

Revisión del concepto de posible conflicto como técnica de pre-compilación

Belarmino Pulido Junquera
Departamento de Informática
Universidad de Valladolid
Campus Miguel Delibes
belar@infor.uva.es

Carlos J. Alonso González
Departamento de Informática
Universidad de Valladolid
Campus Miguel Delibes
calonso@infor.uva.es

Resumen

El registro de dependencias en línea, mediante algún mecanismo de registro de dependencias, es una de las técnicas más utilizadas para calcular conflictos en el Diagnóstico basado en Consistencia. No obstante, dados los problemas de eficiencia que conlleva, se han propuesto distintas alternativas en los últimos años. Entre ellas, se puede considerar que los métodos topológicos forman una de las opciones más asentadas. Dentro de esta vertiente, cabe destacar los trabajos relacionados con la compilación fuera de línea, o pre-compilación. Este trabajo repasa los sistemas que usan algún tipo de pre-compilación, tanto desde el campo de la Inteligencia Artificial como de la Ingeniería de Control. A continuación, revisa y extiende una de estas técnicas, la basada en el concepto de posible conflicto. Finalmente, compara este método con otras técnicas de pre-compilación, discutiendo sus diferencias y ventajas.

1. Introducción

El diagnóstico basado en consistencia (DBC) [Reiter, 1987] es un área de investigación dentro del diagnóstico basado en modelos (DBM) que ha proporcionado en los últimos años resultados satisfactorios en campos tan diversos como la biomedicina [Lafon y cols., 1998], la automoción [Struss y cols., 2000], la ecología [Struss, 1997] o los reactores nucleares [Mosterman, 1997]. Muchos de estos métodos organizan el diagnóstico como un proceso iterativo de predicción de comportamiento, detección de discrepancias, generación de un conjunto de candidatos y refinamiento de dicho conjunto.

El GDE [de Kleer y Williams, 1987] es, posiblemente, la implementación más conocida del DBC y el paradigma con el que comparar la mayor parte de los resultados. La importancia de esta aproximación queda patente observan-

do sus principales características. En primer lugar razona exclusivamente en base a modelos de estructura y comportamiento correcto de los componentes¹. En segundo lugar, puede realizar detección y localización de fallos sólo con este conocimiento. Además, permite encontrar automáticamente fallos múltiples². Por último, obtiene resultados de diagnóstico que son sólidos, desde un punto de vista lógico.

Este sistema organiza su fase de detección de discrepancias en torno al concepto de conjunto conflicto. Cada uno de estos señala a un conjunto de suposiciones de funcionamiento correcto que no son consistentes con las observaciones. Existen resultados teóricos que demuestran la importancia de este concepto dentro del proceso de diagnóstico [de Kleer y cols., 1992]. No obstante, el cálculo de conflictos no es un

¹No incorpora ningún tipo de heurística para realizar el diagnóstico.

²Sin utilizar conocimiento adicional sobre los modos en los que puede fallar un componente.

proceso trivial y por ello el GDE utiliza un ATMS [de Kleer, 1986] que registra las suposiciones de corrección asociadas a la estimación proporcionada por el motor de inferencias. De aquí en adelante, nos referiremos a Mecanismo de Registro de Dependencias, MRD, para no restringir la discusión al uso de un ATMS. Sin embargo, la utilización en línea de un MRD origina una sobrecarga al sistema, que ha de calcular todas las etiquetas con cada nuevo conjunto de observaciones. Además, la utilización de MRDs con modelos cualitativos para el diagnóstico de sistemas con dinámica no es inmediata [Guckenbiehl y Schäfer-Richter, 1990, Dressler, 1996].

Por estas razones, distintos grupos de investigación han comenzado a buscar alternativas a los MRD y su combinación con la simulación en línea. Por un lado, ha surgido la línea de diagnóstico basado en estado³ [Struss, 1997] frente a la idea de diagnóstico basado en simulación. Por otro lado, otros grupos se han decantado por evitar el registro de dependencias en línea con un MRD. Esta última tendencia, engloba una serie de trabajos que se suelen denominar *métodos topológicos*, ya que utilizan fundamentalmente la representación de la topología del sistema que aparece de forma implícita en la descripción del mismo. Dentro de esta aproximación se pueden distinguir aquellos trabajos que realizan registro de dependencias en línea (explorando grafos causales [Bousson y cols., 1998, Mosterman, 1997], grafos dirigidos con signo [Oyeleye, 1990] u otras técnicas de modelado [Chittaro y cols., 1993]) de aquellos otros que la realizan fuera de línea. Es en este último campo, que de aquí en adelante se denominará pre-compilación, donde se encuadra este trabajo.

El principal problema asociado al registro de dependencias en línea (bien sea hacia adelante, como el GDE [de Kleer y Williams, 1987], o hacia atrás, como CAEN [Bousson y cols., 1998], DYNAMIS [Chittaro y cols., 1996] o TRANSCEND [Mosterman, 1997]) es la necesidad de repetir los cálculos con cada nuevo conjunto de observaciones disponibles. Hoy en día, la pre-compilación (basándose únicamente en la información estructural, de comportamiento y/o funcional) puede considerarse como una alternativa establecida a los MRDs en línea.

La primera referencia a la posible utilización de la información sobre la estructura y el comportamiento puede encontrarse en el trabajo de de Kleer y Williams [de Kleer y Williams, 1987]. Usaban dicha información para refinar el conjunto de candidatos. El trabajo de Nooteboom y Leemeijer [Nooteboom y Leemeijer, 1993] iba en esa misma dirección.

Hay que destacar que los primeros trabajos utilizaban dicha información en la fase en línea del diagnóstico:

- Dague y cols. [Dague y cols., 1991] utilizaban la información para analizar estructuras complejas mientras diagnosticaban sistemas analógicos;
- Misra y Stzipanovits [Misra y cols., 1994] se aprovechaban de la información para detectar fallos en los sensores una vez se ha dado una alarma;
- Moriarty [Williams y Millar, 1996] busca sistemas de restricciones sobre-determinados, equivalentes a los conflictos minimales, en el aprendizaje descomposicional basado en modelos⁴.

Es por esta última vía por la que se han decantado distintos autores en los últimos años, y no sólo en el campo del DBM que utiliza técnicas de Inteligencia Artificial (y conocida como aproximación DX), sino también en la aproximación por parte del campo de la Ingeniería de Control (y conocida como aproximación FDI).

La propuesta de Staroswiecki y Declerk [Staroswiecki y Declerk, 1989] se basa en las relaciones de redundancia analítica, ARR, buscando sistemas sobre-determinados sobre los que realizar la detección y localización de fallos.

A mitad de camino entre las comunidades FDI y DX está el trabajo de Lunze y Schiller [Lunze y Schiller, 1992], que obtiene los subsistemas capaces de generar diagnosis a partir de un grafo causal asociado a las fórmulas lógicas de sus modelos.

Por último, aquellos trabajos que realizan pre-compilación y que pueden considerarse dentro del campo de la Inteligencia Artificial son, hasta donde nosotros sabemos:

³State-based diagnosis.

⁴Traducción de los autores: *Decompositional Model-based Learning* en inglés en el original.

- Darwiche y Provan utilizan el concepto de consecuencia para caracterizar al conjunto de diagn sis [Darwiche y Provan, 1996]. Esto les permite analizar la estructura de un sistema y localizar, fuera de línea, aquellos sub-sistemas que pueden diagnosticarse de forma independiente.
- Steele y Leitch [Steele y Leitch, 1996] utilizan la información para refinar el conjunto candidatos, realizado dentro de una aproximación adaptativa.
- Ligeza y Gorny [Ligeza y G rny, 2000] localizan, dentro del entorno CAEN, las dependencias causales que intervienen en la estimación de una variable.
- DOGS [Loiez y Taillibert, 1997] manipula mediante el método de Gauss las ecuaciones que est n en el modelo del sistema para encontrar aquellos sub-sistemas capaces de generar conflictos.
- Fr lich y Nejd l [Fr lich y Nejd l, 1997] utilizan la información estructural para encontrar aquellos conjuntos de fórmulas lógicas que pueden generar diagnósticos minimales. Además se benefician de esta información para refinar el procedimiento de diagnóstico.
- Pulido y Alonso [Pulido y Alonso, 1999] amplían el concepto inicial de *posible conflicto* [Pulido y Alonso, 1997] para identificar todos aquellos sub-sistemas que pueden dar lugar a un conflicto minimal dentro del paradigma GDE, tanto para sistemas est ticos como para sistemas dinámicos.

La organización de este trabajo es la siguiente. En la segunda sección se recuerda y amplía el concepto de posible conflicto, ilustr ndola con un ejemplo de un sistema est tico. En la tercera sección se compara dicha aproximación con el resto de técnicas de pre-compilación y con el trabajo de Cordier y cols. [Cordier y cols., 2000].

Para obtener más detalles sobre la extensión del concepto de posible conflicto a sistemas dinámicos, así como su integración en el ciclo de diagnóstico los lectores pueden consultar [Pulido y Alonso, 2000, Pulido y cols., 2001].

2. Posibles conflictos

En el marco del DBC propuesto por Reiter [Reiter, 1987] cada conflicto minimal identifica un conjunto de restricciones que contienen suficiente redundancia como para dar lugar a un diagnóstico. En el caso en que las restricciones fuesen ecuaciones, estaríamos hablando de sistemas estrictamente sobre-determinados⁵. La idea principal en nuestra aproximación es que en ausencia de fallos estructurales y asumiendo que la localización de las medidas en el sistema es fijo y conocido *a priori*⁶, es posible determinar fuera de línea aquellas partes del modelo que pueden dar lugar a conflictos. Una suposición adicional y menos restrictiva es que los modelos pueden expresarse como restricciones o relaciones entre las magnitudes del sistema, ya sean cuantitativas o cualitativas, algebraicas o no, lineales o no. Esto nos permite abstraer la representación del sistema (*SD* en la terminología de DBC) y analizar dicha abstracción, en nuestro caso un hipergrafo [Berge, 1989]. Las notaciones relativas a hipergrafos se detallan en el apéndice A.

En el hipergrafo $H_{SD} = \{V, R\}$ asociado a *SD*:

- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ son las variables del sistema; que pueden ser variables observadas o no observadas, $V = OBS \cup NOBS$, sabiendo que $OBS \cap NOBS = \emptyset$;
- $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ es la familia de sub-conjuntos de V que representa a las relaciones entre las variables del sistema y que se usan para modelar su comportamiento.

En el análisis de H_{SD} inicialmente se localizan aquellos sub-sistemas con suficiente redundancia como para dar lugar a un conflicto. Después se obtienen todas las formas posibles en las que pueden evaluarse dichos sub-sistemas. Los dos siguientes apartados resumen la aproximación ya descrita en [Pulido y Alonso, 1999, Pulido y Alonso, 2000].

⁵El término determinado se utilizará para sistemas con igual número de ecuaciones que de incógnitas, el término sobre-determinado se reserva para aquellos sistemas con mayor número de ecuaciones que de incógnitas y estrictamente sobre-determinado para indicar que el número de ecuaciones es exactamente igual al número de incógnitas más uno.

⁶Suposici n válida en el entorno de procesos industriales continuos.

2.1. Búsqueda de sistemas sobre-determinados

Para localizar fuera de línea aquellos sub-sistemas capaces de generar conflictos minimales es preciso identificar sistemas sobre-determinados. Además, estos deben realizar las predicciones que puedan llevar a un conflicto tal y como las hace un GDE: realizando una doble estimación de una variable no observada o realizando una estimación de una variable observada. Estos sub-sistemas se denominan *Cadenas Evaluables*, CE:

Cadena Evaluable: Una cadena evaluable, $H_{ce} \subseteq H_{SD}$, es un sub-hipergrafo parcial de H_{SD} : $H_{ce} = \{V_{ce}, R_{ce}\}$, donde $V_{ce} \subseteq V$, $R_{ce} \subseteq R$ y $X_{ce} = V_{ce} \cap NOBS$ es el conjunto de variables no medidas, y que verifica:

1. H_{ce} es conexo,
2. $V_{ce} \cap OBS \neq \emptyset$,
3. $\forall v_{no} \in X_{ce} \Rightarrow d_{H_{ce}}(v_{no}) \geq 2$,
4. si $G(H_{ce})$ es un grafo bipartito cuyos nodos corresponden por un lado a $x \in X_{ce}$ y por otro lado a $r_{ice} \in R_{ce}$, donde los nodos están unidos por un arco sii $x \in r_{ice}$, entonces $G(H_{ce})$ tiene un *matching* de máxima cardinalidad $m' = |X_{ce}|$ y $|R_{ce}| \geq m' + 1$.

La primera condición nos asegura que tenemos un sistema sobre-determinado y no un conjunto de sistemas sobre-determinados. La segunda condición viene impuesta por la necesidad de observaciones para diagnosticar.

La tercera condición nos asegura que podrán propagarse valores a través de las relaciones. Si además se quiere que sólo pueda realizarse propagación local habría que eliminar aquellas configuraciones en la CE que impiden este tipo de propagación. Las fuentes de no localidad se identificarán cuando se resuelva el sistema de restricciones, no antes. Por lo tanto, se tratará este tema en el siguiente apartado de esta sección. No obstante, al no imponer esta restricción, se pueden encontrar sistemas sobre-determinados que detendrían la propagación local en un ATMS y que serían descartados por otros sistemas que utilizan técnicas similares como Moriarty [Williams y Nayak, 1996].

La cuarta condición exige la redundancia necesaria para tener un sistema sobre-determinado

y, en principio, poder realizar la diagnosis. Trabajos relacionados con la asignación automática de causalidad [Porté y cols., 1988] nos garantizan que si el sistema es sobre-determinado ha de existir un *matching* de máxima cardinalidad $m' = |X_{ce}|$ y que $|R_{ce}| \geq m' + 1$. Las CE cumplen esta condición por la forma en la que han sido construidas. El algoritmo *Justificar* en el apéndice B.2 introduce una nueva relación por cada variable desconocida (además de la que la ha introducido en la lista de variables no justificadas). Por lo tanto, cada variable no observada intervendrá en, al menos, dos relaciones y, al final del proceso, el sistema será sobre-determinado.

Todas las cadenas evaluables de un sistema se calculan utilizando los algoritmos que aparecen en el apéndice B.2, ya que recorren todas las relaciones del sistema y para cada una encuentran todas las posibles CE a las que pertenece. Como además estamos interesados exclusivamente en los conflictos minimales⁷, centraremos nuestra discusión posterior en las cadenas que sean minimales, CEM:

Cadena evaluable minimal: H_{ce} es una cadena evaluable minimal si no existe $H'_{ce} \subset H_{ce}$ que sea cadena evaluable.

En la Figura 1 se puede observar un ejemplo típico en la literatura de DBC. En la Figura

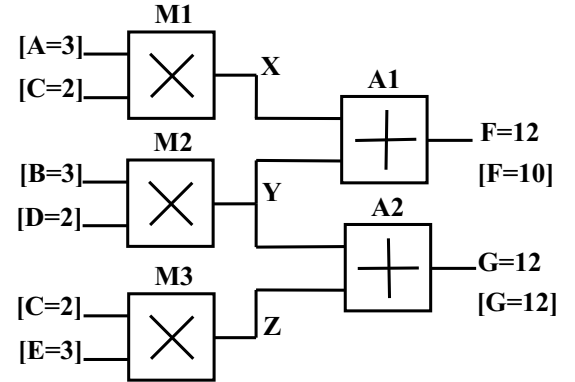


Figura 1: Sistema de sumadores y multiplicadores. Los valores observados se encuentran entre corchetes. Los valores estimados se encuentran sin corchetes, salvo $\{X, Y, Z\}$ que son valores no observados.

⁷Existen resultados teóricos que nos garantizan que se pueden caracterizar el conjunto de todas las diagnosis a partir del conjunto de conflictos minimales [de Kleer y cols., 1992].

2 se puede ver el hipergrafo asociado a dicho sistema.

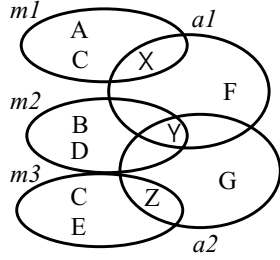


Figura 2: Hipergrafo, H_{SD} , asociado al sistema de los sumadores-multiplicadores.

La Figura 3 muestra las CEMs que se han obtenido del hipergrafo de la Figura 2.

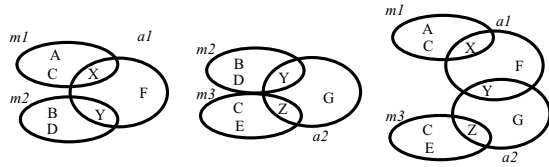


Figura 3: H_{ce1} , H_{ce2} y H_{ce3} son las CEMs encontradas en el hipergrafo H_{SD} .

La Figura 4 muestra el grafo bipartito asociado a H_{ce1} , así como un *matching* de máxima cardinalidad.

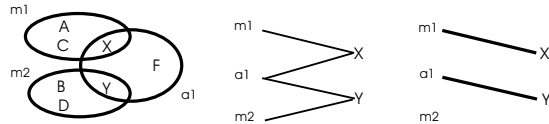


Figura 4: Grafo bipartito $G(H_{ce1})$ asociado a H_{ce1} y un *matching* de máxima cardinalidad.

2.2. Obtención de todas las formas en que pueda evaluarse cada CEM

Una CEM representa una condición necesaria, pero no suficiente, para que un sub-sistema pueda dar lugar a un conflicto minimal. Es necesario comprobar que el modelo del sub-sistema puede evaluarse, mediante la resolución local de cada una de sus relaciones a partir de las observaciones, ya que así es como el GDE obtiene sus

conflictos. Esto no es posible con la información del hipergrafo. Es necesario conocimiento adicional: hay que saber todas las formas posibles en las que puede evaluarse una relación. Esta información puede representarse como un arco Y-O [Pearl, 1984] por cada posible forma de evaluar un hiperarco. De esta forma, cada CEM permite generar un grafo y-o dirigido, donde los arcos Y indican que debe conocerse cada variable en la cola del arco (midiéndola o estimándola) para obtener el valor de la variable en la cabeza. Un arco O indica que sólo algunas de las variables en la cola necesitan ser conocidas para evaluarlo. En la parte superior de la Figura 5 se observa el hiperarco que modela el comportamiento del sumador A_1 : a_1 . En la parte inferior pueden verse sus arcos y-o dirigidos asociados.

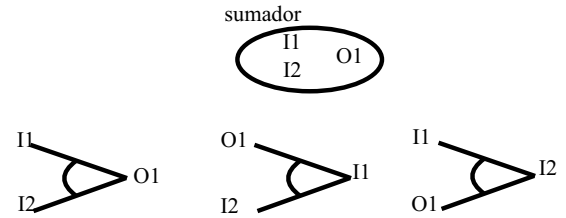


Figura 5: Hiperarco y arcos y-o dirigidos asociados para un sumador.

Como consecuencia, la selección de uno u otro de los arcos Y-O puede originar distintas formas de evaluar la CEM. Cada una de estas formas se denomina Modelo Evaluable Minimal, MEM. El algoritmo que se utiliza para calcular todos los MEMs existentes asociados a cada CEM se puede encontrar en el apéndice B.3. Además, dada la relación existente entre las $r_{ice} \in R_{ce}$ y estos nuevos arcos Y-O r_{ik} , se cumple la siguiente proposición:

Proposición 1 Sea $G_{me} = \{V_{me}, R_{me}\}$ el grafo Y-O inducido por el criterio de resolución local sobre H_{ce} , donde:

- $V_{me} = V_{ce}$
- $\forall r_{ice} \in R_{ce} \Rightarrow \exists r_{ik} \in R_{me}, k \geq 1$

Entonces, $r_{ice} \in R_{ce}$ induce una partición en R_{me} .

Prueba de la Proposición 1: Cada $r_{ice} \in R_{ce}$ induce una clase de equivalencia en R_{me} . Por definición, inducirá una partición.

A continuación se introducen dos conceptos que

son necesarios para entender la definición de Modelo Evaluable Minimal:

Nodo hoja: Un nodo i es hoja sii $\hat{\Gamma}_i^{-1} = 0$.

Es decir, un nodo hoja no tiene predecesores.

Nodo discrepancia: Un nodo discrepancia verifica:

$$(d_{H_m}^-(i) \geq 2 \wedge i \in NOBS) \vee$$

$$(d_{H_m}^-(i) \geq 1 \wedge i \in OBS)$$

Esto es, un nodo discrepancia representa aquellas variables que son estimadas por dos vías y no son observadas, o que son estimadas por una vía y, al mismo tiempo, son observadas.

Modelo evaluable minimal: Un grafo Y-O parcial de G_{me} , $H_{me} = \{V_{me}, R_{me}\}$, asociado a una cadena evaluable minimal H_{ce} , es un modelo evaluable minimal sii:

1. R_{me} es un conjunto de corte minimal para la partición inducida por $r_{ice} \in R_{ce}$ en R_{me} ,
2. $(\forall v_i \mid v_i \in V_{me} \text{ y } v_i \text{ es un nodo hoja}) \Rightarrow v_i \in OBS$,
3. $\exists_1 x_j \in V_{me} \mid x_j \text{ es un nodo discrepancia}$,
4. si x_j es un nodo discrepancia existe un camino dirigido $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+k}, x_j$ desde cada nodo hoja x_i hasta x_j .

La primera condición garantiza que cada MEM toma una, y sólo una de las posibles, interpretaciones asociadas a cada hiperarco en la CEM. La segunda condición nos indica que las estimaciones se realizarán partiendo de las observaciones. La tercera condición exige que exista un único nodo discrepancia, ya que un MEM equivale a evaluar un sistema estrictamente sobre-determinado. Si hubiese más de un nodo discrepancia, alguna variable podría calcularse de más de una forma y ya no estaríamos hablando de un sistema estrictamente sobre-determinado. La cuarta condición exige que los valores del nodo discrepancia se obtengan a partir de las observaciones y propagando localmente.

La Figura 6 muestra uno de los MEMs encontrados para las CEMs de la Figura 2. Los MEMs de este Figura se corresponden con las siguientes expresiones:

$$F = X + Y = A * C + B * D$$

$$G = Z + Y = E * C + B * D$$

$$Y_{pred_1} = Y_{pred_1} \equiv$$

$$G - Z = F - X \equiv G - C * E = F - A * C$$

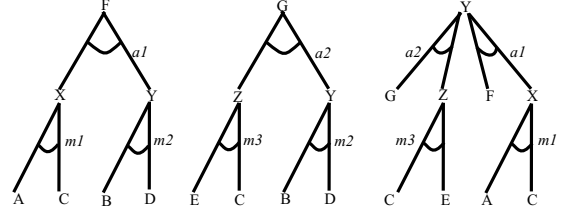


Figura 6: Modelos evaluables seleccionados para las cadenas evaluables minimales. Las variables observadas son $\{A, B, C, D, E, F, G\}$. Las incógnitas son $\{X, Y, Z\}$.

Los dos siguientes apartados presentan nuevos resultados (frente a [Pulido y Alonso, 1999, Pulido y Alonso, 2000]). Estos se centran en el análisis de ciclos y en la comparación de los resultados teóricos con los que obtendría un GDE.

2.3. MEMs y el principio de localidad

Se ha observado que la presencia de un ciclo en un MEM en el que sólo intervienen variables no observadas no puede resolverse exclusivamente mediante la propagación local. Una configuración cíclica donde sólo intervengan variables no observadas detiene la propagación local, dado que es necesario conocer el valor de la variable x_1 para calcular x_1 . Estaríamos, por lo tanto, ante un bucle algebraico.

A partir de la definición de Berge[Berge, 1989] para ciclo en un hipergrafo, definimos un ciclo en un grafo Y-O como:

Ciclo en grafo Y-O: Sea $H = \{V, R\}$ un grafo Y-O, y sea $k \geq 2$ un entero. Un ciclo de longitud k es una secuencia $\{x_1, r_1, x_2, r_2, \dots, x_k, r_k, x_1\}$ donde:

- r_1, r_2, \dots, r_k son arcos Y-O distintos de H ,
- x_1, x_2, \dots, x_k son nodos distintos de H ,
- $x_i, x_{i+1} \in r_i$ ($i = 1, 2, \dots, k - 1$),
- $x_k, x_1 \in r_k$.

Si sólo se desean obtener los mismos resultados que el GDE es necesario modificar el algoritmo *construir-modelo* del apéndice B.3 para eliminar aquellos MEMs que tengan un ciclo. Para ello, sencillamente hay que hacer esta comprobación antes de incluir el nuevo *modelo* en el CMEM.

De la misma forma, si se quieren evaluar sistemas que necesiten técnicas de resolución más generales que la propagación local, sería necesario utilizar métodos de solución de ecuaciones más elaborados y recurrir al concepto de super-relación, siguiendo el concepto de super-componente propuesto por Katsillis y Chantler en [Katsillis y Chantler, 1997]. Esto implicaría involucrar en una super-relación todas las relaciones que intervienen simultáneamente en la predicción de un conjunto de magnitudes no observadas. En [Pulido y Alonso, 2001] se puede encontrar información adicional sobre este punto.

2.4. Posibles conflictos y conflictos minimales

Los MEMs son sub-sistemas estrictamente sobre-determinados que pueden estimar una variable observada o realizar una doble estimación de una magnitud no observada. Es decir, pueden dar lugar a un conflicto. Sin embargo, al calcularse fuera de línea y con independencia de las observaciones, no se sabrá si dan lugar a un conflicto hasta que se introduzcan las observaciones. Por este motivo se introduce el concepto de posible conflicto:

Posible conflicto: Conjunto de relaciones en una Cadena Evaluable Minimal que contenga, al menos, un Modelo Evaluable Minimal.

En el ejemplo de los sumadores-multiplicadores de la Figura 1 se han encontrado los posibles conflictos: $\{\{m_1, m_2, a_1\}, \{m_1, a_1, a_2, m_3\} \text{ y } \{m_2, m_3, a_2\}\}$ ⁸

En este caso, donde los modelos están compuestos por una sola relación, el conjunto de posibles conflictos es igual que el conjunto de todos los conflictos minimales que puede encontrar un GDE, con independencia de las observaciones introducidas. Sin embargo, esto no quiere decir que, de forma general, un GDE y un sistema que utilice posibles conflictos vaya a generar los mismos diagnósticos. Para comparar los resultados de ambas aproximaciones son necesarias las siguientes definiciones:

⁸Para diferenciar los componentes y las relaciones, se utilizan letras mayúsculas para referirse a los componentes y letras minúsculas para referirse a las relaciones de sus modelos asociados.

- $P(S)$ es el conjunto de las partes de S ;
- $modelo : COMPS \rightarrow P(R_{SD})$ dado un componente C , $modelo(C)$ define todas las relaciones que intervienen en el modelado de su comportamiento;
- $comp : R_{SD} \rightarrow COMPS$
 $r_i \rightarrow comp(r_i) = \{C \mid r_i \in modelo(C)\}$,
 $comp(r_i)$ permite definir al componente que utiliza r_i en la definición de su conducta.

Proposición 2 Si un GDE encuentra un conflicto minimal, co , asociado a una discrepancia en $v \in V$, entonces existe una CEM, $H_{ce} = \{V_{ce}, R_{ce}\}$, tal que:

$$v \in V_{ce} \text{ y } co = \bigcup_{r_i \in R_{ce}} comp(r_i)$$

Prueba de la Proposición 2: El GDE encuentra un conflicto minimal resolviendo un sistema sobre-determinado [Katsillis y Chantler, 1997]. Además el algoritmo *Calcular-cadenas* es exhaustivo y encuentra todos los sistemas sobre-determinados de H_{SD} . Por lo tanto, tiene que encontrar cualquier sistema sobre-determinado que encuentre el GDE.

Es decir, cuando un GDE encuentra un conflicto minimal, el algoritmo *Calcular-cadenas* también encuentra una CEM que contiene las relaciones usadas para determinar el conflicto minimal.

Proposición 3 Si un GDE encuentra un conflicto minimal, co , asociado a una discrepancia en $v \in V$, entonces existe un MEM, $H_{me} = \{V_{me}, R_{me}\}$, asociado a una CEM, H_{ce} , que también generará una discrepancia asociada a v y

$$v \in V_{me} \text{ y } co = \bigcup_{r_i \in R_{me}} comp(r_i)$$

Prueba de la Proposición 3: Por la proposición 2 existe una CEM que contiene las mismas relaciones que un conflicto minimal. Además el algoritmo *Construir-modelos* es exhaustivo, por lo tanto, encuentra todas las formas posibles de evaluar un sistema siguiendo los mismos criterios que un GDE. En consecuencia, al menos

uno de los MEMs se corresponde con la evaluación a la que ha llegado el GDE para detectar una discrepancia.

Esto es, alguno de los MEMs asociados a una CEM encontrará una discrepancia tal y como lo hace el GDE.

Proposición 4 *Si pc es un posible conflicto asociado a una CEM, $H_{ce} = \{V_{ce}, R_{ce}\}$ y $X_{ce} = V_{ce} \cap NOBS$, entonces $|R_{ce}| = |X_{ce}| + 1$.*

Prueba de la Proposición 4: Por lo proposición 2, las CEMs tendrán las mismas relaciones que utiliza un GDE para encontrar un conflicto minimal. Por lo tanto, sólo hay dos formas de construirlo:

- Comparando dos estimaciones de una variable no observada, x_{nobs} .
Cada estimación de la variable se consigue con un sistema determinado, esto es, con igual número de ecuaciones que de incógnitas. La única variable compartida por ambos subsistemas tiene que ser x_{nobs} . Si no fuese así, el conflicto no sería minimal. Por esta razón, tenemos que el número de ecuaciones es igual al número de incógnitas más uno, por lo que se tiene un sistema estrictamente sobre-determinado.
- Comparando una estimación de una variable observada con la observación.
Este caso puede considerarse una particularización del primero, ya que una observación de una variable puede considerarse como un sistema determinado de una ecuación y una incógnita.

Es decir, si pc es un posible conflicto asociado a una CEM, entonces la CEM está asociada a un sistema estrictamente sobre-determinado.

Desafortunadamente, el número de MEMs que se pueden extraer de una CEM puede ser exponencial en el número medio de interpretaciones por hiperarco. Debido a esto, en la práctica se selecciona sólo uno de los MEMs de cada CEM. A continuación se construye su modelo ejecutable asociado y será ése el que se utilice para detectar las discrepancias. Sin suposiciones adicionales se puede enunciar:

Corolario 1 *Si H_{ce} es una CEM, H_{me} es uno de sus MEMs asociados y al evaluar el mode-*

lo asociado al H_{me} se genera una discrepancia en $v \in V_{ce}$, entonces un GDE encontrará un conflicto en v .

Nótese que la confirmación de un pc no implica que el GDE encuentre un conflicto minimal asociado. Mientras que los posibles conflictos son minimales c.r.a. inclusión de restricciones, los conflictos son minimales c.r.a. inclusión de componentes. Sólo se dará la equivalencia cuando el modelo de un componente contenga una sola restricción. En [Pulido y cols., 2001] se muestran ejemplos de esta diferencia cuando se analiza un sistema dinámico. En la discusión se volverá a incidir sobre este tema.

La afirmación del Corolario 1 es genérica. Sin embargo, en algunas ocasiones todas las formas en las que se puede evaluar un modelo son equivalentes. En esos casos se cumplirá, además:

Corolario 2 *Si un GDE encuentra un conflicto minimal, co , asociado a una discrepancia en v y todos los MEMs asociados a una CEM, H_{ce} que contiene v proporcionan una única solución para cualquier conjunto de observaciones, entonces el posible conflicto asociado a H_{ce} se confirmará como un conflicto.*

Prueba del Corolario 2: Por la Proposición 2, existe una CEM. Si todas las formas posibles de evaluar una CEM dan lugar a la misma solución, es obvio que cualquier MEM será capaz de encontrar la discrepancia que encuentre el GDE.

En resumen, si bien teóricamente ambas aproximaciones son equivalentes, en la práctica sólo se puede garantizar que se encuentran las mismas soluciones cuando se cumplen las condiciones del Corolario 2. En general, la solución mediante posibles conflictos será sub-óptima con respecto a la solución de un GDE, ya que cuantos más conflictos se confirmen, más específico será el diagnóstico.

3. Discusión y comparación con otros trabajos

La aproximación mediante posibles conflictos consta de tres fases:

- En una primera etapa cualitativa de alto nivel de abstracción, se buscan los sistemas sobre-determinados que podrían dar lugar a conflictos minimales. Esto permite eliminar aquellos sistemas que no son estrictamente sobre-determinados sin perder información valiosa de diagnóstico.
- En una segunda etapa cualitativa con mayor nivel de detalle, se calculan todas las posibles formas en las que puede evaluarse una CEM, dando lugar a los MEMs.
- Se construye un modelo ejecutable para el MEM que represente a cada posible conflicto.

En lo que respecta a las similitudes o diferencias con otras técnicas de pre-compilación del campo de la Inteligencia Artificial, cabe destacar que:

- La aproximación mediante posibles conflictos se centra, exclusivamente, en el DBC como lo realiza el GDE, aunque es fácilmente extendible con técnicas de propagación no locales. Por lo tanto, su uso es distinto al dado por otros autores, como detección de fallos en sensores [Misra y cols., 1994], ayuda al refinamiento del diagnóstico en diagnosis adaptativa [Steele y Leitch, 1996] o aprendizaje automático basado en modelos [Williams y Nayak, 1996].
- A diferencia del trabajo de Darwiche y Provan [Darwiche y Provan, 1996], la aproximación mediante posibles conflictos no se centra en el concepto de consecuencia, que es una alternativa a la caracterización de diagnosis mediante conflictos. Además, los posibles conflictos no imponen que los sensores físicamente “dividan” al sistema en sub-sistemas independientes.
- El análisis cualitativo que realiza la aproximación mediante posibles conflictos es más genérica que las propuestas de Lunze y Schiller [Lunze y Schiller, 1992] o Frölich y Nejd [Frölich y Nejd, 1997], ya que no está ligado a técnica de modelado alguna.
- La técnica que aquí se presenta se utiliza para construir los modelos, fuera de línea y una sola vez. Por lo tanto, no es necesario su recorrido en línea *hacia atrás* una vez que se ha realizado la detección [Ligeza y Górný, 2000, Mosterman, 1997].

Ya que el trabajo de Loiez y Taillibert [Loiez y Taillibert, 1997] no aporta variaciones significativas frente a la propuesta de Staroswiecki y cols. [Staroswiecki y Declerk, 1989, Cassar y Staroswiecki, 1997] sólo se comparará la aproximación mediante posibles conflictos con respecto a esta última. Esta es la misma suposición en la que se basa el trabajo de Cordier y cols. [Cordier y cols., 2000] para comparar las aproximaciones de las comunidades de DX y FDI. La necesidad de comparar los resultados obtenidos por ambas comunidades ha quedado refrendado recientemente por la celebración del taller BRIDGE. Esta comparación, esbozada en [Pulido y Alonso, 2000], ha sido ampliamente tratada en [Cordier y cols., 2000]. Por lo tanto, utilizaremos este último trabajo para comentar las similitudes y diferencias entre los posibles conflictos y las ARR.

Es evidente que los conceptos de ARR, conflicto potencial y posible conflicto son conceptualmente equivalentes. Todos buscan sistemas sobre-determinados para realizar el diagnóstico. Sin embargo, las principales diferencias de los posibles conflictos con las ARRs son:

- Cada CEM asociada a un posible conflicto se construye, siguiendo las ideas de un GDE, bajo criterios de minimalidad. Esto no se cumple en el caso de las ARRs, ya que en general no se cumple el recíproco de la proposición 4: estrictamente sobre-determinado no implica minimalidad.
- Para cada CEM se calculan todas las MEMs asociadas, aunque sólo se utiliza una para realizar el diagnóstico. Desde el punto de vista de las ARRs equivaldría a generar todas las posibles asignaciones causales para todos los sistemas sobre-determinados, en lugar de generar una. Por lo tanto, ambas aproximaciones son equivalentes desde el punto de vista práctico. No obstante, Cordier y cols. asumen que los resultados mediante ARRs y GDE son equivalentes, lo cual no se cumple en general, según se observa en los corolarios 1 y 2. Sólo en el caso en que se den las condiciones del corolario 2 será posible dicha afirmación.
- La aproximación mediante posibles conflictos trabaja con minimalidad con respecto a relaciones, mientras que la aproximación

GDE lo hace con respecto a componentes. Esta suposición hace que la proposición 1 de Cordier y cols. sólo se cumpla, si además cada modelo consta sólo de una relación. Pulido y Alonso [Pulido y Alonso, 2000] han encontrado posibles conflictos que son minimales c.r.a. relaciones pero que no se corresponden con conflictos minimales c.r.a. componentes.

Además, teniendo en cuenta la utilización de los posibles conflictos y las ARRs en el proceso de diagnóstico, los primeros se utilizan sin tener en cuenta las suposiciones de exoneración o compensación. A diferencia de la aproximación de FDI, no hay ninguna suposición sobre los modos de fallo, ya que se utiliza una aproximación basada en consistencia.

A partir de lo expuesto hasta aquí se puede concluir que la aproximación al DBC mediante posibles conflictos permite evitar la utilización de técnicas de registro de dependencias en línea. Si bien esta aproximación y la que proporciona el GDE son equivalentes desde un punto de vista teórico, las consideraciones de eficiencia impiden que esta equivalencia se obtenga siempre en la práctica. Aún así, en general los resultados del DBC mediante posibles conflictos son sub-óptimos en lo que respecta al número de posibles conflictos confirmados, manteniendo al mismo tiempo la solidez en el razonamiento.

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer a Louise Travé-Massuyès sus valiosos comentarios sobre trabajos anteriores y la financiación del M.E.C. por medio de los proyectos CICYT TAP98-0828 y TAP99-0344.

Referencias

- [Berge, 1989] Berge, C. (1989). *Hypergraphs. Combinatorics of Finite Sets*. North-Holland, Amsterdam.
- [Berge, 1990] Berge, C. (1990). *Graphs*. North Holland mathematical library 6,1. North-Holland, Amsterdam.
- [Bousson y cols., 1998] Bousson, K., Steyer, J.-P., Travé-Massuyès, L., y Dahhou, B. (1998). From a heuristic-based to a model-based approach for monitoring and diagnosis of biological processes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 11:447–493.
- [Cassar y Staroswiecki, 1997] Cassar, J. y Staroswiecki, M. (1997). A structural approach for the design of failure detection and identification systems. En *Actas de la IFAC-IFIP-IMACS Conference on Control of Industrial Processes*, Belfort, Francia.
- [Chittaro y cols., 1993] Chittaro, L., Guida, G., Tasso, C., y Toppano, E. (1993). Functional and teleological knowledge in the multi-modeling approach for reasoning about physical systems: A case study in diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23:1718–1751.
- [Chittaro y cols., 1996] Chittaro, L., Ranon, R., y Lopez Cortes, J. (1996). Ship over troubled waters: Functional reasoning with influences applied to the diagnosis of a marine technical system. En *Actas del Seventh International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-96)*, páginas 69–78, Val Morin, Quebec, Canadá.
- [Cordier y cols., 2000] Cordier, M., Dague, P., Dumas, M., Lévy, F., Montmain, J., Staroswiecki, M., y Travé-Massuyès, L. (2000). A comparative analysis of ai and control theory approaches to model-based diagnosis. En *Actas de la Fourteenth European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2000)*, páginas 136–140, Berlín, Alemania.
- [Dague y cols., 1991] Dague, P., Devès, P., Luciani, P., Jehl, O., y Taillibert, P. (1991). When oscillators stop oscillating. En *Actas de la Twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91)*, páginas 1109–1115, Sidney, Australia.
- [Darwiche y Provan, 1996] Darwiche, A. y Provan, G. (1996). Exploiting system structure in model-based diagnosis of discrete-event systems. En *Actas del Seventh International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-96)*, páginas 93–105, Val Morin, Quebec, Canadá.
- [de Kleer, 1986] de Kleer, J. (1986). An assumption-based TMS. *Artificial Intelligence*, 28:127–162.
- [de Kleer y cols., 1992] de Kleer, J., Mackworth, A., y Reiter, R. (1992). Characterizing diagnosis and systems. En *Readings*

- in *Model Based Diagnosis*, páginas 54–65. Morgan-Kaufman Pub., San Mateo.
- [de Kleer y Williams, 1987] de Kleer, J. y Williams, B. (1987). Diagnosing multiple faults. *Artificial Intelligence*, 32:97–130.
- [Dressler, 1996] Dressler, O. (1996). On-line diagnosis and monitoring of dynamic systems based on qualitative models and dependency-recording diagnosis engines. En *Actas de la Twelfth European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-96)*, páginas 461–465.
- [Frölich y Nejd, 1997] Frölich, P. y Nejd, W. (1997). A static model-based engine for model-based reasoning. En *Actas de la Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, páginas 446–471, Nagoya, Japón.
- [Gondran y Minoux, 1984] Gondran, M. y Minoux, M. (1984). *Graphs and Algorithms*. John Wiley and Sons, Nueva York.
- [Guckenbiehl y Schäfer-Richter, 1990] Guckenbiehl, T. y Schäfer-Richter, G. (1990). Sidia: Extending prediction based diagnosis to dynamic models. En *Actas del First International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-90)*, páginas 74–82, Stanford, California, EE. UU.
- [Katsillis y Chantler, 1997] Katsillis, G. y Chantler, M. (1997). Can dependency-based diagnosis cope with simultaneous equations? En *Actas del Eighth International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-97)*, páginas 51–59, Le Mont Saint Michel, Francia.
- [Lafon y cols., 1998] Lafon, M., Pastor, J., Travé-Massuyès, L., Doyon, B., Demonet, J., y Celsis, P. (1998). Qualitative modeling of cerebral information propagation mechanisms. En *Actas de la Third International Conference on Computational and Neurosciences*, volume 2, páginas 21–23, Research Triangle Park, EE. UU.
- [Ligeza y Górný, 2000] Ligeza, A. y Górný, B. (2000). Systematic conflict generation in model-based diagnosis. En *Actas de la*, páginas 1103–1108.
- [Loiez y Taillibert, 1997] Loiez, E. y Taillibert, P. (1997). Polynomial temporal band sequences for analog diagnosis. En *Actas de la Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, página ??, Nagoya, Japón.
- [Lunze y Schiller, 1992] Lunze, J. y Schiller, F. (1992). Logic-based process diagnosis utilising the causal structure of dynamical systems. En *Actas de la Artificial Intelligence in Real-Time Control (IFAC/IFIP/IMACS)*, páginas 649–654, Delft, Holanda.
- [Misra y cols., 1994] Misra, A., Sztipanovits, J., y Carnes, J. (1994). Robust diagnostic system: structural redundancy approach. En *Actas del SPIE's International Symposium on Knowledge-based AI Systems in Aerospace and Industry*, Orlando, Florida, EE. UU.
- [Mosterman, 1997] Mosterman, P. (1997). *Hybrid dynamic systems: a hybrid bond graph modeling paradigm and its applications in diagnosis*. Tesis doctoral, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, EE. UU.
- [Nooteboom y Leemeijer, 1993] Nooteboom, P. y Leemeijer, G. (1993). Focusing based on the structure of a model in model-based diagnosis. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38:455–474.
- [Oyeleye, 1990] Oyeleye, O. (1990). *Qualitative modeling of continuous chemical processes and applications to fault diagnosis*. Tesis doctoral, Department of Chemical Engineering, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, EE. UU.
- [Pearl, 1984] Pearl, J. (1984). *Heuristics. Intelligent search strategies for computer problem solving*. Addison Wesley Pub.
- [Porté y cols., 1988] Porté, N., Boucheron, S., Sallantin, J., y Arlabosse, F. (1988). An algorithmic view at causal ordering. Informe técnico 45, Centre de Recherche en Informatique, Montpellier, Francia.
- [Pulido y Alonso, 1997] Pulido, B. y Alonso, C. (1997). La información sobre la topología y el dominio simplifican el cálculo de conflictos minimales en el diagnóstico basado en modelos. En *Actas de la VII Conferencia Nacional de la Asociación Española de Inteligencia Artificial (CAEPIA-97)*, páginas 75–84, Torremolinos, España.
- [Pulido y Alonso, 1999] Pulido, B. y Alonso, C. (1999). Possible conflicts instead of conflicts to diagnose continuous dynamic systems. En *Actas del Tenth International*

Workshop on Principles of Diagnosis (DX-99), páginas 234–241, Loch Awe, Escocia (Reino Unido).

[Pulido y Alonso, 2000] Pulido, B. y Alonso, C. (2000). An alternative approach to dependency-recording engines in consistency-based diagnosis. En *Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications. Ninth International Conference (AIMSA-00)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence. Subseries of Lecture Notes in Computer Science, páginas 111–120. Springer Verlag, Berlin, Alemania.

[Pulido y Alonso, 2001] Pulido, B. y Alonso, C. (2001). Analysing cyclical structures in the framework of possible conflicts. En *Enviado a CAEPIA-2001*, Gijón, España.

[Pulido y cols., 2001] Pulido, B., Alonso, C., y Acebes, F. (2001). Lessons learned from diagnosing dynamic systems using possible conflicts and quantitative models. En *Lecture Notes in Artificial Intelligence. Vol. 2070. Engineering of Intelligent Systems. Fourteenth International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA/AIE-2001)*, páginas 135–144, Budapest, Hungría.

[Reiter, 1987] Reiter, R. (1987). A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, 32:57–95.

[Staroswiecki y Declerk, 1989] Staroswiecki, M. y Declerk, P. (1989). Analytical redundancy in non linear interconnected systems by means of structural analysis. En *Actas del IFAC Advanced Information Processing in Automatic Control (AIPAC-89)*, páginas 51–55, Nancy, Francia.

[Steele y Leitch, 1996] Steele, A. y Leitch, R. (1996). A strategy for time-constraint qualitative parameter identification. En *Actas del Computational Engineering in Systems Applications (CESA IMACS-IEE/SMC Multi-conference)*, Lille, Francia.

[Struss, 1997] Struss, P. (1997). Fundamentals of model-based diagnosis of dynamic systems. En *Actas de la Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, páginas 480–485, Nagoya, Japón.

[Struss y cols., 2000] Struss, P., Sachenbacher, M., y Carlén, C. (2000). Insights from building a prototype for model-based on-board diagnosis of automotive systems. En *Actas del Eleventh International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-00)*, páginas 201–212, Morelia, México.

[Williams y Millar, 1996] Williams, B. y Millar, B. (1996). Automated decomposition of model-based learning problems. En *Actas del Seventh International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-96)*, páginas 258–266, Val Morin, Quebec, Canadá.

[Williams y Nayak, 1996] Williams, B. y Nayak, P. (1996). A model-based approach to reactive self-configuring systems. En *Actas del Seventh International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-96)*, páginas 267–274, Val Morin, Quebec, Canadá.

A. Notaciones utilizadas de hipergrafos

Términos de grafos e hipergrafos utilizados [Gondran y Minoux, 1984]:

$G = [V, E]$	Grafo con conjunto de vértices V y conjunto de arcos E
Γ_i	Sucesores del vértice i
Γ_i^{-1}	Predecesores del vértice i
$d_G(i)$	Grado del vértice i en el grafo G
$d_G^+(i), d_G^-(i)$	Semi-grado de salida y de entrada del vértice i en G
$G \mid Y$	Grafo generado usando $G = [V, E]$ con respecto a los vértices $Y \subset V$

Grafo bipartito: Un grafo $G = [V, E]$ se denomina **bipartito** si existe una partición $V = S \cup T$ de sus nodos tal que los arcos de E siempre tienen un nodo de S y otro de T — $E \mid S$ y $E \mid T$ son vacíos [Gondran y Minoux, 1984]—.

Matching: Un *matching* en un grafo $G = [V, E]$ es un subconjunto de arcos de E donde cada vértice es adyacente a lo sumo a un arco [Berge, 1990].

B. Algoritmos

B.1. Términos utilizados

Término	Significado
CCEM	Conjunto de CEMs
CMEM	Conjunto de MEMs
H_{SD}	Hipergrafo asociado a SD
R, R1	Restricciones
I, I2	Interpretación de una restricción
Cadena	Cadena en construcción
Modelo	Modelo en construcción
v	variable
Por-justificar	Incógnitas no calculadas
Justificadas	Incógnitas ya calculadas
Cabeza, Cola	Variables evaluadas o usadas para evaluar una interpretación
NOBS	Conjunto de incógnitas de H_{SD}
R.nobs	Incógnitas de una relación R
I.nobs	Incógnitas de una interpretación I

B.2. Cálculo de Cadenas

Algoritmo Calcular-cadenas (CCEM) **es**

Inicio
Disponibles := Lista-restricciones(H_{SD});
mientras Disponibles $\neq \{\}$ *hacer*
R := Elegir-r(Disponibles);
Cadena := {R};
Disponibles := Disponibles \ R;
Por-justificar := R.nobs;
Justificadas := {};
Justificar (CCEM, Cadena, Por-justificar, Justificadas, Disponibles);
fin mientras
Fin

Algoritmo Justificar (CCEM, Cadena, Por-justificar, Justificadas, Disponibles) **es**

Inicio
si Por-justificar = {} *entonces*
si $\neg \exists$ Cadena2 en CCEM | Cadena2 contenida en Cadena *entonces*
Eliminar de CCEM los superconjuntos de Cadena;
Insertar Cadena en CCEM;
fin si
sino
repetir
v := Elegir-variable (Por-justificar);
Relacionadas := R | R \in Disponibles y v \in R.nobs;
mientras Relacionadas $\neq \{\}$ *hacer*
R1 := elegir-r (Relacionadas);
Insertar R1 en Cadena;
Por-justificar := (Por-justificar \ v) \cup R1.nobs;

Insertar v en Justificadas;
Disponibles := Disponibles \ R1;
Justificar (CCEM, Cadena, Por-justificar, Justificadas, Disponibles);
fin mientras
hasta que Por-justificar = {}
fin si
Fin

B.3. Cálculo de MEMs

Algoritmo Construir-modelos (CCEM, CMEM) **es**

Inicio
para Cadena = cada CEM en CCEM *hacer*
para R = cada restricción en Cadena *hacer*
para I = cada Interpretación de R *hacer*
Modelo := {I};
Por-justificar := I.nobs;
Justificadas := {};
Construir-modelo (Modelo, Cadena \ {R}, Por-justificar, Justificadas, CMEM);
fin para
fin para
fin para
Fin

Algoritmo Construir-modelo (Modelo, Disponibles, Por-justificar, Justificadas, CMEM) **es**

Inicio
si Por-justificar = {} y Disponibles = {} *entonces*
es
si \exists_1 nodo discrepancia en Modelo *entonces*
Insertar Modelo en CMEM;
fin si
sino
para S = cada restricción en Disponibles *hacer*
si S.nobs \cap Por-justificar = \emptyset *entonces*
para I2 = cada interpretación de S *hacer*
si cabeza(I2) \cap Por-justificar $\neq \emptyset$ *entonces*
Insertar {I2} en Modelo;
disponibles := disponibles \ {S};
Por-justificar := (Por-justificar \ cabeza(I2)) \cup (cola(I2).nobs \ Justificadas);
Insertar cabeza(I2) en Justificadas;
Construir-modelo (Modelo, disponibles, por-justificar, justificadas, CMEM);
fin si
fin para
fin si
fin para
Fin