-effective and low-complexity task scheduling for heterogeneous computing. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 13(3):260–274, 2002.
- [27] Jeffrey D. Ullman. NP-complete scheduling problems. *Journal of Computer and System sciences*, 10(3):384–393, 1975.
- [28] Wil MP van Der Aalst, Arthur HM Ter Hofstede, Bartek Kiepuszewski, and Alistair P Barros. Workflow patterns. *Distributed and parallel databases*, 14(1):5–51, 2003.
- [29] Marek Wieczorek, Andreas Hoheisel, and Radu Prodan. Taxonomies of the multi-criteria grid workflow scheduling problem. In *Grid Middleware and Services*, pages 237–264. Springer, 2008.
- [30] Marek Wieczorek, Andreas Hoheisel, and Radu Prodan. Towards a general model of the multi-criteria workflow scheduling on the grid. *Future Generation Computer Systems*, 25(3):237–256, 2009.
- [31] Yun Yang, Ke Liu, Jinjun Chen, Joel Lignier, and Hai Jin. Peer-to-peer based grid workflow runtime environment of swindow-g. In *e-Science and Grid Computing, IEEE International Conference on*, pages 51–58. IEEE, 2007.
- [32] Jia Yu and Rajkumar Buyya. Scheduling scientific workflow applications with deadline and budget constraints using genetic algorithms. *Scientific Programming*, 14(3):217–230, 2006.
- [33] Jia Yu, Rajkumar Buyya, and Kotagiri Ramamohanarao. Workflow scheduling algorithms for grid computing. In *Metaheuristics for scheduling in distributed computing environments*, pages 173–214. Springer, 2008.
- [34] Jia Yu, Rajkumar Buyya, and Chen Khong Tham. Cost-based scheduling of scientific workflow applications on utility grids. In *e-Science and Grid Computing, 2005. First International Conference on*, pages 8–pp. IEEE, 2005.