

Desarrollo de un sistema dinámico de verificación de software basado en un comprobador de satisfacibilidad lógica

Trabajo fin de máster del
Máster en Investigación en Ingeniería del Software
de la Universidad de Educación a Distancia

Diego J. Romero López

Índice

Agradecimientos.....	5
Introducción.....	6
Objetivo.....	8
Lógica proposicional.....	10
Definición.....	10
Constantes.....	10
TRUE.....	10
FALSE.....	10
Operadores.....	10
Operador de negación.....	10
Operador de conjunción.....	11
Operador de disyunción inclusiva.....	11
Resto de operadores.....	11
Precedencia.....	12
Propiedades.....	12
Propiedad asociativa.....	12
Asociatividad del operador OR.....	12
Asociatividad del operador AND.....	12
Asociatividad del operador de equivalencia.....	12
Propiedad distributiva.....	12
Distribución de la conjunción con respecto a la disyunción.....	12
Distribución de la disyunción con respecto a la conjunción.....	12
Leyes de De Morgan.....	13
Árboles Binarios de Decisión.....	14
Introducción.....	14
Árboles reducidos.....	16
No-redundancia.....	17
Unicidad de cada vértice.....	17
Orden de las variables.....	19
Definición.....	21
Operaciones	22
Creación.....	22
Apply.....	24
Restrict.....	27
Swap.....	30
Algoritmos.....	36
Window Permutation.....	36
Sifting de Rudell.....	36
Algoritmo de intercambios aleatorios.....	37
Algoritmo genético.....	37
Estructuras de datos.....	37
Población inicial.....	37
Selección.....	38
Cruce.....	38

Mutación.....	38
Actualización de la población.....	38
Algoritmo memético.....	38
Iterative Sifting.....	39
Software.....	40
Herramientas usadas.....	40
antlr3.....	40
Javaluator.....	41
Diseño.....	42
Paquete raíz: djbdd.....	42
core.....	42
VariableList.....	42
Vertex.....	43
TableT.....	43
BooleanEvaluator.....	47
BDD.....	48
BDDApply.....	48
GCThread.....	48
io.....	48
logic.....	49
main.....	50
reducers.....	50
test.....	51
timemeasurer.....	51
graphvizjava.....	51
logger.....	51
Implementación.....	51
Manual de uso de los binarios.....	52
Mostrar BDDs.....	52
Realizar un benchmark.....	52
Ejemplos de uso de la API.....	53
Experimentos y resultados.....	56
Problemas no satisfacibles.....	56
Problemas satisfacibles.....	56
Datos de prueba.....	56
AIM.....	57
AIS.....	57
Anomaly.....	57
BW.....	57
Dubois.....	58
Hanoi.....	58
Hole.....	58
Nemesis.....	58
Parity problem.....	58
Quinn.....	58
Simple.....	58
Resultados por algoritmo.....	58
Sifting.....	60

Orden de variables en número de vértices descendente.....	60
Orden de variables inicial.....	61
Orden de variables aleatorio.....	62
Window permutation.....	63
Tamaño de ventana de 2.....	63
Tamaño de ventana de 3.....	64
Tamaño de ventana de 4.....	65
Tamaño de ventana de 5.....	66
Intercambios aleatorios.....	67
Algoritmo genético.....	68
Algoritmo memético.....	69
Algoritmo Iterative Sifting.....	70
Discusión de los resultados.....	72
Arquitectura de la solución software.....	76
Objetivo.....	76
Entidades.....	76
BDD.....	76
Asserter.....	76
Sistema.....	76
Motor lógico.....	76
Relaciones.....	76
Funcionamiento.....	77
Ejemplos.....	78
Problemas abiertos.....	79
Bibliografía.....	80

Agradecimientos

Agradezco a la Prof. Dra. Dña. Elena Ruiz Larrocha el haberme dado la oportunidad de trabajar en este trabajo fin de máster.

Por último, también agradezco a mi familia el haberme apoyado de multitud de formas a lo largo de todo el máster y en especial, este trabajo que supone el colofón del mismo.

Introducción

En general, cuando se piensa en un sistema tolerante a fallos, se suele pensar en sistemas software que tienen vidas a su cargo, como software para aviónica o para centrales nucleares, pero, supongamos por un momento un sistema web que gestione ocupaciones de reserva de plazas para un lavadero de coches. Desde el momento que el cliente inicia su compra, está reservando un intervalo de tiempo. Este intervalo de tiempo se almacena en un estado que podríamos calificar como “pendiente”, puesto que todavía no se ha pagado, y bloquea la selección de esa misma ranura de tiempo para el resto de clientes. Obviamente, en este sistema, hay condiciones de carrera puesto que los clientes entran en la web de forma paralela.

Ahora, supongamos además que hay varios servicios (lavado, encerado, control de presión, limpieza interior del vehículo...) que son seleccionables y que cada uno de ellos se realiza en una ubicación distinta en distintos “box”. Así, internamente el sistema deberá llevar el control de la ocupación de cada “box”.

Cuando se realice un pago por internet, con todo el protocolo de comunicación que ha de ser implementado, deberá marcar la venta como pagada y reservar efectivamente la ocupación para el cliente, es obvio que éste se ha introducido en una máquina de estados implementada en el sitio web. Cuando el pago sea efectivo, deberá generar un ticket para que el encargado pueda leer de forma automática qué servicios ha comprado el cliente. Por supuesto, en este ticket deberá indicar quién ha realizado la compra.

Este tipo de problemas de restricciones de competencia entre instancias de un sistema pueden bien con bloqueos o pueden modelarse con árboles binarios de decisión (Binary Decision Diagram, BDD, en inglés) de forma que el sistema sea capaz de detectar inconsistencias y por ende, verificar que el proceso se encuentra con unos datos incorrectos y por tanto, cancelar el procedimiento actual y volver a un estado seguro. En el caso de una detección de un estado inconsistente, el software podrá detener el proceso y volver al estado correcto más cercano. En nuestro ejemplo, cancelar la compra.

Otro ejemplo más lejano a un usuario normal puede ser el de desarrollo de software para sistemas de control. Se modelan los estados como proposiciones lógicas y se estructura un BDD con todas las restricciones. Este árbol se mantiene en memoria y refleja el estado real del sistema. De forma que cuando el sistema entre en un estado inconsistente, puede reiniciarlo o volver a un estado seguro. Un ejemplo de este tipo de sistemas puede ser cualquier software que compruebe que una máquina industrial está funcionando correctamente.

En definitiva, sea cual sea el uso que se le dé, usar un BDD como software de control adicional permite que se detecten errores en el software y que el sistema vuelva al estado estable más cercano. Además, el BDD reflejará en cada momento el estado real del sistema.

Así, en primer lugar, se ha desarrollado esta *piedra angular*. Una librería eficiente para BDDs que implementa todas las herramientas para que un equipo de ingenieros de software la puedan usar para construir sistemas tolerantes a fallos.

Además, esta implementación sigue las directrices más estrictas en cuanto a desarrollo, de manera que se pueda continuar su desarrollo de forma sencilla por cualquier estudiante de máster o doctorado, al contrario de como ocurre con algunas implementaciones oscuras basadas en lenguajes menos modernos que además tienen un nivel ofuscación y falta de diseño estructurado que hacen difícil el trabajo sobre ellas.

A lo largo de la primera parte se mostrará cómo se ha implementado esta solución, los problemas que se encontraron, las soluciones que se han aportado y los algoritmos que se han usado. En especial, cabe destacar la parte de optimización de BDDs, en la que se han realizado varios experimentos con varios algoritmos que tratan, mediante el intercambio de variables de reducir el número de nodos de un árbol de este tipo.

En segundo lugar se presenta una librería que hace uso de este motor de satisfacibilidad basado en BDDs que tiene como objetivo permitir usar los BDDs como comprobadores de consistencia. Por esto, se mostrarán varios ejemplos de sistemas en los que estos sistemas logran mejorar la calidad del software de forma sustancial.

Con respecto a la estructura del trabajo, inicialmente daremos una pequeña introducción sobre qué son este tipo de estructuras, luego hablaremos sobre su implementación y por último mostraremos esos resultados de optimización de tamaño de BDDs sobre varios *benchmarks* basados en el formato DIMACS [DIMACS].

Después se mostrará la arquitectura del comprobador de consistencia y varios posibles usos que puede tener.

Por último, terminaremos con una sección de problemas abiertos, que son interrogantes que han surgido a lo largo de este proyecto pero que no se ha obtenido respuesta para ellos.

Objetivo

El objetivo de este trabajo fin de máster era realizar un estudio completo de algún método de verificación de software. Me decidí por los árboles binarios de decisión, en primer lugar porque ya había trabajado con ellos con anterioridad y el tema no me era del todo desconocido y en segundo lugar, porque era uno de los temas más explotado en cuanto a verificación de software y hardware, lo que me permitiría encontrar abundante información y ejemplos de uso en el mundo real.

Una vez fijado el tema, quería desarrollar una serie de experimentos que mostrasen cómo optimizar árboles binarios de decisión de forma sencilla. Esto no es fácil y en sucesivos trabajos he visto que los algoritmos exactos tienen órdenes de eficiencia muy grandes. Hasta que llegué al trabajo de [Rudell93], en el que, mediante una operación constante, monta dos algoritmos de optimización de BDDs.

Una vez que tuve claro en qué dirección iba a ir el trabajo, pensé en la implementación. Inicialmente no sabía si tomar una implementación referencia o realizar yo una propia. Es cierto que hay mucho software sobre este tema y todas está muy estudiada. Por ejemplo, las librerías BuDDy [BuDDy] y CUDD [CUDD] ofrecen dos de las librerías más usadas y eficientes. Ahora bien, la calidad del software de estos proyectos es escasa. La legibilidad del código es pequeña y la la documentación se refiere a su uso, pero no a su diseño. Estos paquetes tienen como objetivo el ser los más rápidos en cuanto a tiempo de ejecución, pero no logran tener ser un software de calidad ni muchos menos.

Estando en un máster de Ingeniería del Software, decidí hacer una implementación que respetase algo más los estándares y buenas prácticas y que, además, me permitiese realizar experimentos de forma sencilla y sabiendo exactamente qué estaba ocurriendo.

He llegado a leer determinados trabajos en los que se hacía uso de paquetes con BDDs en los que los autores no sabían como funcionaban éstos, y eso nos parece un grave error. Si no sabes exactamente como está hecho, ¿cómo puedes extraer conclusiones científicas?

De esta forma, decidí realizar una implementación desde cero de una librería de BDDs. Puesto que la eficiencia y el competir con otras implementaciones más asentadas no era mi objetivo, me decidí por usar un lenguaje de programación que ofreciese lo mejor de los dos mundos. Por un lado quería que estuviese cercano a la máquina en cuanto a eficiencia y por otro quería que me resolviera algunos temas como la gestión de memoria dinámica. Por todo eso, escogí el lenguaje estrella de la plataforma JVM, Java.

Comencé comprobando como efectivamente era muy costoso la creación de árboles simplemente mediante un generador recursivo y se necesitaba una funcionalidad más elaborada para alcanzar un orden de eficiencia que no fuera exponencial. Mi objetivo era tener un paquete no que pudiera competir en tiempo con BuDDy o el CUDD, sino que me permitiera trabajar con distintos algoritmos y con el que pudiera realizar experimentos.

Además, los paquetes de software existentes usaban aristas complementadas, de lo que yo no era muy partidario, ya que se pierde la unicidad del BDD ante una fórmula lógica determinada.

También comprobé como es complicada la paralelización de este tipo de algoritmos¹.

En definitiva, en este trabajo se incluye una librería de uso de BDD basada en Java que puede integrarse en sistemas de verificación formal o en sistemas de control. También se muestran una

¹ Thomas van Dijk lo ha implementado en su tesis [Dijk2012], pero para ello ha tenido que modificar radicalmente el enfoque que se hacía hasta ese momento en la construcción de BDDs.

serie de resultados en los que se puede comprobar cómo se comportan los distintos algoritmos de reducción del número de vértices en árboles binarios de decisión.

Lógica proposicional

La lógica proposicional es un sistema formal en el que las fórmulas de un lenguaje formal se interpretan como proposiciones. Se usa un conjunto de reglas de inferencia y axiomas para derivar fórmulas. A estas fórmulas derivadas se las llama teoremas.

En la lógica proposicional, podemos interpretar las fórmulas de forma sintáctica, realizando derivaciones unas de otras y obteniendo resultados, o por el contrario podemos dar valores a cada proposición y aplicando los operadores lógicos obtener una interpretación de la fórmula. Ambas formas de proceder son equivalentes, así que para propósitos de este trabajos supondremos ambos tipos de demostración equivalentes.

Definición

La lógica proposicional (o lógica clásica) es aquella determinada por enunciados que pueden ser o bien ciertos, o bien falsos.

De forma formal, podemos decir que una proposición p es:

- $p = \text{TRUE}$
- $p = \text{FALSE}$
- $\neg q$, donde q es una proposición y \neg el operador de negación
- Dadas p y q proposiciones y OP un operador lógico, $p \text{ OP } q$ es otra proposición lógica.

A continuación explicamos cada uno de estos conceptos

Constantes

TRUE

Proposición cierta. Se representa como TRUE, true, 1 o T.

FALSE

Proposición falsa. Se representa con FALSE, false, 0 o F.

Operadores

Los operadores en la lógica proposicional se definen mediante tablas de verdad. Recordemos lo dicho anteriormente, que la demostración sintáctica y semántica son equivalente. Así, dejamos para el lector la demostración sintáctica, dado que está demostrado [LICS] que son equivalentes.

Operador de negación

p	$\neg p$
0	1
1	0

Operador de conjunción

Este operador proporciona una proposición cierta siempre y cuando al menos una de las proposiciones, que actúan como sus operandos, lo sea.

p	q	$p \wedge q$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Muchas veces este operador se identifica con los símbolos \cdot , AND. También suele escribirse yuxtaponiendo directamente las variables, de forma que se escribirían una detrás de otra, por lo que si vemos $F = xy$, nos referiremos a $F = x \text{ AND } y$.

Operador de disyunción inclusiva

Este operador proporciona una proposición cierta siempre y cuando al menos una de las proposiciones, que actúan como sus operandos, lo sea.

p	q	$p \vee q$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Este operador se identifica con los símbolos OR, \vee , +.

Resto de operadores

El resto de operadores posibles puede definirse en función de los ya indicados. Por ejemplo, el operador de implicación obedece la siguiente tabla de verdad:

p	q	$p \Rightarrow q$	$\neg p \vee q$
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	1	1	1

Para el operador de equivalencia tendríamos algo parecido

p	q	$p \Leftrightarrow q$	$(\neg p \vee q) \wedge (p \vee \neg q)$
0	0	1	1
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	1	1

No es nuestro objetivo mostrar todos los posibles operadores binarios lógicos, por lo que, ante un operador no incluido aquí, supondremos que la fórmula puede convertirse sin problemas a cualquier combinación de los operadores incluidos anteriormente.

En este trabajo no vamos a detallar todos los operadores posibles como XOR, NAND, NOR, etc. El lector puede encontrar más información en [LICS] y conociendo su comportamiento ante las entradas, si la salida es determinista podrá expresarlo como combinación de AND, OR y NOT.

Precedencia

De aquí en adelante, vamos a suponer que la precedencia de operadores sigue el siguiente orden:

- NOT
- AND
- OR
- \rightarrow

De todas formas, salvo en el caso de NOT, que tiene siempre la mayor precedencia, vamos a incluir paréntesis para evitar confusiones entre las distintas precedencias.

Propiedades

Propiedad asociativa

Los operadores OR, AND y \leftrightarrow son asociativos, esto quiere decir que se cumplen estas equivalencias:

Asociatividad del operador OR

$$p \vee (q \vee r) \Leftrightarrow (p \vee q) \vee r$$

Asociatividad del operador AND

$$p \wedge (q \wedge r) \Leftrightarrow (p \wedge q) \wedge r$$

Asociatividad del operador de equivalencia

$$(p \Leftrightarrow (q \Leftrightarrow r)) \Leftrightarrow ((p \Leftrightarrow q) \Leftrightarrow r)$$

Propiedad distributiva

Distribución de la conjunción con respecto a la disyunción

$$p \wedge (q \vee r) \Leftrightarrow (p \wedge q) \vee (p \wedge r)$$

Distribución de la disyunción con respecto a la conjunción

$$p \vee (q \wedge r) \Leftrightarrow (p \vee q) \wedge (p \vee r)$$

Leyes de De Morgan

Las leyes de De Morgan relacionan los operadores AND y OR con el de negación según la siguiente expresión:

$$\neg(p \wedge q) \Leftrightarrow \neg p \vee \neg q$$

$$\neg(p \vee q) \Leftrightarrow \neg p \wedge \neg q$$

Estas propiedades son interesantes debido a que deberemos tener un algoritmo para negar algún subárbol, se deberá recorrer todos los vértices e ir intercambiando los descendientes de cada vértice. Esto de hecho es lo que se hace cuando se construye una expresión en la que la negación afecta a una subexpresión compleja, como por ejemplo: $\neg((a \wedge b) \vee c)$.

Árboles Binarios de Decisión

Introducción

Un árbol binario de decisión [BRYANT1986] es una forma de representar tablas de verdad basada en la expansión de Boole², en la que se enuncia que cualquier fórmula lógica puede descomponerse en la expresión:

$$F = xF_{(x=1)} + \neg xF_{(x=0)}$$

Donde $F_{(x=0)}$ es la expresión F asignando a la variable x el valor *false* y $F_{(x=1)}$ es la expresión F sustituyendo la variable x por el valor *true*.

Si representamos esta expresión de forma gráfica tendremos un nodo con la expresión F (que depende de la variable x), de forma que si se le da a la x el valor 0 se obtiene $F_{(x=0)}$ y se se le da el valor 1 se obtiene $F_{(x=1)}$. La asignación de $x=0$ la marcamos con una arista discontinua, y la asignación de $x=1$ la marcamos con una arista continua.

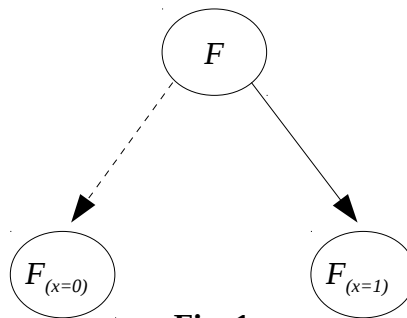
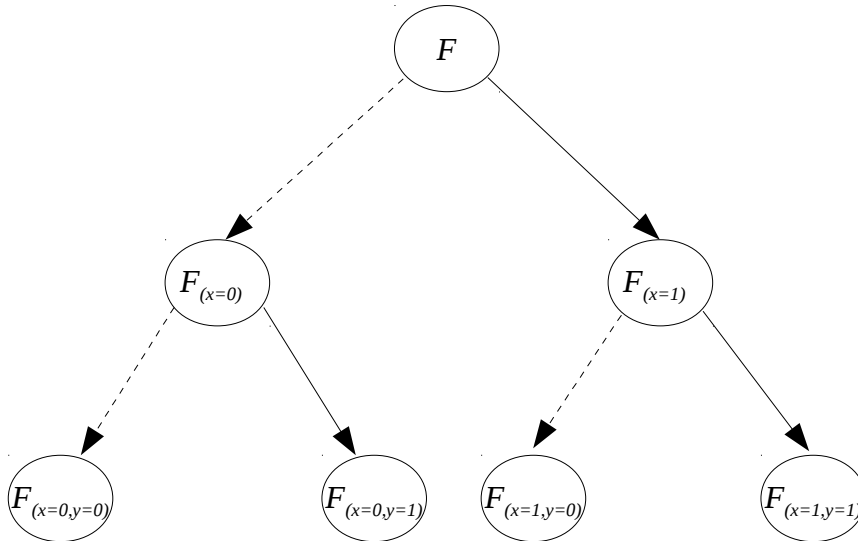


Fig. 1

Si F depende de otra variable, llamada y , podremos repetir este mismo proceso de bifurcación de asignaciones con $F_{(x=0)}$ y con $F_{(x=1)}$. Es decir, si suponemos que la siguiente variables es y , tendríamos el siguiente árbol de decisión:

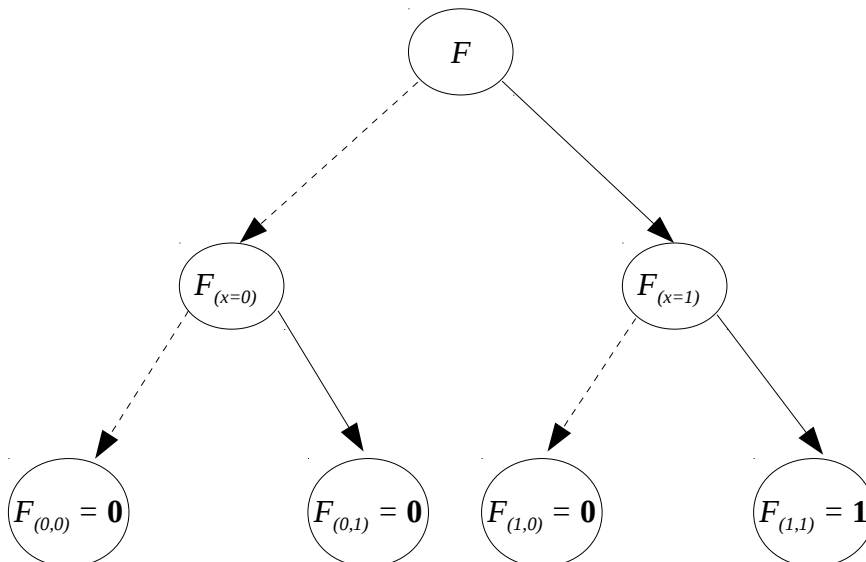
² También se le suele llamar expansión de Shannon, aunque su creador fue George Boole, matemático, lógico y filósofo inglés del siglo XIX. Nosotros usaremos distintamente cualquiera de estos dos nombres.

**Fig. 2**

Como podemos ver, hablamos de árboles binarios de decisión porque cada nodo tiene exactamente dos nodos descendientes.

Puede ocurrir que alguno de los nodos no dependa de ninguna variable y tenga un valor constante (**0** ó **1**). En ese caso, ese nodo será un nodo hoja, dado que no tendrá descendientes, y sólo podrá tomar el valor *true* o *false*.

Vamos a ver un ejemplo de fórmula lógica real $F = xy$. Y tomando el orden de las variables como x , y luego, y . También, para facilitar la visibilidad del diagrama, suponemos que $F_{(a,b)} = F_{(x=a,y=b)}$.

**Fig. 3**

Notemos que al nodo que viene de una arista punteada se le suele llamar, *low*, y al de la línea llena *high*, debido a que son producto de la asignación de **0** y **1** a su vértice padre, respectivamente.

Otro ejemplo en el que podemos ver varios niveles es el siguiente: $F = xz + y$, con el orden x, y, z .

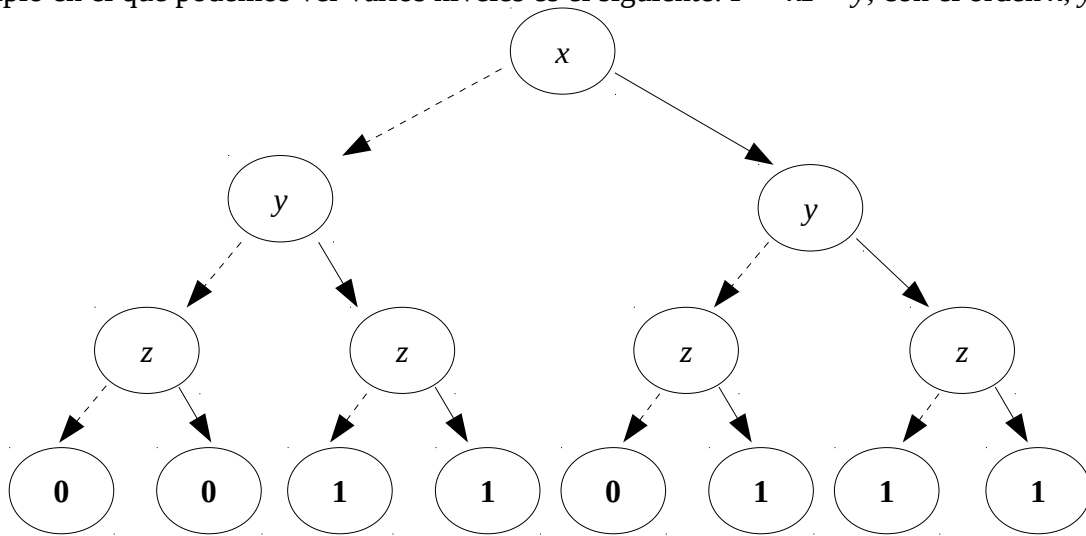


Fig. 4

Como se puede ver en este ejemplo, hay ramas completas repetidas. En la siguiente sección vamos a mostrar cómo se pueden reducir los BDD haciendo que pasen de ser árboles binarios a dígrafos acíclicos.

Árboles reducidos

Dado el árbol de la Fig. 3 (función $F = xy$), un detalle importante que podemos apreciar en este diagrama es la repetición de nodos. Es decir, podemos ver cómo se repiten los nodos hoja y tenemos tres nodos con el valor 0 y sólo uno con el valor 1. Si eliminamos los nodos con el mismo valor, obtenemos el siguiente árbol binario reducido:

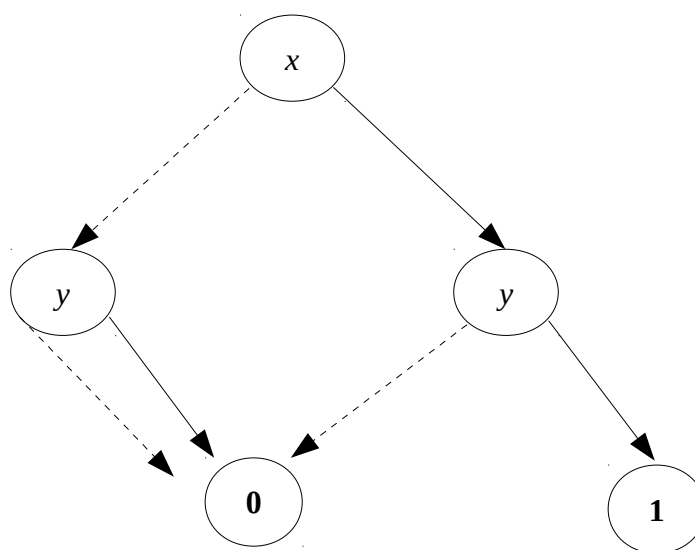


Fig. 5

Como podemos ver, hemos reducido el árbol en 2 nodos sobre un total de 7 nodos. Esto no puede parecer mucho, pero pensemos a gran escala, en fórmulas de miles de variables, conseguir una reducción de un tercio de su tamaño es muy deseable.

También vemos como, en el nodo y de la izquierda, independientemente del valor que tome y, se obtiene el valor **0**. ¿No se podría tener una normas para reducir aún más el árbol evitando repeticiones innecesarias?

Randal Bryant en la Universidad Carnegie Mellon inventó el concepto de Diagrama de Decisión Binario Ordenado Reducido Compartido en [BRYANT1986], indicando las restricciones que debía tener un BDD para que fuera mínimo y único dado el mismo orden de variables. Para ello, el diagrama ha de cumplir dos propiedades.

No-redundancia

En primer lugar, no debe haber vértices redundantes, esto es, no puede haber un vértice cuyos descendientes sean otro. En el caso de que en el proceso de construcción esta casuística se dé, se tomará el nodo descendiente y se eliminará el nodo y se le pasará el

Es decir, dado un vértice v , si $low(v) = high(v)$, entonces se produce la siguiente sustitución:

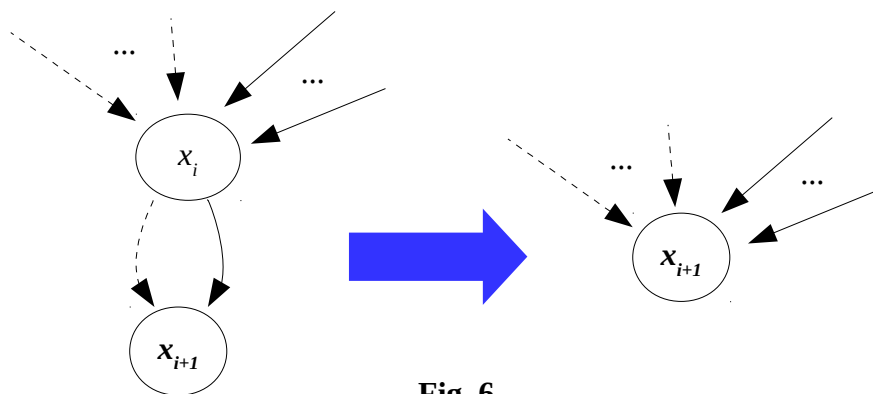
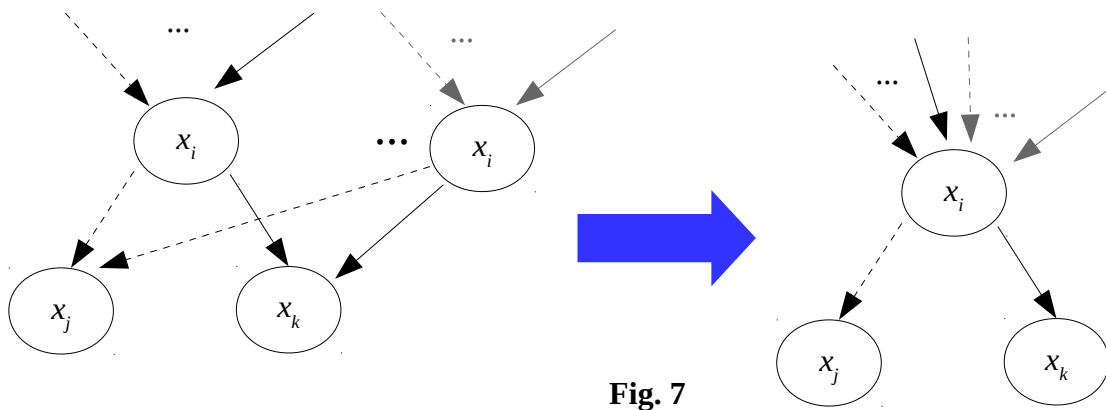


Fig. 6

Unicidad de cada vértice

Si un vértice tiene los mismos descendientes que otro y la misma variable, entonces ha de ser sustituido por éste. Es decir, supongamos que tenemos un árbol que tiene dos vértices distintos u y v que cumplen que ambos tienen la misma variable y que tienen los mismos descendientes low y $high$. Entonces, ambos son el mismo vértice.



Por ejemplo, si tenemos el árbol de la figura 4 ($F = xz + y$), tendremos varios vértices repetidos y redundantes. Si los eliminamos, obtendremos el siguiente árbol reducido:

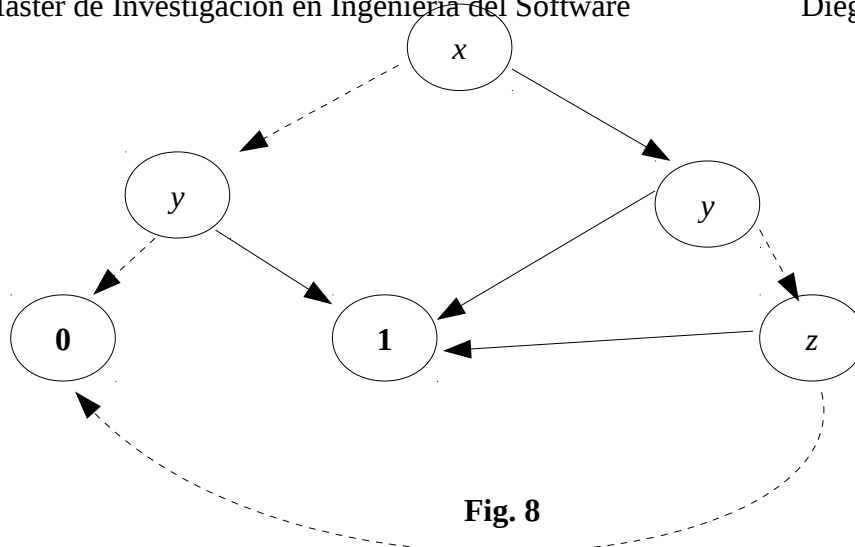


Fig. 8

Orden de las variables

Como podemos ver, hablamos de que las variables tienen un orden entre ellas. Esto nos sirve para evitar tener niveles repetidos, tengamos en cuenta que cada camino que va desde la rama raíz representa una asignación de valores de verdad a variables, lo que sería equivalente a una fila de una tabla de verdad, y por tanto, no se puede repetir asignaciones.

De igual forma, hemos de respetar este orden en todas las ramas del árbol, o si no, podríamos encontrarnos con problemas a la hora de evaluar funciones o de reducir el árbol.

Por ejemplo, supongamos la función $F=xz+y$, mostramos a continuación dos órdenes de los posibles, (x, y, z) y en la imagen de la derecha (x, z, y) :

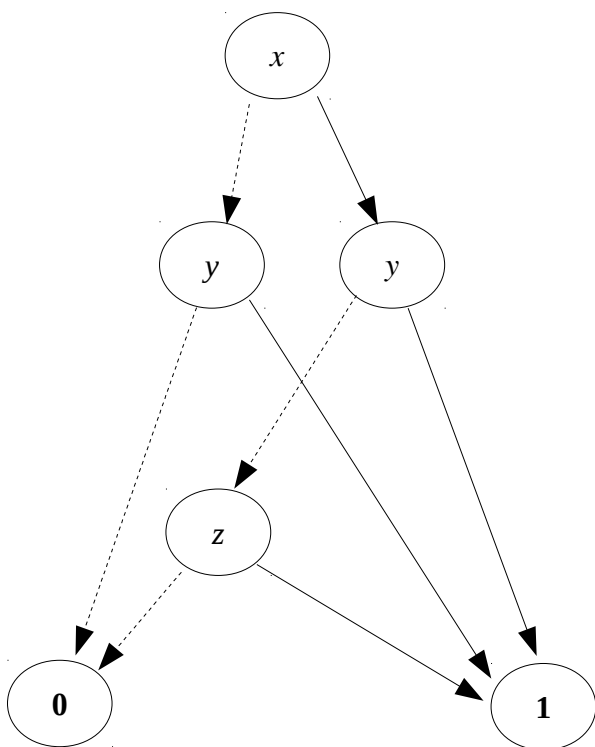


Fig. 9

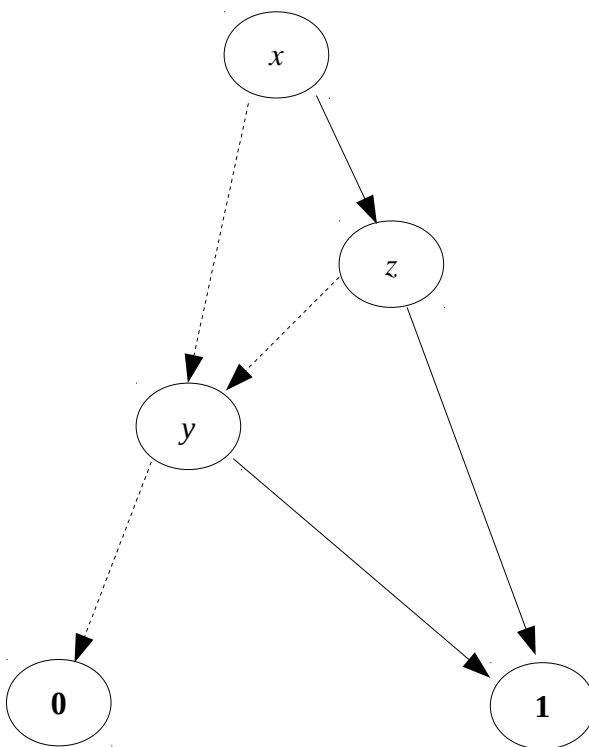


Fig. 10

El BDD de la figura 9, que es el que tiene el orden (x, y, z) tiene un nodo más que el árbol de la figura 10, que es el que tiene el orden (x, z, y). Como podemos ver, el orden es determinante en cuanto al tamaño del árbol.

Por supuesto, en este sencillo ejemplo sólo se incrementa de tamaño el BDD un vértice, lo que no es mucho. Ahora bien, pensemos en el árbol para la fórmula lógica $F = x_1x_3 + x_2x_4$. Si suponemos que el subíndice de cada variable indica su orden en el árbol, obtendríamos un BDD de 8 vértices. En cambio, si le dotamos de un orden algo más inteligente, siendo éste (x_1, x_3, x_2, x_4) , el BDD es de un tamaño de 6 vértices.

A continuación se muestran los árboles gráficamente:

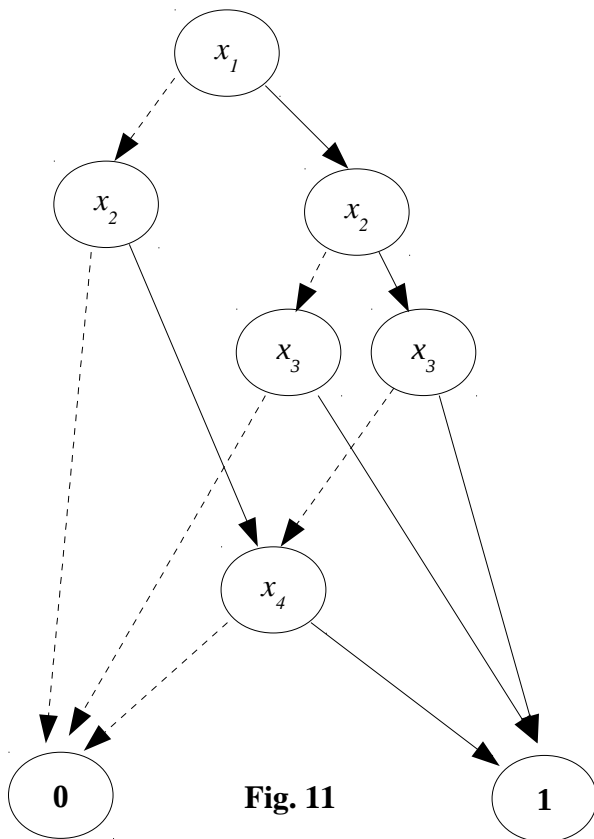


Fig. 11

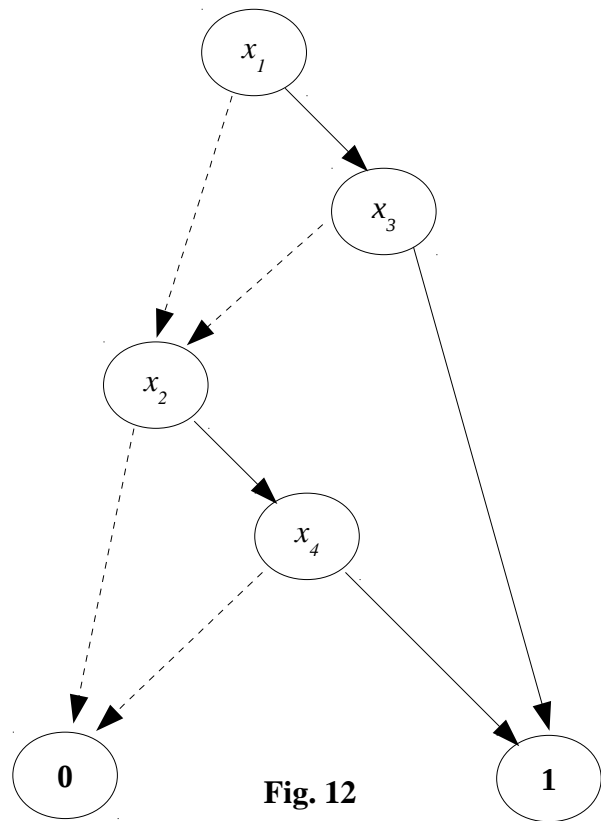


Fig. 12

Notemos cómo se puede pasar de un número de nodos exponencial a uno lineal simplemente cambiando el orden a las variables.

De hecho, la mayoría de las estrategias de optimización tratan de encontrar órdenes que reduzcan el tamaño del árbol.

Definición

Ahora que tenemos ciertos conceptos, vamos a dar una definición de lo que es un ROBDD.

Un árbol binario de decisión es un grafo dirigido acíclico con un vértice como raíz.

Cada vértice tiene los siguientes atributos $v = \{id: Int, var: Variable, low: Vertex, high: Vertex\}$.

- *id*: identificador del vértice. Número entero mayor que cero. Nos servirá para identificar cada vértice y distinguirlo del resto.
- *var*: variable que está asociada con el vértice. Como hemos visto antes, cada nivel de vértices tiene asociada una variable. Las variables se numeran como enteros mayores que cero indicando de esta forma el orden que tienen en el árbol, esto es var_i precede a var_j si y solamente si $var_i < var_j$.
- *low*: referencia al vértice que se toma cuando se la ruta toma el valor 0 para el vértice actual.
- *high*: referencia al vértice que se toma cuando se la ruta toma el valor 1 para el vértice actual.

No se permiten ciclos en el árbol, esto es,

Para todo vértice v , $v.low = u \leftrightarrow v.var < u.var$ ³

A *low* y *high* se le llama los descendientes de cada vértice y cumplen las siguientes propiedades:

Sean v y u vértices del árbol.

- $v.low \neq v.high$
- $v.low = u.low$ AND $v.high = u.high$ AND $v.var = u.var \leftrightarrow v = u$

Existen unos vértices especiales constantes:

- **1**: $\{id=1, low=null, high=null\}$
- **0**: $\{id=0, low=null, high=null\}$

Estos vértices constantes no tienen descendientes, de ahí que sus atributos *low* y *high* tomen el valor *null*.

Operaciones

Los árboles de decisión tienen una serie de operaciones propias [Bryant1992], [Somenzi]. Nosotros hemos implementado las que nos parecían más importantes. Obviamente la creación, *Apply* y la restricción. Si se desea otra operación, dada la naturaleza abierta de la librería animo al lector a estudiar la implementación de otras operaciones.

Creación

Normalmente los autores tal y como ocurre en [Bryant1992][Andersen1999] hacen uso de dos estructuras de datos:

La tabla de vértices en la que un índice nos da la tripleta: *variable*, *low* y *high*. Normalmente a esta tabla se la suele llamar *T*.

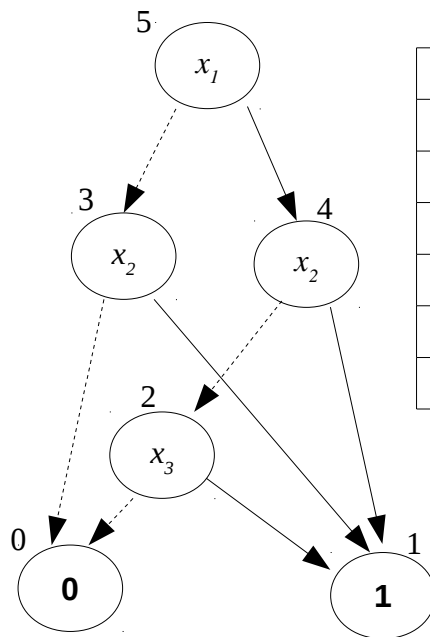
Por ejemplo, para el árbol $F = x_1x_3 + x_2$

Tendríamos las variables en orden:

Variable	x_1	x_2	x_3
Índice	1	2	3

³ En este documento usaremos la notación orientada a objetos para indicar que la propiedad pertenece al objeto, de manera que $v.var$ indica la variable del vértice v .

Y el siguiente árbol su tabla T:



Id vértice	Variable	Id vértice <i>low</i>	Id vértice <i>high</i>
0			
1			
2	3	0	1
3	2	0	1
4	2	2	1
5	1	3	4

Fig. 13

En la tabla *T*, podemos ver como a los nodos hoja *true* y *false* le asignamos de forma arbitraria los identificadores 0 y 1 y obviamente sin variable ni descendientes. El resto de nodos se va asignando de abajo a arriba (veremos más adelante cómo se genera un árbol con la operación *Apply*), aunque en realidad, el identificador da igual, lo que nos tiene que interesar es que esa tabla contiene la estructura arbórea y la asociación entre vértices y variables.

De esta forma, gracias a esta tabla *T* podemos extraer de forma eficiente qué variable tiene el nodo y sus descendientes. Ahora bien, tal y como hemos visto antes, hablamos mucho de unicidad de nodo en cuanto a que sólo existe un nodo con la misma variable, *low* y *high*. Por tanto usaremos una tabla inversa para poder obtener y comprobar que efectivamente sólo hay un único vértice con una variable y unos valores de *low* y *high* determinados. A esta tabla inversa la podemos llamar *H*.

La tabla *H* es una tabla que dada la variable, y valores *low* y *high* obtiene el vértice o nos informa de que no existe en tiempo constante.

A partir de este momento, la construcción sigue un proceso recursivo basado en la expansión de Shannon [Andersen1999]. Mostramos su pseudocódigo a continuación:

Obtiene un nuevo vértice

mk(variable, low, high):

Si ambos descendientes son iguales, no creamos un nuevo vértices

devolvemos uno de ellos

if low == high:

return low

Si existe el vértice con la misma variable y descendientes

Lo devolvemos

```

    if H[variable, low, high] != null:
        return H[variable, low, high]
    # Es un nuevo vértice
    v = Vertex(variable, low, high)
    H[variable, low, high] = v
    # Añadimos el vértice v a la tabla T con un id único
    T[T.getNewKey()] = v
    return v

# Construye cada uno de los niveles del árbol
# Nótese que cada nivel es en realidad una variable
build(formula, level):
    if level > n:
        if t == False
            return 0
        return 1
    else:
        # Obtiene el vértice low del nuevo vértice
        low = build(formula(x[level]=0), level+1)
        # Obtiene el vértice high del nuevo vértice
        high = build(formula(x[level]=1), level+1)
        # Nuevo vértice
        return mk(level, low, high)

# Llamada inicial
buildBDD(formula):
    return build(formula, 1)

```

Nótese que en la construcción en el paquete software este es uno de los métodos de construcción de árboles, siendo el otro el uso del algoritmo *Apply*, que se detalla a continuación.

Apply

El algoritmo *Apply* que permite ejecutar una operación binaria lógica entre dos árboles BDD fue detallada en [Bryant1986].

En este algoritmo se va construyendo de forma recursiva gracias a la siguiente propiedad de la expansión de Shannon:

Si definimos un operador que podemos llamar *if-then-else* con una forma similar al operador ternario de cualquier lenguaje de programación:

$$x \rightarrow y_0, y_1 = (x \wedge y_0) \vee (\neg x \wedge y_1)$$

Entonces la expansión de Shanon puede definirse de la siguiente forma:

$$t = x \rightarrow t_{(x=1)}, t_{(x=0)}$$

Pues bien, la siguiente propiedad se cumple para todos los operadores booleanos binarios:

$$(x \rightarrow t_1, t_2) op (x \rightarrow t'_1, t'_2) = x \rightarrow (t_1 op t'_1), (t_2 op t'_2)$$

Una vez dicho esto, podemos mostrar el pseudocódigo del algoritmo definido por Bryant:

Construye una nueva clave para cada vértice

```
makeUniqueKey(var_index, low, high):
    if(low==null && high==null):
        return var_index+"-"+ "NULL"+"-"+ "NULL";
    return var_index+"-"+low.index+"-"+high.index
```

Añade un vértice único a la tabla hash

```
addNewVertex(var_index, low, high):
    # Obtiene la siguiente clave e incrementa el contador global
    index = getNextKey()
    v = new Vertex(index, var_index, low, high)
    T[index] = v
    U[makeUniqueKey(var_index, low, high)] = v
    V[var_index].add(v)
    return v
```

Añade un vértice no-redundante a la tabla hash

```
addVertex(var, low, high):
    vertexUniqueKey = makeUniqueKey(var_index, low, high)
    if(uniqueKey in U):
        return U[uniqueKey]
    return addNewVertex(var, low, high)
```

Aplica el algoritmo Apply a dos vértices

```
applyVertices(Vertex v1, Vertex v2):
    # Clave hash del subárbol de estos dos vértices
    String key = "1-" + v1.index + "+2-" + v2.index
    if( key in G ):
        return G[key]

    if(v1.isLeaf() && v2.isLeaf()):
```

```
        # op es la operación boolean entre dos vértices hoja
        # (que pueden ser true o false)
        if(op(v1,v2)):
            return True # Vértice con el valor true
        return False # Vértice con el valor false

var = -1
low = null
high = null
# v1.index < v2.index
if (!v1.isLeaf() and (v2.isLeaf() or v1.variable < v2.variable)):
    var = v1.variable;
    low = applyVertex(v1.low, v2)
    high = applyVertex(v1.high, v2)
else if (v1.isLeaf() or v1.variable > v2.variable):
    var = v2.variable
    low = applyVertex(v1, v2.low)
    high = applyVertex(v1, v2.high)
else:
    var = v1.variable
    low = applyVertex(v1.low, v2.low)
    high = applyVertex(v1.high, v2.high)

# Respeta la propiedad de no-redundancia:
# "Ningún vértice ha de tener como low y high a un único vértice."
if(low.index == high.index):
    return low

# Respeta la propiedad de unicidad:
# "Ningún vértice ha de tener la misma variable y vértices
# low y high que otro."
Vertex u = addVertex(var, low, high)
G[key] = u
return u;

# Llamada al algoritmo de apply
apply(operation, bdd1, bdd2):
    # Caché para evitar cálculos repetidos
```

```
G = {}  
String function = bdd1.function + " "+operation+" "+bdd2.function  
# Llenar la tabla hash T que contiene el nuevo árbol  
# con vértices de bdd1 y bdd2  
root = applyVertex(bdd1.root, bdd2.root)  
# Construcción del nuevo BDD  
return new BDD(function, root)
```

Restrict

En [Bryant1992], Randal Bryant define esta operación de manipulación de árboles binarios de decisión que asigna valores booleanos a algunas variables, de esta forma restringiendo la ruta desde la raíz del árbol y obteniendo un nuevo árbol de menor tamaño.

De forma gráfica podríamos verlo más fácilmente:

Supongamos el árbol $F = x + yz$

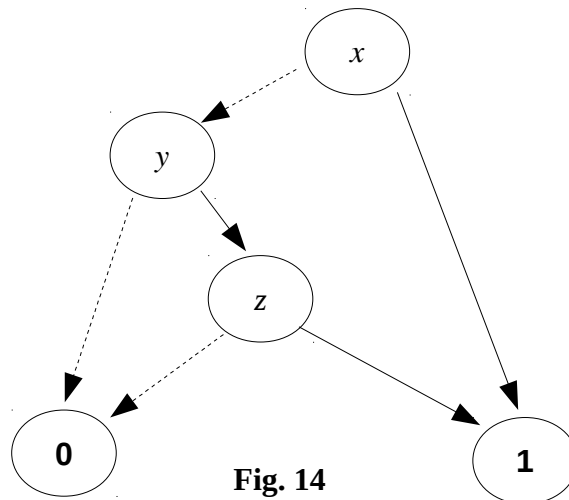
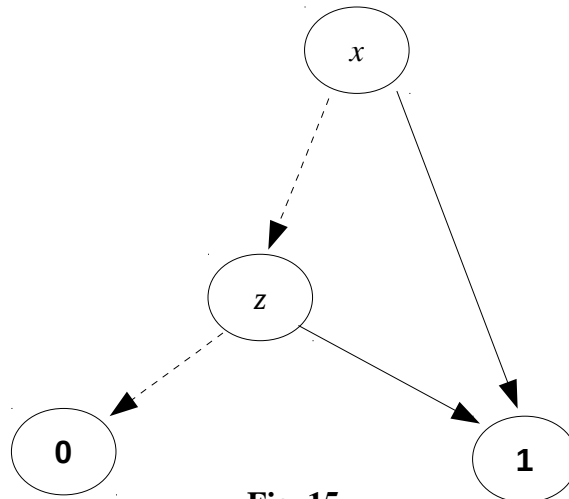


Fig. 14

Si asignamos a la variable y el valor **1**, el BDD perderá todos los vértices con esa variable y se sustituirán por los de su rama *high*. En nuestro caso, sólo hay un vértice, de forma que el *low* del vértice x llegaría directamente al vértice z , es decir:

**Fig. 15**

Como se puede ver a simple vista, este árbol restringido, obedece a la expresión lógica $F_{y=1} = x + z$.

Además de obtener un árbol restringido, esta operación puede usarse para realizar una evaluación lógica de la expresión contenido en el BDD. De esta forma, si se asigna un valor lógico a cada variable, al final se obtendrá un árbol de sólo un vértice, el vértice **1** o **0**. Obviamente el vértice resultante será el que indique el valor de verdad de la expresión lógica contenida en el árbol, dada esa asignación de valores de verdad para las variables.

Obtiene una nueva raíz de un BDD basándose en el BDD con raíz v

y con una asignación de valores booleanos en algunas variables

restrictFromVertex(v, assignement):

 if(v.isLeaf()):

 # Hay un único vértice 1 ó 0

 return T[v.index]

 if(v.variable in assignement):

 boolean value = assignement[v.variable]

 if(value):

 return restrictFromVertex(v.high, assignement)

 else:

 return restrictFromVertex(v.low, assignement)

 else:

 low = restrictFromVertex(v.low, assignement)

 high = restrictFromVertex(v.high, assignement)

 if(low.index == high.index)

 return low

 return addVertex(v.variable, low, high)

Obtiene un nuevo BDD basándose en este BDD junto con una

```
# asignación booleana a algunas variables.
restrict(bdd, assignement):
    restrictedBDD = restrictFromVertex(bdd.root, assignement);
    rfunction = bdd.function
    for(pair : assignement.pairs()):
        variable = VARIABLES[pair.key]
        value = pair.value
        rfunction = rfunction.replace(variable, value)
    return new BDD(rfunction, restrictedBDD)
```

Swap

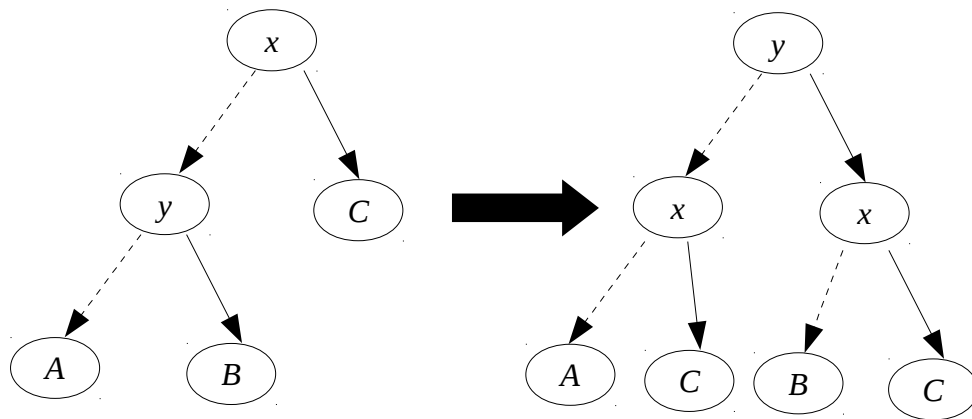
Esta operación intercambia dos niveles del árbol. El objetivo es tener una operación que permita obtener algunos vértices huérfanos, de forma que se puedan eliminar y por tanto reduciendo el tamaño del árbol.

La implementación es ignorada en la mayoría de los trabajos de la bibliografía y en ellos se indica [Rud93] como referencia. Para comprender mejor esta operación se pueden ver las notas del mismo autor en el taller [Rud93W].

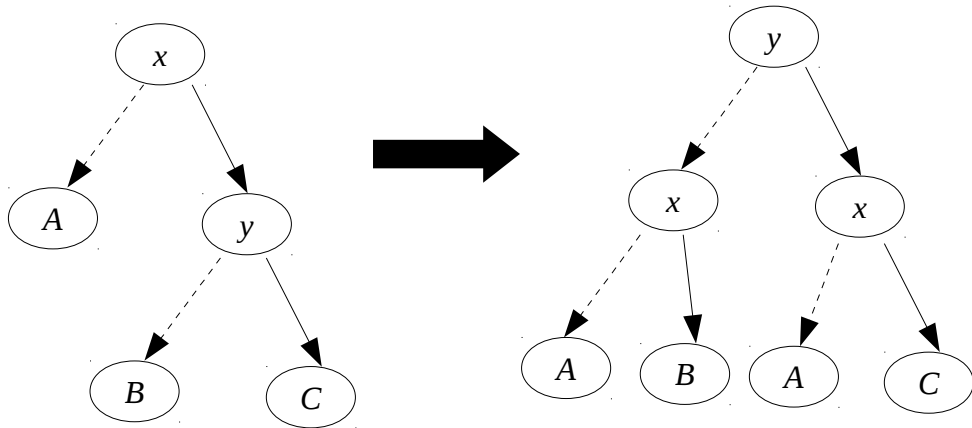
En [JacobiEtAl], los autores indican de forma gráfica cada uno de los posibles cambios escenarios en los que se puede encontrar un vértice que ha de intercambiarse con el del siguiente nivel. Los reproducimos a continuación:

Supongamos que en el nivel actual se encuentra la variable x y en el siguiente la variable y . El resto

de vértices que no tengan ninguna de estas dos variables se les pondrá como nombre *A*, *B*, *C* o *D*.



Caso B



Caso C

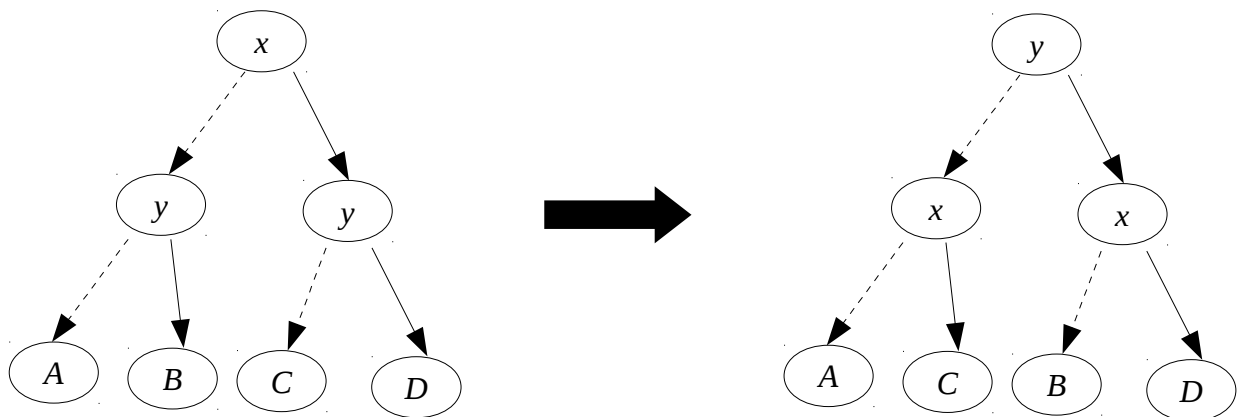


Fig. 16

En el resto de escenarios de intercambios de variables, el vértice x no tiene vértices descendientes con la variable y , por lo tanto, no se produce ningún intercambio.

A continuación incluimos el pseudocódigo de los distintos casos de intercambio, indicando en cada uno de ellos a qué caso se refiere.

El método `addWithoutRedundant(varI, A, C)` añade un vértice con esos valores de variable y con los descendientes `low` y `high`, comprobando que no existe ya un vértice con esos atributos. Si no existe, devuelve un nuevo vértice con esos valores, si existe, lo obtiene y de igual forma lo devuelve.

```
# Reemplaza el vértice v (si tiene la variable varJ)
```

```
# con el vértice del siguiente nivel
```

```
swapVertex(Vertex v, int varJ):
```

```
    swapWasMade = false
```

```
    varI = v.variable
```

```
    low = v.low
```

```
    high = v.high
```

```
    A = null
```

```
    B = null
```

```
    if (!low.isLeaf()):
```

```
        A = low.low
```

```
        B = low.high
```

```
    else:
```

```
        A = low
```

```
        B = low
```

```
    C = null
```

```
    D = null
```

```
    if (!high.isLeaf()) :
```

```
        C = high.low()
```

```
        D = high.high()
```

```
    else:
```

```
        C = high
```

```
        D = high
```

```
    newLow = null
```

```

    newHigh = null

    # Caso a:
    if (low != null && low.variable == varJ &&
        (high == null || high.variable != varJ)):
        newLow = addWithoutRedundant(varI, A, C)
        newHigh = addWithoutRedundant(varI, B, C)
        setVertex(v, varJ, newLow, newHigh)
        swapWasMade = true

    # Caso b:
    else if ((low == null || low.variable != varJ) &&
        (high != null && high.variable == varJ)):
        newLow = addWithoutRedundant(varI, A, B)
        newHigh = addWithoutRedundant(varI, A, C)
        setVertex(v, varJ, newLow, newHigh)
        swapWasMade = true

    # Caso c:
    else if ((low != null && low.variable == varJ) &&
        (high != null && high.variable == varJ)):
        newLow = addWithoutRedundant(varI, A, C)
        newHigh = addWithoutRedundant(varI, B, D)
        this.setVertex(v, varJ, newLow, newHigh)
        swapWasMade = true

    # Caso d:
    else if ((low == null || low.variable != varJ) &&
        (high == null || high.variable != varJ)):
        swapWasMade = false

    # Caso e:
    else if ((low == null || low.variable != varJ) && high == null):
        swapWasMade = false

    return swapWasMade

# Intercambia un nivel con el siguiente
swap(int level):

    # Si es el último nivel, ignorar
    if(level == variables.size()-1)

```

```
        return false

    variableI = variables.getVariableInPosition(level)
    variableJ = variables.getVariableInPosition(level+1)

    boolean swapWasMade = false

    verticesOfThisLevel = V[variableI]
    for(Vertex v : verticesOfThisLevel):
        swapWasMade = swapWasMade || swapVertex(v, variableJ)

    variables.swap(variableI, variableJ);
    return swapWasMade
```

Algoritmos

Con el objetivo de reducir el número de vértices, hemos desarrollado una serie de algoritmos que hacen uso del intercambio de variables.

Window Permutation

Este algoritmo está basado en los trabajos [Fujita91] y [Ishiura91]. Consiste en definir una ventana móvil de un determinado tamaño sobre las variables ordenadas y obtener el mejor orden posible en cada posición. En cada iteración en la que se mueve la ventana se almacena la mejor solución y al final, se devuelve ésta.

Es decir, se obtiene para cada posición de la ventana la permutación que genera un orden cuyo tamaño de árbol es mínimo.

Rudell, en [Rud93] indica que este algoritmo es eficiente para tamaños de ventana 3, 4 ó 5, pero sus resultados indican que su algoritmo es mejor.

Sifting de Rudell

Richard Rudell en el año 1993 desarrolló un algoritmo de reducción del número de vértices en árboles BDD, [Rud93]. El algoritmo consiste en encontrar la posición óptima de una variable en el árbol, suponiendo que las demás variables están fijas.

Así, comenzamos con una variable determinada y movemos sus vértices hacia el fondo del árbol y luego de vuelta hacia la primera posición. En cada paso vamos calculando el número de vértices que tiene el árbol, de forma, que cuando se termine el proceso se sepa exactamente cuál es la posición que genera un tamaño de árbol menor.

Como ya sabemos la mejor posición, sólo tendremos que subir o bajar los vértices de esa variable hasta encontrar la posición antes encontrada.

Como se puede ver, este algoritmo heurístico es sencillo y da unos resultados muy buenos para problemas con pocas variables.

Un aspecto importante a tener en cuenta es el de cómo ir escogiendo las variables para ir realizando los intercambios. Nosotros hemos optado por tener varias estrategias: ir escogiendo las variables según su número de vértices, tal y como se recomendaba en [Rud93W] o tomar la variable que más ocurrencias tenga en la fórmula o tomar una variable al azar.

Algoritmo de intercambios aleatorios

Mostramos los resultados de un algoritmo aleatorio que consiste en realizar una serie de iteraciones y en cada iteración hacer un intercambio de una variable escogida de forma aleatoria con la que ocupe la posición siguiente.

En cada iteración comprobamos si el grafo resultante es de menor tamaño que el inicial, y si es así, almacenamos ese nuevo orden como mejor solución.

Por último, devolvemos el mejor orden encontrado.

Obviamente, no esperamos grandes resultados de este algoritmo, sino simplemente una base de la que partir y poder comparar con el resto de algoritmos.

Algoritmo genético

El algoritmo genético fue desarrollado después de leer el trabajo [Lenders&Baier04] pensé que sería una buena idea implementarlo y compararlo a las heurísticas ya comentadas.

Estos algoritmos se basan en la metáfora biológica de que una población irá mejorando poco a poco si vamos realizando cruces entre ellos y mutaciones esporádicas. De esta forma, después de un número de iteraciones

En nuestra implementación, hemos optado por un algoritmo genético clásico, que no contuviera hibridación. De forma que contiene las operaciones clásicas de este tipo de algoritmos.

Antes de comenzar a describir sus partes, hemos de destacar un detalle sobre el motor de números aleatorios. Este generador usa la misma semilla para todas las operaciones aleatorias, de forma que sean reproducibles los experimentos. Es decir, que si ejecutamos con las mismas semillas los experimentos, devolverán siempre los mismos resultados.

Estructuras de datos

Hemos optado porque cada cromosoma sea un orden de variables. Cada cromosoma tendrá el orden y el número de vértices que se obtienen aplicando ese orden al BDD. Así podremos usar este número de vértices como medida de la bondad del cromosoma, evidentemente, cuanto menor sea este valor, mejor orden será.

Población inicial

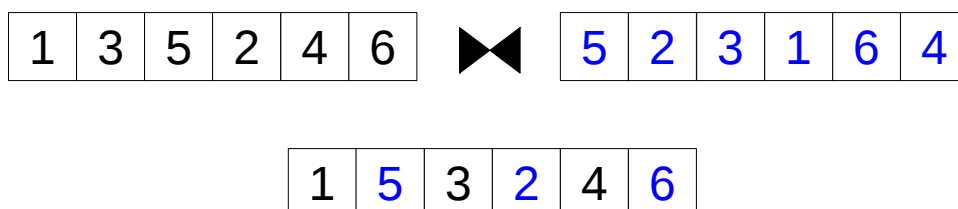
De esta forma, cuando generamos inicialmente una población de cromosomas, lo que hacemos es generar órdenes aleatorios de variables y reordenar nuestro árbol para calcular el tamaño de éste. Es obvio que este proceso es costoso, y su tiempo dependerá en gran medida del número de cromosomas que vayamos a usar, dado que para aplicar al árbol el orden de cada uno de ellos, habrá que realizar como mucho para cada variable $n-1$ intercambios, por lo que tendremos un orden de eficiencia cuadrático.

Selección

Después, en la selección, se toman aleatoriamente un número determinado de padres. No se optimizan usando el algoritmo de Rudell como en [Lenders&Baier04], porque pensamos que aplicar una heurística aquí podía hacer que se llegase a un máximo local y sobre todo porque queríamos tener un algoritmo genético puro, dejando el tema de las hibridaciones para otra implementación distinta.

Cruce

Estos cromosomas seleccionados se emparejan dos a dos para generar, mediante cruces, los cromosomas hijos. Este cruce sí ha sido tomado de [Lenders&Baier04] y se basa en intercalar las posiciones de cada una de las variables de los padres, sin repetir variables, claro. Por ejemplo, si tenemos los siguientes órdenes, para generar su descendiente iríamos intercalando cada una de las variables:



Nótese que cuando se va a escoger la variable 5 del cromosoma de la izquierda, ya se le ha asignado una posición a esta variable, debido a que se encontraba en el frente del cromosoma de la derecha. Ante este problema, hemos de continuar buscando una variable del mismo padre que no se encuentre ya en el cromosoma hijo. En ese caso concreto, le asignamos la variable 4, dado que es la primera del cromosoma padre que todavía no tiene el hijo.

Mutación

La operación de mutación se ejecuta sólo con una determinada probabilidad y consiste en intercambiar las posiciones de dos variables. Obviamente, puede que en un caso concreto no se cambie ninguna variable de sitio, pero si se produce algún cambio habrá que recalcular el tamaño de grafo que genera.

Actualización de la población

Para terminar la iteración, se actualiza la población. Primero se añaden a la población los hijos anteriormente generados. Luego eliminamos de la población los peores cromosomas hasta que al final, la población permanezca con el mismo número de cromosomas que tenía inicialmente.

Hemos optado por no reiniciar la población cuando se estanque el algoritmo para no caer en mínimos locales, dado que desde un orden “malo”, es decir, un orden que genere un árbol de un tamaño enorme, se puede obtener mediante mutaciones y cruces un orden mucho mejor.

Algoritmo memético

El algoritmo memético es una optimización del algoritmo genético. Este algoritmo se basa en aplicar una búsqueda local a los cromosomas obtenidos en el proceso de selección.

Cuando ejecutamos el algoritmo genético, vimos cómo se expandía tanto la búsqueda, que debido a que teníamos cromosomas que representaban órdenes que hacían que el árbol no cupiese en memoria principal. Por eso, pensamos en aplicar un método de optimización rápido que permitiese explorar más en profundidad el espacio de búsqueda, aun perdiendo algunas posibles soluciones que hicieran que el proceso se detuviese debido a falta de memoria.

Aun así, seguía sin poder procesar algunos conjuntos de datos, por lo que pensamos en

Para el proceso de optimización hemos escogido el algoritmo de ventana porque es muy eficiente.

Además, dado que el algoritmo genético no siempre arroja buenos resultados, al menos con este otro algoritmo evolutivo, tendremos como resultado base el de la permutación de ventana.

Obviamente, como hemos añadido para cada cromosoma un proceso de optimización, este algoritmo será más lento, pero al menos, podemos asegurarnos de que consumirá menos memoria.

Iterative Sifting

Este algoritmo está basado en realizar de forma iterativa el movimiento de variables hasta la mejor posición y actualizar el orden si es mejor que el mejor encontrado. En cada iteración establece un orden de variables y las va moviendo hasta que cada una se encuentra en la mejor posición.

El orden de variables se determina, con una probabilidad de reinicio. Es decir, en cada iteración el orden de las variables será:

- Aleatorio: si un número aleatorio es menor o igual a la probabilidad de reinicio del orden.
- Descendente en función del número de vértices de cada variable: de esta forma, nos aseguramos que este algoritmo heurístico tratará de mover primero las variables que tienen asociadas mayor número de vértices en el árbol, y por tanto, generando mayor optimización en el árbol.

Así pues, se basa en el algoritmo de Rudell en el sentido de que usa el mismo proceso de mover una variable dejando fijas las demás, pero lo novedoso de este algoritmo es que permite mover varias veces la misma variable, de forma que pueda solucionar una mala decisión tomada a posteriori.

Otro detalle a destacar, el proceso de reinicio tiene como objetivo el evitar caer en mínimos locales y poder explorar el espacio de búsqueda.

Este algoritmo es de nuevo desarrollo y su publicación está pendiente.

Software

Herramientas usadas

Para ejecutar el software proporcionado se necesita una máquina virtual de Java con la versión 7. Concretamente este paquete se ha desarrollado usando OpenJDK7 [OpenJDK].

Dada la naturaleza multiplataforma de Java, no se requiere de ningún sistema operativo específico, ni enlazado con librería externa para su uso, dado que están integradas en el paquete `jar store/DJBDD.jar`.

El proyecto se encuentra en el siguiente repositorio público del sistema de control de versiones GIT:

<https://github.com/diegojromerolopez/djbdd>

A continuación, vamos a detallar las librerías usadas, dando un fundamento al motivo que nos ha llevado a hacerlas parte integral de nuestro proyecto:

antlr3

Antlr proporciona la posibilidad de crear reconocedores para gramáticas. En nuestro caso lo hemos usado para proporcionar a nuestra librería de la capacidad de construir árboles a partir de una expresión lógica con la misma sintaxis que una expresión lógica en el lenguaje de programación Java.

Recordemos que la construcción del BDD se realizaba de forma recursiva realizando *Apply* entre sucesivos árboles generados a partir de la expresión lógica. Pues bien, el proceso es el siguiente, tomamos la expresión lógica, la convertimos en un árbol sintáctico abstracto usando antlr3 y vamos recorriendo ese árbol, generando BDDs y vamos operándolos entre ellos hasta obtener uno que contenga toda la expresión completa.

Este paquete contiene herramientas muy sencillas que permiten la creación de un reconocedor sintáctico a partir de una gramática como la que hemos usado:

```
grammar Logic;
```

```
options {  
    output=AST;  
}
```

```
parse  
    : expression EOF!    // omitir token EOF  
    ;
```

```
expression  
    : dimplication  
    ;
```

```
dimplication  
    : isdifferent ('<->'^ isdifferent)*    // '<->' es equivalencia o doble imp.  
    ;
```



```

isdifferent
: implication ('!='^ implication)*    // `!=` es lo contrario de <->
;

implication
: notimplication ('->'^ notimplication)*    // `->` es la implicación
;

notimplication
: or ('!->'^ or)*    // `!->` es la implicación negada
;

or
: and ('||'^ and)*    // `||` es el 0 lógico
;

and
: not ('&&'^ not)*    // `&&` es el Y lógico
;

not
: '!'^ atom    // `!` es el operador de negación
| atom
;

atom
: ID
| TRUE
| FALSE
| '('! expression ')!'    // los paréntesis no tienen valor sintáctico
;

TRUE : 'true';    // True y False los tomamos como palabras reservadas
FALSE : 'false'; //

ID : ('a'..'z' | 'A'..'Z' | '0'..'9' | '_' | '{' | '}')+; // Variable lógica
Space : (' ' | '\t' | '\r' | '\n')+ {$channel=HIDDEN;}; // Caracteres vacíos

```

Para facilitarnos las cosas, se puede ver como hemos incluido cada operador y su negación. Esto permitirá poder negar un árbol completo de forma sencilla sin usar aristas etiquetadas. En siguientes secciones se profundizará en este detalle.

Con respecto a la versión, conocemos que existe una versión nueva de *antlr* (la versión 4), pero dado que nuestra gramática es sencilla y generativa por la derecha, no veíamos la necesidad de usar la nueva versión porque entre otras cosas, éramos familiares a la 3.

Javaluator

Tal y como hemos visto con el apartado de construcción y el anterior, la generación se realiza de

forma recursiva generando un árbol sintáctico y generando BDDs y operando sobre ellos hasta obtener el BDD de la raíz, que es el que representa el árbol binario de toda la expresión.

Ahora bien, para dotar de mayor flexibilidad al desarrollador, permitimos que el proceso recursivo de creación del árbol no requiera de un análisis sintáctico, ni del uso de la operación *Apply*, sino simplemente de la creación implícita de la tabla de verdad, evaluando la expresión lógica con todas las posibles combinaciones de asignaciones de valores de verdad para las variables.

Obviamente esta opción no es deseable y es ineficiente, por lo que está desactivada por defecto y sólo debería usarse para expresiones lógicas triviales o cuando tengan un número lo suficientemente pequeño de variables como para ser eficiente, dado que probar todas las combinaciones de n variables implica realizar 2^n evaluaciones.

Diseño

A nivel de diseño software, a continuación se muestran los paquetes ordenados de forma alfabética y desarrollamos en cada uno de ellos la funcionalidad que contiene.

Paquete raíz: djbdd

Paquete raíz que contiene a todos los de la librería djbdd.

core

Este es el módulo principal, contiene todas las clases básicas de la librería. Sin estas clases, no habría sistema. Inicialmente se introdujeron estas clases en el paquete predeterminado, pero debido a que se vio que era una mala práctica, se creó un paquete por defecto en el que estuvieran todas. Este es ese paquete.

A continuación, describimos cada una de ellas de la forma más detallada posible en el orden lógico de uso:

VariableList

Lista de variables. Inicialmente se pensó en hacer que la lista de variables no fuera una clase sino simplemente una colección de objetos *String*. Eso se vio que no era propicio debido a que queríamos tener por un lado las variables, cada una con su índice y por otro el orden que se le había dotado en función a los intercambios realizados.

Por tanto, esta clase tiene dos estructuras principales (y una para facilitarnos el desarrollo, pero que no es vital):

- **variables:** lista de variables donde el índice indica el identificador de la variable. Este atributo no cambia nunca en el transcurso de la vida del sistema.
- **orderedVariables:** lista de variables de acuerdo al orden. Se usa para depuración, ya permite tener las variables en el orden natural. Cuando se intercambien dos variables, esta lista tomará el orden natural de las variables.
- **order:** indica el orden de cada variable, de forma que el valor en la posición i indica el orden de la variable i -ésima. Inicialmente, cada valor contiene la posición en la que se encuentra. En cuanto se empiecen a realizar intercambios de variables, los valores

cambiarán a la posición donde se encuentre realmente.

Vertex

Esta clase contiene la estructura de cada uno de los vértices del

Tiene los siguientes atributos:

- `index`: clave única en la tabla *T*.
- `variable`: identificador de la variable que contiene en la lista de variables. Los vértices hoja la tienen asignada a un valor fijo que no representa a ninguna variable.
- `low`: referencia al descendiente *low*. Para los vértices hoja es *null*.
- `high`: referencia al descendiente *high*. Para los vértices hoja es *null*.
- `num_parents`: contador de vértices que apuntan a este vértice. Dado que usamos una misma red de vértices para todos los BDDs, tenemos que llevar la cuenta de cuándo un vértice no es apuntado por ningún otro.
- `num_rooted_bdds`: indica para cuántos BDDs es este vértice la raíz. De forma similar a `num_parents`, este atributo guarda la cuenta de cuántos BDDs lo usan como raíz, debido a que se comparte toda la malla de vértices.

Además de estos atributos, el vértice tiene las siguientes operaciones destacadas:

- `isLeaf`: informa si el vértice es un vértice hoja.
- `isRedundant`: informa si sus atributos *low* y *high* son iguales.
- `isDuplicate`: informa si dos vértices son duplicados, es decir, si comparten los mismos atributos *variable*, *low* y *high*.
- `isOrphan`: informa si el vértice es huérfano, es decir, si no hay ningún BDD que lo tenga como raíz y si no hay ningún vértice que apunte a él. En ese caso, este vértice puede eliminarse.
- `isChildOf/isParentOf`: comprobación de descendencia/paternidad (respectivamente). Estos métodos permiten saber si un vértice que se pasa como parámetro es hijo/padre (respectivamente) del vértice actual.

Por supuesto hay operaciones de conversión a cadena y de establecimiento de *variable*, *low* y *high* del vértice. Con respecto a esta última operación, hemos de notar que no es pública (al contrario del resto) sino que es propia del paquete puesto que se hace uso en la operación de intercambio de variables, implementada en la clase `TableT`.

TableT

Esta clase contiene las estructuras que definen el grafo global en el que están basados todos los BDDs.

En primer lugar, hay una tabla *T*, que contiene cada vértice dado su índice. Es decir, es una tabla hash en la que para cada vértice, se guarda una entrada en la que la clave es su atributo *index* y el valor es el propio vértice.

En segundo lugar, hay una tabla *hash* que almacena de forma única todos los vértices, de manera

que nunca haya dos vértices con el mismo trío de valores variable, *low* y *high* que sea igual. Así, la clave es la concatenación sigue estas reglas:

- Si es el vértice hoja **1**: "-1-N-N"
- Si es el vértice hoja **0**: "-2-N-N"
- Si es otro tipo de vértice: `variable+"-"+low.index+"-"+high.index`

A esta tabla *hash* la llamamos *U* (de tabla de unicidad de vértices).

En tercer lugar, hay una estructura que agrupa todos los vértices en conjuntos según la variable que contiene cada uno. Implementamos esta estructura de grupos de vértices por variables como una tabla *hash* en la que la clave es la variable y el valor es una lista con todas las variables.

Como veremos en cuando expliquemos las distintas alternativas del algoritmo de intercambio de variables de Rudell, necesitamos tener un acceso rápido a los vértices de cada nivel. Obviamente, en cada intercambio, tendremos que cambiar a los vértices del conjunto que hayamos adelantado un nivel, y por tanto, cambiarles también su variable.

Esta estructura la llamaremos *V*, porque agrupa a los vértices por variables.

Ahora, vamos a mostrar un ejemplo de la estructura que se tendría en memoria para el árbol de la función $F = x_0x_2 + x_1x_3 + x_4$ siendo el orden de las variables el indicado por el subíndice de cada una de ellas. Así, tenemos el BDD representado gráficamente a continuación:

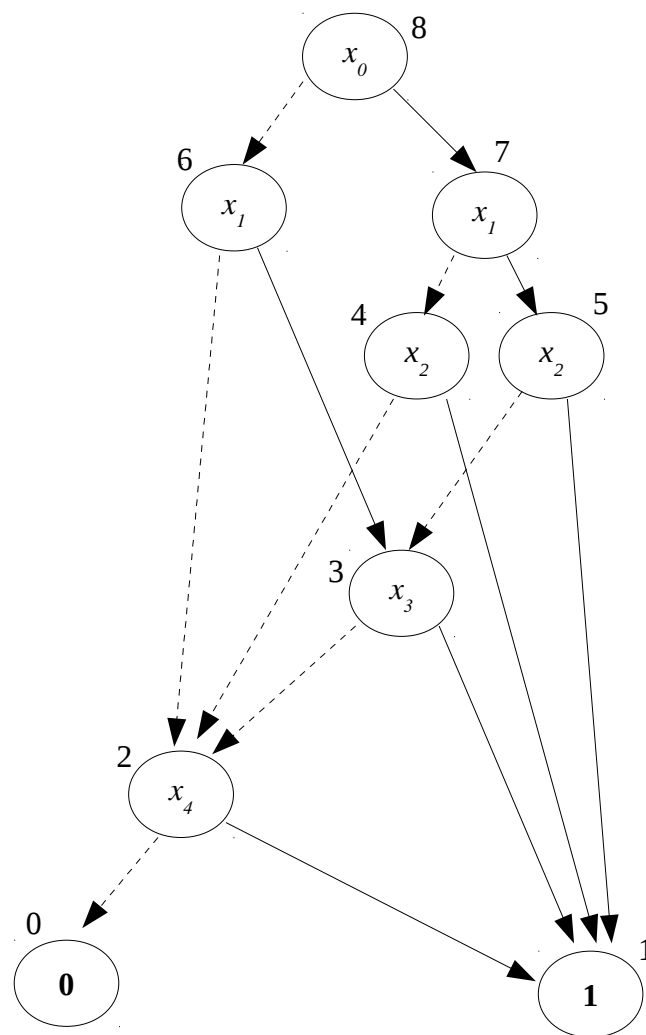


Fig. 17

Nótese que las variables ahora comienzan en 0, dado que en nuestra implementación, las variables son el índice de posición en la `VariableList`, comenzando en 0 y terminando en $n-1$, siendo n el número de variables.

Mostramos a continuación los valores de cada una de las tablas para el BDD con la expresión lógica $F = x_0x_2 + x_1x_3 + x_4$:

Tabla T			
Índice	Variable	Low	High
0	-1	<i>null</i>	<i>null</i>
1	-2	<i>null</i>	<i>null</i>
2	4	0	1
3	3	2	1
4	2	2	1
5	2	3	1
6	1	2	3

7	1	4	5
8	0	6	7

Tabla U	
Clave	Vértice
- 2 - N - N	0
- 1 - N - N	1
4 - 0 - 1	2
3 - 2 - 1	3
2 - 2 - 1	4
2 - 3 - 1	5
1 - 2 - 3	6
1 - 4 - 5	7
0 - 6 - 7	8

Tabla V	
Variable	Vértices
0	{8}
1	{6, 7}
2	{4, 5}
3	{3}
4	{2}

Una vez mostrado el ejemplo, queda un aspecto importante que tratar sobre la implementación de estas tablas. Dado que en las operaciones sobre los BDDs, hay que liberar vértices, estas tablas deben reflejar esas eliminaciones.

La forma de realizar esta eliminación es la de mantener dos contadores de referencias en cada vértice. Hay un contador que indica cuántos vértices tienen al vértice como descendiente (atributo `num_parents`) y un atributo que indica para cuántos BDDs es la raíz, `num_rooted_bdds`.

Estos dos contadores se van modificando conforme se va construyendo el árbol de forma automática, y cuando tanto el contador de padres como el de número de BDDs para los que es raíz son 0, el vértice decimos que es huérfano y puede ser eliminado de las tablas.

Todo vértice huérfano no cumple ninguna función y puede ser eliminado en cuanto se pueda. Así, existe un método de recolección de basura que elimina de forma explícita los vértices. Este método de recolección de basura implementado para solventar este problema se llama `gc`.

Este método de resolución del problema de los vértices huérfanos puede parecer tosco, y de hecho, antes habíamos pensado una solución automática que permitía que el desarrollador se olvidase de tener que ir llamando periódicamente a la recolección de basura, aunque como se vio más adelante, no era lo suficiente eficiente para nuestros propósitos.

Antes de tener una malla de vértices común para todos los árboles, desarrollamos una arquitectura distinta que separaba completamente los vértices de un árbol de los de otro. Es decir, cada árbol tenía sus propias tablas *T* y *U*. Esta arquitectura tenía la ventaja de que al ser la estructura distinta era fácilmente paralelizable y permitía la carga en paralelo, obviamente.

Además, de esta característica, las tablas *T* y *U* de cada árbol no tenían referencias a vértices, sino referencias débiles a objetos de la clase *Vertex*, vértices en definitiva, [JavaWeakReferences] [UnderstandingWeakReferences]. El objetivo de esta decisión era que si el vértice no era referenciado por nadie más que por estas tablas, o lo que es igual, no era descendiente de ningún otro, el recolector de basura lo podía eliminar. O dicho de otra forma, estas referencias no tienen poder como para indicar al recolector de basura que no han de eliminar a los vértices a los que apuntan.

Con esta arquitectura no hacían falta contadores de referencias y de hecho, la recolección de basura era totalmente transparente al desarrollador. Dado que, en cuanto un vértice dejaba de estar apuntado por otro, el recolector de basura de la JVM tenía la capacidad para eliminar el objeto, y por tanto, liberar la memoria usada.

Pero este enfoque tenía un gran problema: la gran redundancia de vértices entre distintos árboles. Ante cualquier operación lógica nos quedábamos sin memoria, porque repetíamos de forma insistente vértices en distintos árboles.

Además, otro problema era el liberar de forma periódica las referencias débiles que no apuntan a nada. Cuando se libera el objeto apuntado por una referencia débil, esta se convierte en una referencia nula que se ha de eliminar. Al final, había que implementar un método específico de liberación de referencias débiles nulas, o lo que es igual, un método de compactación de tablas para cada BDD.

En definitiva, no merecía la pena el esfuerzo para perder el control de la liberación de memoria y sobre todo, para no ahorrar nada, puesto que había igualmente que desarrollar un recolector de basura.

Continuando con los métodos destacados de este clase, está el método de recolección de basura antes comentado, métodos de comprobación de existencia dado un vértice, métodos de adición de vértices a las tres tablas y por supuesto, métodos de eliminación de vértices.

Tenemos que notar, también, el método de intercambio de un nivel con el siguiente, dado que este método se usa en los algoritmos de reducción por intercambio de variables que hemos implementado. Además, esta clase, llevará la cuenta de cuántas veces se ha realizado la operación de intercambio, dado que usaremos ese dato para comprobar la efectividad de cada método.

Por último, notamos que hay métodos que imprimen en un archivo de texto en formato DJBDD y en PNG el grafo completo.

BooleanEvaluator

Esta clase encapsula la llamada a *Javaluator* y permite que se pueda evaluar una expresión lógica de forma sencilla. Esta clase hereda de *AbstractEvaluator* que es una clase abstracta de *Javaluator*. Por supuesto, define todos los operadores lógicos posibles, su precedencia y su asociatividad. Por último, sobrescribe el método *evaluate*, para que devuelva la semántica correcta de cada operación lógica.

Cabe destacar, que el método de evaluación es un método estático llamado *evaluateFunction* que prepara la expresión sustituyendo cada variable por su valor de verdad y realizando la llamada a

evalúate. Así, ocultaremos todo lo relacionado con Javaluator al resto de componentes de este software, logrando una buena separación entre niveles de abstracción.

BDD

Esta clase representa a un BDD concreto. Es decir, a una expresión lógica en forma de árbol binario de decisión.

Como atributos, cada árbol está determinado por un vértice raíz, un subconjunto de variables de las definidas como posibles variables de la expresión y su tamaño.

Estas variables permiten optimizar las operaciones lógicas con otros BDDs, además del propio proceso de construcción. El motivo de esto son las expresiones lógicas que no tienen todas las variables. Por ejemplo, en determinadas fórmulas, se usaban sólo una decena de variables, pero como habíamos definido más de 4000, el proceso de construcción era muy lento sin razón de serlo. Cuando aplicamos esta optimización, el proceso de construcción fue mucho más rápido.

El tamaño de un BDD ha de consultarse visitando todos los vértices que cuelgan del vértice raíz. Este proceso es costoso, de manera que una vez calculado, se guarda para futuras consultas.

Por último, la última optimización que le introduje fue la de almacenar si era un árbol tautológico o contradictorio, es decir, si el árbol devolvía siempre verdad o siempre falso, respectivamente.

BDDApply

Esta clase contiene la implementación del algoritmo *Apply* para ejecutar operaciones entre dos BDDs.

Cabe destacar que se usa una tabla de caché para no volver a computar las operaciones varias veces sobre los mismos vértices, pero podemos decir que es una implementación muy fiel al algoritmo antes mostrado.

GCThread

Esta clase contiene la implementación de una hebra que permite la ejecución de forma concurrente de un recolector de basura.

Actualmente, la implementación de BDDs se basa en referencias débiles, tal y como hemos visto anteriormente. Pero esas referencias débiles han de ser eliminadas puesto que a fin de cuentas, ocupan espacio. Pues bien, esta clase permite al desarrollador olvidarse de la tarea de ir llamando al recolector de basura del sistema de BDDs, pudiendo configurar además la frecuencia de llamada de éste de forma dinámica.

Además, se ha desarrollado esta funcionalidad con una estructura orientada a objetos, para poder tratar con ella de la forma más correcta desde el punto de vista de la Ingeniería del Software.

io

Siguiendo la convención de Java, este módulo contiene utilidades de entrada y salida. Este módulo contiene clases para tratar con cada uno de los tipos de fichero desde los que se puede cargar un BDD.

Así, tenemos los siguientes tipos de cargadores:

- `CstyleFormulaFileLoader`: carga un BDD a partir de una expresión en estilo C.
- `DimacsFileLoader`: carga un BDD a partir de un archivo de cláusulas en formato DIMACS.
- `SheFileLoader`: carga un archivo a partir de un archivo en formato de Stephen She.

Además de estos cargadores de BDDs desde archivos, existe una clase que permite generar un archivo PNG usando la librería `GraphVizJava`. Esta clase es `Printer`. Por ejemplo, el siguiente gráfico ha sido generado usando esta funcionalidad:

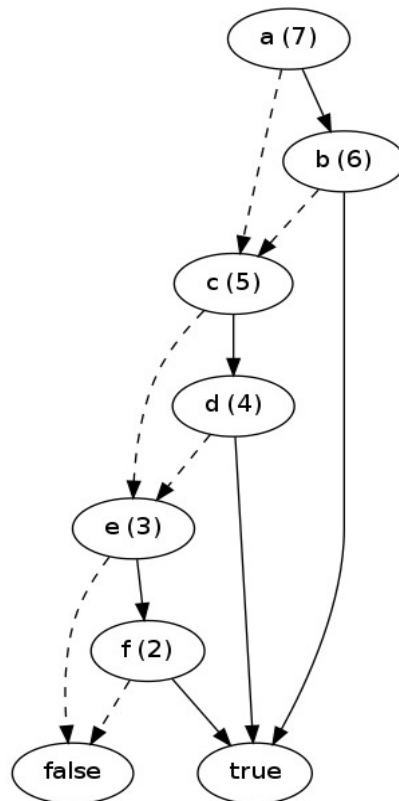


Fig. 18

Nótese que en el diagrama generado a los vértices hoja se les llama *false* y *true* para representar el vértice **0** y el **1** (respectivamente). Y que el resto de vértices contiene la variable y el identificador único de cada vértice entre paréntesis.

El resto de clases son ayudantes internos que permiten descargar de funcionalidad a las clases principales y que no tienen mucha más relevancia.

logic

Paquete que contiene métodos con el analizador sintáctico de fórmulas basado en `antlr3`. Contiene las clases generadas por `antlr3`, `LogicLexer` y `LogicParser` y un analizador desarrollado por mí que hace uso de éstas, `FormulaParser`. También hay una clase con ejemplos de uso que puede ignorarse completamente.

`FormulaParser` devuelve un árbol de sintaxis con los símbolos terminales y operadores de la fórmula. Este árbol lo usaremos en la construcción del BDD que hace uso de *Apply*.

main

Módulo principal, contiene el controlador que procesa los argumentos pasados desde línea de órdenes y realiza las llamadas a cada uno de los módulos según las órdenes que le pase el usuario.

Si se ejecuta sin argumentos, se muestra un pequeño manual de uso con todas las opciones que puede usar.

reducers

Este paquete contiene cada uno de los algoritmos de reducción del tamaño del BDD.

Cada método de reducción ha de heredar de la clase `ReductionAlgorithm`, que tiene el método `execute` que ha de ser sobrescrito por el desarrollador que quiera implementar un método de reducción.

Además esta clase contiene varias referencias a objetos globales para hacer la vida más sencilla al desarrollador, guarda una referencia de la tabla global `T` y de las variables. Por ende, la reducción se aplica al grafo total con todos los vértices. Esto es muy útil en el sentido de que podemos generar varios árboles BDD y mientras estén en memoria, si no los destruimos, si aplicamos algún método de reducción podremos comprobar cómo se reduce el tamaño de todos.

Cada método se implementa junto con sus clases necesarias en un subpaquete, de forma que sus requisitos más inmediatos estén ahí contenidos.

Los métodos de reducción implementados son los siguientes:

- `WindowPermutationReducer`: reduce el tamaño de los BDDs usando el algoritmo [Fujita91]. Lo llamamos con el nombre que le dio R. Rudell: Algoritmo de Permutación en una ventana.
- `SiftingReducer`: aplica el método de reducción de Rudell [Rudell93] sobre todos los BDDs que existan en el sistema.
- `RandomSwapperReducer`: método de reducción que consiste en ir realizando un intercambio sobre una variable escogidas de forma aleatoria en cada iteración. Este algoritmo lo usamos como base para compararlo con los algoritmos genético y memético.
- `GeneticReducer`: esta clase contiene la implementación del algoritmo genético de Lenders y Baier [Lenders&Baier04].
- `MemeticReducer`: esta clase contiene una mejora del algoritmo genético de Lenders y Baier [Lenders&Baier04]. Estos autores hablan de la posibilidad de desarrollar este algoritmo, aunque no muestran unos resultados sobre el mismo.
- `IterativeSifting`: esta clase contiene la implementación de nuestro algoritmo original que soluciona algunos problemas del algoritmo de Rudell, que como veremos en la sección de resultados, logra una mejora sobre sus porcentajes de reducción del tamaño del BDD. Está pendiente de publicación un trabajo sobre este método.

test

Pruebas de funcionamiento del paquete de BDD. Consta de 18 pruebas que pueden ejecutarse con la opción `-- runtest` seguida del número de test que deseemos.

Cada test es estático e independiente. No produce resultados especiales, sino que el desarrollador ha de saber de antemano qué test está ejecutando para poder interpretar correctamente la salida que éste genera. Normalmente se tratan de impresiones de un BDD o de mensajes que indican por sí mismos si el tests es correcto o ha fallado.

Usamos este paquete como método rápido de probar fórmulas lógicas convenientes durante el proceso de desarrollo del software.

Nos habría gustado que el mismo test indicase si es válido o no e implementar tests unitarios, pero nuestro conocimiento en ese particular es limitado y el tiempo era limitado, por lo que no se ha hecho.

timemeasurer

En Java no existe un método canónico de medición de tiempos y queríamos encapsularlo en algún tipo de unidad funcional. Por tanto, hemos creado una clase, `TimeMeasurer`. Esta clase empieza a contar el tiempo desde que se construye una instancia de ella y termina, al ejecutar el método `end`. Como se puede ver, el nivel de encapsulación llega hasta las mediciones de tiempo.

graphvizjava

Este paquete contiene una clase realizada por Laszlo Szathamary, que permite tratar con GraphViz [GraphViz] de forma sencilla desde Java. Usamos esta utilidad, porque permite de forma sencilla convertir un archivo PNG a partir de un archivo dot [DOT]. Usamos el formato dot como formato intermedio para mostrar los BDDs.

Para ver más información sobre este software, vea [GraphvizJava], donde se incluye todo el paquete de software original, los créditos completos y más información adicional.

logger

Contiene un sistema de registro de mensajes centralizado que permite activar y desactivarlo en tiempo de compilación. Si se desactiva antes de compilar este módulo, no se ejecutarán las condiciones de comprobación puesto que Java comprobará que la condición para mostrar los mensajes es falsa de forma constante, por lo que no se producirá una pérdida de rendimiento. Eso sí, este módulo no se puede activar y desactivar en tiempo de ejecución, por lo que sugiero realizar todas las pruebas primero, desactivarlo y finalmente generar el `.jar`.

Sólo contiene una clase, la clase `Log` que contiene varios métodos de impresión de mensajes con nombres exactamente iguales a los de `System.out`, como son `print`, `println`, etc.

Implementación

La mayoría de las implementaciones actuales están realizadas en código C o C++ de baja calidad. De hecho, en la mayoría de los trabajos encontrados, no se preocupan de detalles de cómo está implementada la operación `swap`, de manera que a la hora de mostrar resultados, simplemente se desarrolla un algoritmo basado en esta operación y se toman tiempos.

He optado por realizar una implementación libre y gratuita que pudiera usarse como laboratorio por parte de investigadores.

La implementación se encuentra disponible para descargar bajo licencia libre GPL3 con excepción de uso de clases en <https://github.com/diegojromerolopez/djbdd>.

Manual de uso de los binarios

Mostrar BDDs

Imprimir el BDD como imagen:

```
java -jar DJBDD.jar --image --<format> <file>
```

Imprimir el BDD a un archivo:

```
java -jar DJBDD.jar --print --<format> <file>
```

Formatos soportados (parámetro <format>)

- **dimacs:** formato de cláusulas en forma normal conjuntiva. Por ejemplo:

```
c simple_v3_c2.cnf
c
p cnf 3 2
1 3 0
-2 3 -1 0
```

Equivale a la fórmula $(x1 \text{ OR } x3) \text{ AND } (\text{NOT } x2 \text{ OR } x3 \text{ OR } \text{NOT } x1)$.

- **cstyle:** expresiones booleanas al estilo de C, usando como operadores lógicos el `&&`, `||`, `->`, `<->` y el `!`, para el AND, OR, implicación y doble implicación, respectivamente. Deben estar precedidas por una línea con todas las variables separadas por comas, dadas en el orden el que han de tomarse. Ejemplos de expresiones válidas son los siguientes:
 - `a && !b`
 - `a -> (!b && (c || d))`
 - `a <-> (b && !c)`
 - `a != (b && !c)`
 - `x0 && x1 && !x2`
- **djbdd:** archivo DJBDD. Formato de texto en el que se pueden guardar los árboles BDD en este paquete. Este formato no se soporta para la llamada al procedimiento de reducción.

Realizar un benchmark

```
java -jar --memory-optimization-benchmark --dimacs <ruta del fichero>\
<algorithm> [alg_params]
```

Donde <algorithm> es uno de los siguientes algoritmos:

- **sifting:** usa el algoritmo de Rudell tomando las variables con un orden basado en la ocurrencia de vértices.

- `sifting_sameorder`: usa el algoritmo de Rudell tomando las variables con el orden dado por el fichero.
- `sifting_randomorder`: usa el algoritmo de Rudell tomando las variables con un orden aleatorio. Tiene como parámetro una semilla aleatoria (parámetro `random_seed`).
- `window_permutation`, que tiene el parámetro `window_size` que ha de ser un entero y representa el tamaño de la ventana de este algoritmo.
- `random_swapper`, que además de la semilla aleatoria (parámetro `random_order`) tiene como parámetro el número de iteraciones (`iterations`) en las que ciclará el algoritmo.
- `genetic`: ejecución del algoritmo genético con los siguientes parámetros:
 - `random_seed`: semilla aleatoria.
 - `population`: número de cromosomas que usará el algoritmo genético.
 - `generations`: número de ciclos del algoritmo genético.
 - `selection_percentage`: porcentaje de cromosomas seleccionados en cada iteración.
 - `mutation_probability`: probabilidad de que un gen de un cromosoma sufra una mutación.
- `memetic`: tiene los mismos parámetros del algoritmo genético.
- `isifting`: ejecución del algoritmo Iterative Sifting. Tiene los siguientes parámetros:
 - `iterations`: número de iteraciones del proceso.
 - `random_seed`: semilla aleatoria para el cálculo del número aleatorio que determinará si se realiza el proceso de reinicio del orden de variables.
 - `reinit_probability`: probabilidad de reiniciar el orden de variables en cada iteración.

Por ejemplo, una ejecución de todos los benchmarks que tenemos en nuestro paquete software usando un algoritmo genético, es la siguiente:

```
java -jar DJBDD.jar --memory-optimization-benchmark --dimacs \  
./data/benchmarks genetic random_seed=121481 population=20\  
generations=1000 selection_percentage=0.2 mutation_probability=0.1
```

Nótese que los parámetros del algoritmo requieren el uso del signo igual para darles un valor concreto.

Ejemplos de uso de la API

```
// Variables booleanas  
String[] variables={"a", "b", "c", "d", "e", "f"};  
  
// Siempre ha de iniciar el sistema BDD antes de crear  
// cualquier objeto BDD. Si no, el sistema dará error  
BDD.init(variables);
```

```
// Las funciones se especifican con la sintaxis de operadores lógicos de Java,  
// añadiendo además los operadores -> (operador de implicación)  
// y <-> (operador de doble implicación)  
String function = "(a && b) || (c && d)";  
  
// Con la implementación actual, el orden de las variables  
// es global a todos los BDDs, por lo tanto, si queremos cambiarlo  
// hemos de usar la operación de intercambio de niveles,  
// que intercambiará dos niveles para todos los BDDs  
  
// Construcción de un nuevo BDD  
BDD bdd = new BDD(function);  
  
// Mostrar el BDD bdd en la salida estándar  
bdd.print();  
  
// Puede imprimir el BDD como una imagen PNG  
Printer.printBDD(bdd1, "bdd_"+bdd1.size());  
  
// Otro BDD  
String function2 = "(a && e) || f"  
BDD bdd2 = new BDD(function2);  
  
// Muestra el BDD en el terminal  
bdd2.print();  
  
// Operaciones entre BDDs  
  
// Este BDD es el AND lógico entre bdd y bdd2  
BDD bdd3 = bdd.apply("and", bdd2);  
  
// Este BDD es el OR lógico entre bdd y bdd2  
BDD bdd4 = bdd.apply("or", bdd2);  
  
// Destruye explícitamente bdd2  
bdd2.delete();
```

```
// Se puede liberar memoria de nodos "muertos" llamando  
// a esta función de recolección de basura  
BDD.gc();
```

Experimentos y resultados

Hemos realizado diversos experimentos con los algoritmos de reducción. Hemos tratado de usar datos lo más representativos del mundo real para mostrar el funcionamiento de cada uno de los métodos de reducción.

Los experimentos se han realizado sobre una máquina con un procesador Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU a 3.40GHz. En cuanto al software sobre el que se han realizado las pruebas, el sistema operativo es Ubuntu 12.04 con Java 1.7.0_25 con los siguientes parámetros

AdaptivePermSizeWeight	20
ErgoHeapSizeLimit	0
HeapSizePerGCThread	87241520
InitialHeapSize	196186624
LargePageHeapSizeThreshold	134217728
MaxHeapSize	3139436544
MaxPermSize	174063616
PermSize	21757952

Problemas no satisfacibles

La librería se comporta muy bien, y es capaz de comprobar la satisfacibilidad de un problema concreto. Evidentemente, no buscábamos eso cuando la desarrollábamos, pero es una muestra más de que el trabajo es correcto.

Una fórmula no satisfacible es una contradicción, por lo que al construir el árbol, dado que nos ha de devolver una representación de los caminos posibles según los valores de las variables, ha de darnos el único camino que hay: el vértice *false*. Este vértice indica que independientemente de los valores que se asignen a las variables de esa fórmula, se va a obtener un resultado negativo siempre.

Problemas satisfacibles

Todas las fórmulas que construimos y optimizamos son satisfacibles por los motivos anteriormente comentados.

Hemos tomado las 50 primeras cláusulas lógicas de los distintos archivos DIMACS y hemos trabajado sobre ellas, debido a que no buscábamos un software eficiente a nivel de poder competir con los paquetes que hay en la red, sino proporcionar un entorno con las más avanzadas características de software de ingeniería y que además, nos permitiera estudiar el proceso de construcción y optimización de un árbol BDD.

Datos de prueba

Se han tomado los datos de benchmarks de resolución de cláusulas lógicas de [SATLIBBMK]. En esa web hay una serie de fórmulas lógicas expresadas en el formato DIMACS, que se usan para

comprobar la eficiencia de determinados algoritmos de comprobación de satisfacibilidad.

Debido a la complejidad de los problemas, no se toman enteros, y sólo se consideran las primeras 50 cláusulas lógicas de cada fichero. Estos ficheros provienen de los distintos paquetes que se indican a continuación:

AIM

Fórmulas de 3 cláusulas generadas de forma aleatoria. Consta de los siguientes ficheros:

- aim-50-1_6-yes1-1.cnf
- aim-50-1_6-yes1-4.cnf
- aim-50-2_0-yes1-3.cnf
- aim-100-1_6-yes1-3.cnf
- aim-200-2_0-yes1-1.cnf

AIS

Instancias de un problema aritmético de búsqueda estocástica definido por Holger H. Hoos. Obtenidos de [AIS]. Tenemos 4 ficheros que son los siguientes:

- ais6.cnf
- ais8.cnf
- ais10.cnf
- ais12.cnf

Anomaly

Fórmula que contiene cláusulas lógicas derivadas del problema de la anomalía de Sussman en la planificación de acciones en un mundo de bloques. Consta sólo de un único fichero:

- anomaly.cnf

BW

Más problemas para el mundo de bloques. Distintas planificaciones con diferente estructura y tamaño.

- bw_large.a.cnf
- bw_large.b.cnf
- bw_large.c.cnf
- bw_large.d.cnf
- huge.cnf
- medium.cnf

Dubois

Instancias de fórmulas generadas por Olivier Dubois mediante gensathard.c. A priori no son satisfacibles, pero debido a que tomamos sólo las 50 primeras cláusulas, sí que lo son:

- dubois21.cnf
- dubois22.cnf

Hanoi

El problema de las torres de Hanoi con un número determinados de torres codificado como cláusulas lógicas.

- hanoi4.conf: el problema para 4 torres de Hanoi.
- hanoi5.conf: el problema para 5 torres de Hanoi.

Hole

Problema de situar palomas n palomas en $n+1$ agujeros sin que haya 2 palomas en el mismo agujero.

- hole6.conf

Nemesis

Cláusulas lógicas obtenidas del programa de patrones Nemesis. Para más información, visite [CFA]:

- bf0432-007.cnf

Parity problem

Las instancias en este fichero provienen del problema de aprendizaje de la función de paridad:

- par8-1.cnf

Quinn

Un ejemplo descrito en el libro [Quinn] de Michael Quinn.

- quinn.cnf

Simple

Ejemplo de 6 variables trivial. Usado para comprobar para ejemplos triviales cuánto tarda en procesar cada algoritmo un ejemplo inmediato.

- simple_v3_c2.cnf

Resultados por algoritmo

En esta sección, mostramos los resultados por cada algoritmo. Mostramos los resultados en tablas, indicando no sólo la reducción en número de vértices y el tiempo de ejecución en segundos, sino

también el número de intercambios entre variables realizado.

Nótese que para los algoritmos con componente aleatorio como son los siguientes:

- La variante del algoritmo de Rudell seleccionando las variables de forma aleatoria
- El algoritmo de los intercambios aleatorios
- El algoritmo genético
- El algoritmo memético.
- El algoritmo Iterative Sifting

Se han realizado 3 ejecuciones con las siguientes semillas aleatorias:

Semillas aleatorias
10
327489
121481

En la siguiente página se muestran todos los resultados obtenidos:

Sifting

Orden de variables en número de vértices descendente

Benchmark using Sifting algorithm					
<i>File</i>	<i>Nvars</i>	<i>InitSize</i>	<i>ReducSize</i>	<i>Nswaps</i>	<i>Time (s)</i>
huge.cnf	32	1099	444	1918	0.348655718
anomaly.cnf	17	84	54	539	0.01897443
quinn.cnf	16	18	18	480	0.006503821
ais12.cnf	12	29	25	250	0.006773827
ais8.cnf	16	34	32	485	0.011233742
hanoi4.cnf	44	31519	9152	3568	13.142147291
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	35	2188	0.033976853
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34	1984	0.016376397
par8-1-c.cnf	19	46	37	685	0.006896471
dubois21.cnf	27	40957	97	1385	2.065747985
bw_large.c.cnf	36	311	68	2139	0.04202094
ais10.cnf	20	34	32	757	0.006585643
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39	2665	0.02501033
medium.cnf	20	203	78	707	0.027307104
hole6.cnf	21	144	43	843	0.013646309
dubois20.cnf	27	40957	97	1385	2.008655734
bf0432-007.cnf	30	128	60	1797	0.020302275
simple_v3_c2.cnf	3	6	6	12	0.000095165
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43	3280	0.02571548
bw_large.d.cnf	30	1195	47	1326	0.101601375
bw_large.a.cnf	24	157	47	819	0.011414871
ais6.cnf	24	42	42	1104	0.010572984
bw_large.b.cnf	25	1409	53	1064	0.058078729
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42	3120	0.017882278
dubois22.cnf	27	40957	97	1385	1.984047586

Orden de variables inicial

Benchmark using sifting_sameorder algorithm					
File	Nvars	InitSize	ReducSize	Nswaps	Time (s)
huge.cnf	32	1099	321	1903	0.2792
anomaly.cnf	17	84	47	495	0.0137
quinn.cnf	16	18	18	480	0.0043
ais12.cnf	12	29	25	258	0.0035
ais8.cnf	16	34	32	484	0.0069
hanoi4.cnf	44	31519	6589	3536	16.6437
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	35	2084	0.0260
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34	1984	0.0167
par8-1-c.cnf	19	46	37	683	0.0064
dubois21.cnf	27	40957	101	1025	3.5016
bw_large.c.cnf	36	311	68	2054	0.0334
ais10.cnf	20	34	32	757	0.0065
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39	2665	0.0202
medium.cnf	20	203	78	674	0.0170
hole6.cnf	21	144	46	753	0.0117
dubois20.cnf	27	40957	101	1025	3.4641
bf0432-007.cnf	30	128	62	1780	0.0209
simple_v3_c2.cnf	3	6	6	12	0.0001
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43	3280	0.0253
bw_large.d.cnf	30	1195	46	1441	0.1231
bw_large.a.cnf	24	157	44	763	0.0093
ais6.cnf	24	42	42	1104	0.0105
bw_large.b.cnf	25	1409	40	1026	0.0492
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42	3120	0.1185
dubois22.cnf	27	40957	101	1025	3.3841

Orden de variables aleatorio

Sifting with random variable order (Average)					
File	Nvars	initSize	reducSize	Nswaps	Time
huge.cnf	32	1099	249.00	1847.67	0.2741
anomaly.cnf	17	84	50.33	510.67	0.0135
quinn.cnf	16	18	18.00	480.00	0.0045
ais12.cnf	12	29	25.67	262.33	0.0034
ais8.cnf	16	34	32.00	484.33	0.0071
hanoi4.cnf	44	31519	8096.67	3554.00	13.5872
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	35.00	2123.00	0.0264
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34.00	1984.00	0.0142
par8-1-c.cnf	19	46	37.00	680.33	0.0064
dubois21.cnf	27	40957	206.33	1230.33	1.4411
bw_large.c.cnf	36	311	90.33	2170.00	0.0406
ais10.cnf	20	34	32.00	757.00	0.0063
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39.00	2663.67	0.0214
medium.cnf	20	203	77.33	705.33	0.0187
hole6.cnf	21	144	45.67	808.67	0.0121
dubois20.cnf	27	40957	206.33	1230.33	1.4960
bf0432-007.cnf	30	128	62.00	1818.00	0.0224
simple_v3_c2.cnf	3	6	6.00	12.00	0.0001
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43.00	3280.00	0.0267
bw_large.d.cnf	30	1195	52.67	1143.33	0.0830
bw_large.a.cnf	24	157	49.00	844.67	0.0124
ais6.cnf	24	42	42.00	1104.00	0.0106
bw_large.b.cnf	25	1409	55.33	1053.67	0.0418
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42.00	3120.00	0.0177
dubois22.cnf	27	40957	206.33	1230.33	1.4670

Window permutation

Tamaño de ventana de 2

<i>File</i>	<i>Window Permutation k=2</i>				<i>Time (s)</i>
	<i>Nvars</i>	<i>InitSize</i>	<i>ReducSize</i>	<i>Nswaps</i>	
huge.cnf	32	1099	1079	61	0.0273
anomaly.cnf	17	84	82	31	0.0024
quinn.cnf	16	18	18	28	0.0008
ais12.cnf	12	29	29	20	0.0010
ais8.cnf	16	34	34	28	0.0010
hanoi4.cnf	44	31519	30985	85	0.4897
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	76	41	0.0012
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34	52	0.0009
par8-1-c.cnf	19	46	45	35	0.0006
dubois21.cnf	27	40957	40957	50	0.4618
bw_large.c.cnf	36	311	307	69	0.0031
ais10.cnf	20	34	34	36	0.0005
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	40	56	0.0011
medium.cnf	20	203	197	37	0.0019
hole6.cnf	21	144	140	39	0.0013
dubois20.cnf	27	40957	40957	50	0.5192
bf0432-007.cnf	30	128	124	57	0.0013
simple_v3_c2.cnf	3	6	6	2	0.0000
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43	76	0.0013
bw_large.d.cnf	30	1195	1131	57	0.0117
bw_large.a.cnf	24	157	147	37	0.0015
ais6.cnf	24	42	42	44	0.0007
bw_large.b.cnf	25	1409	1361	47	0.0115
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42	72	0.0010
dubois22.cnf	27	40957	40957	50	0.4618

Tamaño de ventana de 3

<i>File</i>	<i>Window Permutation k=3</i>				<i>Time (s)</i>
	<i>Nvars</i>	<i>InitSize</i>	<i>ReducSize</i>	<i>Nswaps</i>	
huge.cnf	32	1099	1071	176	0.0736
anomaly.cnf	17	84	79	87	0.0053
quinn.cnf	16	18	18	78	0.0019
ais12.cnf	12	29	28	56	0.0018
ais8.cnf	16	34	33	80	0.0024
hanoi4.cnf	44	31519	30467	249	1.3132
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	72	125	0.0027
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34	154	0.0017
par8-1-c.cnf	19	46	45	100	0.0014
dubois21.cnf	27	40957	32765	146	1.5634
bw_large.c.cnf	36	311	303	200	0.0083
ais10.cnf	20	34	33	104	0.0012
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39	172	0.0024
medium.cnf	20	203	191	105	0.0049
hole6.cnf	21	144	136	110	0.0030
dubois20.cnf	27	40957	32765	146	1.4369
bf0432-007.cnf	30	128	120	164	0.0034
simple_v3_c2.cnf	3	6	6	0	0.0017
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43	224	0.0029
bw_large.d.cnf	30	1195	1095	164	0.0316
bw_large.a.cnf	24	157	139	109	0.0041
ais6.cnf	24	42	42	126	0.0017
bw_large.b.cnf	25	1409	1313	134	0.0318
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42	214	0.0022
dubois22.cnf	27	40957	32765	146	1.4540

Tamaño de ventana de 4

<i>File</i>	<i>Window Permutation k=4</i>				<i>Time (s)</i>
	<i>Nvars</i>	<i>InitSize</i>	<i>ReducSize</i>	<i>Nswaps</i>	
huge.cnf	32	1099	1027	341	0.1169
anomaly.cnf	17	84	78	162	0.0063
quinn.cnf	16	18	18	144	0.0021
ais12.cnf	12	29	27	99	0.0017
ais8.cnf	16	34	33	146	0.0025
hanoi4.cnf	44	31519	29535	485	2.7877
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	68	252	0.0055
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34	302	0.0037
par8-1-c.cnf	19	46	45	181	0.0045
dubois21.cnf	27	40957	26621	281	2.7812
bw_large.c.cnf	36	311	299	392	0.0177
ais10.cnf	20	34	32	195	0.0027
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39	339	0.0045
medium.cnf	20	203	188	198	0.0098
hole6.cnf	21	144	134	210	0.0059
dubois20.cnf	27	40957	26621	281	2.7080
bf0432-007.cnf	30	128	116	317	0.0064
simple_v3_c2.cnf	3	6	6	0	0.0017
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43	438	0.0017
bw_large.d.cnf	30	1195	1059	315	0.0650
bw_large.a.cnf	24	157	123	213	0.0072
ais6.cnf	24	42	42	240	0.0033
bw_large.b.cnf	25	1409	1249	255	0.0651
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42	420	0.0045
dubois22.cnf	27	40957	26621	281	2.5959

Tamaño de ventana de 5

<i>File</i>	<i>Window Permutation k=5</i>				<i>Time (s)</i>
	<i>Nvars</i>	<i>InitSize</i>	<i>ReducSize</i>	<i>Nswaps</i>	
huge.cnf	32	1099	1025	552	0.1762
anomaly.cnf	17	84	77	250	0.0094
quinn.cnf	16	18	18	220	0.0028
ais12.cnf	12	29	26	144	0.0025
ais8.cnf	16	34	34	220	0.0040
hanoi4.cnf	44	31519	28527	787	5.1653
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	62	411	0.0095
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34	492	0.0062
par8-1-c.cnf	19	46	45	281	0.0047
dubois21.cnf	27	40957	19453	447	3.9210
bw_large.c.cnf	36	311	291	631	0.0276
ais10.cnf	20	34	32	303	0.0037
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39	549	0.0072
medium.cnf	20	203	184	312	0.0151
hole6.cnf	21	144	132	324	0.0095
dubois20.cnf	27	40957	19453	447	4.2917
bf0432-007.cnf	30	128	110	508	0.0112
simple_v3_c2.cnf	3	6	6	0	0.0018
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43	712	0.0096
bw_large.d.cnf	30	1195	1021	511	0.1055
bw_large.a.cnf	24	157	115	350	0.0113
ais6.cnf	24	42	42	380	0.0052
bw_large.b.cnf	25	1409	1169	407	0.0995
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42	684	0.0063
dubois22.cnf	27	40957	19453	447	4.5412

Intercambios aleatorios

A continuación se presenta la media de las 3 ejecuciones de 100 iteraciones en las que se intercambian variables de orden de forma aleatoria:

<i>File</i>	<i>Random Swapper (Average)</i>				<i>Time (s)</i>
	<i>Nvars</i>	<i>initSize</i>	<i>reducSize</i>	<i>Nswaps</i>	
huge.cnf	32	1099	1063.0000	122.0000	0.0677
anomaly.cnf	17	84	80.0000	115.0000	0.0087
quinn.cnf	16	18	18.0000	120.6667	0.0031
ais12.cnf	12	29	26.3333	103.6667	0.0040
ais8.cnf	16	34	37.3333	122.6667	0.0042
hanoi4.cnf	44	31519	31154.3333	136.0000	0.8195
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	72.6667	54.6667	0.0013
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34.0000	94.6667	0.0011
par8-1-c.cnf	19	46	44.0000	127.3333	0.0018
dubois21.cnf	27	40957	33782.3333	125.0000	1.0095
bw_large.c.cnf	36	311	301.3333	118.0000	0.0048
ais10.cnf	20	34	34.0000	121.3333	0.0015
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	40.0000	93.0000	0.0011
medium.cnf	20	203	166.3333	108.6667	0.0049
hole6.cnf	21	144	126.0000	109.0000	0.0066
dubois20.cnf	27	40957	33782.3333	125.0000	1.1334
bf0432-007.cnf	30	128	113.3333	121.0000	0.0026
simple_v3_c2.cnf	3	6	6.0000	69.3333	0.0008
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43.0000	127.3333	0.0015
bw_large.d.cnf	30	1195	1055.6667	115.3333	0.0266
bw_large.a.cnf	24	157	132.6667	95.3333	0.0031
ais6.cnf	24	42	43.6667	126.0000	0.0018
bw_large.b.cnf	25	1409	945.6667	101.0000	0.0202
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42.0000	120.3333	0.0011
dubois22.cnf	27	40957	33782.3333	125.0000	1.0458

Algoritmo genético

Media de tres ejecuciones de 100 iteraciones, con una población de 8 cromosomas, un porcentaje de selección del 20% y una probabilidad de mutación de 0,1:

File	Genetic Algorithm (Avg.)				
	Nvars	InitSize	ReducSize	Nswaps	Time (s)
huge.cnf	32	1099	992.6667	17995.6667	63.2529
anomaly.cnf	17	84	69.3333	4742.0000	0.2597
quinn.cnf	16	18	18.0000	4261.3333	0.0563
ais12.cnf	12	29	28.0000	2178.0000	0.0303
ais8.cnf	16	34	34.0000	0.0000	0.0028
hanoi4.cnf	44	31519	31519.0000		
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	64.3333	19214.6667	4.6202
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34.0000	18057.6667	1.6187
par8-1-c.cnf	19	46	48.0000	5895.3333	0.3116
dubois21.cnf	27	40957	0.0000		
bw_large.c.cnf	36	311	158.6667	21268.3333	5.3910
ais10.cnf	20	34	42.6667	6274.3333	0.2002
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	44.0000	24574.6667	7.5901
medium.cnf	20	203	203.0000		
hole6.cnf	21	144	104.3333	7286.3333	0.6729
dubois20.cnf	27	40957	3430.3333	12615.0000	816.7689
bf0432-007.cnf	30	128	136.0000	15395.3333	6.1474
simple_v3_c2.cnf	3	6	6.0000	12.0000	0.0016
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	51.6667	29954.3333	9.6658
bw_large.d.cnf	30	1195	1195.0000		
bw_large.a.cnf	24	157	99.0000	8012.6667	0.4309
ais6.cnf	24	42	267.0000	212.3333	0.2196
bw_large.b.cnf	25	1409	166.0000	10123.0000	3.2632
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42.0000	28146.6667	9.2357
dubois22.cnf	27	40957	4742.3333	259.6667	54.4555

En primer lugar, hemos de notar que varios ficheros de datos no han podido ser completados. Esto se debe a que como en distintas operaciones del algoritmo genético obtenemos órdenes muy diversos, puede que el árbol asociado sea tan grande que no nos quepa en memoria principal. Esto ha ocurrido para los ficheros hanoi4.cnf, dubois21.cnf, medium.cnf y bw_large.d.cnf.

Algoritmo memético

Media de tres ejecuciones de 100 iteraciones, con una población de 8 cromosomas, un porcentaje de selección del 20% y una probabilidad de mutación de 0.1. Se usa como proceso heurístico de mejora el algoritmo de la ventana con un tamaño de ventana de 2:

<i>File</i>	<i>Memetic Algorithm (Avg.)</i>				
	<i>Nvars</i>	<i>InitSize</i>	<i>ReducSize</i>	<i>Nswaps</i>	<i>Time (s)</i>
huge.cnf	32	1099	757.0000	112283.3333	276.1718
anomaly.cnf	17	84	61.3333	33648.3333	1.3325
quinn.cnf	16	18	18.0000	29234.6667	0.2803
ais12.cnf	12	29	28.0000	16741.3333	0.2079
ais8.cnf	16	34	59.6667	28704.3333	1.0300
hanoi4.cnf	44	31519	31519.0000		
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	38.6667	111872.0000	33.8721
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34.0000	105977.3333	14.8620
par8-1-c.cnf	19	46	74.0000	38997.6667	1.5922
dubois21.cnf	27	40957	40957.0000		
bw_large.c.cnf	36	311	129.0000	129624.6667	59.9599
ais10.cnf	20	34	56.0000	44982.3333	1.4271
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39.3333	145431.3333	32.1413
medium.cnf	20	203	106.0000	44993.0000	4.5000
hole6.cnf	21	144	68.3333	51422.0000	4.1111
dubois20.cnf	27	40957	40957.0000		
bf0432-007.cnf	30	128	130.0000	98916.6667	35.3551
simple_v3_c2.cnf	3	6	6.0000	735.3333	0.0077
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43.0000	178548.3333	177.3446
bw_large.d.cnf	30	1195	98.6667	76224.6667	23.0383
bw_large.a.cnf	24	157	64.3333	52523.0000	1.9791
ais6.cnf	24	42	123.3333	62878.6667	17.8881
bw_large.b.cnf	25	1409	143.3333	68164.6667	15.4237
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42.0000	171610.3333	76.3048
dubois22.cnf	27	40957	40957.0000		

Al igual que ocurre en el algoritmo genético, en estos resultados vemos como los ficheros de datos hanoi4.cnf, y los de la familia dubois no dan solución. Esto se debe a las restricciones de memoria a las que hemos sometido el algoritmo.

Algoritmo Iterative Sifting

El algoritmo desarrollado por nosotros basado en el de Ruddell, se comporta de forma extraordinaria, mejorando los resultados obtenidos por éste.

En primer lugar, probamos sin reiniciar el orden de variables en ninguna iteración (establecemos que la probabilidad de reinicio del orden es 0) y con un número mediano de iteraciones, 100,

Benchmark using ISifting algorithm (iterations = 100, reinit_probability=0)					
File	Nvars	InitSize	ReducSize	Nswaps	Time (s)
huge.cnf	32	1099	191	198291	11.4219
anomaly.cnf	17	84	46	54372	0.8038
quinn.cnf	16	18	18	48000	0.2813
ais12.cnf	12	29	25	26386	0.2408
ais8.cnf	16	34	32	48005	0.5256
hanoi4.cnf	44	31519	558	377984	209.0338
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	35	211276	1.7601
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34	198400	1.3483
par8-1-c.cnf	19	46	37	68401	0.6646
dubois21.cnf	27	40957	55	140109	37.1594
bw_large.c.cnf	36	311	68	222711	2.6769
ais10.cnf	20	34	32	75997	0.6654
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39	266401	1.9929
medium.cnf	20	203	66	75942	1.5941
hole6.cnf	21	144	34	84012	0.6891
dubois20.cnf	27	40957	55	140109	36.9667
bf0432-007.cnf	30	128	60	173661	1.8079
simple_v3_c2.cnf	3	6	6	1200	0.0084
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43	328000	2.6955
bw_large.d.cnf	30	1195	47	126066	5.5062
bw_large.a.cnf	24	157	44	83970	1.0009
ais6.cnf	24	42	42	110400	1.1748
bw_large.b.cnf	25	1409	52	117483	1.9136
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42	312000	1.9798
dubois22.cnf	27	40957	55	140109	37.6470

Después, probamos con una probabilidad de reinicio de 0.1 y el mismo número de iteraciones. Tal y como hemos hecho en los casos anteriores, ejecutamos 3 veces el algoritmo y cada una con las semillas aleatorias anteriormente indicadas y obtenemos la siguiente media:

<i>File</i>	<i>ISifting Algorithm (Avg.)</i>				
	<i>Nvars</i>	<i>InitSize</i>	<i>ReducSize</i>	<i>Nswaps</i>	<i>Time (s)</i>
huge.cnf	32	1099	191.00	198287.67	11.2601
anomaly.cnf	17	84	46.00	54372.00	0.7715
quinn.cnf	16	18	18.00	48000.00	0.2617
ais12.cnf	12	29	25.00	26386.00	0.2298
ais8.cnf	16	34	32.00	48005.00	0.4773
hanoi4.cnf	44	31519	558.00	377978.33	210.2973
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	35.00	211276.00	1.7052
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34.00	198400.00	1.3129
par8-1-c.cnf	19	46	37.00	68401.00	0.6382
dubois21.cnf	27	40957	55.00	140109.00	37.7994
bw_large.c.cnf	36	311	68.00	222711.00	2.5680
ais10.cnf	20	34	32.00	75997.00	0.6288
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39.00	266401.00	1.9317
medium.cnf	20	203	66.00	75942.00	1.5209
hole6.cnf	21	144	34.00	84012.00	0.6619
dubois20.cnf	27	40957	55.00	140109.00	37.6329
bf0432-007.cnf	30	128	60.00	173661.00	1.6582
simple_v3_c2.cnf	3	6	6.00	1200.00	0.0080
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43.00	328000.00	2.6340
bw_large.d.cnf	30	1195	47.00	126066.00	5.5387
bw_large.a.cnf	24	157	44.00	83970.00	0.9527
ais6.cnf	24	42	42.00	110400.00	1.0911
bw_large.b.cnf	25	1409	52.00	117483.00	1.8446
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42.00	312000.00	1.9224
dubois22.cnf	27	40957	55.00	140109.00	37.4371

Discusión de los resultados

Si comparamos todos los algoritmos para cada fichero, obtenemos las siguientes reducciones⁴:

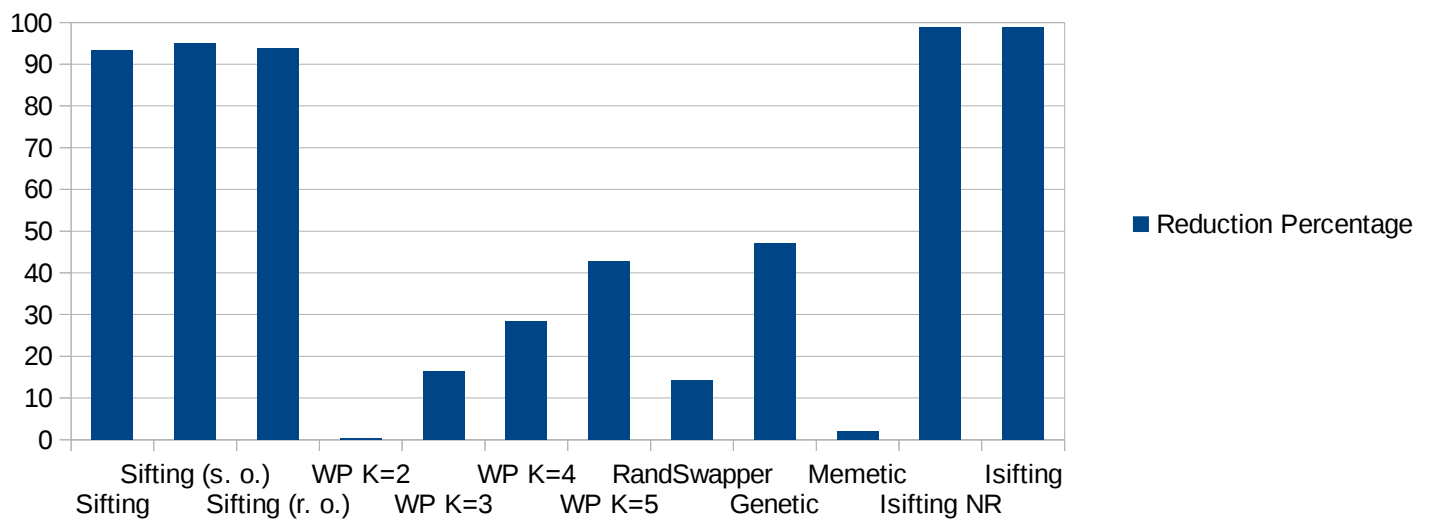
File	Nvars	InitSize	Sifting	Sifting (s. o.)	Sifting (r. o.)	Size obtained in each reduction process				RandSwapper	Genetic	Memetic	Isifting NR	Isifting
						WP K=2	WP K=3	WP K=4	WP K=5					
huge.cnf	32	1099	444	321	249.0000	1079	1071	1027	1025	1063.0000	992.6667	757.0000	191.0000	191.0000
anomaly.cnf	17	84	54	47	50.3333	82	79	78	77	80.0000	69.3333	61.3333	46.0000	46.0000
quinn.cnf	16	18	18	18	18.0000	18	18	18	18	18.0000	18.0000	18.0000	18.0000	18.0000
ais12.cnf	12	29	25	25	25.6667	29	28	27	26	26.3333	28.0000	28.0000	25.0000	25.0000
ais8.cnf	16	34	32	32	32.0000	34	33	33	34	37.3333	34.0000	59.6667	32.0000	32.0000
hanoi4.cnf	44	31519	9152	6589	8096.6667	30985	30467	29535	28527	31154.3333	31519.0000	31519.0000	558.0000	558.0000
aim-200-2_0-yes1-1.cnf	46	80	35	35	35.0000	76	72	68	62	72.6667	64.3333	38.6667	35.0000	35.0000
aim-50-2_0-yes1-3.cnf	38	34	34	34	34.0000	34	34	34	34	34.0000	34.0000	34.0000	34.0000	34.0000
par8-1-c.cnf	19	46	37	37	37.0000	45	45	45	45	44.0000	48.0000	74.0000	37.0000	37.0000
dubois21.cnf	27	40957	97	101	206.3333	40957	32765	26621	19453	33782.3333	40957.0000	40957.0000	55.0000	55.0000
bw_large.c.cnf	36	311	68	68	90.3333	307	303	299	291	301.3333	158.6667	129.0000	68.0000	68.0000
ais10.cnf	20	34	32	32	32.0000	34	33	32	32	34.0000	42.6667	56.0000	32.0000	32.0000
aim-100-1_6-yes1-3.cnf	47	40	39	39	39.0000	40	39	39	39	40.0000	44.0000	39.3333	39.0000	39.0000
medium.cnf	20	203	78	78	77.3333	197	191	188	184	166.3333	203.0000	106.0000	66.0000	66.0000
hole6.cnf	21	144	43	46	45.6667	140	136	134	132	126.0000	104.3333	68.3333	34.0000	34.0000
dubois20.cnf	27	40957	97	101	206.3333	40957	32765	26621	19453	33782.3333	3430.3333	40957.0000	55.0000	55.0000
bf0432-007.cnf	30	128	60	62	62.0000	124	120	116	110	113.3333	136.0000	130.0000	60.0000	60.0000
simple_v3_c2.cnf	3	6	6	6	6.0000	6	6	6	6	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000	6.0000
aim-50-1_6-yes1-1.cnf	43	43	43	43	43.0000	43	43	43	43	43.0000	51.6667	43.0000	43.0000	43.0000
bw_large.d.cnf	30	1195	47	46	52.6667	1131	1095	1059	1021	1055.6667	1195.0000	98.6667	47.0000	47.0000
bw_large.a.cnf	24	157	47	44	49.0000	147	139	123	115	132.6667	99.0000	64.3333	44.0000	44.0000
ais6.cnf	24	42	42	42	42.0000	42	42	42	42	43.6667	267.0000	123.3333	42.0000	42.0000
bw_large.b.cnf	25	1409	53	40	55.3333	1361	1313	1249	1169	945.6667	166.0000	143.3333	52.0000	52.0000
aim-50-1_6-yes1-4.cnf	42	42	42	42	42.0000	42	42	42	42	42.0000	42.0000	42.0000	42.0000	42.0000
dubois22.cnf	27	40957	97	101	206.3333	40957	32765	26621	19453	33782.3333	4742.3333	40957.0000	55.0000	55.0000
Avg	27.44	6382.72	428.88	321.16	393.32	6354.68	5345.76	4564.00	3657.32	5477.05	3378.09	6260.40	68.64	68.64

La media nos puede servir para ver cuáles son los algoritmos que mejor se comportan en todos los casos de forma global. Viendo la tendencia de ciertos algoritmos a no reducir mucho el árbol independientemente del conjunto de datos tomado.

A continuación, incluimos un gráfico en el que se puede ver el porcentaje de reducción del árbol obtenido por cada uno de los algoritmos.

⁴ (s.o.) indica que es el algoritmo de *Sifting* con las variables en el orden dado por el fichero y (r. o.) indica que es el algoritmo *Sifting* en el que se toman las variables de forma aleatoria. WP K=X es el algoritmo de la permutación en ventana con un tamaño de ventana igual a X. *RandSwapper* es el algoritmo de intercambio de variables de forma aleatoria.

Reduction percentage achieved for each algorithm



Cada barra del gráfico es cada uno de los algoritmos desarrollados para esta memoria, incluyendo el algoritmo Iterative Sifting original por nuestra parte.

El algoritmo de Rudell se comporta muy bien, logrando porcentajes de reducción superiores al 90%. Es importante notar que no hay gran diferencia entre tomar un orden inicial de variables determinado u otro. Básicamente, las tres versiones del algoritmo superan ampliamente los porcentajes de reducción del 90%. Esto es consecuente con lo indicado por el autor en [Rud93].

Siguiendo con el gráfico, los algoritmos de permutación en ventana se comportan medianamente bien a partir de valores elevados del tamaño de ventana, pero tal y como indica Rudell en su trabajo [Rud93], son superados ampliamente por su algoritmo.

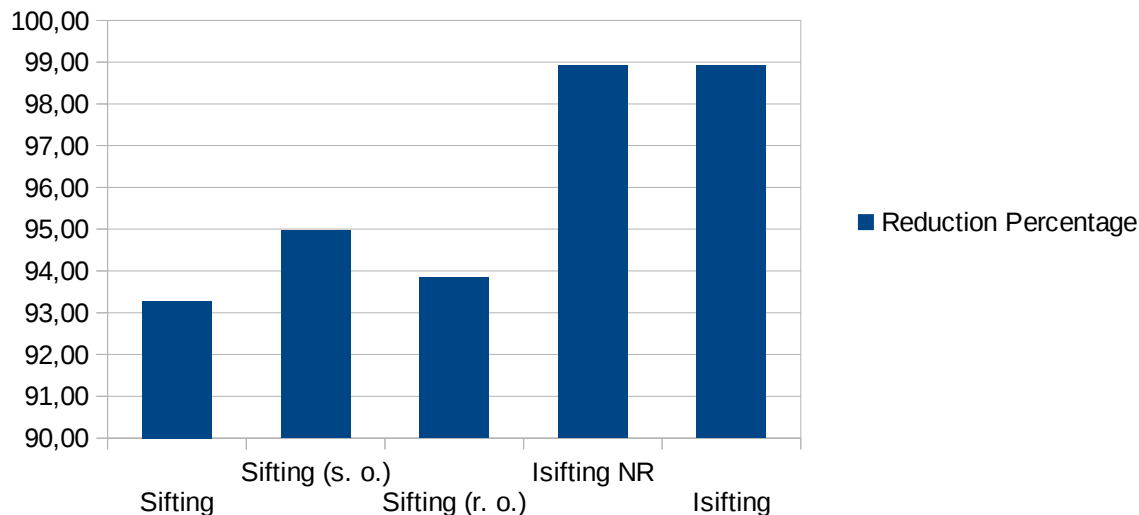
Por otro lado, en el campo de los algoritmos evolutivos, nos llevamos una decepción debido a los pobres resultados obtenidos. Esto se debe a, sobre todo, a sus limitaciones en cuanto a espacio, es decir, si se generan durante el proceso evolutivo cromosomas que representa a órdenes muy malos, al intentar evaluar el tamaño, nos quedaremos sin memoria. Si hubiéramos podido tener algún tipo de heurística sobre los órdenes que nos indicase que un orden es mejor que otro sin generar el árbol, podríamos haber obtenido mejores resultados. En nuestros experimentos nos hemos visto muy limitados por este detalle y no hemos podido ejecutar más que unas pocas iteraciones estos algoritmos, y aun así, algunos ficheros han hecho fracasar este método al producirse un desbordamiento de memoria principal.

Además, para estos algoritmos el hecho de tener que construir el árbol cada vez que quisiéramos evaluar un orden ha hecho que fueran mucho más lentos, que los puramente heurísticos. Intentamos solventar este hecho usando una caché de evaluaciones, de forma que nunca un orden se calculase dos veces, pero para fórmulas con valores altos de fórmulas, esto era insuficiente.

Por último, destaca nuestra propuesta de solución, el algoritmo Iterative Sifting que, da una mejora sobre el algoritmo de Rudell considerable. Esto se debe a que el proceso en cada iteración vuelve a rehacer el orden, por lo que no es un algoritmo voraz simplemente, ya que puede volver a tomar varias veces la misma variable en distintas iteraciones.

Si comparamos nuestra propuesta con el algoritmo de Rudell:

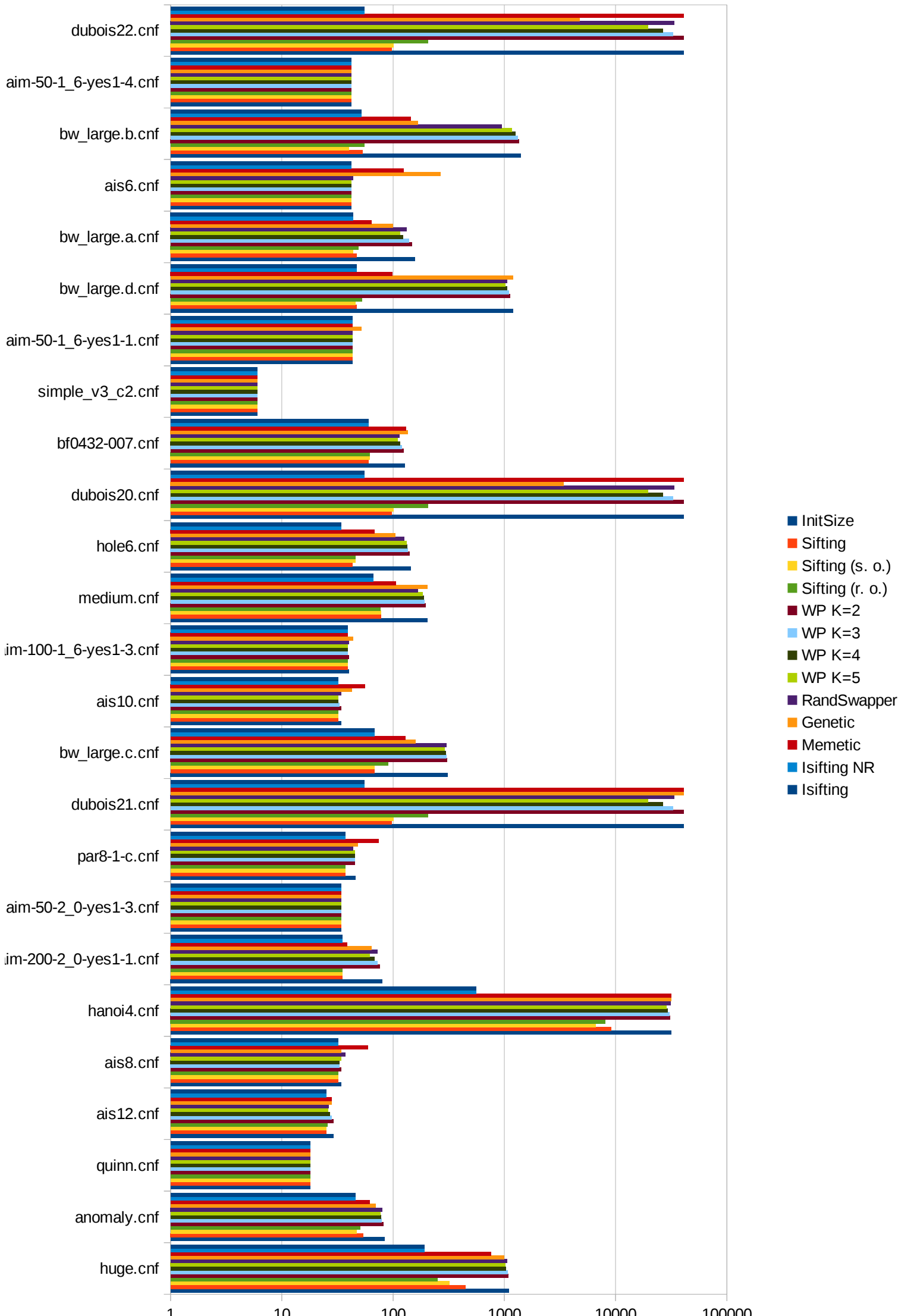
Reduction percentage or Rudell's based algorithms



Vemos cómo nuestro algoritmo se queda a las puertas del 99% de reducción en media, logrando una mejora de casi un 5%. Es llamativo observar cómo el algoritmo Iterated Sifting no varía si se usa una probabilidad de reinicio de la lista de variables o no, por lo que aunque pensábamos que esto evitaría que el método se quedase en un mínimo local, no ha sido necesario.

En definitiva, el algoritmo Iterated Sifting soluciona los problemas tanto del algoritmo Sifting como los de los genéticos. En primer lugar, permite mover varias veces la misma variable por el árbol, por lo que evita un mínimo local y la consolidación de malas soluciones. Y en segundo lugar, carece del gran problema del desbordamiento de la memoria principal que era un problema que plagaba cualquier que explore el espacio de búsqueda sin un control, como son los algoritmos evolutivos clásicos implementados para este problema de optimización de tamaños del árbol BDD.

Por último, mostramos todos los resultados de reducciones de tamaños de árboles en la siguiente página:



Arquitectura de la solución software

En esta sección se muestra la arquitectura de la solución software que permite controlar si un software externo está en un estado consistente o no.

Objetivo

Recordemos que el objetivo de este sistema es el de permitir comprobar de forma sencilla y eficiente si un estado de un sistema es consistente. Es decir, si el estado en el que se encuentra ahora mismo el sistema es legal dentro de los sistemas definidos por el ingeniero, cada uno con sus estados bien diferenciados.

Entidades

Las entidades que tiene este sistema son las siguientes:

BDD

Árbol binario de decisión que contendrá la expresión lógica que recoja los estados posibles del sistema. Además de sólo almacenar la fórmula lógica, optimizará la evaluación de la expresión, usando el mejor método de reducción, desarrollado de forma original aquí y mostrado anteriormente en esta misma memoria.

Asserter

Es la clase que contiene la lógica de comprobación de la consistencia. Por eso, contiene las definiciones de las variables lógicas que describen al sistema.

Obviamente, esta clase es la encargada de gestionar el árbol binario de decisión y realizar las llamadas al objeto que pueda obtener una instantánea con los valores de verdad del sistema.

Sistema

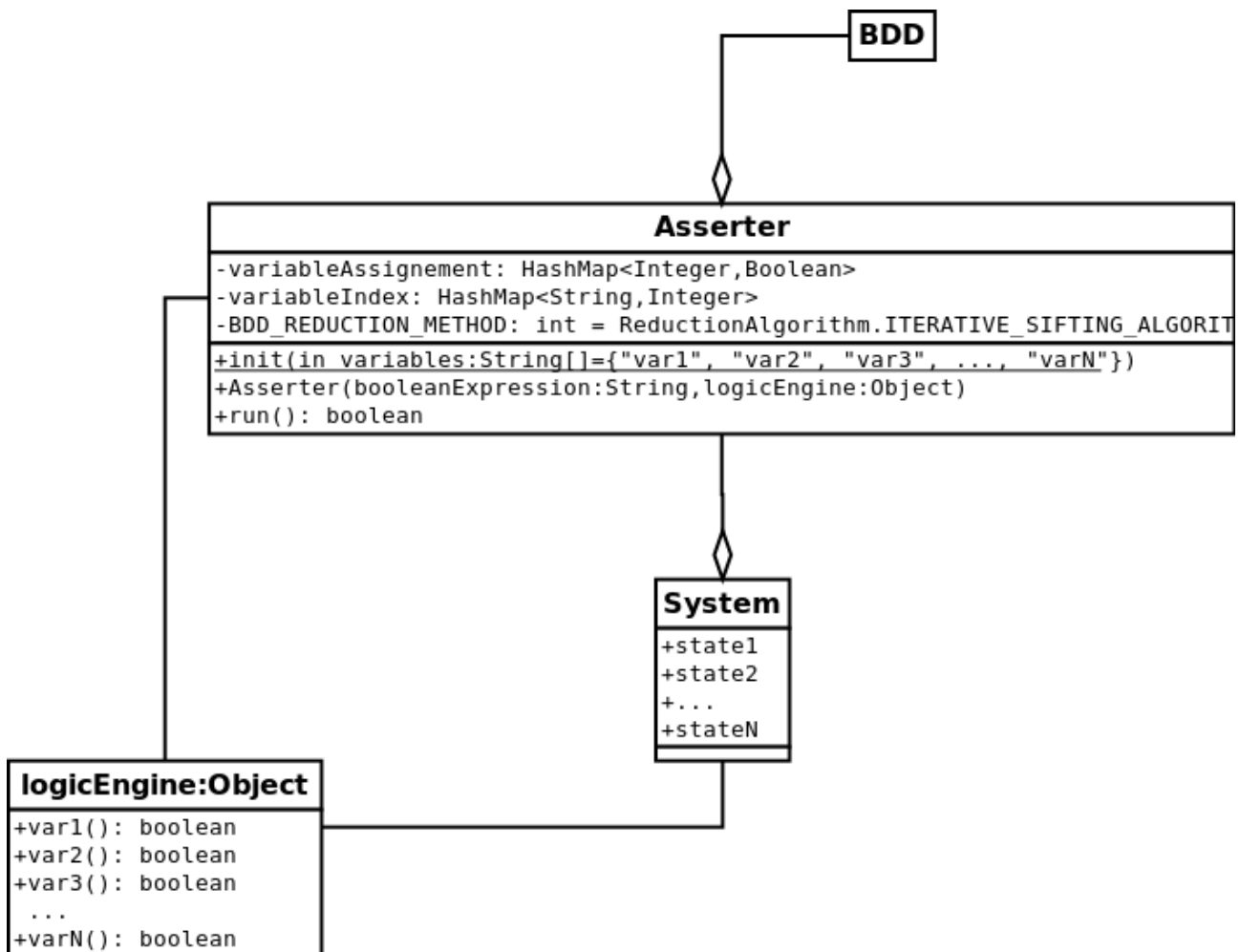
El sistema cuya consistencia vamos a comprobar. Aquí lo mostraremos implementado como una clase, pero obviamente se tratará de una fachada, ya que el sistema puede ser tan complejo como se necesite.

Motor lógico

Puede ser el mismo sistema, pero según la complejidad de éste, nos interesará tener un observador que sea capaz de obtener la información de en qué estado se encuentra el sistema. La forma de comunicarla al Asserter es implementando métodos públicos que devuelvan valores booleanos cuyo nombre sea igual a las variables definidas

Relaciones

En el siguiente gráfico se puede ver un diagrama somero de clases en las que se muestran las relaciones entre las distintas clases.



Se puede ver como la clase Asserter es el núcleo de nuestro sistema, conteniendo el árbol binario de decisión y teniendo acceso al consultor de estados del sistema.

Por otro lado, el sistema se muestra como una máquina de estados, a la que puede acceder el motor lógico. El consultor lógico deberá convertir los estados del sistema a proposiciones lógicas que pueda comprender el comprobador de consistencia.

Funcionamiento

Inicialmente se ha de construir el comprobador de consistencia a partir de una expresión lógica y del objeto que tenga como responsabilidad ofrecer los valores de verdad de cada una de las variables que aparezcan en dicha expresión.

El motor deberá tener cada variable implementada como un método público. Suponemos que este motor lógico deberá acceder a estados internos del sistema, realizar comprobaciones y lo más importante, traducir de forma fidedigna los estados de la máquina de estados que es el sistema en variables lógicas.

Por último, se deberá introducir la llamada al método run protegiendo las zonas de código que deban cumplir las restricciones propias determinadas por el sistema. Este método llamará a la

operación `restrict` del BDD con la asignación de valores de verdad obtenida en el instante de la llamada. Una vez que se haya restringido con la asignación realizada, sólo quedará ver si el árbol resultante es el vértice `TRUE` o el vértice `FALSE`. Si es el primero, eso indicará que la asignación de valores de verdad es consistente, por lo que el estado es correcto y se podrá seguir con la ejecución normal en el sistema. En cambio, si el BDD se convierte en el vértice constante `FALSE`, tendremos que recuperar el sistema a un estado consistente para poder proseguir la ejecución del mismo.

Ejemplos

En la librería DJBDD se han incluido varios ejemplos. Hay un ejemplo de un ascensor y otro de un vehículo. El primero es muy sencillo y sirve como estudio y aprendizaje, en cambio, en el segundo se puede comprobar la gran funcionalidad de este sistema.

Problemas abiertos

En primer lugar, está el problema de la naturaleza misma de los árboles binarios de decisión. Algunos autores han definido otro tipo de árboles de decisión como los KDD, FDD, ZDD, etc.

Centrándonos en los árboles binarios de decisión, hay varios problemas que se están estudiando en la actualidad que comentamos a continuación.

Para comenzar, la paralelización del algoritmo *Apply*. Como hemos visto anteriormente, este algoritmo permite la construcción de un árbol a partir de una operación lógica y otros dos. Algunos trabajos como [Kimura &Clarck90] y [Dijk2012] han implementado esta operación de forma paralela, reduciendo su orden de eficiencia y permitiendo la construcción de árboles en menor tiempo.

Seguimos con el problema del tamaño. Cuando comenzamos a trabajar con los ficheros DIMACS, intentamos cargar algunos de las fórmulas que usaban en las competiciones de cálculo de la satisfacibilidad. Esto se tornó imposible debido al gran tamaño en variables de estos, y sobre todo, de su complejidad computacional que generaban. No se puede depender del orden de las variables tanto que si se escoge un orden que no es el óptimo, la estructura no quepa en memoria principal. Ante este problema, tenemos dos soluciones, minimizar el tamaño del árbol, o uno mucho más interesante, tratar de estimar el tamaño a partir del orden, o lo que es igual, tener algún tipo de heurística que nos indique si un orden determinado generará un BDD inabarcable en nuestra memoria.

Por último, pensamos que no se han aplicado estas estructuras complejas en muchos sistemas más allá del hardware debido al desconocimiento de muchos ingenieros y científicos en diversos campos de lo que pueden realizar. Por ejemplo, estos árboles pueden almacenar restricciones de tipo genético y modelar problemas de biología desde el punto de vista computacional.

Bibliografía

- [ABDDOpt] Advanced BDD Optimization. Rüdiger Ebendt, Görschwin Fey, Rolf Drechsler.
- [ALGOVLSI] Algorithms and Data Structures in VLSI Design. C. Meinel & T. Theobald.
- [Andersen1999] An Introduction to Binary Decision Diagrams. H. R. Andersen. Lecture notes for Efficient Algorithms and Programs. IT Universidad de Copenhagen. 1999.
- [antlr3] Versión 3 del analizador de lenguajes. <http://www.antlr3.org/>
- [Antlr3Book] The definitive ANTLR reference. Terence Parr.
- [AIS] All Interval Series <http://www.cs.ubc.ca/~hoos/SATLIB/Benchmarks/SAT/AIS/descr.html>
- [BDDT&I] Binary Decision Diagrams: Theory and Implementation. Rolf Drechsler.
- [BP&BDD] Branching Programs and Binary Decision Diagrams: Theory and Applications. Ingo Wegener.
- [Bryant1986] Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation, Randal E. Bryant, 1986
- [Bryant1992] Symbolic Boolean Manipulation with Ordered Binary Decision Diagrams, Randal E. Bryant. Acm Computing Surveys. 1992.
- [CFA] Instances for Circuit Fault Analysis.
<http://www.cs.ubc.ca/~hoos/SATLIB/Benchmarks/SAT/DIMACS/BF/descr.html>
- [Dijk2012] The Parallelization of Binary Decision Diagram operations for model checking. Tom van Dijk. Tesis. 2012.
- [DIMACS] DIMACS CNF formula format. <http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/data/cnf/cnf.html>
- [ImpBDD] Efficient implementation of a BDD package, Karl S. Brace, Richard L. Rudell, Randal E. Bryant.
- [ImpBDDStornetta] Implementation of an Efficient Parallel BDD Package. Tony Stornetta, Forrest Brewer.
- [Fujita91] Fujita, M., Matsunaga, Y., Kakuda, T., On Variable Orderings of Binary Decision Diagrams for the Application of Multi-Level Logic Synthesis, Proceedings of the European Conference on Design Automation, 1991 .
- [GraphViz] Graphviz, Graph Visualization Software. <http://www.graphviz.org/>
- [GraphVizJava] Paquete de software de uso de GraphViz desde Java, por Laszlo Szathmary. <http://www.loria.fr/~szathmar/off/projects/java/GraphVizAPI/index.php>
- [DOT] Formato del lenguaje DOT. <http://www.graphviz.org/doc/info/lang.html>
- [Hassoun&Sasao] Logic Synthesis and Verification. Soha Hassoun, Tsutomu Sasao.
- [Ishiura91] N. Ishiura, H. Sawada, S. Yajima. Minimization of Binary Decision Diagrams Based on Exchanges of Variables. En Proceedings International Conference on Computer-Aided Design. 1991.
- [JacobiEtAl] Incremental Reduction of Binary Decision Diagrams. R. Jacobi, N. Calazans, C. Trullemans.
- [Javaluator] Librería de evaluación Java. <http://javaluator.sourceforge.net/en/home/>

- [Java7API] Documentación de la API de Java 7. <http://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/>
- [JavaWeakReferences] Documentación de la API de Java 7 sobre referencias débiles (clase WeakReference). <http://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/java/lang/ref/WeakReference.html>
- [Kimura &Clarck90] A parallel algorithm for constructing binary decision diagrams . S Kimura , E. M. Clarke .
- [Lenders&Baier04] Genetic Algorithms for the Variable Ordering Problem of Binary Decision Diagrams . Wolfgang Lenders, Christel Baier .
- [LICS] Logic in Computer Science. M. Huth, M. Ryan. Cambridge University Press.
- [OpenJDK7] Plataforma de referencia de desarrollo Java de código abierto. <http://openjdk.java.net/>
- [Quinn2004] Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. McGraw-Hill, 2004. Michael Quinn.
- [Rud93] *Dynamic variable* ordering for ordered binary decision diagrams. Richard L. Rudell 1993.
- [Rud93W] BDDs: Implementation Issues & Variable Ordering. Richard Rudell 1993.
- [Sasao96] Representations of Discrete Functions. Tsutomu Sasao.
- [SATLIBBMK] SATLIB Benchmark problems. <http://www.cs.ubc.ca/~hoos/SATLIB/benchm.html>
- [Somenzi] Binary Decision Diagrams. Fabio Somenzi. Department of Electrical and Computer Engineering. University of Colorado at Boulder.
- [UnderstandingWeakReferences] Understanding Weak References, por Ethan Nicholas. https://weblogs.java.net/blog/enicholas/archive/2006/05/understanding_w.html