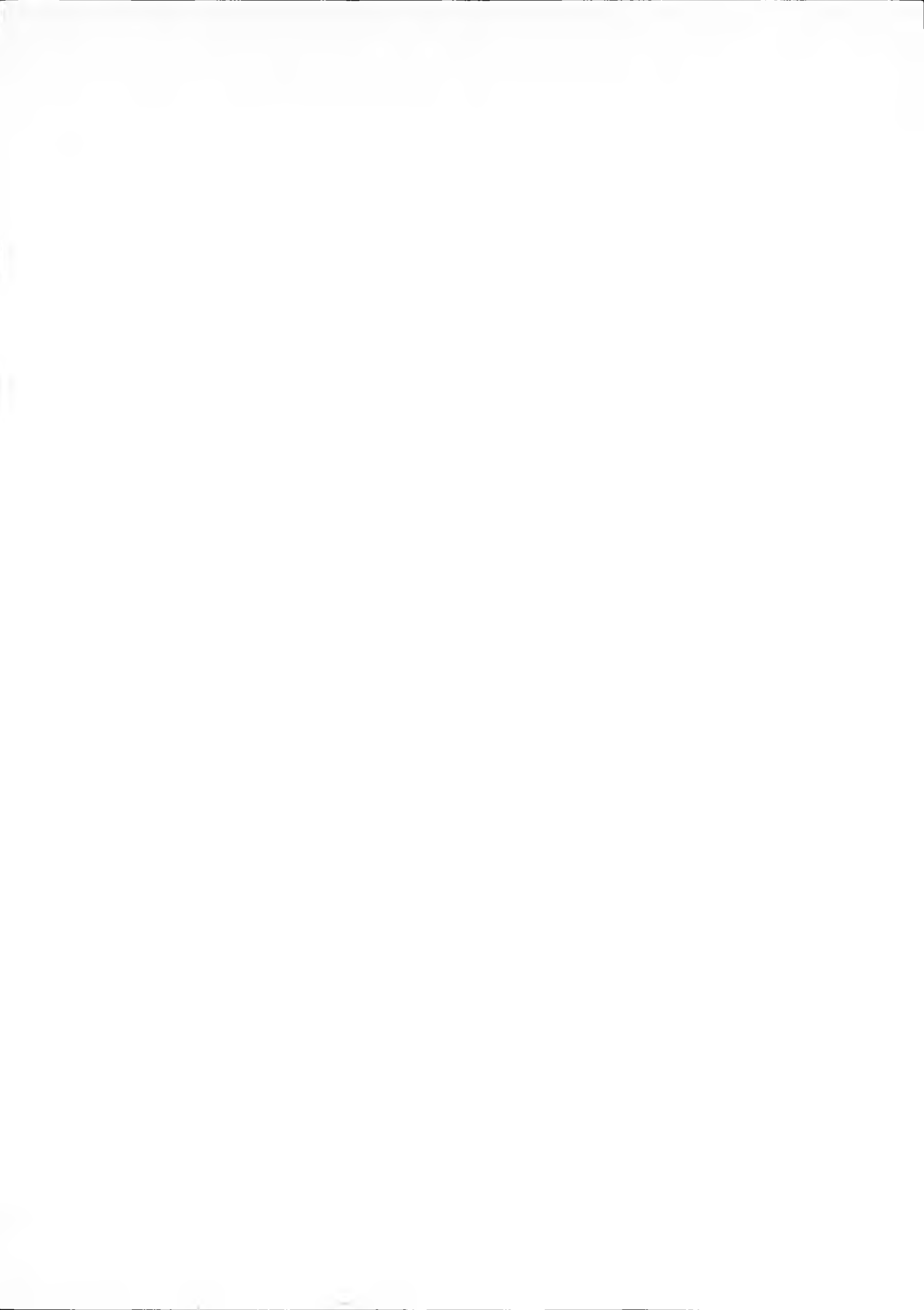


UNIVERSIDAD DE DEUSTO

Facultad de Informática

DISEÑO DE UN ALGORITMO CONSTRUCTIVO DE
SIMULACIÓN CUALITATIVA DE SISTEMAS FÍSICOS
PARA SU APLICACIÓN EN ENTORNOS DE APRENDIZAJE

José Luis del Val Román



ANEXO

UNIVERSIDAD DE DEUSTO TERCER CICLO

PROGRAMA:

CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

DISEÑO DE UN ALGORITMO CONSTRUCTIVO DE SIMULACIÓN
CUALITATIVA DE SISTEMAS FÍSICOS PARA SU APLICACIÓN EN
ENTORNOS DE APRENDIZAJE

Tesis doctoral presentada por D. José Luis del Val Román

Dirigida por el Dr. Enrique Burguera Montoya

El Director

El Doctorando

Bilbao, 26 de marzo de 1996



RESUMEN

Hemos realizado un examen de ciertos algoritmos de simulación cualitativa existentes, obteniendo una clasificación de los mismo de acuerdo con su carácter constructivo o no constructivo. Además hemos desarrollado una arquitectura de razonamiento cualitativo para ser empleada en la simulación de la evolución de un sistema físico, empleando información cuantitativa y cualitativa para describir las relaciones entre las variables del modelo. Por otro lado hemos separado las inferencias relacionadas con el tiempo con las relacionadas con los valores reales. El hecho de haber creado un algoritmo constructivo permite considerarlo como una analogía cualitativa de la simulación numérica convencional, ordenando las ecuaciones causalmente. Hemos introducido además el concepto de planos diferenciales, que nos permite representar sistemas físicos de orden elevado ajustando la complejidad del modelo a nuestras necesidades. Finalmente, hemos aplicado nuestro algoritmo a varios sistemas físicos con el fin de comprobar su validez.

ABSTRACT

The algorithm structures of a number of existing techniques for qualitative simulation are examined and compared, and this leads to a new way of classifying such techniques according to whether they use constructive or non constructive processes. Besides, an architecture for qualitative reasoning is presented which can be employed to simulate the dynamic evolution of a physical system, using quantitative and qualitative information for describing the relationship between the system variables. One important feature of the algorithm is that it separates reasoning to do with time from reasoning to do with real value. Because of its constructive nature, the algorithm may be regarded as the qualitative analogue of the numerical simulation. The equations of the system model are causally ordered. We have introduced the notion of differential planes, to model high-order systems and adjusting the complexity of the model to the user's requirements. The algorithm is applied to a number of examples.



AGRADECIMIENTOS

- A todos mis compañeros de la Universidad, que con su apoyo e insistencia han hecho posible que finalmente haya conseguido poner punto final a esta tesis.
- Al Dr. Enrique Burguera, mi director de tesis, por su apoyo, sus consejos y las orientaciones sobre el contenido y la estructura de esta tesis, y sin cuya ayuda me hubiera sido imposible llevar a cabo la misma.
- Y finalmente, a Rebeca, que con su infinita paciencia me ha sabido comprender y apoyar durante estos años.



A Jesús y Carmen



7.4.- COMPLEJO DE LA CALDERA DE LA CENTRAL DE SANTURCE	198
7.4.1.- Modelo SIMNON de la Turbina de Recirculacion de Gas	200
7.4.2.- Modelo SIMNON del Intercambiador	202
7.4.3.- Turbina de Recirculacion de Gas: modelo cualltativo y respuesta	204
7.4.4.- Intercambiador : modelo cualltativo y respuesta	211
8.- CONCLUSIONES	219
8.1.- RESUMEN	219
8.2.- FUTUROS DESARROLLOS	223
APENDICE A: EL INTERFAZ DEL MOTOR PREDICTIVO	227
APENDICE B: OPERACIÓN DEL ALGORITMO PREDICTIVO	233
APENDICE C: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA EL COMPLEJO DE LA CALDERA	237
BIBLIOGRAFÍA	249

INDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- AMBITO, MOTIVACIÓN E INTERÉS DEL TRABAJO	1
1.2.- ESTRUCTURA DE LA TESIS	4
2.- HISTORIA Y ESTADO ACTUAL DE LA MATERIA	7
2.1.- INTRODUCCIÓN	7
2.2.- SISTEMAS DE TUTORÍA INTELIGENTES	8
2.3.- MODELOS MENTALES, CUANTITATIVOS Y CUALITATIVOS	10
2.4.- SIMULACIÓN CUALITATIVA EN LOS SISTEMAS DE TUTORÍA INTELIGENTES	12
2.5.- UTILIZACIÓN DE LOS MÚLTIPLES MODELOS EN LOS SISTEMAS DE TUTORÍA INTELIGENTES	16
2.6.- LA SIMULACIÓN CUALITATIVA	21
2.6.1.- El Algoritmo OSIM	22
2.6.2.- Análisis Temporal Cualitativo	32
2.6.2.1.- Propagación Causal	34
2.6.2.2.- Análisis de Transiciones	36
2.6.3.- Simulación e Imaginación	43
2.6.4.- El Propagador de Restricciones Temporales	50
2.7.- RESUMEN	52

3.- LA RETÍCULA CUANTITATIVA	55
3.1. INTRODUCCIÓN	55
3.2.- EL MÓDULO GRÁFICO DIRIGIDO	58
3.2.1.- Estructura Algebraica	58
3.2.2.- Relaciones transitivas y relaciones ordinales combinadas	61
3.2.3.- Algoritmo de búsqueda gráfico	63
3.2.4.- Relaciones no convexas	66
3.2.5.- Funcionalidad del módulo Grafo Dirigido	69
3.3.- EL MODULO RETÍCULA CUANTITATIVA	70
3.3.1.- Propagación de restricciones numéricas	70
3.3.2.- Aritmética de Intervalos	72
3.3.3.- Relaciones entre los órdenes de magnitud	77
3.3.4.- Aritmética Relacional y de Expresiones	78
3.3.5.- Inferencias hacia atrás.	83
3.3.6.- Razonamiento No-monotónico	87
3.3.7.- Funcionalidad del módulo Retícula Cuantitativa	88
3.4.- RESUMEN	89
4.- ARQUITECTURA DEL MOTOR PREDICTIVO	91
4.1.- INTRODUCCIÓN	91
4.2.- EL ESPACIO CUANTITATIVO	94
4.2.1.- Valores Cualitativos	94
4.2.2.- Mantenimiento de valores cualltativos	97
4.2.3.- Funcionalidad del módulo Espacio Cuantitativo	103
4.2.4.- Conceptos alternativos del valor cualltativo	103
4.3.- EL COMPILADOR	107
4.3.1.- Análisis del Fichero Modelo	107
4.3.2.- Compilación de las ecuaciones del sistema	110
4.3.3.- Generación del álgebra parcial.	112
4.3.4.- Posibles mejoras	114
4.4.- EL ESPACIO TEMPORAL	115
4.4.1.- Representación del Tiempo	115
4.4.2.- El tiempo y las discontinuidades	117
4.4.3.- Duración	118
4.4.4.- Funcionalidad del módulo Espacio Temporal	119
4.5.- RESUMEN	120

5.- EL ALGORITMO PREDICTIVO	121
5.1.- INTRODUCCIÓN	121
5.2.- EVENTOS	123
5.3.- EL ALGORITMO PREDICTIVO	127
5.3.1.- Introducción	127
5.3.2.- Propagación Causal	129
5.3.3.- Integración Cualitativa	134
5.3.4.- Reconocimiento de Transiciones	137
5.3.5.- Ordenación de Transiciones	139
5.4.- COMPROBACIONES DE VALIDEZ EN LA PROPAGACIÓN CASUAL	143
5.5.- ORDENACIÓN DE PRIORIDADES	146
5.6.- RESUMEN	148
6.- ESPECIFICACIÓN DE LOS MODELOS CUALITATIVOS	149
6.1.- INTRODUCCIÓN	149
6.2.- EJEMPLOS DE SISTEMAS FÍSICOS	150
6.2.1.- Tanque simple con flujo laminar	150
6.2.2.- Tanque simple con flujo turbulento	151
6.2.3.- Dos tanques acoplados con flujos laminares	152
6.3.- ESTRUCTURA DE LAS ECUACIONES DEL MODELO	153
6.4.- ESPECIFICACION DE LOS MODELOS CUALITATIVOS	158
6.4.1.- Espacios cuantitativos	158
6.4.2.- Restricciones	159
6.4.3.- Ecuaciones del sistema	161
6.5.- PLANOS DIFERENCIALES DE ORDEN ELEVADO	166
6.6.- FUNCIONES DE ENTRADA	170
6.7.-RESUMEN	172
7.- RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION	173
7.1.- INTRODUCCIÓN	173
7.2.- SISTEMAS HIDRÁULICOS SIMPLES	174
7.2.1.- Tanque simple con flujo laminar	174
7.2.2.- Tanque simple con flujo turbulento	179
7.2.3. Dos tanques acoplados con flujo laminar	182
7.3.- INTERCAMBIADOR DE CALOR	189
7.3.1.- Circuito del fluido	190
7.3.2.- Ciclo de temperatura	193

7.4.- COMPLEJO DE LA CALDERA DE LA CENTRAL DE SANTURCE	198
7.4.1.- Modelo SIMNON de la Turbina de Recirculacion de Gas	200
7.4.2.- Modelo SIMNON del Intercambiador	202
7.4.3.- Turbina de Recirculacion de Gas: modelo cualitativo y respuesta	204
7.4.4.- Intercambiador : modelo cualitativo y respuesta	211
8.- CONCLUSIONES	219
8.1.- RESUMEN	219
8.2.- FUTUROS DESARROLLOS	223
APENDICE A: EL INTERFAZ DEL MOTOR PREDICTIVO	227
APENDICE B: OPERACIÓN DEL ALGORITMO PREDICTIVO	233
APENDICE C: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA EL COMPLEJO DE LA CALDERA	237
BIBLIOGRAFÍA	249

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Masa con un muelle	26
Figura 3-1 Arquitectura del Motor Predictivo	56
Figura 3-2 Ejemplo de Grafo Dirigido D' (N' , A')	60
Figura 3-3: Ejemplo de Grafo Dirigido D'' (N'' , A'')	66
Figura 4-1 Arquitectura del Motor Predictivo y el compilador	92
Figura 4-2 Espacio Cuantitativo de x	94
Figura 4-3: Retícula Cuantitativa de x	98
Figura 4-4: Quantity Lattice de x e y	99
Figura 4-5: Valores correspondientes para a , b y c	101
Figura 5-1: Diagrama de flujo del Algoritmo Predictivo	128
Figura 5-2: Diagrama de flujo de la Ordenación de transiciones	139
Figura 5-3: Diagrama de flujo de la Ordenación de Prioridades	147
Figura 6-1 Tanque simple	150
Figura 6-2 Tanques acoplados	152
Figura 6-3 Ordenación Causal Dinámica en el Tanque simple con flujo laminar	154
Figura 6-4 Ordenación Causal Estática en un Tanque simple con flujo laminar	155
Figura 6-5 Ordenación Causal en los Tanques acoplados con Flujo laminar	156

Figura 7-1 Tanque simple con Flujo Laminar - Planos Insuficientes	176
Figura 7.2 Tanque Simple con Flujo Laminar - Respuesta a una rampa	177
Figura 7-3 Tanque simple con Flujo Laminar - Demasiados planos	178
Figura 7.4 Tanque Simple con Flujo Laminar - Respuesta a una rampa	178
Figura 7-5 Tanque Simple con Flujo Turbulento - Respuesta a una rampa	181
<i>Figura 7-6 Dos Tanques acoplados - Respuesta a un escalón en t_d</i>	183
Figura 7-7 Dos tanques acoplados. Respuesta a una escalón en t_b	184
Figura 7-8 Dos tanques acoplados. Estructura simétrica	185
Figura 7-9 Dos tanques acoplados. Respuesta a una escalón en t_{11}	186
Figura 7-10 Dos tanques acoplados. Respuesta a una escalón	186
Figura 7-11 Dos Tanques Acoplados. Traza del Algoritmo	188
Figura 7-12 El proceso del Intercambiador de Calor	189
Figura 7-13: Estructura Cualitativa del Flujo	192
Figura 7-14: Flujo: respuesta a un escalón.	192
Figura 7-15 Estructura Cualitativa del Ciclo de Temperatura	195
Figura 7-16 Ciclo de Temperatura: Primera respuesta a un escalón	196
Figura 7-17 Ciclo de Temperatura: Segunda respuesta a un escalón	196
Figura 7-18 Ciclo de Temperatura: Segunda respuesta a un escalón	197
Figura 7-19 Complejo de Caldera de la Planta de Santurce	198
Figura 7-20 Relación entre los Subsistemas de la Caldera	199
Figura 7-21 Estructura Cualitativa de la Turbina de recirculación de gas	205
Figura 7-22: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un escalón en DP2P1	208
Figura 7-23: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un Escalón en cra	208
Figura 7-24: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un Escalón en Tetr g	209
Figura 7-25: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un Escalón en wg	209
Figura 7-26: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un Escalón en Tg	210
Figura 7-27 Estructura cualitativa del recalentador	214
Figura 7-28: Intercambiador: Respuesta (1) a un escalón en cra	215

Figura 7-29: Intercambiador: Respuesta (2) a un escalón en $cr16$	216
Figura A-1: Un Mapa de Eventos	230
Figura B-1: Entrada aplicada a q_e'	234
Figura B-2: Propagación Causal (1)	234
Figura B-3: Integración Cualitativa (1)	234
Figura B-4: Propagación Causal (2)	235
Figura B-5: Integración Cualitativa (2)	235
Figura B-6: Propagación Causal (3)	235
Figura B-7: Reconocimiento de Transiciones	236
Figura B-9: Propagación Causal	236
Figura B-9: Fin del Algoritmo	236
Figura C-1: Gráfico de cra en %	238
Figura C-2: Gráfico de $Tetrg$, Tg y $Tstrg$ en °Celsius	239
Figura C-3: Gráfico de $wegin$, wg y $wstrg$ en lb/s	240
Figura C-4: Gráfico de $pevin$, $Psvin$ en PSI	241
Figura C-5: Gráfico de qin en Kbtu/s	242
Figura C-6: Gráfico de $kwevin$ y $wsvin$ en Klb/s	243
Figura C-7: Gráfico de $devin$ en lb/ft ³	244
Figura C-8: Gráfico de $hevin$ y $hsvin$ en %	245
Figura C-9: Gráfico de $dhsvin/dt$ en btu/s	246
Figura C-10: Gráfico de $CTsvin$ en °Celsius (Sin TRG)	247
Figura C-11: Gráfico de $CTsvin$ en °Celsius	248



INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Clasificación de los Algoritmos de Simulación Cualitativa	53
Tabla 3-1: Reglas de Transitividad de Relaciones Ordinales en Serie	62
Tabla 3-2: Reglas de Combinación de Relaciones Ordinales en Paralelo	62
Tabla 3-3: Multiplicación en los números Reales Extendidos.	74
Tabla 3-4: División en los números Reales Extendidos	75
Tabla 3-5: $\ln(\cdot)$ en los números Reales Extendidos	75
Tabla 3-6: $e^{(\cdot)}$ en los números Reales Extendidos	75
Tabla 4-1: Tabla simbólica de x	97
Tabla 4-2 Tabla Simbólica de x e y	99
Tabla 4-3: Tabla simbólica de a, b y c	108



1.- INTRODUCCION

1.1.- Ambito, motivación e interés del trabajo

El desarrollo de una formalización a gran escala de nuestro conocimiento acerca del mundo físico fue sugerido en primer lugar en [Hayes 1978]. Entre las distintas propuestas que se han realizado desde entonces, se encuentra la de utilizar unas ciertas *cualidades* para describir las propiedades de los objetos del mundo físico. Los conjuntos ordenados de estas cualidades formarían espacios, y deberían especificarse reglas de inferencia acerca del modo en que podrían evolucionar sus propiedades a través de los espacios a lo largo del tiempo. Aunque los requerimientos originales de formalismo no siempre se observaron, esta noción básica condujo la investigación del *razonamiento cualitativo* acerca de sistemas físicos, también conocido como *física cualitativa*.

La motivación original del razonamiento cualitativo podría fijarse en el deseo de desarrollar sistemas capaces de razonar acerca del mundo físico, utilizando un modelo que refleje la evidencia del proceso de pensamiento humano. El uso de cualidades, expresado simbólicamente, para describir los rangos de propiedades del sistema físico, es un intento de definir y razonar acerca del comportamiento del sistema en *términos humanos*. El interés de la aplicación de algunas formas de razonamiento cualitativo se demostró tempranamente en diversas actividades, como por ejemplo la resolución de

problemas mecánicos, el diagnóstico de fallos en circuitos electrónicos y el diseño de circuitos electrónicos. A medida que se extendía el área de investigación y se consideraban nuevos ejemplos, creció el interés en la investigación de sistemas dinámicos continuos con modelos parametrizables. Esta clase de sistemas se han expresado, tradicionalmente, mediante modelos de ecuaciones diferenciales que involucran variables del sistema. La noción de *cuallidad* se convirtió en una abstracción del rango de los valores reales mediante su división en puntos simbólicos e intervalos abiertos entre ellos. En [Weld 1990] podemos encontrar aspectos interesantes sobre el desarrollo histórico del razonamiento cualitativo como un área de la Inteligencia Artificial; este trabajo de compilación contiene algunas de las referencias que hemos empleado en esta tesis y puede consultarse en lugar de las fuentes originales que citaremos.

Además de considerar una gran variedad de tareas, tales como el diseño, el diagnóstico, la explicación, el entrenamiento, etc. la investigación acerca del razonamiento cualitativo también se ha organizado en torno a la consideración de técnicas básicas. La técnica de obtener el comportamiento de un sistema en términos puramente cualitativos se conoce como *simulación cualitativa*; es éste el área particular en el que hemos centrado el trabajo de esta tesis.

La aplicación del razonamiento cualitativo a los sistemas dinámicos, y en particular la técnica de la *simulación cualitativa*, ha modificado el interés original en el uso de métodos cualitativos como sistemas de razonamiento en términos humanos. El desarrollo de modelos cualitativos para los sistemas físicos se ha considerado recientemente como un medio de razonar a partir del *conocimiento incompleto* de las relaciones funcionales entre las variables del sistema, y también como un medio de simplificar la consideración de sistemas altamente complejos. La motivación que subyace en el trabajo de esta tesis es posibilitar la inferencia del comportamiento de un sistema físico a partir del conocimiento incompleto acerca del mismo, y explicar el comportamiento del sistema en términos simples. No nos hemos alejado, sin embargo, del objetivo original de la simulación cualitativa de expresar el comportamiento del sistema en términos humanos; no en vano, el área de aplicación de la simulación ha sido la enseñanza en la operación de sistemas físicos industriales complejos.

Además del ámbito de la simulación cualitativa, este trabajo debe enmarcarse dentro del área más general de la construcción de Sistemas de Entrenamiento Inteligentes y especialmente en el sector industrial para el manejo

de sistemas físicos industriales complejos. Esta aplicación específica de la simulación cualitativa ha condicionado nuestro trabajo a la consecución de unas características determinadas.

Los trabajos en el área de los Sistemas de Entrenamiento Inteligentes han sido muy numerosos en los últimos años. El marco teórico adoptado generalmente en su desarrollo ha sido intentar capturar el conocimiento experto mediante un pequeño conjunto de modelos mentales. El propósito del Sistema de Entrenamiento es desarrollar en los estudiantes una progresión de modelos mentales incrementalmente sofisticados para razonar acerca del comportamiento de un sistema.

Además de ser estructuras de conocimiento eficaces para los estudiantes, los modelos mentales se han revelado también como estructuras de conocimiento eficaces sobre las que basar un Sistema de Entrenamiento Inteligente. Los modelos mentales hacen posible, si se diseñan de manera apropiada, que tanto el sistema instruccional como el estudiante razonen a partir de principios generales y, además, sirven para generar explicaciones causales del comportamiento del sistema en estudio.

Los modelos que se emplearon en primer lugar en los Sistemas de Entrenamiento fueron modelos cuantitativos; sin embargo, los estudios de de Kleer [de Kleer 1984b] demostraron la importancia del razonamiento cualitativo en el aprendizaje. De acuerdo con estos estudios y algunos posteriores [de Kleer 1986a, Chi 1991a], los Sistemas de Entrenamiento Inteligentes deberían emplear modelos cualitativos que, además, deberían permitir generar explicaciones causales de los cambios que se producen en los estados de los elementos durante el funcionamiento de un sistema. Por lo tanto, estos modelos deberían ser capaces de razonar sobre los estados de los elementos y sobre los procesos que llevan a cambios en esos estados.

El análisis de las necesidades de un Sistema de Entrenamiento Inteligente nos condujo a la identificación de las características principales que debía tener un algoritmo de simulación cualitativa para su utilización en este ámbito.

Resulta necesario poder representar separadamente el conocimiento cualitativo del conocimiento temporal, con el fin de poder presentar al alumno una secuencia de estados en lugar de un único resultado final, de modo que

pueda contemplarse la evolución del sistema y analizar el por qué de su comportamiento. Igualmente es necesario obtener como resultado de la simulación una única secuencia de estados del sistema físico y no todas las posibles secuencias. Como veremos, esto nos ha obligado a que nuestro algoritmo sea de naturaleza constructiva, lo que por otro lado ha redundado en beneficios respecto del rendimiento del algoritmo.

La naturaleza de los sistemas físicos a representar es muy diversa, debiendo utilizar en muchos casos modelos que incluyen ecuaciones de orden elevado. Para solucionar este problema hemos definido los Planos Diferenciales, que además de permitirnos representar y manejar estos modelos, también nos permiten eliminar la ecuación de orden superior con el fin de evitar inestabilidades en la simulación en caso de que estas se produzcan.

La utilización del algoritmo de simulación cualitativa en un sistema de entrenamiento supone que el resultado de la simulación sea tratable por otras aplicaciones, además representable gráficamente para su interpretación por parte de un alumno. Finalmente, concluimos que nuestro algoritmo de simulación debe producir siempre respuestas plausibles, de forma que si no encuentra una solución no proporcione ninguna salida.

La revisión de los distintos algoritmos de simulación cualitativa diseñados y documentados hasta ahora ha demostrado que dado su carácter general no resultaban adecuados para su aplicación en Sistemas de Entrenamiento, al no recoger alguna o ninguna de las características anteriores.

El principal interés de esta tesis ha sido, por lo tanto, la definición de un sistema de simulación cualitativa que recogiendo todas las características anteriores permita la utilización de múltiples modelos y por lo tanto, refinar el conocimiento del aprendiz con distintos grados exactitud y complejidad y que permita no sólo simular la evolución del sistema físico dinámico ante las manipulaciones del estudiante, sino analizar las respuestas del mismo y generar explicaciones cualitativas acerca del comportamiento del sistema y de los cambios de estado de sus variables.

Para hacer frente a estas necesidades nos hemos planteamos la especificación de una arquitectura nueva capaz de representar el conocimiento cualitativo y cuantitativo acerca del sistema físico y especificar y diseñar una

herramienta que fuera capaz de efectuar predicciones a partir de un dominio de conocimiento incompleto.

En nuestro diseño de arquitectura hemos adoptado una estructura modular, tratando de separar el razonamiento basado en los valores cualitativos del razonamiento basado en el tiempo. Este último aspecto nos ha resultado clave para, registrando la información temporal en un módulo específico, poder lograr explicaciones sobre el orden de modificación de las variables del sistema.

En esta memoria hemos recogido las especificaciones de diseño del Motor Predictivo que implementa las técnicas básicas de simulación cualitativa de sistemas dinámicos continuos necesarias para su uso en un Sistema de Entrenamiento Inteligente.

1.2.- Estructura de la Tesis

Uno de los objetivos iniciales previos al inicio de este trabajo fue la clarificación del trabajo existente hasta el momento en el área de la simulación cualitativa, antes de embarcarnos en la tarea de diseñar nuestro Algoritmo Predictivo. En el Capítulo 2 hemos presentado detalladamente los principales métodos de simulación cualitativa desarrollados y publicados hasta el momento actual. Esta revisión nos ha servido para proponer criterios de clasificación de los distintos algoritmos, principalmente en relación con el uso de procesos constructivos y no constructivos. El análisis de las características de estos algoritmos ha servido para manifestar la preferencia en la utilización de procesos constructivos en el diseño de nuestro sistema de simulación cualitativa. Estos procesos son generalmente más eficientes que los no constructivos, y además, pueden reflejar un sentido de causalidad de manera intuitiva en la simulación del comportamiento del sistema físico que resulta de gran utilidad en tareas tales como la explicación y el diagnóstico. Esto último resulta de importancia capital cuando el sistema de simulación cualitativa va a ser empleado en un entorno de aprendizaje, donde es necesario proporcionar una explicación del comportamiento del sistema y no sólo simular éste.

Hemos incluido en este capítulo algunas explicaciones acerca de las características principales del Algoritmo Predictivo, por comparación con las de los otros algoritmos que hemos revisado; sin embargo, el lector puede obviar

estas referencias en una primera lectura para encontrarlas más detalladamente en los capítulos posteriores.

Consideramos de importancia capital utilizar en nuestro sistema de simulación un diseño modular que proporcione extensibilidad y generalidad. Es por ello que el diseño de la Arquitectura del Motor Predictivo constituye la parte principal del trabajo, puesto que es aquí donde se implementan estos requerimientos. Los Capítulos 3 y 4 presentan los módulos que constituyen la arquitectura del Motor Predictivo. La estructura está basada en la utilización el uso de un razonador general de desigualdades que es capaz de manejar expresiones que contienen tanto términos simbólicos como valores reales. En el Capítulo 3 detallamos el funcionamiento y estructura de este razonador. El Capítulo 4 nuestro como hemos separado dentro del Motor Predictivo el razonamiento acerca de los valores cualitativos del razonamiento acerca del tiempo.

En el Capítulo 5 presentamos el algoritmo de simulación que hace uso de la arquitectura anterior. Este Motor Predictivo está organizado como un conjunto de fases distintas que operan sobre tuplas valor/tiempo que contienen el comportamiento cualitativo de las variables del sistema. En el Capítulo 6 discutimos la información que es necesario detallar en el modelo cualitativo para que el Algoritmo Predictivo pueda operar sobre él. Introduciremos en este capítulo la noción de planos diferenciales para representar la información sobre la estructura de orden elevado del sistema, y proporcionaremos criterios para determinar hasta que nivel deberíamos incluir información.

El Capítulo 7 está dedicado a la aplicación del Motor Predictivo a un grupo de sistemas físicos, incluyendo un estudio a escala industrial. Para todos los ejemplos considerados, mostraremos como pueden determinarse los modelos cualitativos apropiados y presentaremos los resultados de la operación del Algoritmo Predictivo. Las conclusiones derivadas de esta experimentación y las recomendaciones de futuros trabajos están recogidas en el Capítulo 8.

2.- HISTORIA Y ESTADO ACTUAL DE LA MATERIA

2.1.- Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar razonadamente la evolución que han experimentado los Sistemas de Entrenamiento basados en ordenador y, en especial, la importancia que tiene para ellos la simulación cualitativa. Revisaremos los desarrollos más representativos dentro de los Sistemas de Entrenamiento, los avances que presentaron y las limitaciones que tenían.

Examinaremos también en este capítulo los algoritmos de simulación cualitativa más relevantes desarrollados y publicados hasta el momento, haciendo especial referencia a la idoneidad de sus características para su utilización en los Sistemas de Entrenamiento. En este sentido, sugeriremos una nueva clasificación de estos algoritmos que nos parece especialmente relevante para el área de la enseñanza asistida. Esto nos servirá para introducir algunas de las características del Algoritmo Predictivo que le hacen especialmente apropiado para su uso en Sistemas Tutores Inteligentes. De esta forma se justifica el trabajo que se presenta en los capítulos siguientes y se ilustran los factores que han conducido al diseño del Algoritmo Predictivo. El Algoritmo Predictivo se describe completamente en los capítulos siguientes por lo que la presentación del mismo en el presente capítulo es poco ortodoxa y meramente introductoria; el lector de esta tesis podrá seguramente ignorar las referencias al Algoritmo Predictivo en este capítulo en una primera lectura.

2.2.- Sistemas de Tutoría Inteligentes

El desarrollo de entornos de entrenamiento asistidos por ordenador ha sido un área de trabajo muy activa desde la década de los 70, habiendo despertado un gran interés su aplicación al aprendizaje práctico y al re-entrenamiento en entornos Industriales, principalmente por sus aplicaciones para el adiestramiento en la utilización de sistemas de control.

El aprendizaje acerca de las tareas de mantenimiento, control y diagnóstico de fallos de los procesos Industriales requiere años de práctica y entrenamiento, durante los cuales el operador alcanza a comprender la naturaleza física del proceso que controla y adquiere destreza en el manejo de problemas operativos extraños y en emergencias.

La tendencia hacia una mayor automatización de la industria ha hecho que los operadores no tengan la oportunidad de adiestrarse mediante la experiencia operacional directa con el proceso, y por ello se ha generalizado el uso de sistemas de entrenamiento basados en ordenadores para complementar los programas de instrucción convencionales.

El modelo primitivo de los sistemas EBC (Enseñanza Basada en Computador) estuvo profundamente influenciado por una visión del aprendizaje basada en el comportamiento. Este enfoque constituyó el fundamento de una metodología de instrucción basada en la Programación Lineal que se empleó con profusión en los años 50 y 60. Siguiendo este enfoque, se proporciona una reallimentación inmediata a la respuesta del usuario a una serie de cuestiones, forzando de este modo respuestas correctas.

Pronto se apreciaron las limitaciones que presentaba una secuencia fija de problemas y se desarrollaron "programas arborescentes" que modificaban la secuencia de aprendizaje basándose en las respuestas del usuario. Esto último hizo mucho más efectivos los sistemas EBC, pero sin embargo, hizo que el diseño de las estrategias de aprendizaje resultara complicado e incluso imposible en dominios complejos.

Esta dificultad condujo posteriormente a la introducción de los "lenguajes de autor", cuya finalidad era facilitar el desarrollo de programas instruccionales. Estos sistemas sólo precisan unas estrategias generales de entrenamiento para

producir un árbol de Interacciones posibles con un gran número de ramas. Este es, en general, el estado actual de los sistemas EBC comerciales, si bien se han hecho considerables avances en la presentación del material mediante el uso de técnicas gráficas, de audio y de vídeo interactivo.

La limitación fundamental que está presente en todas estas consideraciones es que el material a enseñar y la forma en que éste se selecciona están unidos en la estrategia implícita. Esto hace muy difícil modificar o extender el material, y también restringe la posibilidad de elección o modificación de la estrategia particular empleada. Los sistemas EBC también se caracterizan por tener una conciencia limitada del conocimiento que posee el usuario acerca del material a aprender, dado que se deben limitar a juicios binarios sobre las respuestas y al registro de progreso del estudiante. En estos sistemas, la evaluación del conocimiento del aprendiz se basa en medidas globales de las respuestas, en lugar de en una representación explícita del conocimiento.

Uno de los aspectos importantes, y quizás el más significativo en los estudios sobre sistemas basados en el conocimiento es el reconocimiento de los beneficios conseguidos por una separación clara entre el dominio del conocimiento (material a enseñar) y el modo en que se utiliza (estrategia instruccional). Esta separación permite considerar de forma independiente el mejor modo de representar el dominio del conocimiento para un problema dado, y el modo en que puede usarse éste más efectivamente. La aplicación de estos principios a los sistemas EBC ha conducido al desarrollo de Sistemas Tutores Inteligentes (STI).

Dentro de los STI podemos distinguir tres elementos básicos: el modelo del dominio, el modelo del usuario y el tutor.

El modelo del dominio es el conocimiento a enseñar al alumno. El modelo del usuario se emplea para representar y valorar el entendimiento actual del alumno o sus progresos en el conocimiento acerca del modelo del dominio (en la mayor parte de los casos se representa como un subconjunto del modelo del dominio). Finalmente, el tutor controla cómo y en qué orden deben introducirse los conceptos y monitoriza el progreso del usuario al resolver problemas.

Mediante una arquitectura de este tipo, se consigue separar el conocimiento a enseñar de la estrategia instruccional a emplear para ello, a la vez que se dispone de una herramienta de evaluación mucho más poderosa que en los sistemas EBC. Los estudios y publicaciones acerca del modelo del dominio han sido muy frecuentes entre investigadores del área de la Inteligencia Artificial, centrándose en el desarrollo de formalismos de representación más adecuados del conocimiento.

2.3.- Modelos mentales, cuantitativos y cualitativos

El marco teórico adoptado generalmente en el desarrollo de los entornos de aprendizaje inteligentes es que el conocimiento experto se puede capturar mediante un pequeño conjunto de modelos mentales que cubren conceptos del funcionamiento de un sistema alternativos pero coordinados. Por ejemplo, los expertos utilizan tanto modelos cualitativos como cuantitativos y tanto modelos de comportamiento como modelos funcionales.

Los resultados de los estudios dentro de este área han demostrado que los estudiantes encuentran mayor motivación y aprenden con más eficacia cuando resuelven problemas aplicando sus conocimientos activamente. Para dar soporte a este aprendizaje práctico, el estudiante debe mantener, en todo momento, una estructura de conocimiento suficientemente completa. Por tanto, el propósito del entorno inteligente de aprendizaje es desarrollar en los estudiantes una progresión de modelos mentales incrementalmente sofisticados para razonar acerca del comportamiento de un sistema y cada uno de ellos capaz de dar soporte a la resolución de problemas prácticos parciales.

Como se apunta en [de Kleer 1984b], estos modelos pueden englobar conceptos y leyes, pueden generar explicaciones causales y hacen posible la resolución de problemas en un amplio rango de contextos. Esto contrasta, por ejemplo, con el conocimiento de localización de averías representado como asociaciones de síntoma-fallo que son específicas para un contexto y no explícitamente causales, y son, por tanto, de utilidad limitada para ayudar a los estudiantes a comprender cómo funcionan los sistemas.

Además de ser estructuras de conocimiento eficaces para los estudiantes, los modelos mentales son también estructuras de conocimiento eficaces sobre las que basar un STI. En cualquier punto en la evolución de conocimientos del estudiante, un único modelo puede proporcionar no sólo un modelo de cómo se desea que el estudiante razone, sino que también proporciona una simulación interactiva de un fenómeno del dominio. Esta simulación es capaz de generar explicaciones causales acerca del comportamiento de un sistema sobre el que el estudiante está operando y observando. Por tanto, los modelos mentales hacen posible, si se diseñan de manera apropiada, que tanto el sistema instruccional como el estudiante razonen a partir de principios generales y, además, sirven para generar explicaciones causales del comportamiento del sistema en estudio.

Los modelos que se emplearon en primer lugar en los sistemas de entrenamiento fueron modelos cuantitativos; sin embargo, los estudios de de Kleer [de Kleer 1984b] demostraron la importancia del razonamiento cualitativo en el aprendizaje.

De acuerdo con estos estudios y algunos posteriores [de Kleer 1986a], los STI deberían emplear modelos cualitativos que, además, deberían permitir generar explicaciones causales de los cambios que se producen en los estados de los elementos durante el funcionamiento de un sistema. Por lo tanto, estos modelos deberían ser capaces de razonar sobre los estados de los elementos y sobre los procesos que llevan a cambios en esos estados. Los conceptos y procesos de razonamiento empleados en los modelos cualitativos deberían, por ejemplo, ser compatibles con modelos cuantitativos del comportamiento de un sistema, con modelos físicos reducidos y con explicaciones funcionales de funcionamiento del sistema. Esto es importante, no sólo porque puede facilitar el aprendizaje de múltiples conceptos, sino porque razona éstos en el curso de la resolución de problemas.

La importancia del razonamiento cualitativo queda patente cuando se examina el comportamiento de principiantes y expertos en la resolución de problemas; tanto unos como otros emplean el razonamiento cualitativo en primer lugar. Los expertos razonan cualitativamente sobre los fenómenos antes de pasar a las formalizaciones cuantitativas, mientras que los principiantes son a menudo capaces solamente de llevar a cabo un razonamiento cualitativo. Este fenómeno se invierte cuando nos referimos a principiantes más experimentados, como estudiantes que han cursado uno o dos años de Física, cuyo razonamiento

es primordialmente cuantitativo e implica la búsqueda de ecuaciones que contengan los datos dados en el problema. Esta discrepancia se debe al énfasis que se concede durante la enseñanza de la física al aprendizaje de métodos cuantitativos y a la resolución de problemas cuantitativos. Los expertos, al igual que los principiantes, hacen uso extenso del razonamiento cualitativo; como observa de Kleer "un Ingeniero no lleva a cabo un análisis cuantitativo a menos que primero comprenda el circuito en un nivel cuantitativo" [de Kleer 1984c].

De acuerdo con lo explicado anteriormente, los estudiantes deberían estar expuestos inicialmente a un razonamiento causal cualitativo de manera que sean capaces de hacer conexiones con sus modelos intuitivos de los fenómenos físicos y puedan adquirir esta habilidad para resolver problemas que la evidencia demuestra que no tienen.

2.4.- Simulación Cualitativa en los Sistemas de Tutoría Inteligentes

El razonamiento cuantitativo debería introducirse sólo después de que los estudiantes hayan tenido una concepción causal y cualitativa del dominio y, el razonamiento cuantitativo enseñado después, debería ser una extensión lógica del razonamiento cualitativo ya adquirido. Además, el razonamiento causal y cualitativo debería construirse sobre la intuición inexperta pero correcta de los estudiantes y, por tanto, debería ayudar a superar las intuiciones incorrectas. En este aspecto, debería ser compatible con el razonamiento empleado en dominios físicos, como la mecánica, sobre la cual los estudiantes pueden tener conocimiento y experiencia que puede utilizarse durante el aprendizaje. Debería ser también compatible con las intuiciones de los estudiantes sobre la naturaleza causal del mundo, como: "los cambios de estado tienen causas que los precipitan".

Pese a la aceptación casi general de la importancia de los modelos cualitativos en la enseñanza, los primeros STI no incluían simulaciones cualitativas debido a que la capacidad de los computadores resultaba insuficiente y a que el rendimiento de las simulaciones era muy pobre. En su lugar, empleaban simulaciones numéricas para soportar la enseñanza de los modelos cualitativos de los sistemas físicos.

El sistema más importante de los que han utilizado esta concepción es SOPHIE [Brown 1982a]. SOPHIE fue desarrollado como un laboratorio automatizado construido sobre un simulador electrónico de propósito general denominado SPICE, para que los alumnos construyeran e hicieran funcionar sus propios circuitos eléctricos. Los alumnos podían construir un circuito y observar al sistema experto. Este proporcionaba al estudiante explicaciones acerca del comportamiento de su circuito expresados en términos cualitativos en múltiples niveles. Sin embargo, estaba limitado por un árbol de decisión fijo y por lo tanto no podía seguir y entrenar en el proceso de resolución de problemas.

Este enfoque de combinar una simulación numérica con un sistema experto ha sido empleado en muchos STI y a pesar de las expectativas iniciales se ha encontrado que su uso resulta muy limitado para el entrenamiento [Clancey 1986a]. Hay demasiado conocimiento embebido dentro del sistema que no es explícito, proporcionando al alumno un acceso limitado al conocimiento. La Base de Conocimiento representa información sobre el dominio compilada y por lo tanto sólo puede proporcionar enseñanza a este nivel superficial.

Fue durante la evaluación de SOPHIE cuando se apreció que tanto los expertos como los aprendices preferían razonar en términos cualitativos y causales, lo que condujo a los trabajos de de Kleer [de Kleer 1984b] ya mencionados donde se proponía una física cualitativa como alternativa a la física basada en matemáticas.

Otro STI desarrollado tempranamente y que tuvo un impacto importante en este área fue STEAMER [Stevens 1983a]; su propósito era enseñar una apreciación cualitativa de un sistema físico a través de una simulación interactiva e inspeccionable basada en una simulación numérica. Se emplearon varios niveles de 'abstracciones gráficas' para representar diferentes grados de fidelidad conceptual. Al igual que SOPHIE, STEAMER también sirvió de inspiración a futuras investigaciones en el razonamiento y la explicación cualitativa, conduciendo a la formulación, por Forbus, de la Teoría del Proceso Cualitativo [Forbus 1984a]. Forbus investigó el modo de pensamiento de la gente acerca de los procesos físicos e intentó codificar la causalidad tal y como es percibida generalmente por la gente: una forma de física ingenua.

Aunque muchos sistemas han utilizado modelos cualitativos para la generación de explicaciones, su uso para la generación de simulaciones ha sido menos frecuente. Esto se ha debido, seguramente, a que hasta hace poco tiempo no se habían desarrollado lo suficiente las técnicas de razonamiento cualitativo como para tener un uso práctico.

La ventaja de la simulación cualitativa es que el aprendiz puede inspeccionar e interactuar con el sistema, observando los efectos de los cambios en el modelo cualitativo sobre el comportamiento cualitativo del mismo. Diversos estudios sobre la educación han demostrado que esto resulta una herramienta muy poderosa para el aprendizaje [Papert 1980a]. Una segunda ventaja es que el uso de un solo modelo a partir del cual generar el comportamiento y las explicaciones asegura la consistencia durante el desarrollo y el mantenimiento del SIT.

El sistema MACH-III [Massey 1988a] es un SIT que combina una simulación cualitativa con un sistema experto sobre el dominio del radar HAWK. Su objetivo ha sido desarrollar un sistema de entrenamiento utilizando las técnicas disponibles en su momento, procedentes de la Inteligencia Artificial y de la ciencia cognitiva, para enseñar el proceso cognitivo que subyace en una detección efectiva de fallos.

El sistema MACH III hace uso de la simulación cualitativa derivada de un modelo cualitativo basado en restricciones de los cambios cualitativos en el estado de los componentes. Su modelo cualitativo no intenta ser realista pero, sin embargo, ayuda a enseñar acerca del modelo mental de la organización, función y operación del radar y sus componentes.

MACH III está basado en una serie de estudios cognitivos realizados sobre técnicos mecánicos con diferentes niveles de destreza, que condujeron a la formación de una hipótesis de trabajo sobre la naturaleza del cambio cognitivo [Tenney 1988a]. Estos estudios, influenciados por el trabajo de Gentner & Stevens [Gentner 1988a], mostraron que los expertos poseen mejores modelos mentales que los aprendices. Posteriormente, dichos estudios, combinados con un análisis de tareas cognitivas, se emplearon en el diseño e implementación de nuevos sistemas de entrenamiento de mantenimiento [Kurland 1988a].

Una visión del aprendizaje obtenida del enfoque de los modelos mentales, es que, la transición desde experto a aprendiz se contempla como una evolución del modelo, en el cual el aprendiz progresa a través de una serie de modelos compatibles de forma incremental, cada uno adecuado para resolver un subconjunto particular de problemas. Las transiciones entre los modelos están motivadas por conflictos entre el modelo mental y las observaciones del comportamiento. Por lo tanto, la base primaria del aprendizaje es la transformación de modelos.

Esta visión del aprendizaje pudiera parecer excesivamente simplista, puesto que hay evidencias suficientes para poder sugerir que las personas pasan periódicamente por reorganizaciones radicales de sus modelos mentales que originan una serie de modelos que no son compatibles de forma incremental [Piaget 1966a]; sin embargo, proporciona un camino para registrar el desarrollo del aprendizaje humano y de los modelos mentales.

La transformación puede implicar la adición, modificación, diferenciación o generalización de las características del modelo, o incluso, la construcción de modelos alternativos.

La representación del estado actual de conocimientos del estudiante es una descripción del conjunto de modelos que él ya ha desarrollado. Esta representación, a su vez, caracteriza a los tipos de problemas que el estudiante puede resolver cada momento. Los sistemas deben basarse en progresiones de modelos cada vez más sofisticados. La primera aplicación de esto último fue la de White & Fredericksen que desarrollaron QUEST [White 1990a], donde emplearon múltiples modelos cualitativos para la enseñanza del comportamiento cualitativo de circuitos eléctricos. Sin embargo, para evitar los problemas de la decisión del momento de cambiar de modelo y a qué modelo cambiar se empleó una secuencia predefinida de ejercicios que guían al aprendiz a través de una serie de modelos fijos, lo que no permite ajustarse a cada aprendiz individual.

2.5.- Utilización de los Múltiples Modelos en los Sistemas de Tutoría Inteligentes

La creación de progresiones de modelos hace necesario definir algunas dimensiones en las que un modelo puede variar. En el caso de [White 1990a] se definieron dos dimensiones: el *orden* y el *grado de elaboración*. Las progresiones laterales, que representan modos alternativos de comprender el dominio, implican cambios en la perspectiva del modelo. Las progresiones incrementales a modelos más sofisticados implican cambios en el orden del modelo y su grado de elaboración.

En el contexto de los modelos de comportamiento, se puede hacer una subdivisión de modelos atendiendo al orden de los mismos. Los modelos de orden cero pueden razonar sobre estados binarios de los elementos. Los modelos de primer orden, por otra parte, razonan sobre la base de derivadas cualitativas de primer orden.

Durante el aprendizaje, los modelos cualitativos desarrollados pueden incrementar lo que se denomina su "grado de elaboración". Este grado se determina mediante el número de reglas cualitativas utilizadas en propagar el efecto de los cambios en los estados de componentes del sistema en el comportamiento de otros componentes.

El propósito que persiguen los sistemas con modelos múltiples al presentar modelos con un grado de elaboración incremental es enseñar a los estudiantes a razonar de una manera flexible utilizando un conjunto completo de ecuaciones, sin importar que sean redundantes en el razonamiento cualitativo sobre el comportamiento de un circuito simple. Esto resulta importante cuando el objetivo perseguido es introducir el razonamiento cuantitativo como una extensión natural del razonamiento cualitativo. Para razonar cuantitativamente, los estudiantes deben aprender a aplicar de un modo flexible el conjunto de ecuaciones de la teoría de circuitos y a razonar de forma "algebraica" para localizar y aplicar múltiples ecuaciones.

Las dimensiones definidas en [White 1990a] carecen de validez cognitiva, es decir, no hay una conexión directa entre el cambio a lo largo de una de estas dimensiones y un cambio cognitivo en el modelo. El aumento del número de reglas de un modelo puede aumentar el área del dominio modelizado,

incrementar la precisión de la representación, e incrementar la funcionalidad representada. No hay un cambio cognitivo claramente identificable que resulte de un cambio en la elaboración. De igual forma, el orden es una función de la representación, no del modelo cognitivo. No hay conexión directa entre un cambio en las derivadas utilizadas en el modelo y un simple cambio cognitivo.

Sería conveniente identificar unas dimensiones a través de las cuales el modelo pudiera cambiar y relacionar éstas con cambios cognitivos. Esto podría utilizarse como la base del cambio de modelo y de la selección de modelo. Cuando se enseña sobre la precisión es útil poder cambiar entre modelos de diferentes niveles de precisión para poder utilizar las diferencias, de igual forma para otros aspectos del conocimiento, como el cambio del nivel de abstracción del modelo.

Otro sistema que ha abordado el problema de los modelos múltiples es MULEDS (Ploetzner 1992). Al igual que QUEST, se basa en la suposición de que el aprendizaje es un proceso de desarrollo de modelos y que la enseñanza tiene que soportar no sólo la adquisición de conocimientos a un nivel, sino también las transiciones entre distintos niveles. Por ello, la representación de distintos niveles de dominio mental requieren diferentes niveles de presentación de información.

Distintos estudios sobre el comportamiento humano en la resolución de problemas, como los de (Chi 1981a) sugieren que las intuiciones cualitativas de los aprendices y los conocimientos numéricos no están adecuadamente conectados. Sin embargo, los estudios de las explicaciones de las personas algo más expertas revelan que hacen uso en realidad de explicaciones cualitativas (Chi 1991a, Chi 1994a). MULEDS ayuda a corregir esta desconexión, en el conocimiento cualitativo y numérico, mediante el uso de múltiples niveles de representación haciendo que los aprendices comiencen a aprender en el nivel representacional más próximo a sus intuiciones, generalmente cualitativas, antes de proceder con modelos numéricos.

MULEDS está concebido para enseñar sobre los cambios en el comportamiento que resultan de un movimiento en la dimensión cualitativa/numérica utilizando las tres simulaciones. Mediante la enseñanza y la demostración de los efectos sobre el comportamiento de un cambio en la dimensión cualitativa/numérica, MULEDS puede enseñar acerca de las relaciones cualitativas y originar transiciones entre modelos, es decir, cambio de modelos.

MULEDS es novedoso en el sentido de que hace uso de múltiples niveles de modelos en el diagnóstico de errores. El diagnóstico se basa en una biblioteca de errores que contiene hipótesis sobre las relaciones funcionales entre las variables independientes. La biblioteca (o base de conocimiento) se divide de modo que haya un conjunto diferente de hipótesis, reglas, disponible para cada nivel de representación. El diagnóstico supone la identificación del subconjunto de reglas que predice más aproximadamente el comportamiento del aprendiz, éste "modelo de estudiante" se usa para predecir el comportamiento del aprendiz y guiar la instrucción mediante el uso de contra ejemplos que contradicen el actual modelo de conocimiento del aprendiz.

El problema con esta biblioteca de errores para el diagnóstico es que requiere la enumeración exhaustiva de todos los estados posibles de conocimiento por los cuales puede pasar un aprendiz. Esta aproximación sólo es apropiada en dominios donde hay un número reducido de errores comunes, lo que supone una falta de generalidad.

(Ploetzner 1992a) reconocen que la diagnosis que se basa en una biblioteca enumerativa de estados de conocimiento y no contiene conocimientos acerca de cómo estos estados evolucionan resulta insuficiente. No proporciona una base adecuada al diagnóstico de los cambios dinámicos que se producen a medida que el aprendiz adquiere conocimiento y por lo tanto no puede soportar un proceso de aprendizaje dinámico. Concluyen que lo que se necesita son modelos de aprendizaje que puedan reproducir no solo el aprendizaje con representaciones sino también las transiciones entre niveles de representación. Con este fin llevaron su investigación a KAGE, un modelo de aprendizaje genérico basado en razonamiento analógico. El razonamiento analógico es un mecanismo potente que enfatiza la elaboración y extrapolación de la estructura interna de ejemplos concretos, es decir de dominio específico, a partir de los cuales generaliza reglas.

KAGE puede resultar útil para diseñar material de instrucción, y puede ayudar a mejorar nuestro conocimiento de los mecanismos de aprendizaje, sin embargo, resulta limitado en los tipos de aprendizaje que puede simular, es decir, aprendizaje inductivo a partir de ejemplos, y por lo tanto es un "pseudoeudiante" bastante pobre y de uso limitado para un sistema de entrenamiento inteligente. Tanto la idea de una biblioteca de errores como la de

un modelo de aprendizaje genérico tienen problemas, ninguna intenta modelar el estado actual de conocimiento del aprendiz.

¿ Qué modelos múltiples deberían usarse ?, ¿ Como deberían variar los modelos múltiples ? QUEST hace uso de dos dimensiones en las cuales los modelos pueden variar: orden y grado de elaboración. MULEDS hace uso de tres modelos posicionados en una sola dimensión, la dimensión cualitativo-numérica. En QUEST, no está claro exactamente qué significa, en términos cognitivos, cambiar entre estos modelos. Un cambio en la elaboración se define como un cambio en el número de reglas utilizados en el modelo, pero esto podría significar un cambio en el panorama del dominio que se contempla, o un cambio en la precisión del modelo. No hay relación directa entre un cambio entre una dimensión y un cambio cognitivo. Sería mejor si las dimensiones utilizadas fueran fundamentales y resultado de un simple cambio en el modelo cognitivo del dominio. Está claro por tanto lo que debe enseñarse, y lo que representa un cambio entre dos modelos en términos cognitivos.

Existen, obviamente, un cierto número de dimensiones en las cuales el modelo puede variar, pero que son las fundamentales que se dan útiles en la enseñanza sobre el comportamiento de los sistemas físicos. Los modelos múltiples pueden verse también en el trabajo de otros investigadores de tutores inteligentes (tanto si son explícitamente reconocidos como si no los son).

Muchos sistemas STI utilizan modelos múltiples, con distintos niveles de precisión, mediante el uso de jerarquías. En realidad, el uso de diferentes niveles de representación puede ser útil en el diagnóstico educacional, donde resulta importante hacer algún diagnóstico, aunque impreciso, mejor que ninguno. Esto puede verse en PROUST [Johnson 1984] y en el trabajo de Jim Greer sobre la granularidad [Greer 1989a].

Rod Moysé estudió los problemas de las representaciones múltiples de un dominio, con cada representación, o punto de vista, resaltando una visión cognitiva diferente de un sistema físico [Moysé 1989a]. Moysé reconoció el problema de que las representaciones múltiples conducen al requerimiento no sólo para el modelo del dominio y el mecanismo de diferencia para generar el comportamiento, sino también el conocimiento de la aplicabilidad y las condiciones de uso de cada representación. El modelo, mecanismo de diferencia y conocimiento de aplicación están todos incluidos en su definición de punto de

vista. El conocimiento de qué modelo utilizar bajo qué circunstancias es justamente uno de los problemas introducidos con el uso de representaciones múltiples, o modelos, de un dominio.

Desde que la comunidad de razonamiento basado en modelos ha reconocido la necesidad de modelos múltiples se han desarrollado varios sistemas que han sido aplicados a diversas áreas, por ejemplo, el diagnóstico basado en modelos [Galant 1989], el diseño multinivel [Murphi y Adankl], la explicación de sistemas físicos [Falkenhainer 1991a, Iwasaki 1990a, Iwasaki 1992a, Liu 1991], el diagnóstico educacional [Greer 1989a], y la Instrucción [White 1991a]. Sin embargo, es claro que no hay un consenso de opinión sobre la dimensiones en que estos modelos deberían variar, y sobre qué base seleccionar un modelo para el razonamiento. El uso de múltiples modelos, a la vez que ofrece una solución al problema de la complejidad, abre un abanico de otras posibilidades que también deben ser contempladas. ¿ Qué modelos son apropiados para qué situaciones ? ¿ Cómo saber cuando y como cambiar de modelo ? ¿ En qué difieren estos modelos ? Estos son precisamente algunos de los problemas adicionales que se introducen con los modelos múltiples.

2.6.- La Simulación Cualitativa

Como ya hemos mencionado anteriormente, los trabajos de Brown y de Kleer [de Kleer 1984a] sentaron las bases del uso del razonamiento cualitativo en el aprendizaje. Los modelos cualitativos deben representar el esquema mental del estudiante, pero además, y lo que es más importante dentro del esquema instruccional, deben permitir generar explicaciones causales de los cambios producidos en los sistemas. La necesidad de incluir el uso de modelos cualitativos en los STI ha originado un área de investigación muy activa en los últimos años centrada en el desarrollo de algoritmos de simulación cualitativa. Sin embargo, muchos de estos algoritmos son de propósito general y, como veremos, sus características no son especialmente adecuadas para su uso en STI, al no permitir generar explicaciones acerca del comportamiento del sistema. Este es el motivo principal del desarrollo del Algoritmo Predictivo: generar un algoritmo de simulación cualitativa que permita la utilización de múltiples modelos y por lo tanto refinar el conocimiento del aprendiz y que permita no sólo simular la evolución del sistema ante las manipulaciones del estudiante, sino generar explicaciones acerca del comportamiento de dicho sistema.

Los trabajos más relevantes en el área de la simulación cualitativa que han aparecido publicados en la literatura al respecto son: el algoritmo QSIM [Kuipers 1986a], el Análisis Temporal Cualitativo (TQ) [Williams 1984a, Williams 1990a], ciertos trabajos sobre la simulación y la Imaginación [de Kleer 1984a], y el Propagador de Restricciones Temporales [Williams 1986 a].

Todos estos trabajos se refieren a la simulación del comportamiento cualitativo de sistemas dinámicos, obviando la literatura anterior referida a la simulación de sistemas estáticos por su poco interés para su utilización en el entorno de sistemas de aprendizaje.

Todos estos métodos comparten una noción similar del valor cualitativo consistente en abstraer el rango de valores reales de las variables de un sistema en una secuencia contigua de puntos simbólicos y los intervalos abiertos entre ellos. En los sistemas dinámicos continuos, las respuestas de las variables, consideradas como funciones del tiempo, son continuas y continuamente diferenciables. Todos los métodos mencionados usan teoremas matemáticos simples para restringir el modo en que las variables del sistema pueden

evolucionar legítimamente dentro de los espacios abstractos de sus valores cualitativos.

El objetivo de esta revisión es comparar los métodos desde la perspectiva de los algoritmos que emplea cada uno de ellos. La principal consideración que se hará será la distinción entre los algoritmos constructivos (es decir directos) y los algoritmos no constructivos (de generación y prueba). Los métodos constructivos resultan por lo general más eficientes que los no constructivos, y utilizaremos esta distinción para sugerir una forma nueva de clasificar los algoritmos de simulación cualitativa.

2.6.1.- El Algoritmo QSIM

El algoritmo QSIM [Kuipers 1985a, Kuipers 1986a] es el algoritmo de razonamiento cualitativo más difundido de todos los desarrollados hasta el momento, seguramente debido a la política seguida por sus autores de distribuir gratuita y libremente su implementación a todos los investigadores interesados en él. El algoritmo arranca a partir de la descripción de un modelo dinámico para el sistema físico y del estado inicial del sistema. La operatoria del algoritmo determina el comportamiento del modelo del sistema como respuesta a su estado inicial.

Para la creación del modelo dinámico del sistema se dispone de una serie de primitivas algebraicas de modelado.

Algunas de estas primitivas se denominan "fuertes", significando que puede considerarse que especifican relaciones funcionales exactas entre los valores reales de las variables del sistema, por ejemplo:

ADD (*flujo neto, flujo de salida, flujo de entrada*)

MULT (*masa, aceleración, fuerza*)

MINUS (*avance, retroceso*)

Otras primitivas carecen de una interpretación precisa en el dominio de los valores reales y se hace referencia a ellas como "débiles", por ejemplo:

M^+ (*volumen, peso*)

M^- (*mph, mpg*)

Estas primitivas débiles indican la existencia de una relación funcional entre dos variables de un sistema, pero sólo especifican que dicha relación es monótona; es decir, una variable es monótonamente creciente (o decreciente) con respecto a la otra.

La habilidad del ingeniero en la utilización de las primitivas débiles es uno de los aspectos más importantes en el modelado de sistemas y en el razonamiento cualitativo, dado que el algoritmo puede hacer deducciones sobre el comportamiento de los modelos de sistemas especificados de modo Incompleto.

QSIM soporta también primitivas de modelado dinámico:

DERIV (*velocidad, aceleración*)

Esta primitiva iguala una variable del sistema a la derivada de otra.

Los valores cualitativos de las variables de un sistema se definen mediante un conjunto totalmente ordenado de valores marca, que pueden ser bien valores reales o bien puntos simbólicos, pero que deben incluir necesariamente el valor 0. Estos puntos de marca representan puntos de interés dentro del rango de las variables del sistema.

Un valor cualitativo en QSIM es bien un punto de marca o el intervalo entre dos de estas marcas. Esta noción de valor cualitativo es compartida por la mayor parte de los métodos que se revisan en este capítulo, incluido el Motor Predictivo. Para mantener la consistencia de la terminología en todo el capítulo, en lo sucesivo nos referiremos a los valores de los puntos de marca como "puntos cualitativos" y a los intervalos de los valores como "intervalos cualitativos". También encontramos conveniente referirnos al conjunto de valores cualitativos que puede tomar una variable como "espacio cuantitativo", tal y como se sugiere en la publicación [Forbus 1988a].

La caracterización de los valores cualitativos como puntos e intervalos de la recta real está motivado por el hecho de que tratamos con sistemas dinámicos continuos. Los valores reales de las respuestas de las variables de los sistemas

(como funciones de tiempo) en esta clase de sistemas son continuos y continuamente diferenciables. Algunos teoremas matemáticos bastante sencillos (el Teorema del Valor Medio y el Teorema del Valor Intermedio [Spivak 1973a]) proporcionan restricciones efectivas al modo en que se pueden comportar las variables de sistemas dinámicos continuos en un espacio cuantitativo formado por puntos contiguos e intervalos. En el capítulo cuatro se discutirán nociones alternativas de los valores cualitativos.

El algoritmo QSIM utiliza una caracterización ligeramente diferente para el valor de la primera derivada de la variable de un sistema, dv/dt . En este caso, se hace referencia al valor de la primera derivada como la dirección cualitativa de la variable del sistema, de acuerdo con la siguiente nomenclatura:

inc, si $dv/dt > 0$
std, si $dv/dt = 0$
dec, si $dv/dt < 0$

QSIM se refiere al estado cualitativo de una variable del sistema en un instante como una tupla compuesta por el valor cualitativo de la variable y su dirección cualitativa. Observamos que la dirección cualitativa de una variable puede ser caracterizada como el valor cualitativo de la derivada de la propia variable expresada mediante un conjunto de puntos de marca consistente únicamente en el punto 0; es decir, la derivada de la variable de un sistema tiene un espacio cuantitativo $\{ (-\infty, 0), 0, (0, \infty) \}$ que podemos escribir abreviadamente como $\{ -, 0, + \}$.

Siempre que se produce un cambio en el valor cualitativo de una variable, QSIM delimita el momento en que se produce el cambio mediante un punto de distinción temporal. A medida que una variable se desplaza a lo largo del tiempo a través de su espacio cuantitativo, delimita un conjunto totalmente ordenado de puntos de distinción temporal. El estado cualitativo de un sistema en un instante es la tupla formada por los estados cualitativos de las variables individuales del sistema. El estado cualitativo puede ser considerado como la situación cualitativa del sistema; esta última terminología proviene de la noción de "cálculo de situación" que aparece descrita en [Cherniak 1985a]. El comportamiento cualitativo en QSIM es una secuencia de estados cualitativos del sistema, alternando entre los puntos de distinción temporal y los intervalos de tiempo.

El algoritmo QSIM comienza con el sistema en un estado inicial y determina cómo puede evolucionar para producir el comportamiento cualitativo. El estado cualitativo del sistema cambia siempre que cambia el valor cualitativo de cualquiera de las variables. Los espacios cualitativos de las diferentes variables se relacionan entre sí asociando los valores correspondientes con cada una de las restricciones en el modelo del sistema. Estas restricciones proporcionan información para limitar la forma en que puede cambiar de modo legítimo el estado cualitativo del sistema. Por ejemplo, si tenemos la restricción:

ADD (*flujo neto, flujo de salida, flujo de entrada*)

y los conjuntos de puntos de marca de cada una de las variables son respectivamente:

flujo neto	[$-max_n, 0, max_n$]
flujo de salida	[$0, max_s$]
flujo de entrada	[$0, max_e$]

podremos asociar los valores correspondientes de [$0, max_s, max_e$] con la restricción anterior. Esto significa que si el flujo de salida tiene un valor max_s y el flujo de entrada tiene el valor max_e , el flujo neto debe tomar el valor 0. La restricción permite determinar el valor de las variables flujo neto, flujo de salida o flujo de entrada conocidos los valores de cualquiera de las otras dos variables.

Los valores correspondientes a (0, 0) para las primitivas débiles M^+ y M^- son tan habituales que tienen una notación específica en QSIM:

$M_0^+(a, b)$
 $M_0^-(a, b)$

$M_0^+(a, b)$ expresa que a y b son monótonamente crecientes una respecto de la otra, y cuando una es cero la otra también toma ese valor.

La operatoria del algoritmo QSIM es la siguiente, a partir del estado actual del sistema genera un conjunto de transiciones legítimas, considerando cada variable como una función de tiempo independiente y continuamente diferenciable. Las dependencias existentes entre las distintas variables se tienen en cuenta mediante la aplicación de las restricciones del modelo, y los valores correspondientes, como filtros de consistencia para probar la validez local de las

transiciones del estado del sistema. Los restantes conjuntos de transiciones se agrupan para formar los siguientes estados candidatos, aplicándose sobre ellos filtros globales.

Se han desarrollado filtros globales para evitar una serie de fenómenos espúreos asociados a la simulación cualitativa en general y a QSIM en particular. El origen de muchos de estos problemas está en la naturaleza puramente local de los criterios de transición empleados para construir los posibles estados siguientes; es fácil apreciar que muchos de los estados candidatos son imposibles cuando se considera el comportamiento del sistema en un contexto más amplio que la secuencia de estados cualitativos. Incluso después de un filtrado global, el algoritmo QSIM genera un cierto número de comportamientos espúreos, si bien se ha probado que el algoritmo no rechaza ningún comportamiento correcto. Una gran parte del esfuerzo de investigación sobre QSIM se ha orientado hacia comprender exactamente el motivo por el cual QSIM no filtra ciertos comportamientos espúreos, siendo el área del desarrollo de filtros globales una de las áreas más activas de investigación (Struss 1988a, Fouché 1990a).

La generación de comportamientos espúreos en QSIM ha sido atribuida a varias causas. Una de ellas puede ser la introducción de excesivos detalles en el espacio cuantitativo de las variables: esto resulta particularmente relevante para QSIM, que puede descubrir nuevos puntos de marca a medida que se avanza en la simulación. Por ejemplo, consideremos un sistema formado por una masa oscilando sobre un muelle.

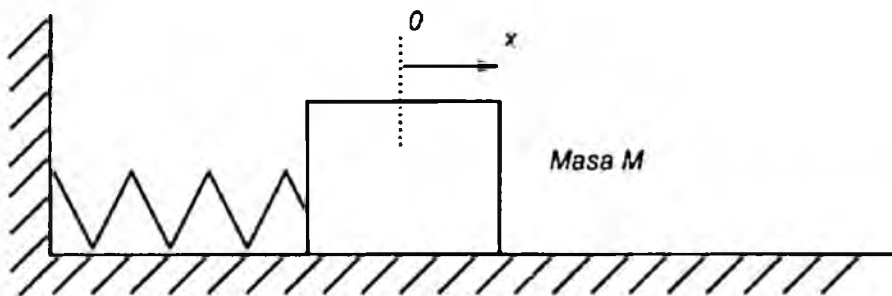


Figura 2-1: Sistema con una masa y un muelle

Si caracterizamos el espacio cuantitativo de la variable de posición x como el conjunto de valores cualitativos $\{-, 0, +\}$ (es decir un sólo punto de marca, el cero) encontraremos que se genera un sólo comportamiento cualitativo. Sin

embargo, este comportamiento tiene un nivel de abstracción elevado y no proporciona suficiente detalle para determinar si las oscilaciones de la masa son constantes, crecientes o decrecientes en amplitud: x simplemente se mueve según la secuencia $+, 0, -, 0, +, 0, -, \dots$ etc.

QSIM puede intentar introducir más detalle en la simulación descubriendo nuevos puntos de marca en el espacio cualitativo de x , que representen el máximo y mínimo local de la posición de la masa oscilante a medida que se genera el comportamiento del sistema; Estos valores marca descubiertos se denominan puntos de marca "temporalmente específicos" [Forbus 1988a]. Estos puntos de marca adicionales pueden permitirnos determinar si la oscilación es constante, creciente o decreciente comparando las magnitudes de los sucesivos máximos y mínimos durante el comportamiento del sistema. De hecho, y en la realidad, estos valores marca descubiertos no permitieron al algoritmo QSIM original hacer tal distinción. Los criterios locales empleados para filtrar las transiciones de estado no son ni siquiera suficientes para predecir simplemente una de las tres posibilidades anteriores, y en cada ciclo de oscilación, el máximo local puede ser mayor, igual o menor que el máximo local anterior, permitiendo que sean comportamientos posibles oscilaciones aleatorias. Los puntos de marca descubiertos durante la simulación proporcionan más detalle acerca de las relaciones entre las variables del sistema (mediante la utilización de los valores correspondientes), pero el algoritmo QSIM no permite utilizar este detalle, y el resultado es la proliferación de comportamientos espúreos.

Los intentos de hacer frente a la incorporación de detalles adicionales del espacio cualitativo y a la vez la eliminación de la predicción comportamientos espúreos han conducido a trabajos muy interesantes. Los enfoques para la resolución particular del problema anterior incluyen el uso de una "restricción energética" para invalidar las oscilaciones estacionarias y crecientes [Fouché 1991a]. Otras técnicas se centran en el uso de retratos cualitativos de planos de fase para producir filtros globales que eliminen los comportamientos espúreos de QSIM. En el trabajo de [Lee 1988a] se presenta una restricción global de "no intersección" que materializa cualitativamente la imposibilidad de que una trayectoria en el espacio de fase se interseccione consigo misma. Esta es una interpretación de la propiedad de unicidad del comportamiento de un sistema físico continuo y dinámico. El uso de esta restricción en sistemas oscilatorios de segundo orden puede eliminar la posibilidad de oscilaciones aleatorias. Los

comportamientos estacionarios, crecientes o decrecientes que quedan pueden manejarse empleando restricciones específicas para el sistema, por ejemplo representando que el sistema está amortiguado, lo que conduciría a la predicción del simple caso de una oscilación decreciente (por lo demás correcta). En un estudio independiente [Struss 1988b] se empleó también la técnica de retrato cualitativo de fase para la simulación de sistemas oscilatorios de segundo orden, preparando el camino para la aplicación de restricciones específicas de un sistema. Además, se observó que la extensión de tales métodos a la consideración de sistemas de orden superior no es ni clara ni sencilla.

Otro fenómeno relacionado con la generación de comportamientos espúreos en QSIM es el conocido como "ruido" y detallado en [Kulpers 1987a]. Este fenómeno se ha asociado con la aplicación de el algoritmo QSIM a ciertos tipos de sistemas acoplados, tales como el problema de los dos depósitos de agua. También puede encontrarse la consideración del problema del acoplamiento de más de dos depósitos de agua en [Molle 1989a]. Los comportamientos ruidosos consisten en una variación no sujeta a las restricciones de la dirección cualitativa de los valores *inc*, *std* y *dec* en alguna de las variables del sistema. En el trabajo anterior se concluye que el motivo de esto es la falta de conocimiento acerca de las relaciones entre las variables en sistemas de orden superior. En [Kulpers 1987a] se presentan dos posibles soluciones al problema, una sobre la base de ignorar el valor de la dirección cualitativa en aquellos estados donde el ruido comienza, y otra basada en asumir la linealidad local en las primitivas de modelado débiles. Esta última solución, la "Suposición de la Suavidad" representa un método cualitativo de Euler-Cauchy [Henricy 1964a]. Algunos Investigadores han argumentado que no es válido generalmente, y han presentado otras técnicas basadas en argumentos gráficos intuitivos [Willoughby 1989a, Willoughby 1989b].

En el trabajo de desarrollo del Algoritmo Predictivo, hemos encontrado que el uso de relaciones funcionales no lineales en el modelo pueden introducir una estructura de orden superior en el sistema que tienen su efecto sobre la forma cualitativa [Morgan 1988a] del comportamiento que se produce durante la simulación. Aunque esto es dependiente en cierta forma de las primitivas empleadas para la formulación del modelo (permitimos relaciones funcionales más fuertes entre las variables), podemos argumentar que la suposición de la linealidad (Incluso localmente) puede no estar bien fundada.

Intentando contribuir con una nueva perspectiva en el área de la simulación cualitativa nos referiremos a la operativa del algoritmo QSIM como no-constructiva debido a las siguientes razones:

- I. No hay una direccionalidad causal asociada con las restricciones del modelo.
- II. Las transiciones de estado candidatas de las variables de sistema se generan por el algoritmo sin considerar necesariamente la naturaleza causal de la primitiva de modelado dinámico.
- III. Las restricciones del modelo (y los valores correspondientes) no se utilizan para generar los siguientes estados, sino para probar y filtrar aquellos, eliminando los comportamientos imposibles.

Más adelante, resaltaremos esta idea de algoritmo no-constructivo y lo usaremos para comparar distintos algoritmos de simulación cualitativa, incluyendo el Algoritmo Predictivo.

El problema del ruido puede separarse en al menos dos fenómenos distintos; y encontramos que uno de ellos es debido a la naturaleza no constructiva del algoritmo QSIM; las transiciones de estado que se introducen por el algoritmo no pueden ser filtradas por criterios locales. En un algoritmo no-constructivo como QSIM, las transiciones son sugeridas por el algoritmo y no necesariamente por el estado actual. Esta tesis mostrará que las técnicas constructivas investigan transiciones que son determinados sólo por el estado actual. Sostenemos que la distinción entre técnicas constructivas (restricciones del modelo y estado actual utilizados como generadores de los comportamientos correctos) y técnicas no constructivas (restricciones del modelo y estado actual usado como prueba o filtro de comportamientos incorrectos) conduce a un modo muy útil de catalogar los algoritmos de simulación cualitativa. Para la segunda forma de ruido, introduciremos en el capítulo 7 la noción de sistema cualitativamente simétrico. Mostraremos que esta última forma de ruido puede eliminarse en los sistemas lineales de segundo orden, pero no tenemos una solución válida de forma general que mejore los resultados obtenidos al suponer linealidad local.

Todos los mecanismos de simulación cualitativo sufren de un crecimiento exponencial de la complejidad con el tiempo. El número de posibilidades para la transición de estados que deben considerarse es exponencial con relación al

número de variables del sistema que se están moviendo hacia nuevos puntos cualitativos. La necesidad de producir un conjunto totalmente ordenado de estas transiciones conduce a la generación de comportamientos múltiples cuando la información del modelo sólo es suficiente para determinar una ordenación parcial. Se ha asegurado que evitando la necesidad de considerar ordenaciones irrelevantes de las transiciones pueden eliminarse ciertos tipos de comportamientos espúeos. Esto ha conducido al desarrollo de técnicas que sólo consideran una ordenación total cuando es necesario y hay suficiente información. El Propagador de Restricciones Temporal (TCP Temporal Constraint Propagator) explicado en términos generales en [Williams 1986a], divide las variables de un sistema en clases que interactúan localmente con respecto al modelo de restricciones. Este trabajo conduce a la clasificación de todos los demás algoritmos de razonamiento cualitativos como "basados en la situación" [Weld 1990a]; puesto que tratan de producir una secuencia de estados del sistema completo (situaciones), el objetivo fundamental es conseguir una ordenación total de transiciones. TCP, sin embargo, trata principalmente con la producción de los comportamientos de las variables del sistema (historias) y no determina necesariamente un conjunto totalmente ordenado de transiciones de estado: por lo tanto será clasificado como "basado en la historia".

Si bien compartimos esta visión de la distinción entre "basado en la situación" y "basado en la historia", sugerimos que la distinción entre técnicas constructivas y no constructivas es quizás más relevante. Podemos apreciar que la ontología basada en componentes de [de Kleer 1984b] tiene un papel similar que el TCP, pero a un nivel más alto durante el proceso de formulación del modelo, dividiendo las variables del sistema en clases que interactúan localmente con respecto al concepto de un componente.

Cualquier técnica que divida las variables del sistema en grupos que interactúan localmente mejorará la eficiencia. Por ejemplo, para producir una ordenación total de 4 variables en transición es necesario considerar $2^4 - 1 = 15$ subconjuntos posibles (ignorando el conjunto vacío). Sin embargo, si fuera posible dividir las variables del sistema en dos grupos, cada uno de dos variables, para producir una ordenación total de cada grupo sólo se requiere la consideración de $(2^2 - 1) + (2^2 - 1) = 6$ subconjuntos posibles. De acuerdo con lo anterior, algunos investigadores han desarrollado métodos para la división de las variables del sistema de alguna forma. En la publicación de [Iwasaki 1988a] se

presenta el desarrollo de las descomposiciones Jerárquicas basadas en las fuerzas de Interacción relativas de las variables. El método de "abstracción de la escala temporal" (Kuipers 1987b) organiza un sistema complejo en una Jerarquía de mecanismos que son ordenados con respecto a su velocidad de respuesta (o constante de tiempo). Un mecanismo rápido ve a otro más lento como si fuera estático; un mecanismo lento ve a uno más rápido como Instantáneo (o cambiando según funciones escalón). Esto es un modo efectivo de limitar la generación de comportamientos en sistemas complejos que de otro modo resultarían Intratables, dado que una ordenación total sólo se necesita para cada mecanismo considerado de forma individual.

En este apartado hemos revisado el algoritmo QSIM e Introducido el uso de álgebras cualitativas basadas en puntos simbólicos e intervalos de la recta real. Consideramos el uso de los valores correspondientes como un apunte para expresar detalles relevantes de estas álgebras. En la descripción del Motor Predictivo, describimos un compilador que genera automáticamente los aspectos relevantes de las álgebras basadas en intervalos a partir de la descripción de las ecuaciones del modelo y sus valores correspondientes. Nos hemos referido al trabajo desarrollado sobre álgebras cualitativas de caracterización y sobre la formulación del modelo, y hemos revisado el resultado de la falta de completitud del razonamiento cualitativo, es decir, la generación de comportamientos espúreos. La generación de detalles adicionales en el espacio cuantitativo (puntos de marca temporalmente específicos) pueden manejarse considerando el comportamiento global (dado que no hay criterios locales), y nos hemos referido al trabajo hecho en el análisis de retratos de fase para el manejo de este tipo de problemas. La consideración del problema del ruido nos ha llevado a introducir una distinción entre las técnicas constructivas y no constructivas. Creemos que esto conduce a una interesante perspectiva sobre el razonamiento cualitativo y una base clara para clasificar los algoritmos de simulación cualitativa de especial importancia de cara a su utilización en sistemas de entrenamiento Inteligentes. Esta perspectiva se resaltarán en este capítulo cuando se consideren nuevos ejemplos.

2.6.2.- Análisis Temporal Cualitativo

Las técnicas empleadas en el Análisis Temporal Cualitativo (TQ), tal y como aparece descrito en [Williams 1984a, Williams 1990a] han sido la principal fuente de inspiración para el diseño del Algoritmo Predictivo. El análisis TQ es un algoritmo constructivo; toma de la Ingeniería la consideración de la Integración como operación causal. Esta noción de causalidad conduce a una significación especial del proceso de Integración cualitativa, visión que compartimos, produciendo una clasificación temporal de Inferencias constructivas. Estas Inferencias constructivas se usan para generar las transiciones del sistema a partir del modelo de restricciones y del estado actual del sistema (según cabe suponer, de modo análogo a la construcción del comportamiento por el sistema real, si bien esto constituye un asunto más bien filosófico). Por el contrario, un algoritmo no constructivo como QSIM considera la diferenciación sólo como una correlación y trata el operador de derivación como a cualquier otra primitiva de modelado de restricciones.

El análisis TQ emplea la misma noción de espacio cuantitativo que QSIM para expresar los espacios de valores de las variables en sistemas físicos continuos y dinámicos. Los valores son o bien puntos cualitativos de la recta real (puntos de marca) o bien los intervalos cualitativos entre dichos puntos; la selección de estos valores se efectúa "con el nivel de detalle apropiado para el análisis" [Williams 1984a]. En todos los ejemplos presentados, el análisis TQ emplea sólo el espacio cualitativo $\{ -, 0, + \}$ correspondiente al signo algebraico, aunque pueden construirse valores más complejos aplicando operaciones aritméticas y combinaciones lógicas para alterar los valores semánticos. El análisis TQ soporta primitivas de modelado algebraico como la negación, la suma y la multiplicación.

Como el comportamiento de los sistemas continuos dinámicos se genera en el tiempo, determina una secuencia contigua, lineal y alternada de momentos de tiempo y períodos de tiempo. Los momentos de tiempo son intervalos cerrados de longitud cero (similares a los puntos de distinción temporal en QSIM), mientras que los períodos son intervalos abiertos entre dichos momentos. Cuando Williams expone el análisis TQ da la impresión de que éste se basa en la situación [Williams 1984a].

"Durante un Intervalo de tiempo, todas las cantidades de interés tienen un valor cualitativo único. En otras palabras, cada cantidad permanece dentro de una región cualitativa a lo largo de la duración de un Intervalo."

Pero esto puede ser simplemente una cuestión de perspectiva. Williams continua:

"Usando esta representación, las cantidades sólo pueden interactuar si son locales espacialmente y esto ocurre durante el mismo intervalo de tiempo. Se ha elegido una representación lineal del tiempo por simplicidad; sin embargo, ninguno de los conceptos presentados depende de forma importante de que esta representación sea una secuencia lineal."

Por "espacialmente local" Williams entiende que las cantidades están agrupadas juntas de alguna manera. Ya observamos anteriormente que esto puede tener varios significados: que las variables se encuentran en la misma restricción del modelo, que están conectadas fuertemente (Iwasaki 1988a), que están en el mismo componente I de Kleer 1984b), que pertenecen a mecanismos con una constante de tiempo similar (Kuipers 1987b). Si todas las variables son "espacialmente locales" respecto a las demás, resulta una ordenación total del tiempo (una secuencia lineal), pero si algunos de las variables no son locales puede resultar una ordenación parcial de los Intervalos de tiempo (secuencia no lineal). Aquí radica la diferencia entre los algoritmos basados en la situación, como QSIM y el análisis TQ, y los algoritmos basados en la historia como el Propagador de Restricciones temporales (TCP) (Williams 1986a), que se discutirá detalladamente en el siguiente apartado: vemos que es una cuestión de perspectiva y no necesariamente de la operación del algoritmo.

Si se aplica el análisis TQ a la descripción de un sistema en el que todas las cantidades son espacialmente locales, se producirá un conjunto totalmente ordenado de periodos de tiempo y de momentos, y puede ser considerado como basado en la situación. Si se aplica a un sistema en el que los grupos de variables no son locales (en algún sentido) puede producirse sólo una ordenación parcial, y podría considerarse como basado en la historia. Por esta razón preferimos utilizar la distinción entre técnicas constructivas y no constructivas para clasificar

los algoritmos de simulación cualitativa. Tanto el análisis TQ como el TCP son constructivos, de hecho, TCP es una extensión del análisis TQ.

Debemos tener en cuenta que el uso de una ontología de modelado apropiada puede considerarse como la suposición de ciertos criterios para la división de variables, de modo que cada grupo se identifique con algún mecanismo, y todas las variables de cualquier grupo sean locales a las demás. La consideración de cualquier grupo independientemente proporcionará una ordenación total del tiempo. La distinción entre algoritmos basados en la situación y basados en la historia surgió debido a que el algoritmo QSIM se aplicó originalmente a un conjunto amorfo de restricciones del modelo, en el cual se había suprimido cualquier noción de descomposición del sistema. Como resultado, se apreciaba que algunos modelos (aquellos que eran no-locales de alguna forma) producían un número elevado de comportamientos que representaban direcciones temporales irrelevantes al intentar el algoritmo producir una ordenación total del tiempo.

El análisis TQ tiene en cuenta la representación y uso de derivadas de orden elevado de las variables del sistema, y los ejemplos indican cómo pueden emplearse para resolver cierta clase de ambigüedad cualitativa y proporcionar más detalle acerca del comportamiento del sistema. El trabajo es muy pertinente para el Algoritmo Predictivo, dado que ha llevado al desarrollo de una técnica que emplea los planos diferenciales para controlar la ambigüedad en sistemas con entradas acumulativas, y manejar la complejidad exponencial de la simulación cualitativa. El análisis TQ consta de dos fases: Propagación Causal y Análisis de Transiciones. Discutiremos a continuación ambas etapas y aprovecharemos la oportunidad de identificarlos con las fases similares del Algoritmo Predictivo.

2.6.2.1.- Propagación Causal

La fase de Propagación Causal del análisis Q es responsable de la determinación de los valores de las variables del sistema que se producen instantáneamente en respuesta a un grupo de causas primarias. Siempre que una variable cambia a un nuevo valor cualitativo comienza un nuevo período; si esto es un período o un momento de tiempo dependerá de si el nuevo valor es un intervalo o un punto respectivamente. El conjunto de variables que cambian para

crear el comienzo de un nuevo período de tiempo o momento se denominan causas primarias del intervalo temporal.

Es el objetivo de la Propagación Causal determinar el nuevo estado del sistema que resulta de estas causas primarias. Consideramos esto como la determinación de los valores de las variables producidos instantáneamente en respuesta a las causas primarias del nuevo intervalo de tiempo (si bien en las presentaciones del análisis TQ no emplea este enfoque de forma explícita). El término causal se utiliza para describir el paso de la propagación, porque aunque una restricción del sistema pueda no incluir una primitiva de modelado dinámica, puede existir una relación causal asociada con la ecuación. El hecho de que el mecanismo que expone la causalidad se muestre como una relación instantánea entre las variables del sistema es el resultado de la decisión de suprimir el detalle del mecanismo en el modelo del sistema [Iwasaki 1988a, Simon 1961a]. En el modelo se proporciona a las ecuaciones una interpretación causal (para considerar la estructura oculta del mecanismo) pero el fenómeno causa-efecto se considera que se produce instantáneamente al nivel de detalle expresado en el modelo del sistema.

Resulta curioso el modo en que el análisis TQ da una interpretación causal a las ecuaciones del sistema. Una ecuación bidireccional que representa una relación entre las variables del sistema se implementa como un conjunto de relaciones unidireccionales. Por ejemplo

$$a + b + c = 0$$

se implementa como:

$$a \leftarrow -b - c$$

$$b \leftarrow -a - c$$

$$c \leftarrow -a - b$$

La Propagación Causal usará únicamente una de estas relaciones unidireccionales del conjunto determinado por cualquier relación bidireccional, pero la relación unidireccional que se emplee dependerá de las causas primarias del intervalo de tiempo. En otras palabras, diferentes intervalos de tiempo pueden emplear diferentes relaciones unidireccionales dependiendo de las causas primarias de dicho intervalo, es decir, del conjunto de variables de transición. El término causas primarias generalmente está reservado para

variables exógenas (de entrada). En este caso, sin embargo, incluye variables de sistema endógenas que están evolucionando como parte de la dinámica. Esta es nuestra principal queja contra la Propagación Causal en el análisis TQ; parece sugerir que la estructura del sistema puede variar en el tiempo (que de hecho puede, pero no es esto lo que pretende el análisis TQ).

Una explicación de porqué el análisis TQ permite que la estructura del modelo sea flexible es que Williams se preocupa del diseño de sistema a un nivel más elevado. Sin embargo, también es posible en el análisis TQ emplear directamente relaciones unidireccionales para describir el modelo. En este caso, la perspectiva de la causalidad es fijada por el modelador y después permanece invariable. Esta es la aproximación que hemos utilizado en el Algoritmo Predictivo, donde siempre utilizamos relaciones unidireccionales para representar la estructura fija del modelo de un sistema, y esta perspectiva de la causalidad del sistema permanece invariable a lo largo del proceso de simulación. En el capítulo 6 describiremos un método para poder determinar la estructura causal de un sistema. Este método requiere que las variables exógenas sean especificadas a priori; estas variables constituyen las causas primarias y no serán revisadas durante la simulación. Esto no excluye la posibilidad de alteración dinámica de la estructura del modelo para tareas de más alto nivel (por ejemplo el diagnóstico basado en el modelo) pero este refinamiento reside fuera de la primitiva tarea de predicción (Lelch 1990a, Lelch 1992a).

2.6.2.2.- Análisis de Transiciones

El Análisis de Transiciones determina el efecto del modelado dinámico original, es decir, inflere los cambios en los valores de las variables que son salidas de Integradores; por ejemplo, el modo en que dx/dt afecta a x .

Estos cambios en el valor pueden tardar algún tiempo en producirse (no son instantáneos). El resultado del Análisis de Transiciones se convierte en la causa primaria de la Propagación Causal, ya que observamos que las salidas de los Integradores son las variables de estado independientes del sistema. Sería necesario mantener interpretaciones causales separadas de una ecuación bidireccional dado que sólo hay una Interpretación para una estructura particular del sistema si las ecuaciones son consistentes.

El paso del tiempo no está relacionado con las inferencias realizadas por la Propagación Causal; puede usarse en cualquier etapa para proporcionar información sobre el estado actual del sistema. La importancia de esto es que cuando hemos podido determinar que una variable cambia a un nuevo valor cualitativo podemos aplicar la Propagación Causal para averiguar los valores del resto de las variables del sistema en la nueva etapa generada por el cambio (la causa primaria). Independientemente de la duración temporal de la nueva etapa generada por la causa primaria, La Propagación Causal siempre es válida, porque no hace ninguna suposición sobre el período de tiempo en el que las variables del sistema mantendrán sus valores.

El Análisis de Transiciones consta de dos partes: Reconocimiento de Transiciones, que determina cuándo una variable está cambiando a un nuevo punto cualitativo o a un intervalo cualitativo; y la Ordenación de Transiciones, que determina qué subconjunto de las variables que parecen estar cambiando cambiarán realmente en primer lugar.

Ambas partes se fundamentan en que el comportamiento de las variables del sistema sea continuo y continuamente diferenciable en los intervalos de tiempo de interés. En este caso, algunos teoremas matemáticos sencillos restringen el modo en que las variables del sistema pueden cambiar a lo largo del tiempo. La Regla de Integración Cualitativa en el análisis TQ se usa para desarrollar el Reconocimiento de Transición y puede ser descrita como sigue:

1 Transiciones a 0

- a) Si el valor de dx/dt es $+$ ($-$) durante un período de tiempo, y el valor de x es $-$ ($+$) durante dicho período, x puede cambiar a 0 en los momentos siguientes.
- b) Si el valor de dx/dt es $+$ ($-$) ó 0 durante un período de tiempo, y el valor de x es $-$ ($+$) durante dicho período, x no puede cambiar a 0 durante ese período de tiempo.

2 Transiciones desde 0

- a) Si el valor de dx/dt es $+$ ($-$) durante un período de tiempo, y el valor de x fue 0 en el momento anterior, x puede cambiar a $+$ ($-$) al comienzo del período de tiempo.

- b) Si el valor de dx/dt es 0 durante un período de tiempo, y el valor de x fue 0 en el momento anterior, x será 0 durante dicho período de tiempo.

Esta regla resume el efecto de la Integración sobre los valores cualitativos de las variables del sistema. La Integración normal opera sobre funciones de tiempo que tienen rangos y dominios densos. La Integración numérica (usada en la simulación numérica) opera sobre funciones de tiempo que tienen rangos densos pero dominios no-densos (se elige un intervalo discreto de tiempo para la simulación). En el caso cualitativo usamos álgebras basadas en Intervalos, de modo que aunque podemos considerar la línea del tiempo como densa con el propósito de utilizar las propiedades de continuidad y diferenciabilidad, la no-densidad de los rangos sólo nos permite percibir una línea de tiempo no-densa. Además, la representación débil de los valores de las derivadas del espacio cuantitativo $\{ -, 0, + \}$ no soporta la comparación del ritmo de cambio de las variables, y como resultado de ello, la Regla de Integración Cualitativa por sí sola, no siempre permite producir una total ordenación del tiempo. Se aprecia esta ambigüedad en la aserción (1a) de la regla, que inflere sólo la posibilidad de transiciones. Es responsabilidad de la Ordenación de Transiciones producir una ordenación total de estas posibles transiciones, generando así el subconjunto de variables en evolución que realmente cambiarán en primer lugar.

La parte (1) de la regla anterior se emplea para determinar las causas primarias de un nuevo estado existente en un momento de tiempo, mientras que la parte (2) se utiliza para determinar las causas primarias adicionales para un nuevo estado que ya existe en un cierto período. Para aplicar esta segunda parte debemos tener el valor de la derivada durante el siguiente período de tiempo. Este valor es proporcionado por la Regla de Continuidad que se puede describir como sigue:

Regla de Continuidad

1. Si una variable es + (-) en un momento permanecerá + (-) durante el siguiente período de tiempo.
2. Si una variable es 0 durante un período de tiempo, seguirá siendo 0 durante el siguiente momento.

La parte (1) de esta regla se emplea para conseguir información suficiente para poder aplicar la parte (2a) de la Regla de Integración Cualitativa. Las derivadas de orden superior se manejan mediante la aplicación de estas reglas, teniendo en cuenta que la derivada de una variable es a su vez una variable.

Puede considerarse que las transiciones desde 0 determinadas por la parte (2a) de la Regla de Integración Cualitativa se producen después de un tiempo infinitesimal. Las transiciones a 0 determinadas por la parte (1a) de la Regla de Integración Cualitativa pueden producirse sólo después de un tiempo finito o infinito (asintóticamente). De esta forma la Integración cualitativa impone una noción de retraso (y por lo tanto de causalidad) en la propagación de los valores cualitativos cuando se ve como un proceso constructivo. En el análisis TQ, las transiciones de tiempo finito o infinito se tratan en ambos casos como propagaciones con retraso finito. Hemos apreciado que la Ordenación de Transiciones sólo es necesaria para estas transiciones de tiempo finitas, es decir, cuando el estado evoluciona desde un período de tiempo a otro. Por esta razón, en el Algoritmo Predictivo nos referiremos a la aplicación de la parte (2) de la Regla de Integración Cualitativa como la fase de Integración Cualitativa, y reservaremos el término Reconocimiento de Transiciones a la aplicación de la parte (1) de esta regla.

Cuando el Reconocimiento de Transiciones ha determinado qué variables pueden hacerse 0 el siguiente momento (y cuales no), la Ordenación de Transiciones debe determinar qué subconjunto de éstas cambiará en primer lugar. El modo más obvio de hacerlo es enumerar las posibilidades y probar cada una de ellas. El número de posibilidades a considerar en esta solución de generación y prueba crece exponencialmente con el número de transiciones reconocidas. Por ejemplo, si hay 4 variables que pueden cambiar a 0, deberíamos investigar $2^4 - 1 = 15$ subconjuntos posibles (excluyendo el conjunto vacío). Sin embargo, el análisis TQ emplea un enfoque diferente en la Ordenación de Transiciones, evitando la técnica exponencial no constructiva. En lugar de examinar subconjuntos posibles individualmente, el análisis TQ aplica la ecuación del modelo del sistema a las variables que pueden (o no) cambiar con el fin de generar un conjunto de restricciones. Estas restricciones se producen por la aplicación del conjunto de Reglas de Ordenación de Transiciones. Las restricciones imponen una división de las variables del sistema en grupos que deben cambiar simultáneamente, y crean una ordenación entre los grupos concluyendo los

grupos de variables que cambiarán en primer lugar. Esta solución constructiva es lineal con el número de relaciones del modelo.

En el Algoritmo Predictivo, hemos utilizado la técnica de generar y probar para llevar a cabo la Ordenación de Transiciones. Se supone un subconjunto de las primeras transiciones, y el Algoritmo Predictivo se llama a sí mismo recursivamente para validar cada subconjunto posible. Incorporadas dentro de la fase de Propagación Causal hay una serie de pruebas de validación que llevan a cabo las tareas de las Reglas de Ordenación de Transiciones del análisis TQ. Si la validación falla, el subconjunto de las primeras transiciones se considera inválido y debe investigarse otro de una forma similar. Sólo hemos aplicado el Algoritmo Predictivo a modelos de orden relativamente bajo, donde la naturaleza exponencial de la fase de Ordenación de Transiciones de carácter no constructivo no constituye un mayor problema. Sin embargo, para la simulación de modelos de sistemas más complejos sería necesario considerar la utilización de aproximaciones más eficientes como las que se emplean en el análisis TQ. Dirigiremos en este momento la cuestión apuntando unas áreas relacionadas con el análisis TQ que nos han conducido a optar por la técnica exponencial, más sencilla, en esta etapa.

El primer asunto es que las Reglas de Ordenación de Transiciones en el análisis TQ parecen contemplar la suposición de relaciones lineales entre las variables del sistema. Por ejemplo, dada la ecuación cualitativa:

$$[a] = [b]$$

las Reglas de Ordenación de Transiciones parecen interpretar esto como que a es una función monótona creciente de b , o expresado de otro modo,

$$\{ da/dt \} = \{ db/dt \}$$

Si bien esto puede ser cierto para las relaciones lineales entre a y b , no es cierto de forma general. El problema es que las reglas de ordenación de Transiciones tienen que hacer inferencias acerca de la dirección basándose en las ecuaciones del sistema. Esto supone propagar valores en una dirección no causal (desde las variables a sus derivadas). Si las reglas de Ordenación de Transiciones implican realmente la suposición de la linealidad (lo cual no es claro), el requisito de razonar sobre relaciones no-lineales parecería ser inconsistente con el uso de

un esquema constructivo para la Ordenación de Transiciones como la empleada en el análisis TQ.

La segunda cuestión es que el análisis TQ no puede razonar acerca de modelos cuya estructura presente una realimentación. La extensión del análisis TQ que se propone para este sistema, denominado análisis de realimentación, supone el uso de heurísticas de alto nivel que emplean argumentos causales acerca de la estructura del modelo del sistema. En el Algoritmo Predictivo, la estructura de realimentación del sistema está implícita en el modo en que la ecuación del modelo está organizada. Encontramos que el Algoritmo Predictivo explica el comportamiento con realimentación de forma bastante natural sin recurrir a reglas adicionales que reflejen argumentos heurísticos de alto nivel. Si las ecuaciones del sistema son bidireccionales y no estructuradas como en el análisis TQ, no está claro como puede evitarse el uso de heurísticas de realimentación. Las Reglas de ordenación de Transiciones son locales para las ecuaciones particulares y no pueden tener en cuenta la estructura causal de un conjunto de ecuaciones. De este modo parece que nuestro deseo de manejar la realimentación de un modo natural y general puede frustrar el uso de un esquema constructivo.

Un tercer aspecto es que las Reglas de Ordenación de Transiciones se especifican sólo para aquellas variables que tienen un espacio cuantitativo del tipo $\{-, 0, +\}$. El uso de espacios cuantitativos con intervalos más generales en el Algoritmo Predictivo, y la extensión de las reglas a esta noción de valor cualitativo no parece ser trivial.

El último aspecto es que el análisis TQ es realmente incapaz de manejar discontinuidades de una forma natural. Williams indica que el método podría extenderse para contemplar las discontinuidades, y parece que esta extensión supondría la propagación del orden de la singularidad (por ejemplo, impulso, escalón, rampa lineal, rampa parabólica). En el Algoritmo Predictivo hemos desarrollado una técnica basada en el uso de planos diferenciales para modelar la estructura de orden superior del sistema. Esto se basa en la observación de que cualquier cambio en la entrada del sistema supone una discontinuidad en alguna derivada de orden superior al de la entrada (a menos que la entrada haya cambiado continuamente, como un crecimiento asintótico o una entrada sinusoidal, por ejemplo). No está todavía claro cómo podría incorporarse nuestra forma natural de tratar la discontinuidad mediante planos diferenciales a un

esquema constructivo como el análisis TQ (aunque no hay firmes razones para creer que no pueda hacerse), pero esperamos que nuestro trabajo en el desarrollo del Algoritmo Predictivo contribuya a clarificar la cuestión del comportamiento discontinuo. El punto realmente importante es que el comportamiento de entrada descrito por una función singular no es infinitamente diferenciable, y que las derivadas de la singularidad se hacen iguales a 0 en algún orden elevado.

Lo siguiente es una breve descripción de los pasos que contempla el análisis TQ:

1. Dadas las causas primarias, se ejecuta la Propagación Causal para determinar el estado en un momento dado.
2. Se determinan aquellas variables que pueden cambiar desde 0 empleando la Regla de Continuidad y la segunda parte de las Reglas de Integración Cualitativa.
3. Se usa el resultado del paso anterior para obtener las causas primarias y se aplica la Propagación Causal para determinar el estado durante el período de tiempo.
4. Se determinan las variables que pueden cambiar a 0 empleando la primera parte de la Regla de Integración Cualitativa.
5. Se usan las Reglas de ordenación de Transiciones para determinar el subconjunto de las variables obtenidas en el paso anterior que cambiarán en primer lugar.
6. Se vuelve al primer paso y se repite el proceso para el momento siguiente.

Veremos que este resumen es similar tanto a las consideraciones de Kleer y Bobrow descritas en el siguiente apartado I de Kleer 1984a I como al Algoritmo Predictivo. Debe apreciarse que la Propagación Causal emplea las ecuaciones que describen el sistema para construir el estado desde las causas primarias, y que la Integración Cualitativa juega un papel constructivo en los pasos 2 y 4 descritos anteriormente. Esto es muy diferente del modo en que trabaja el algoritmo QSIM, si bien mantiene todavía la noción de situación o estado de un sistema. Sugerimos que los conceptos constructivo y no constructivo constituyen una

distinción más relevante que el de "basados en situación" o "basados en la historia". Este criterio de clasificación de los algoritmos de simulación cualitativa resulta especialmente interesante en relación con su utilización en STI; en estos sistemas resulta necesaria la generación de explicaciones y por lo tanto la utilización de algoritmos constructivos.

En resumen, el método de análisis TQ sugiere una base conceptual que considera la simulación cualitativa análoga a la simulación numérica. Se observará más adelante, en la descripción del Algoritmo Predictivo que el trabajo de Williams ha sido una fuente de inspiración importante en nuestras consideraciones; fue un intento de racionalizar este trabajo lo que condujo tanto al Algoritmo Predictivo como al Motor Predictivo. Las sugerencias hechas respecto al manejo de discontinuidades en el comportamiento de las variables del sistema y la necesidad de una buena teoría acerca de cuándo es provechoso tratar las derivadas de orden superior nos ha conducido al desarrollo de la noción de planos diferenciales para eliminar la ambigüedad presentada por las entradas aditivas descritas por una función singular, y para manejar la complejidad exponencial de la Ordenación de Transiciones no-constructiva. También hemos podido tratar la reallimentación en sistemas de forma bastante natural en el Algoritmo Predictivo estructurando las ecuaciones del sistema.

2.6.3.- Simulación e Imaginación

Aunque no tenga una influencia directa en el desarrollo del Algoritmo Predictivo, el trabajo de (de Kleer 1984a) es importante por la relevancia de las ideas que contiene respecto a las consideraciones que nosotros hemos adoptado. Podemos interpretar este trabajo como un intento implícito de formular la simulación cualitativa como el análogo cualitativo de las simulaciones numéricas. El trabajo relaciona implícitamente la Integración cualitativa con la noción convencional de la causalidad en los sistemas dinámicos continuos (aunque hacemos notar que de Kleer ha sido asociado con varias nociones de causalidad en otros trabajos publicados (de Kleer 1984b, de Kleer 1986a)).

De Kleer y Bobrow presentan siete leyes "fundamentales" que según ellos deben gobernar el comportamiento de los mecanismos físicos. Al inspeccionarlas encontramos que podemos extraer un subconjunto independiente de cuatro

reglas. Una de éstas será discutida más adelante, las otras tres ideas principales pueden enunciarse como sigue:

1. Continuidad de valor: Los valores deben cambiar de forma continua en una transición.
2. Evitar la contradicción: El sistema no puede cambiar a un estado que sea inconsistente con respecto a las ecuaciones cualitativas.
3. Regla de cambio instantáneo: Los cambios desde 0 se producen de forma instantánea y ningún otro cambio puede producirse en ese instante.

De Kleer y Bobrow introducen la noción de diferenciación de las ecuaciones del modelo y usan estas ecuaciones de alto orden para razonar sobre las derivadas de orden elevado de las variables del sistema. Dos de las reglas adicionales que presentan se derivan de aplicar las reglas 1 y 3 sobre las derivadas de todos los órdenes. Sin embargo, de Kleer y Bobrow no dan ninguna indicación acerca del modo de incluir las derivadas de orden superior, o lo que es más importante, hasta qué orden deberían diferenciarse las ecuaciones del sistema. En el Algoritmo Predictivo, tratamos estas cuestiones dando una explicación de cómo y por qué la información de orden elevado debería ser incluida en el modelo del sistema y generar el comportamiento del sistema a partir de ella. Es claro que las reglas presentadas por de Kleer y Bobrow se han desarrollado desde la consideración de un conjunto bastante restringido de dispositivos físicos. Si bien estamos de acuerdo que las tres reglas anteriores son fundamentales, hemos encontrado mediante una aplicación más amplia del Algoritmo Predictivo que también se necesitan otras reglas para un esquema de razonamiento como este. En particular, se necesitan algunos mecanismos descubiertos por Kuipers para hacer frente a los comportamientos originados por el ruido, mecanismos que se describirán en el capítulo 7.

De Kleer y Bobrow consideran que las simulaciones comienzan a partir del estado inicial (igual que hace QSIM). Esto resulta adecuado para los mecanismos particulares que se han considerado, pero no conduce a la consideración de la noción de entrada al sistema. Quizás como consecuencia de esto no se hace explícita la noción de causalidad del sistema. Sin embargo, hay una noción implícita de la causalidad que de Kleer y Bobrow obtienen en virtud del hecho de que sólo consideran las transiciones cualitativas de las variables de estado, lo que

llaman "cantidades significativas del mecanismo". Siempre que su algoritmo de simulación considera las ecuaciones algebraicas del sistema (el equivalente de la Propagación Causal) el punto de comienzo para la propagación (las causas primarias) siempre incluye los valores de las variables de estado independientes. Así, el cálculo de los valores cualitativos siempre se construye en la dirección de la causalidad del sistema.

El ciclo básico de Kleer y Bobrow puede presentarse del modo siguiente:

1. Comienza desde algún estado inicial.
2. Resuelve los cambios cualitativos de cada variables.
3. Identifica aquellas variables que se desplazan hasta su umbral (puntos cualitativos en el espacio cuantitativo).
4. Construye un conjunto de posibles estados siguientes desde estas transiciones.

- a) Construye una descripción parcial de los estados correctos (continuos) a partir de la información del umbral (regla 1); Los siguientes estados posibles se generan usando las ecuaciones de integración cualitativa para cada "cantidad significativa del mecanismo":

$$\left[X_{siguiente} \right] = \left[X_{actual} \right] + \left[\frac{d^m x}{dt^m_{actual}} \right]$$

donde m expresa el orden de la primera derivada superior distinta de cero.

- b) Generan estados no contradictorios (regla 2) que se ajusten a las descripciones parciales generadas en el paso (4a).
 - c) Prueba todas las transiciones desde el estado actual a los posibles estados siguientes empleando las reglas (1) y (3).
5. Para cada nuevo estado no analizado todavía se repite de forma recursiva el paso 2.

Hay que hacer algunas observaciones en cuanto a la estructura de este algoritmo. El punto más importante es que parece un algoritmo constructivo;

puede apreciarse la similitud del análisis TQ y la diferencia con el algoritmo QSIM. Podemos ilustrar otros aspectos en comparación con el análisis TQ.

El paso (2) anterior se corresponde con la Propagación Causal. Hay una información inicial acerca de algunas variables del sistema (causas primarias) y se emplean las ecuaciones del sistema para derivar los valores del resto de las variables. El paso (3) se corresponde al reconocimiento de Transiciones y el paso (4) se corresponde con la ordenación de Transiciones. Debe tenerse en cuenta que de Kleer y Bobrow llevan a cabo la Ordenación de Transiciones empleando un esquema no constructivo de generación y prueba. El paso (4a) genera subconjuntos de variables en transición y los pasos (4b) y (4c) usan las ecuaciones del sistema para probar estos subconjuntos de variables en transición. Si nuestra interpretación es correcta, el paso (4) del algoritmo es de complejidad exponencial, dado que si hubiera 4 posibles transiciones en el paso 3, el paso (4a) generaría $2^4 - 1 = 15$ subconjuntos posibles. Podemos suponer que dado que el paso (4a) sólo considera transiciones de "cantidades significativas del mecanismo" (variables de estado independientes) el factor exponencial de esta complejidad está siempre limitada por el orden del modelo del sistema. Sin embargo, en un ejemplo proporcionado por de Kleer y Bobrow esto no parece ser el caso, de modo que la posición no está clara en este punto tan importante. En nuestro trabajo sobre el Algoritmo Predictivo hemos clarificado esta cuestión y mostramos cómo la naturaleza exponencial de la Ordenación de Transiciones no constructiva siempre puede limitarse por el orden del modelo del sistema.

De Kleer y Bobrow observan que el uso de las reglas (1) y (2) para la Continuidad de los Valores y para Evitar las Contradicciones es más simple que el uso de las reglas de Ordenación de Transiciones en el análisis TQ. Apoyaríamos esta opinión, aunque parece olvidar que la Ordenación de Transiciones constructiva del análisis TQ debería ser desde el punto de vista de cálculo más eficaz que un esquema no constructivo. Resulta útil ilustrar el modo en que las reglas (1) y (2) llevan a cabo la Ordenación de Transiciones. Supongamos que tenemos:

$$[a] - [b] = [c]$$

$$[a] = + , [b] = + , [c] = +$$

$$[da / dt] = - , [db / dt] = 0$$

El paso (4a) consideraría un estado en el cual la variable a ha cambiado a 0; la propagación de este valor llevaría a $[c] = -$, y la regla (1) aplicada a la variable c construiría un estado en el cual c cambiaría a 0 mientras que $[a]$ es todavía $+$. Como podemos ver, se ha descubierto la transición de c y se ha ordenado con respecto al cambio de a , incluso sin disponer de $[dc/dt]$. Consideremos este otro ejemplo:

$$[a] = [b]$$

$$[a] = +, [b] = +$$

$$[da/dt] = -, [db/dt] = -$$

El paso (4a) construiría un estado posible en el que a cambiaría a 0 mientras $[b]$ seguiría siendo $+$. El paso (4b) aplicaría la regla (2) para invalidar la contradicción de que $[b] = +$, dando como resultado que b cambia a 0 al mismo tiempo que a . Como se ve, los pasos (4a) y (4b) aplican implícitamente las ecuaciones algebraicas del sistema (como la Propagación Causal) y el resultado se valida frente a las reglas (1) y (2).

Basándonos en esta observación, hemos adoptado en el Algoritmo Predictivo la noción de que la Propagación Causal puede fallar. Aunque nuestra Propagación Causal es constructiva desde un punto de vista de cálculo, puede construir (inferir) estados inválidos. Por lo tanto incorporamos pruebas de validez en la propagación Causal que forman la parte de prueba del esquema de generación y prueba de la Ordenación de Transiciones.

De Kleer y Bobrow no parecen hacer ninguna distinción entre las transiciones desde los intervalos cualitativos a los puntos cualitativos y desde los puntos a los intervalos. Williams interpreta esto observando que (Williams 1984a):

" La formulación de Kleer y Bobrow puede producir una descripción consistente en una secuencia de instantes que no están separados por intervalos abiertos, así su modelo de tiempo no es denso."

Pero esto es quizás una simplificación de lo que puede ocurrir. De Kleer y Bobrow hacen una distinción implícita entre estos tipos de transición que está contenida en la regla (3), la regla de Cambio Instantáneo. Ellos usan la misma ontología temporal para los comportamientos cualitativos que el análisis TQ y QSIM: los estados en los que una variable toma el valor 0 tienen lugar en un

momento, mientras que los estados en los que todas las variables tienen valores en intervalos cualitativos (+ ó -) tienen lugar en períodos de tiempo. La generación de "secuencias de Instantes" (momentos de tiempo) es un intento de ilustrar la causalidad, que según el caso (y no en la aplicación a los STI) puede suprimirse en la presentación del comportamiento cualitativo de un sistema (como por ejemplo se expone en las nociones de de Kleer acerca del "tiempo mítico" y " causalidad mítica" [de Kleer 1984b], [de Kleer 1986a]). Citando a de Kleer y Bobrow [de Kleer 1984a]:

" Si más de una cantidad nula tiene una derivada distinta de cero, podemos pensar en ellas cambiando de una en una o todas a la vez. Modelando lo que ocurre como una serie de instantes, tenemos un sentido intuitivo de causalidad satisfactorio; agrupando estos instantes en un simple instante tenemos transiciones consistentes con cambios simultáneos desde un instante al siguiente intervalo de tiempo."

La regla de Cambio Instantáneo obliga a las transiciones desde 0 a producirse siempre antes que las transiciones a 0 y visto que esto se ha hecho explícito en la estructura del algoritmo de análisis de TQ, se maneja implícitamente en el paso (4c). La confusión se debe parcialmente a que de Kleer y Bobrow no explican su mecanismo para refutar transiciones de estado Inválidas con suficiente detalle.

La noción de causalidad en los sistemas dinámicos se centra en el papel que asignamos a la Integración. En los sistemas físicos, se considera que la causalidad se dirige desde la derivada de una variable de estado independiente a la propia variable de estado, es decir, en la dirección de la Integración. Un algoritmo no constructivo como QSIM no tiene esta perspectiva de la primitiva de modelado dinámico; sin embargo, en un algoritmo constructivo tal como el análisis TQ o el de de Kleer y Bobrow, la manera en que se desarrolla la Integración cualitativa (y la Ordenación de Transiciones) es de particular interés dado que es aquí donde se hace explícita la noción de causalidad. Debemos considerar ahora el proceso de Integración cualitativo de de Kleer y Bobrow con más detalle. Hasta ahora hemos asumido que de Kleer y Bobrow tienen una visión constructiva de la Integración; esto se debe al uso del término "generar" en el paso (4a) de la simulación. Sin embargo examinemos la ecuación de Integración cualitativa:

$$[x_{siguiente}] = [x_{actual}] + \left[\frac{d^m x}{dt^m actual} \right]$$

donde m representa el orden de la primera derivada superior distinta de cero, apreciamos que la forma algebraica de esta ecuación puede originar ambigüedad cualitativa previniendo la generación de descripciones parciales de los siguientes estados. De Kleer y Bobrow hacen una breve mención de la técnica alternativa del algoritmo de simulación, denominado algoritmo de "Imaginación". La Imaginación es un proceso no constructivo donde la Integración cualitativa se usa como prueba para filtrar transiciones de estado incorrectas. Dado que estamos interesados en la comparación con el esquema constructivo del análisis TQ, suponemos una Interpretación constructiva de la ecuación de Integración cualitativa anterior. Por el contrario, si consideramos el uso del algoritmo anterior para Imaginar los siguientes estados, quizás podemos adoptar una Interpretación no constructiva de la regla de Interpretación cualitativa.

Finalmente, consideraremos la cuarta regla propuesta por de Kleer y Bobrow que fue pospuesta en la presentación anterior.

4. No cambio de todas las derivadas nulas: Una variable que es distinta de cero en algún momento no puede nunca ser idénticamente igual a cero.

Esta regla es válida para los sistemas dinámicos continuos dado que un cambio supondría una discontinuidad en alguna derivada de orden superior de la variable en cuestión. Como puede apreciarse, el análisis TQ no implementa esta cuarta regla; ni tampoco QSIM, aunque está prevista su inclusión de forma opcional. En el Algoritmo Predictivo tampoco damos soporte a esta regla. Identificamos este estado con una aproximación asintótica, y permitimos que tenga lugar la transición a 0 durante un período de tiempo. Cuando del Algoritmo Predictivo termina, extendemos el último momento con todos sus valores 0 hasta un período final idénticamente nulo.

2.6.4.- El Propagador de Restricciones Temporales

El Propagador de Restricciones Temporales (TCP) [Williams 1986a] ha llevado a diferenciar entre los algoritmos de razonamiento cualitativo basados en la situación y los basados en la historia [Weld 1990a]. Todos los algoritmos discutidos hasta ahora en este capítulo estarían dentro de la categoría de basados en la situación. El TCP sugiere que la simulación debería considerarse en una dimensión ortogonal, es decir, considera que el comportamiento de cada variable independiente es una primitiva de la noción de situación o estado del sistema completo. Estas dos perspectivas diferentes del razonamiento cualitativo reflejan la divergencia en la Inteligencia Artificial entre el "cálculo de situación" [Charniak 1985a] y la noción de historias [Hayes 1985a, McCarthy 1969a]. El TCP considera la simulación cualitativa como la evolución de las variables independientes a lo largo del tiempo. Esta evolución, llamada una "historia", se representa como una secuencia contigua de "episodios". Cada episodio es una tupla que consta del valor de la variable y el intervalo de tiempo, su "extensión temporal", durante el que toma dicho valor. Las historias se hacen "concisas" asegurando que cada episodio tiene una extensión temporal máxima con respecto a su valor, es decir, dos episodios adyacentes deben tener diferentes valores y cada uno de ellos tiene un solo valor. Aunque aparentemente trivial, la noción de hacer una historia concisa supone que la extensión temporal de un episodio en una historia concisa puede extenderse a varias situaciones (estados) del sistema como totalidad; es por esta razón que se considera que la aproximación basada en la historia es ortogonal a la aproximación basada en la situación.

En los algoritmos basados en la situación, la Ordenación de Transiciones debe producir una ordenación total de transiciones. Observamos que si dos o más grupos de variables no interactúan, un algoritmo basado en la situación está obligado a hacer ciertas distinciones temporales irrelevantes. Sin embargo, refiriéndose a la extensión temporal de los episodios de diferentes variables sólo cuando las variables interactúan, la aproximación basada en la historia del TCP evita hacer estas distinciones irrelevantes. [Williams 1986a] ilustra este punto con un curioso ejemplo sobre dos osos que viven en diferentes partes del mundo.

Consideraremos ahora más profundamente el significado de interacción entre las variables y cómo el proceso de Ordenación de Transiciones tiene en cuenta esta interacción. Debe apreciarse que el algoritmo TCP es una extensión del análisis TQ. En otras palabras, parecer ser una aproximación basada en la situación dentro de otra basada en la historia; esto sugiere que puede haber una forma mejor de categorizar los algoritmos de simulación cualitativa. Anteriormente en este capítulo nos hemos referido a diferentes métodos para dividir el grupo de variables del sistema en subgrupos de variables que interactúan entre sí de alguna manera. Sólo se necesita una ordenación total de transiciones dentro de cada uno de estos grupos; la interacción entre grupos se define por la ontología que se usó para hacer la división. Mientras se necesite una ordenación total, el llevar a cabo la Ordenación de Transiciones mediante mecanismos no constructivos no produce distinciones temporales irrelevantes. Sin embargo, cuando las restricciones del modelo contiene dos (o más) grupos de variables que no interactúan, el mecanismo no constructivo que hemos discutido no reconoce esto, y las distinciones irrelevantes producidas por la Ordenación de Transiciones. Debe imponerse una ontología de modelado para dividir las variables del sistema en grupos mutuamente interactivos.

El TCP no produce estas distinciones temporales irrelevantes, incluso aunque no haya evidencia de que se esté empleando una ontología de modelado. La siguiente formulación contiene la clave de una mejor categorización de los algoritmos de simulación cualitativa [Williams 1986a]:

"Las Interacciones de Interés están definidas por las ecuaciones del sistema, donde cada ecuación especifica una interacción local. Veremos que estas Interacciones que afectan el comportamiento del sistema pueden identificarse durante el proceso de análisis.

La capacidad de TCP de identificar las Interacciones de Interés durante el proceso de análisis depende del hecho de que el análisis TQ lleva a cabo la Ordenación de Transiciones de una manera constructiva y no mediante la generación y prueba. El análisis TQ emplea el criterio determinado por las ecuaciones del sistema para dividir el grupo de variables en transición de modo que se eviten las distinciones temporales irrelevantes. Este mismo mecanismo constructivo para la Ordenación de Transiciones se encuentra aparentemente en TCP, y es crucial en la perspectiva basada en la historia que ofrece. Hemos explicado anteriormente por qué la Ordenación de Transiciones en el Algoritmo

Predictivo es no constructivo; principalmente porque deseamos manejar la realimentación de forma natural usando ecuaciones del sistema estructuradas. Identificamos las interacciones de interés aplicando una ontología de modelada basada en componente para descomponer el sistema en componente interconectadas que se consideran entonces individualmente mediante el Algoritmo Predictivo. Dentro de un componente, cada interacción es de interés y de esta forma la Ordenación de Transiciones no constructiva no produce distinciones irrelevantes. Con el estudio de casos concretos más adelante se ilustrará el uso de esta ontología.

2.7.- Resumen

En este capítulo hemos argumentado la importancia de los múltiples modelos en los Sistemas de Tutoría Inteligente para conseguir una enseñanza eficaz y la utilidad de los modelos cualitativos que permiten elaborar explicaciones causales del comportamiento del sistema y su importancia para conducir a un conocimiento experto acerca de un sistema.

Este fenómeno ha hecho que el desarrollo de algoritmos de simulación cualitativa haya despertado un gran interés entre los investigadores dedicados a este área, y hemos presentado en este capítulo los desarrollos más relevantes. Se ha argumentado además que la distinción entre algoritmos de razonamiento cualitativo basados en la situación y basados en la historia puede ocultar las distinciones realmente importantes que pueden permitir un mejor entendimiento y clasificación de los distintos métodos. Hemos intentado apoyar esta opinión en una detallada comparación de los algoritmos más conocidos de la simulación cualitativa. Hemos incluido el Algoritmo Predictivo en esta comparación como preparación de la exposición detallada que se hace de él más adelante. La conclusión de este capítulo es la sugerencia de una clasificación métrica y mostrar donde se encajan estos algoritmos dentro de esta métrica. La tabla siguiente presente la clasificación que proponemos para los principales algoritmos.

		Ordenación de Transiciones	
		Constructivo	No constructivo
Integración Cualitativa (Reconocimiento de Transiciones)	Constructivo	Análisis TQ TCP	Algoritmo Predictivo Simulación de Kleer/Bobrow
	No constructivo		OSIM Imaginación de Kleer/Bobrow

Resaltamos la relevancia del mecanismo de la Integración Cualitativa (o el Reconocimiento de Transiciones) y hemos mostrado la ventaja de la aproximación constructiva del análisis TQ. Este capítulo ha indicado también la relevancia del mecanismo de Ordenación de Transiciones; la perspectiva basada en la historia depende de este carácter constructivo en lugar del de generación y prueba. Hemos explicado porqué no hemos adoptado dicho esquema constructivo para la Ordenación de Transiciones en el Algoritmo Predictivo, pero confiamos en una ontología de modelado apropiada.



3. LA RETÍCULA CUANTITATIVA

3.1. Introducción

Los trabajos de Williams acerca del análisis TO y el TCP [Williams 1984a, Williams 1986a, Williams 1990a] han sido la principal fuente de inspiración para nuestro diseño del Algoritmo Predictivo. En el desarrollo de la arquitectura del Algoritmo Predictivo hemos adoptado e implementado íntegramente la sugerencia que hace Williams en su trabajo de separar las inferencias relacionadas con el tiempo de las inferencias relacionadas con los valores. Como podemos ver en la Figura 3.1, los módulos Espacio Temporal y Espacio Cuantitativo se encargan respectivamente de las inferencias relacionadas con el tiempo y las relacionadas con los valores. Hemos adoptado, si bien parcialmente, un visión basada en la historia, aunque empleamos una terminología ligeramente diferente de la presentada en la literatura: denominamos "eventos" a los "episodios" y el módulo de Mapa de Eventos registra estos como unidades de propagación para el módulo del Algoritmo Predictivo.

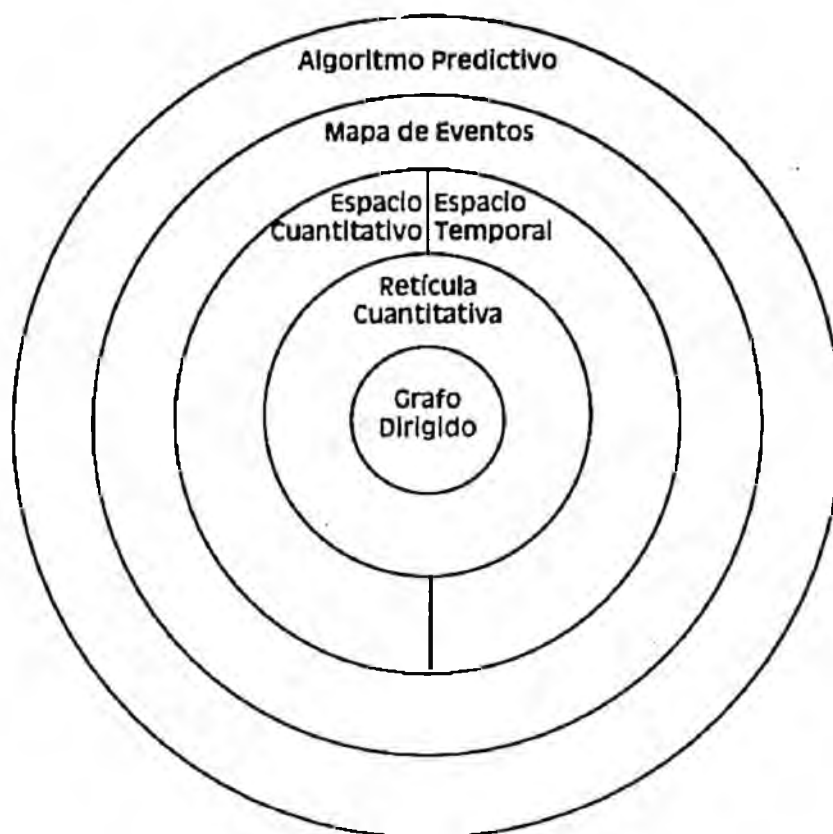


Figura 3-1 Arquitectura del Motor Predictivo

La etapa de la Propagación Causal en el Algoritmo Predictivo es similar a la del TCP, es decir, determina la Intersección de las extensiones temporales de dos (o más) eventos (empleando el módulo Espacio Temporal), y calcula el valor cualitativo de la ecuación utilizando el Espacio Cuantitativo. Cada módulo de la arquitectura del Motor Predictivo hace uso de la funcionalidad del módulo inmediatamente Interior mediante un conjunto de interfaces predicados del tipo "Tell_and_Ask". El Motor Predictivo se controla completamente, por lo tanto, mediante la funcionalidad proporcionada por su módulo más exterior.

Hemos adoptado la sugerencia de Simmons de emplear razonamientos basados en desigualdades de tipo general, al igual que en su desarrollo del "Time Box" (Espacio Temporal), y siguiendo los trabajos de Williams hemos hecho uso del módulo denominado "Quantity Lattice" (Retícula Cuantitativa) de Simmons [Simmons 1986a]. Nuestro módulo Retícula Cuantitativa es la representación central del conocimiento y el mecanismo de Inferencia del Motor Predictivo. Su funcionalidad es aprovechada tanto por el módulo Espacio Cuantitativo como

por el módulo Espacio Temporal, que pueden considerarse como abstracciones de la Retícula Cuantitativa: lo cual constituye una evidencia bastante satisfactoria de la dualidad entre el tiempo y el valor en la simulación cuantitativa.

Nuestra implementación de la Retícula Cuantitativa incorpora ciertas extensiones de la funcionalidad contenida en los trabajos de Simmons. Estas extensiones resultan necesarias, fundamentalmente, para que el módulo Espacio Cuantitativo pueda utilizar también el módulo Retícula Cuantitativa, uso que describimos en el siguiente capítulo.

Otro aspecto importante en el desarrollo de nuestra Retícula Cuantitativa es la separación de ciertas funcionalidades en un módulo separado denominado Grafo Dirigido. El principal objetivo que perseguimos con ello es clarificar cuándo las inferencias de la Retícula Cuantitativa se basan simplemente en el conocimiento relacional simbólico (en el módulo Grafo Dirigido) y cuándo implica conocimiento cuantitativo (en el módulo Retícula Cuantitativa).

3.2.- El módulo Grafo Dirigido

3.2.1.- Estructura Algebraica

El módulo Grafo Dirigido implementa la estructura de representación central de la estructura de los datos del Motor Predictivo; que no es sino un grafo dirigido con arcos etiquetados.

Aunque la noción más habitual de etiquetado suele ser una medida de algún tipo (por ejemplo una función de la distancia como en el problema del "vendedor viajando" [Garey 1979a]), una etiqueta en el módulo Grafo Dirigido indica la relación ordinal que existe entre los dos nodos que conecta; esta relación puede ser bien una igualdad = o bien una desigualdad <, >, ≤, ≥.

El usuario de este módulo no está limitado por el tipo de nodos que pueden almacenarse. Sin embargo, como puede verse en la Figura 3-1, el módulo Grafo Dirigido sirve para almacenar, a través del módulo Retícula Cuantitativa, la información necesaria tanto para el módulo Espacio Temporal como para el módulo Espacio Cuantitativo.

Como mostraremos más adelante, hemos empleado el módulo Grafo Dirigido para contener tanto puntos temporales simbólicos como valores cualitativos simbólicos, así como también expresiones aritméticas y funciones que incluyan estos nodos básicos. Para ello, el módulo Grafo Dirigido proporciona una etiqueta adicional σ que puede emplearse para indicar la relación de aparición de un nodo en otro nodo (expresión). Esto último nos permite evitar la repetición de búsquedas lineales en el conjunto de nodos intentando dibujar ocurrencias de un nodo particular como una subexpresión de otros nodos.

Más formalmente, el módulo Grafo Dirigido $D (N, A)$ tiene nodos N de tipo no especificado (el tipo viene determinado por el módulo que haga uso del módulo Grafo Dirigido) y arcos A con etiqueta. Los arcos A están etiquetados con relaciones ordinales del conjunto $\phi \equiv (<, >, \leq, \geq)$ o con la relación de aparición σ , es decir, disponemos en el Grafo Dirigido un conjunto completo de etiquetas formado por $\Lambda \equiv \phi \cup (\sigma) = (<, >, \leq, \geq, \sigma)$. Cada relación $r \in \Lambda$ origina una relación binaria $R_r \subset N \times N$. Además, puede considerarse que las relaciones de ϕ originan una relación Inversa, de acuerdo con las siguientes condiciones:

para $a, b \in N$

$$(a, b) \in R_{<} \text{ si } (b, a) \in R_{>}$$

$$(a, b) \in R_{\leq} \text{ si } (b, a) \in R_{\geq}$$

$$(a, b) \in R_{=} \text{ si } (b, a) \in R_{=}$$

Aunque $(a, a) \in R_{=}$, estos arcos ordinales no se incluyen en el grafo dirigido, puesto que no permitimos en él la existencia de bucles cerrados. La exclusión de estos arcos mejora el rendimiento del algoritmo de búsqueda en el grafo que describiremos a continuación. Tenemos entonces:

$$A = \bigcup_{r \in \Lambda} R_r = R_{<} \cup R_{>} \cup R_{=} \cup R_{\leq} \cup R_{\geq} \cup R_{\sigma}$$

Existen varios modos diferentes de describir la estructura algebraica de los grafos dirigidos. Las consideraciones anteriores reflejan las decisiones básicas que se tomaron para la implementación del módulo Grafo Dirigido; sin embargo, no es necesario incluir todas las relaciones ordinales, ni siquiera la relación de aparición. Podríamos implementar sólo las relaciones $<$, $=$, \leq para etiquetar los arcos, y emplear la búsqueda lineal a través de los nodos de N en lugar de implementar σ para encontrar la aparición de subexpresiones. Las relaciones virtuales de $R_{>}$ y R_{\geq} podrían generarse utilizando las condiciones anteriores. Alternativamente, también podríamos describir completamente la estructura en términos de la relación ordinal \leq (reflexiva, antisimétrica y transitiva) con las siguientes condiciones:

$$(a, b) \in R_{=} \text{ si } (a, b) \in R_{\leq}, (b, a) \in R_{\geq}$$

$$(a, b) \in R_{<} \text{ si } (a, b) \in R_{\leq}, (b, a) \notin R_{\leq}$$

Debemos tener en cuenta, sin embargo, que la implementación exclusivamente en términos de la relación ordinal \leq necesita tener en cuenta la suposición de mundo cerrado permitiendo que la negación lógica se manejase explícitamente, de otra forma R_{\leq} y $R_{<}$ no podrían distinguirse. En esencia, por lo tanto, puede pensarse en el grafo dirigido como en un conjunto parcialmente ordenado. Si proporcionamos límites inferior y superior tendríamos una retícula [Rutherford 1965a].

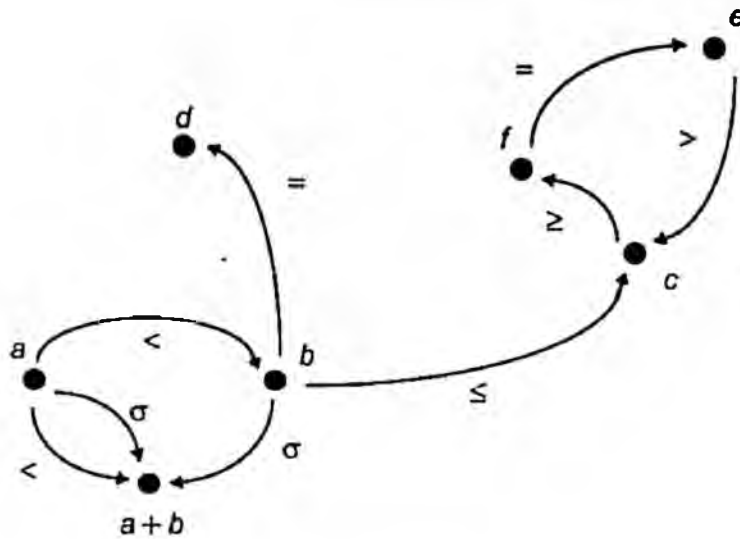


Figura 3-2 Ejemplo de Grafo Dirigido $D' (N', A')$

En la Figura 3-2 mostramos un ejemplo de grafo dirigido, tal y como lo hemos definido anteriormente, al que denominaremos $D' (N', A')$. En el módulo Grafo Dirigido Implementamos todas las relaciones de Λ (puesto que así queda reflejada más intuitivamente la realidad que subyace en el grafo dirigido) proporcionando la siguiente matriz de representación de los arcos A' :

	a	b	a+b	c	d	e	f
a		<	$\sigma, <$				
b			σ	\leq	=		
a+b							
c						>	\geq
d							
e							
f							=

Como podemos apreciar, la matriz no es densa, por lo cual en la implementación hemos empleado estructuras de almacenamiento adecuadas que eviten malgastar espacio en la memoria. El arco de aparición σ puede existir en paralelo con un arco ordinal de ϕ . Esto refleja que las relaciones de aparición y ordinales son independientes; normalmente, no están permitidos los arcos paralelos en los grafos dirigidos. Estrictamente, deberíamos considerar dos tipos separados de grafos:

$$D_1(N, \bigcup_{r \in \Phi} R_r)$$

$$D_2(N, R_\sigma)$$

No existe ningún problema en considerar el grafo $D = D_1 \cup D_2$, puesto que hemos previsto la existencia de arcos paralelos en la implementación del módulo grafo dirigido. Dado que estamos representando matrices dispersas no existe ningún problema con el almacenamiento de arcos paralelos. Sin embargo, por conveniencia y para mayor claridad, omitiremos los arcos de aparición σ del ejemplo de grafo dirigido $D'(N', A')$ que estamos considerando.

Las relaciones de interés se construyen a partir de los arcos almacenados, de acuerdo con las reglas de las relaciones inversas mencionadas anteriormente. En la implementación del módulo Grafo Dirigido esto se hace de forma virtual con el fin de reducir espacio y tiempo de búsqueda, y puede determinarse una matriz de relaciones virtuales de la matriz de arcos anteriores:

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
<i>a</i>	=	<	<				
<i>b</i>	>	=		≤	=		
<i>a+b</i>	>		=				
<i>c</i>		≥		=		>	≥
<i>d</i>		=			=		
<i>e</i>				<		=	=
<i>f</i>				≤		=	=

3.2.2.- Relaciones transitivas y relaciones ordinales combinadas

Es posible inferir relaciones adicionales entre nodos a partir del grafo dirigido $D'(N', A')$, buscando a lo largo de los caminos del grafo, por ejemplo:

$$(a, b) \in R_{<}, (b, d) \in R_{\leq} \Rightarrow (a, d) \in R_{<}$$

Las reglas de transitividad para las relaciones ordinales en serie están contenidas en la Tabla 3-1 [Simmons 1986a].

	<	>	=	≤	≥
<	<		<	<	
>		>	>		>
=	<	>	=	≤	≥
≤	<		≤	≤	
≥		>	≥		≥

Tabla 3-1: Reglas de Transitividad de Relaciones Ordinales en Serie

Podemos considerar relaciones ordinales en paralelo, por ejemplo:

$$(c, f) \in R_1, (c, f) \in R_2 \Rightarrow (c, f) \in R_3$$

La consideración de una combinación paralela de relaciones puede sugerir la creación de un nuevo arco entre dos nodos, donde $(c, f) \in R_1$ debería reemplazar el arco $(c, f) \in R_2$. La Tabla 3-2 codifica las reglas de combinación para las relaciones ordinales en paralelo.

	<	>	=	≤	≥
<	<			<	
>		>			>
=			=	=	=
≤	<		=	≤	=
≥		>	=	=	≥

Tabla 3-2: Reglas de Combinación de Relaciones Ordinales en Paralelo

Debemos definir una noción de especificidad en las relaciones ordinales, que provendrá de considerar la relación \leq como $<$ ó $=$ y la relación \geq como $>$ ó $=$:

$x \in \Phi$ es más específica que $y \in \Phi$ si existe una relación $u \in \Phi$, $u \neq x$ tal que y es x ó u .

Esto nos indica que :

< es más específico que ≤

= es más específico que ≤

> es más específico que ≥

= es más específico que ≥

Si representamos la combinación como una conjunción lógica, el efecto de la combinación puede pertenecer a una de las siguientes cuatro clases posibles. Para $x, y, z \in \Phi$:

- 1) $x, y \Rightarrow$ nada, significa que x e y son lógicamente inconsistentes. p.e. $<, \geq$
- 2) $x, y \Rightarrow z$ donde z es más específico que x ó y (no ambos), p.e. $<, \leq \Rightarrow <$
- 3) $x, y \Rightarrow z$ donde z es más específico que x e y , por ejemplo $\leq, \geq \Rightarrow =$
- 4) $x, x \Rightarrow x$, por ejemplo $\leq, \leq \Rightarrow \leq$

Debemos tener en cuenta que las relaciones ordinales $<, >, =$ no pueden hacerse más específicas por combinación. Además, la relación de aparición σ no está incluida en la tabla de transiciones aunque es una relación transitiva; la razón es simplemente el modo en que se ha desarrollado la implementación como se discutirá al describir el módulo Retícula Cuantitativa.

3.2.3.- Algoritmo de búsqueda gráfico

El algoritmo de búsqueda gráfico que se emplea en esta implementación para inferir aquellas partes de las relaciones resultantes de las transiciones y combinaciones es un caso especial del algoritmo común de búsqueda *primero en profundidad* descrito en [Even 1979a]. Inicialmente se proporciona al algoritmo un nodo de comienzo y un nodo objetivo y el algoritmo intenta deducir la relación que existe entre estos dos nodos a partir de las relaciones virtuales ya determinadas. En lugar de etiquetar cada nodo de N con su distancia al nodo origen, nuestro algoritmo etiqueta cada nodo que examina con la relación transición/combinación que mantiene con el nodo de comienzo. La naturaleza de nuestras relaciones ordinales supone que sólo necesitamos inspeccionar un nodo si esta visita va a producir una relación más específica (en el sentido apuntado anteriormente). Esto significa que cada nodo se inspecciona como máximo dos veces, de modo que la complejidad del algoritmo, en el mejor de los casos, es de orden $O(n)$ donde n es el número de nodos de N , es decir, la búsqueda es lineal. Si visitamos el nodo objetivo con una de las "relaciones más específicas" de entre $<, >, =$ no podremos ya mejorarlo y debemos terminar nuestra búsqueda (a menos que queramos encontrar Inconsistencias).

En la descripción del algoritmo de búsqueda gráfico empleado para Inferir relaciones de transición/combinación debemos emplear la noción del límite de la propagación. Este límite se extiende desde el nodo de comienzo etiquetando adecuadamente los nodos visitados hasta que se alcanza el nodo objetivo. Visitar un nodo supone incluirlo en el límite, una vez que se ha visitado un nodo, se elimina del límite (el límite se extiende más allá de él). Hay tres condiciones de terminación para nuestro algoritmo.

- i) Se puede visitar el nodo objetivo con una relación más específica.*
- ii) No se pueden visitar más nodos, y el nodo objetivo ya se ha visitado con una relación menos específica.*
- iii) No se pueden visitar más nodos, y tampoco se ha visitado el nodo objetivo.*

Un nodo sólo se visita si puede ser etiquetado con una relación de transición; sólo se vuelve a visitar si puede ser etiquetado con una relación más específica. Durante la búsqueda, se emplean relaciones virtuales con la excepción del bucle; la consideración de la transición de un nodo a sí mismo con una relación de identidad haría perder mucho tiempo (aunque el nodo no sería revisado realmente en el sentido anterior). Una advertencia importante a esta regla de no existencia de bucles es la inicialización del límite que etiqueta el nodo inicial con la relación =.

A continuación, describiremos el algoritmo de búsqueda en profundidad que se utiliza para Inferir relación de transición/combinación en el Grafo Dirigido. Este algoritmo, como ya hemos dicho, se basa en el algoritmo presentado en [Even 1979a]:

- 1. Se etiqueta el nodo inicial con =*
- 2. Se visita el nodo inicial (se inicializa el límite).*
- 3. Se buscan todos los nodos que tienen una relación virtual con un nodo del límite que origina una relación de transición válida con la etiqueta del nodo del límite. Si no se encuentra ninguno, se detiene: condición (ii) o (iii) de las mencionadas anteriormente.*

4. Se visitan todos los nodos todavía no visitados que se encontraron en el paso (3). Se vuelven a visitar cualquier nodo encontrado en el paso (3) si mantiene una relación combinacional más específica.
5. Si el nodo objetivo está etiquetado con una relación más específica, se detiene: condición (I) anterior.
6. Se vuelve al paso 3.

Cuando este algoritmo termina, o bien no se ha alcanzado el nodo objetivo (condición III) o sí se ha alcanzado y se ha etiquetado con la relación de transición/combinación que mantiene con el nodo inicial (condiciones I y II). En nuestra implementación, si se infiere una relación en esta búsqueda, el resultado se guarda creando el arco ordinal correspondiente (la intención es ahorrar el tiempo que se pierde en búsquedas repetidas en el uso continuado del módulo Grafo Dirigido).

Nuestro algoritmo de búsqueda aplicado a cada par de nodos pertenecientes al grafo $D' (N', A')$ produce la siguiente matriz de relaciones de transición/combinación:

	a	b	a+b	c	d	e	f
a	=	<	<	<	<		
b	>	=		≤	=		
a+b	>		=				
c	>	≥		=	≥	>	>
d	>	=		≤	=		
e				<		=	=
f				<		=	=

Debemos tener en cuenta, también, que la relación de transición/combinación $(c, f) \in R_3$ es más específica que la relación virtual anterior $(c, f) \in R_2$. Esta nueva relación se guarda reemplazando al arco anterior en el Grafo Dirigido.

3.2.4.- Relaciones no convexas

El algoritmo de búsqueda gráfico que hemos empleado en la implementación se similar al que utiliza Simmons en su Retícula Cuantitativa, con una diferencia importante: no empleamos la relación \neq .

Si esta relación se incluye como una etiqueta de arco, en un algoritmo de búsqueda lineal como el nuestro no está garantizado que proporcione la relación transición/combinación correcta. El uso que hizo Williams de la Retícula Cuantitativa de Simmons [Williams 1986a] tampoco incluía la relación \neq (presumiblemente por esta misma razón). En nuestro uso del módulo Grafo Dirigido, la exclusión de \neq no origina ningún problema. Sin embargo, será interesante tener en cuenta este hecho posteriormente. Consideremos las reglas para las relaciones virtuales incluyendo la relación \neq :

$$(a,b) \in R, \text{ si } (b,a) \in R,$$

$$(a,a) \notin R,$$

Considerando también la línea de la tabla de transición para \neq :

	<	>	=	≤	≥	≠
≠			≠			

La misma fila en la tabla de combinaciones para \neq es:

	<	>	=	≤	≥	≠
≠	<	>		<	>	≠

Observamos simetría en el hecho de tener tres relaciones más específicas <, >, = y tres desigualdades menos específicas ≤ es < ó =, ≥ es > ó = y ≠ es < ó >.

Consideremos ahora el Grafo Dirigido $D''(N'', A'')$ de la Figura 3-3.

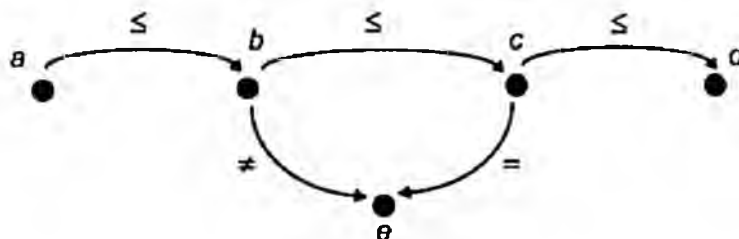


Figura 3-3: Ejemplo de Grafo Dirigido $D''(N'', A'')$

Debemos tener en cuenta que las relaciones $(a, b) \in R_2$ y $(b, e) \in R_2$ no forman una relación de transición válida. Cuando aplicamos nuestro algoritmo de búsqueda lineal para encontrar la relación transición/combinación entre los nodos a y d , sólo podemos deducir que $(a, d) \in R_2$ si buscamos desde b a c por primera vez inferimos que:

$$((b, e) \in R_2, (e, c) \in R_2), (b, c) \in R_2 \Rightarrow (b, c) \in R_2$$

y seguiría que $(a, d) \in R_2$. El único modo de asegurar que todas estas posibilidades se tienen en cuenta es modificar el paso 3 de nuestro algoritmo de búsqueda para dejarlo de la forma siguiente:

3. *Encontrar todos los nodos en la relación buscada con un nodo del límite que produzca una relación de transición válida con la etiqueta del nodo límite. Si no se encuentra ninguno, detenerse:*

Esto asegura, por ejemplo, que la relación $(b, c) \in R_2$ se encuentra durante la búsqueda desde a hasta d , pero la necesidad de efectuar búsquedas gráficas en cada visita a un nodo (y no simplemente considerar las relaciones virtuales) hace el algoritmo mucho menos eficiente. La solución que hemos presentado no es necesariamente la solución óptima (quizás sólo necesitemos efectuar búsquedas cuando se encuentran las etiquetas \neq), pero la búsqueda debe ser ciertamente no lineal si la relación \neq debe incluirse correctamente.

El trabajo de Nökel está muy relacionado con la observación anterior [Nökel 1989a] (ver también [Vilain 1986a, van Beek 1990a]). Nökel parece interesado en encontrar límites de complejidad computacional sobre la verificación de la consistencia global de los arcos etiquetados de un grafo, donde los nodos representan intervalos de tiempo y los arcos son disyunciones de las relaciones de intervalos primitivos de Allen [Allen 1983a]. Este autor considera la clase de las relaciones entre intervalos, que pueden expresarse como relaciones ordinales entre puntos límites de los intervalos donde las relaciones ordinales no incluyen la relación \neq , una noción denominada "puntos finales restringidos definibles". Este tipo puede asociarse a la noción de convexidad de la disyunción de relaciones entre intervalos primitivas (Teorema 1 de [Nökel 1989a]).

Podemos considerar la relación \neq como una relación no convexa en el sentido de que para cualquier número real a , el subconjunto de números reales definido por $\{ b: (a, b) \in R_{\neq} \}$ no es convexo, donde convexo tiene en este caso su definición habitual matemática (Lipschutz 1974a). Todas las relaciones ordinales en Φ son por lo tanto convexas. Podemos interpretar los resultados de Nörkel en nuestro dominio como sigue:

Si el grafo dirigido emplea solamente relaciones ordinales convexas, la comprobación de consistencia global (búsqueda completa de todos los pares de nodos) puede llevarse a cabo en un tiempo polinomial.

Esto está de acuerdo con el uso de un algoritmo de búsqueda lineal sobre todos los pares de nodos. En el caso más general, es decir, usando la relación no convexa \neq , la comprobación de la consistencia global es NP-completa.

Mencionamos la relación entre nuestro grafo dirigido y el trabajo de Nörkel (y otros) porque el módulo Espacio Temporal emplea también el módulo Grafo Dirigido, a través del módulo Retícula Cuantitativa, para representar las relaciones ordinales entre puntos temporales (momentos). Si consideramos estos puntos temporales como los puntos finales de los Intervalos de tiempo (períodos) la importancia del trabajo de contrastar las álgebras basadas en intervalos y en puntos aparece clara. El uso de una relación no convexa \neq fija los límites entre dos niveles de complejidad computacional. Es interesante apreciar que la relación \neq no puede expresarse en términos de una relación de orden \leq en un grafo dirigido, dado que no podemos construir una disyunción de arcos paralelos. Para profundizar más en estos aspectos puede acudirse al trabajo de Garey 1979a), que proporciona una descripción de la teoría de NP-completitud y el modo en que ésta se relaciona con la complejidad en tiempo del algoritmo.

3.2.5.- Funcionalidad del módulo Grafo Dirigido

En resumen, el módulo Grafo Dirigido es el mecanismo central para el almacenamiento de información empleado en el Motor Predictivo. Aunque Simmons presentó originalmente el grafo dirigido como una parte integrante de su Retícula Cuantitativa, nosotros decidimos separar los módulos Grafo Dirigido y Retícula Cuantitativa en el diseño del Motor Predictivo. De esta forma, podemos considerar el Grafo Dirigido y el algoritmo de búsqueda separadamente de los mecanismos de Inferencia de la Retícula Cuantitativa que son responsables de la implementación del uso de expresiones de nodos y límites reales sobre nodos simbólicos. Otra razón para separar el Grafo Dirigido es enfatizar la correspondencia (para los comportamientos de sistemas continuos) entre el tiempo considerado como momentos y períodos, y los valores cualitativos considerados como puntos e intervalos. Ambos pueden representarse empleando la mismo álgebra basada en puntos del Grafo Dirigido.

El Interface del Módulo Grafo Dirigido nos permite hacer lo siguiente:

- 1 Cargar un fichero del modelo pre-compilado.
- 2 Crear y borrar las relaciones aparentes.
- 3 Crear y borrar relaciones ordinales (virtuales).
- 4 Examinar relaciones aparentes (no transitivas).
- 5 Examinar relaciones ordinales (virtuales).
- 6 Buscar relaciones ordinales (relaciones transición/combinación).

3.3.- El módulo Retícula Cuantitativa

3.3.1.- Propagación de restricciones numéricas

El módulo Retícula Cuantitativa Integra los razonamientos simbólico y cuantitativo, y combina el razonamiento basado en desigualdades con el basado en simples expresiones matemáticas. El modo en que este módulo Integra los razonamientos simbólico y cuantitativo es mediante la asociación de un intervalo de valores reales a cada uno de los nodos del Grafo Dirigido. Este intervalo representa lo que se conoce sobre el valor cuantitativo del nodo. Por defecto, cada nodo tiene un intervalo inicial de $(-\infty, \infty)$, indicando que el valor actual del nodo podría ser cualquier número real. A medida que el módulo Retícula Cuantitativa recibe nueva información sobre las relaciones entre los nodos o sobre el valor real de un nodo, la información contenida en los intervalos de los nodos se mantiene consistente mediante un procedimiento llamado "propagación de restricciones numéricas" (de acuerdo con la denominación de Simmons). La propagación de restricciones numéricas comienza en una nueva relación (un arco ordinal en el Grafo Dirigido) o en un nodo cuyo intervalo ha cambiado, y desplaza los arcos ordinales conectados, intentando propagar los cambios efectuados en el intervalo real.

Existen ciertos nodos en la Retícula Cuantitativa que vamos a denominar "pseudo-nodos". Estos nodos son bien valores reales bien expresiones formadas enteramente por términos que son valores reales. No representamos los pseudo-nodos en el Grafo Dirigido; mantendremos la relación de un nodo simbólico "real" con un pseudo-nodo enteramente en el intervalo real asociado al nodo simbólico. Sin embargo, construiremos el intervalo asociado a un pseudo-nodo siempre que sea necesario, de modo que parece como si todos los pseudo-nodos existiesen en la Retícula Cuantitativa.

La importancia que tiene el hecho de asociar un intervalo real a cada nodo es que permite que el módulo Retícula Cuantitativa haga cierta clase de inferencias muy útiles de una forma eficiente. También proporciona un mecanismo para integrar el conocimiento cuantitativo con el conocimiento simbólico. Suponiendo que hemos informado al módulo Retícula Cuantitativa que $a > 1$, $b < 0$ y $a < c$, éste puede inferir que $b < c$ mediante el examen de los

intervalos de b y c (el límite superior del intervalo de b es menor que el límite inferior del intervalo de c).

La naturaleza de los arcos ordinales en el Grafo Dirigido hace que la búsqueda en profundidad de la propagación de restricciones numéricas raramente sea exhaustiva. Sólo es necesario un paso en la búsqueda si el intervalo de un nodo ha cambiado, es decir, si hay un cambio que propagar.

Por ejemplo, si se informa al módulo Retícula Cuantitativa de la relación $a < b$, la propagación de restricciones numéricas restringe el límite superior del intervalo de a a ser menor que el límite superior del intervalo de b . Este nuevo límite superior se propaga entonces a todos los nodos que son $<$, \leq ó $=$ que a (relaciones virtuales asumidas en el Grafo Dirigido). De igual forma, restringe el límite inferior del intervalo de b a ser mayor que el límite inferior del intervalo de a , y propaga el nuevo límite inferior a todos los nodos que son $>$, \geq , ó $=$ que b . La propagación de restricciones numéricas busca de forma recursiva en el grafo siguiendo una búsqueda en profundidad (entre los arcos ordinales virtuales relevantes) mientras haya un cambio que propagar. En cada paso de la propagación, se chequea el nuevo intervalo para estudiar su consistencia; las inconsistencias originan un error que se reporta, y el módulo Retícula Cuantitativa queda en un estado inconsistente (las dependencias no se registran como se hace en el sistema de Simmons). La propagación de restricciones numéricas se comporta de una forma similar cuando se informa al módulo Retícula Cuantitativa de relaciones $>$, \geq , ó \leq . Para relaciones tales como $a = b$ se desarrollarían $a \leq b$ y $a \geq b$ dado que pueden cambiar tanto los límites superior como inferior de a y de b .

Siempre que cambia el intervalo de un nodo durante la propagación de restricciones numéricas, se consulta el Grafo Dirigido para analizar la existencia de arcos que salen de ese nodo. Estos arcos se emplean para localizar las expresiones en las que aparecen los nodos que han cambiado. De este modo queda clara la razón de utilizar los arcos de aparición σ en el Grafo Dirigido: mediante el registro explícito del uso de un nodo en una expresión, evitamos tener que buscar entre todos los nodos expresiones relevantes cada vez que cambia un intervalo durante la propagación de restricciones numéricas. Cuando encontramos que en una expresión aparece un nodo que ha cambiado, el intervalo para la expresión del nodo se recalcula por medio de la aritmética de intervalos.

3.3.2.- Aritmética de Intervalos

El módulo Retícula Cuantitativa soporta las siguientes operaciones aritméticas, funcionales, de conjuntos y monótonas:

$$-a, a+b, a-b, a \times b, a / b, \sqrt{a}, \ln a, e^a, \bar{a}, a \cap b, a \cup b, M_a^+, M_a^-$$

Cualquiera de estas operaciones puede emplearse para construir una "expresión de nodo". Los argumentos de una expresión de nodo deben ser nodos (reales o pseudo-nodos) y deben estar conectados con la expresión mediante la presencia de arcos en el Grafo Dirigido. La expresión de nodo también tiene un intervalo real asociado que se construye y se mantiene (durante la propagación de restricciones numéricas) por el proceso de aritmética de intervalos. Las reglas para el cálculo del efecto de los operadores aritméticos sobre los operandos de intervalos aparecen en [Simmons 1986a] y en [Moore 1966a]. Resulta preferible la definición de Moore de la división entre un intervalo que contiene el 0, considerando esto un error aritmético. Es importante tener en cuenta que tanto la presentación de Simmons como la de Moore suponen que los intervalos reales son cerrados; sin embargo hemos encontrado problemas no triviales en esta suposición.

El proceso de la aritmética de intervalos está totalmente integrado con la propagación de restricciones numéricas. Los arcos y las relaciones ordinales virtuales se examinan durante la propagación y ambos se buscan siguiendo un esquema de búsqueda primero en profundidad. La complejidad computacional de la propagación de restricciones por sí sola sería de orden $O(r)$ en el peor de los casos, donde r es el número de arcos ordinales en el Grafo Dirigido. Sin embargo, los requerimientos de la aritmética de intervalos complica ligeramente lo anterior, sin embargo, dado que nuestras expresiones son binarias, incluso en el peor de los casos cada arco sería atravesado dos veces, así la complejidad computacional solamente es de orden $O(r+O)$ donde o es el número de arcos de aparición y r es el número de arcos ordinales como en la expresión anterior.

La propagación de restricciones numéricas y la aritmética de intervalos se lleva a cabo siempre que informamos al módulo Retícula Cuantitativa de una nueva relación; de este modo, siempre se mantiene la consistencia de los arcos del Grafo Dirigido. Una de las razones para esto es que deseamos obtener respuestas rápidamente y estamos dispuestos a invertir más esfuerzo de cálculo

cuando se introduce la nueva relación con el fin de asegurar una respuesta rápida a las cuestiones. Mostraremos más adelante cómo se inicializa la Retícula Cuantitativa con las álgebras del Espacio Cuantitativo apropiadas antes de comenzar la simulación del Algoritmo Predictivo; sin embargo, es preciso asegurar que el módulo Espacio Cuantitativo trabaje eficientemente durante la simulación.

Para desarrollar la aritmética de Intervalos empleamos las siguientes reglas que se presentan para Intervalos $[a, b]$ donde a y b son números reales:

$$-[a, b] = [-b, -a]$$

$$[a, b] + [c, d] = [a+c, b+d]$$

$$[a, b] - [c, d] = [a-d, b-c]$$

$$[a, b] \times [c, d] = [\min(a \times c, a \times d, b \times c, b \times d), \max(a \times c, a \times d, b \times c, b \times d)]$$

$$[a, b] / [c, d] = [\min(a/c, a/d, b/c, b/d), \max(a/c, a/d, b/c, b/d)], \text{ si } 0 \notin [c, d]$$

$$\sqrt{[a, b]} = [\sqrt{a}, \sqrt{b}], \text{ si } a \geq 0$$

$$\ln [a, b] = [\ln a, \ln b], \text{ si } a > 0$$

$$e^{[a, b]} = [e^a, e^b]$$

$$\overline{[a, b]} \text{ es válido para intervalos cerrados o semiabiertos, p.e. } \overline{[a, \infty)} = (-\infty, a)$$

$$[a, b] \cap [c, d] = [\max(a, c), \min(b, d)] \text{ si } b \geq c, d \geq a$$

$$[a, b] \cup [c, d] = [\min(a, c), \max(b, d)] \text{ si } b \geq c, d \geq a$$

$$M^+ [a, b] = (-\infty, \infty)$$

$$M^- [a, b] = (-\infty, \infty)$$

En el caso del conjunto de operaciones, debemos limitar el ámbito del intervalo aritmético, dado que es necesario un intervalo convexo como resultado. Por ejemplo $[1, 2] \cup [3, 4]$ no puede producir un resultado válido en nuestra aritmética de intervalos. La debilidad de esta aritmética de intervalos no es un problema: el único uso potencial de la operación unión $a \cup b$ es su uso para expresar ambigüedad en el Espacio Cuantitativo y en este caso, la unión siempre es convexa. Debe tenerse también en cuenta que las primitivas débiles de modelado M^+ y M^- no producen resultados útiles.

Todos los problemas relacionados con el uso de las operaciones anteriores sobre intervalos abiertos están relacionados con intervalos sin límite ($-\infty, b$) ó $[a, \infty)$, e intervalos donde 0 es el límite inferior o superior, por ejemplo $(0, b)$ ó $[a, 0)$. Ilustraremos esta última consideración mediante la siguiente operación de división:

$$(1, 2) / (-1, 0)$$

Si seguimos al pie de la letra las reglas anteriores, obtendremos el resultado $(-2, \infty)$, al interpretar $1/0$ y $2/0$ como ∞ . Pero en este ejemplo, el 0 limita los valores negativos y deberíamos haber interpretado $1/0$ y $2/0$ como $-\infty$. Esto daría un resultado (correcto) de $(-\infty, -1)$. El modo en que el módulo Retícula Cuantitativa gestiona este problema es mediante la creación de un nuevo dominio denominado "números reales extendidos" con un conjunto de operaciones y relaciones apropiadas definidas sobre él.

Los números reales extendidos aumentan la recta real con ∞ y $-\infty$ y también con cantidades infinitesimales positivas y negativas, δ y $-\delta$ respectivamente. El problema de manejar intervalos abiertos se resuelve convirtiéndolos en intervalos de reales extendidos, efectuando la aritmética de intervalos con estos, y convirtiéndolos de nuevo a intervalos reales. Las tablas siguientes, desde la 3-3 a la 3-6 definen las operaciones de multiplicación y funcionales en el dominio de los números reales extendidos.

X	$-\infty$	$-r$	$-\delta$	0	δ	r	∞
$-\infty$	∞	∞		0		$-\infty$	$-\infty$
$-r$	∞	r	δ	0	$-\delta$	$-r$	$-\infty$
$-\delta$			δ	0	$-\delta$	$-\delta$	
0	0	0	0	0	0	0	0
δ		δ	$-\delta$	0	δ	δ	
r	$-\infty$		$-\delta$	0	δ	r	∞
∞	$-\infty$	$-\infty$		0		∞	∞

Tabla 3-3: Multiplicación en los números Reales Extendidos.

$/$	$-\infty$	$-r$	$-\delta$	0	δ	r	∞
$-\infty$		∞	∞	!	$-\infty$	$-\infty$	
$-r$	δ	r	∞	!	$-\infty$	$-r$	$-\delta$
$-\delta$	δ	δ		!		$-\delta$	$-\delta$
0	0	0	0	!	0	0	0
δ	$-\delta$	$-\delta$!		δ	δ
r	$-\delta$	$-r$	$-\infty$!	∞	r	δ
∞		$-\infty$	$-\infty$!	∞	∞	

Tabla 3-4: División en los números Reales Extendidos

$/$	$-\infty$	$-r$	$-\delta$	0	δ	r	∞
$\ln(.)$!	!	!	!	$-\infty$	$\pm r$	∞

Tabla 3-5: $\ln(.)$ en los números Reales Extendidos

$/$	$-\infty$	$-r$	$-\delta$	0	δ	r	∞
$e^{(.)}$	δ	r	1	1	1	r	∞

Tabla 3-6: $e^{(.)}$ en los números Reales Extendidos

En estas tablas, r representa cualquier número real positivo; una entrada consistente en una exclamación ("!") indica que la operación no es válida; un espacio en blanco indica que la operación no está definida. Considerando el mismo ejemplo anterior, podemos convertir

$$\frac{(12)}{(-10)} \text{ en } \frac{(12)}{(-1-\delta)}$$

que da un resultado ($-\infty, -2$). La reconversión al Intervalo real deja este resultado invariante. Hay ciertos detalles de menor importancia relacionados con el manejo de operaciones ambiguas en los reales extendidos, de la conversión desde/a Intervalos reales extendidos y del uso de Intervalos abiertos, que hemos suprimido por claridad. El aspecto más reseñable es que la conversión a operaciones sobre el conjunto de los reales extendidos proporciona un modo eficiente de manejar problemas con Intervalos abiertos, y nos permite prohibir completamente la división entre 0 ; bien dividimos entre δ o entre $-\delta$. El lector interesado en profundizar más en estos aspectos puede consultar los ficheros

adecuados de la librería del módulo Redcula Cuantitativa donde se definen claramente las operaciones y las relaciones sobre el dominio de los números reales, los reales extendidos y los intervalos reales.

Hemos considerado en cierta medida la inclusión total del dominio de los intervalos reales extendidos. Aunque utilizamos estos intervalos en un modo restringido para desarrollar aritmética de intervalos, el dominio no está completamente soportado en nuestro módulo Redcula Cuantitativa. El motivo de intentar implementar este dominio fue conseguir que el módulo Espacio Cuantitativo pudiera emplear el módulo Redcula Cuantitativa para soportar cantidades de orden de magnitud con la interpretación del Análisis No Estándar (Robert 1988a, Weld 1988b). Esto significaría la creación de nodos en la Redcula Cuantitativa que tendrían intervalos como $[\delta, \delta] \cup [-\infty, -\infty]$ asociados con ellos, y alternativamente representa un requerimiento para el dominio del intervalo de los reales extendidos. Desafortunadamente, hay problemas semánticos no triviales asociados con los intervalos reales extendidos. El infinitésimo δ representa realmente la clase de cantidades infinitesimales positivas y como resultado, el dominio real extendido, aunque totalmente ordenado, no es denso. No hay ningún problema en emplear expresiones que incluyen intervalos de reales extendidos abiertos o cerrados; por ejemplo, puede apreciarse la diferencia en los extremos que resultan en las siguientes operaciones:

$$[5, 6] + [-\delta, 0] = [5, 6]$$

y

$$(5, 6] + [-1, 0] = (4, 6]$$

Esta diferencia es difícil de manejar. En resumen, aunque es útil para ciertos casos de aritmética de intervalos reales, los reales extendidos definidos axiomáticamente como cantidades de orden de magnitud no proporcionan un álgebra que permita la aritmética de los intervalos reales extendidos. Hemos indicado que esto se puede deber al uso de δ para representar la clase de cantidades positivas infinitas, pero el autor no está suficientemente informado del Análisis No Estándar para hacer comentarios más avanzados sobre el tema.

3.3.3.- Relaciones entre los órdenes de magnitud

Mavrovouniotis y Stephanopoulos (Mavrovouniotis 1987a, Mavrovouniotis 1989a) han presentado semánticas para las cantidades de orden de magnitud que no están basadas en el Análisis No Estándar. Tanto la semántica de su interpretación estricta como la de su interpretación heurística se basa en la asociación de un intervalo particular de valores reales con cada uno de las otras cantidades de los órdenes de magnitud, y "estricta" y "heurística" se refieren a dos métodos diferentes por los cuales pueden calcularse estos intervalos. El módulo Retícula Cuantitativa se ajusta bien a la representación de este tipo de semántica para las cantidades de orden de magnitud: cada cantidad se expresaría como un nodo, y el intervalo asociado con ella se inicializaría con un rango apropiado determinado por la semántica. Contrastando esta semántica de intervalos reales con la semántica axiomática de Raiman (Raiman 1986a), Mavrovouniotis y Stephanopoulos presentan ciertas ventajas para su sistema, pero esta comparación no se discutirá aquí. Simplemente indicamos que dado que se basan en las propiedades del álgebra de la recta real (y no en un marco axiomático ni en los resultados del Análisis No Estándar) es mucho más factible expresarlo en la Retícula Cuantitativa. Esto no excluye la posibilidad de usar semánticas de orden de magnitud alternativas en el Espacio Cuantitativo, pero si se incluyen deben manejarse enteramente dentro del módulo del Espacio Cuantitativo (el dominio de los reales extendidos que está implementado dentro del módulo Retícula Cuantitativa sólo se usa internamente y no está accesible por el interface).

Además de proporcionar una semántica clara para las cantidades de orden de magnitud, Mavrovouniotis y Stephanopoulos emplean la misma semántica para definir ciertos operadores relacionales que pueden emplearse para el razonamiento del orden de magnitud. Estas relaciones que definen son:

<<	para "es mucho menor que"
-<	para "es moderadamente menor que"
~<	para "es ligeramente menor que "
=	para "es igual a"
>-	para "es ligeramente mayor que"
>~	para "es moderadamente mayor que"
>>	para "es mucho mayor que"

Las relaciones ordinales pueden definirse en términos de uniones disjuntas de estas relaciones de órdenes de magnitud:

$$< \equiv >> \text{ ó } -< \text{ ó } \sim < \text{ escrito } <<.. \text{ } \sim <$$

$$> \equiv >..>>$$

$$\leq \equiv <<..=$$

$$\geq \equiv =..>>$$

Las relaciones pueden usarse también para expresar las relaciones definidas axiomaticamente en [Rabinman 1986a], por ejemplo:

$$N_o \equiv <<$$

$$V_o \equiv \sim <.. > \sim$$

$$C_o \equiv -<.. >-$$

Las relaciones de orden de magnitud del intervalo real de Mavrovouniotis y Stephanopoulos tienen una semántica bien definida, y esto permite una comparación de su sistema con esquemas alternativos para el razonamiento del orden de magnitud. El módulo Redícula Cuantitativa en nuestra primera versión del Motor Predictivo contiene las relaciones de orden de magnitud basadas en estos intervalos semánticos: los detalles de esta trabajo no se presentan en esta tesis pero si el lector está interesado puede referirse a [Rousseaus 1989a]. En este sistema, las funcionalidades de búsqueda del Grafo Dirigido, el propagador de restricciones numéricas, etc. están todas basadas en las relaciones de orden de magnitud anteriores. Las relaciones ordinales estándares están definidas en términos de éstas y pueden usarse si se desea.

3.3.4.- Aritmética Relacional y de Expresiones

Hay dos tipos de inferencias soportadas en el módulo Redícula Cuantitativa: la "aritmetica relacional" que infiere relaciones entre un nodo expresión y sus argumentos y la "aritmetica de expresiones" que infiere una relación entre dos nodos de expresión del mismo tipo (es decir con el mismo operador). Cada una de ellas se discutirá individualmente, pero en la implementación del módulo Redícula Cuantitativa ambas se aplican simultáneamente, en respuesta a un petición al Interface.

Deberían aplicarse ambas siempre que la información de la Retícula Cuantitativa cambie, (dado que puede haber nuevas inferencias que cualquiera de los procesos puede llevar a cabo), pero en la práctica, encontraremos que ciertas características del Espacio Cuantitativo y del Espacio Temporal lo hacen innecesario. Por esta razón, ambos se desarrollan sólo cuando se solicita expresamente. La aritmética de expresiones se una generalización de la operación de Simmons de "aritmética de eliminación de constantes".

La aritmética relacional es de interés para encontrar relaciones ordinales entre un nodo expresión y sus argumentos. Extendemos como sigue los axiomas de Simmons para aritmética relacional para manejar una clase de operadores más amplia:

Para $r \in \{ <, >, =, \leq, \geq \}$, nodos x, y

$$0 r x \Rightarrow -x r 0$$

$$x r 0 \Rightarrow x + y r y$$

$$y r 0 \Rightarrow x + y r x$$

$$x r y \Rightarrow x - y r 0$$

$$x > 0, y > 0 \Rightarrow (x r 1 \Rightarrow x \times y r y, y r 1 \Rightarrow x \times y r x)$$

$$x > 0, y < 0 \Rightarrow (1 r x \Rightarrow x \times y r y, y r -1 \Rightarrow x \times y r -x)$$

$$x < 0, y > 0 \Rightarrow (x r -1 \Rightarrow x \times y r -y, 1 r y \Rightarrow x \times y r x)$$

$$x < 0, y < 0 \Rightarrow (-1 r x \Rightarrow x \times y r -y, -1 r y \Rightarrow x \times y r -x)$$

$$x > 0, y > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow x / y r 1)$$

$$x > 0, y < 0 \Rightarrow (-y r x \Rightarrow x / y r -1)$$

$$x < 0, y > 0 \Rightarrow (x r -y \Rightarrow x / y r -1)$$

$$x < 0, y < 0 \Rightarrow (y r x \Rightarrow x / y r 1)$$

$$x > 0 \Rightarrow (1 r x \Rightarrow \sqrt{x} r x)$$

$$\ln x < x$$

$$e^x > x$$

No hay axiomas para el conjunto de operaciones \bar{x} , $x \cap y$ o $x \cup y$ o para las operaciones monótonas M^{+x} o M^{-x} . Tanto los operadores $x \times y$ como x / y requieren nodos para la negación de sus argumentos $-x$ y $-y$. Esto supone un esfuerzo adicional de cálculo en el uso de estos operadores.

El proceso de aplicar los axiomas para la aritmética relacional comprueba cada nodo expresión en la Retícula Cuantitativa, desarrollando como máximo una búsqueda de grafo para satisfacer el axioma relevante. La complejidad

computacional de la aritmética relacional es por lo tanto en el peor de los casos de orden $O(e \times r)$ donde e es el número de nodos expresión y r es el número de arcos relaciones (relacionamos r con el número de nodos n para preservar la consistencia con Simmons; en el peor caso $n = 2r$). Las comparaciones con cantidades reales, por ejemplo $x > 0$ pueden hacerse en tiempo constante comprobando el intervalo del nodo.

La aritmética de expresiones está relacionada con la búsqueda de relaciones ordinales entre dos nodos expresión con el mismo operador. Es una generalización de la aritmética de eliminación de constantes de Simmons. De nuevo, extendemos los axiomas de Simmons para dar cabida a nuestros operadores como sigue:

Para $r \in \{ <, >, =, \leq, \geq \}$, nodos x, y, z

$$x r y \Rightarrow -y r -x$$

$$x r y \Rightarrow x + z r y + z$$

$$x r y \Rightarrow z + x r z + y$$

$$x r y \Rightarrow x + z r z + y$$

$$x r y \Rightarrow z + x r y + z$$

$$x r y \Rightarrow x - z r y - z$$

$$x r y \Rightarrow z - y r z - x$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow x \times z r y \times z)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow z \times x r z \times y)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow x \times z r z \times y)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow z \times x r y \times z)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow y \times z r x \times z)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow z \times y r z \times x)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow y \times z r z \times x)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow z \times y r x \times z)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow x/z r y/z)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow z/y r z/x)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow y/z r x/z)$$

$$z > 0 \Rightarrow (x r y \Rightarrow z/x r z/y)$$

$$x r y \Rightarrow \sqrt{x} r \sqrt{y}$$

$$x r y \Rightarrow \ln x r \ln y$$

$$x r y \Rightarrow e^x r e^y$$

$$x r y \Rightarrow M^{*x} r M^{*y}$$

$$x r y \Rightarrow M^x r M^y$$

No hay axiomas para el grupo de operaciones x , $x \cap y$ o $x \cup y$. Nuestros axiomas para manejar la división son más generales que los de Simmons. Debemos referirnos a lo anterior como axiomas "débiles" para la aritmética de expresiones. Se basan en la Identidad de argumentos, por ejemplo $a + 5 > a + 4$ donde a es idéntico en cada una de las expresiones. En el peor de los casos, la forma débil de expresión aritmética chequea cada par de nodos expresiones en la Retícula Cuantitativa, desarrollando como máximo una búsqueda en el grafo para intentar satisfacer el axioma relevante. La complejidad computacional de la aritmética de expresiones débiles es por lo tanto en el peor de los casos de orden $O(e^2 \times r)$ donde e es el número de nodos expresión y r es el número de arcos de relación. Simmons indica que esto es un caso particular de un sistema más general que prueba para buscar la igualdad en lugar de la identidad, por ejemplo puede descubrirse $a + 5 > b + 4$ donde $a = b$ en la Retícula Cuantitativa mediante búsquedas. Hay un sistema más general (el más general) que puede expresarse en forma de los siguientes axiomas "fuertes":

Para $r, r_1, r_2, r_3 \in \{ <, >, =, \leq, \geq \}$, nodos x, y, z

$$x r y \Rightarrow -y r -x$$

$$x r_1 y, w r_2 z \Rightarrow x+w r_3 y+z$$

$$x r_1 y, w r_2 z \Rightarrow x+w r_3 z+y$$

$$x r_1 y, w r_2 z \Rightarrow x - w r_3 y - z$$

$$x > 0, y > 0, w > 0, z > 0 \Rightarrow (x r_1 y, w r_2 z \Rightarrow x \times w r_3 y \times z)$$

$$x > 0, y > 0, w > 0, z > 0 \Rightarrow (x r_1 y, w r_2 z \Rightarrow x \times w r_3 z \times y)$$

$$x > 0, y > 0, w > 0, z > 0 \Rightarrow (x r_1 y, w r_2 z \Rightarrow x / w r_3 y / z)$$

$$x r y \Rightarrow \sqrt{x} r \sqrt{y}$$

$$x r y \Rightarrow \ln x r \ln y$$

$$x r y \Rightarrow e^x r e^y$$

$$x r y \Rightarrow M^{x^2} r M^{y^2}$$

$$x r y \Rightarrow M^{-x} r M^{-y}$$

Donde la relación r_3 se decide en función de r_1 y r_2 y el operador aritmético relevante $+$, $-$, \times o $/$ por las siguientes tablas:

$r_1, +, r_2$	<	>	=	≤	≥
<	<		<	<	
>		>	>		>
=	<	>	=	≤	≥
≤	<		≤	≤	
≥		>	≥		≥

$r_1, -, r_2$	<	>	=	≤	≥
<		<	<		<
>	>		>	>	
=	>	<	=	≥	≤
≤		<	≤		≤
≥	>		≥	≥	

r_1, \times, r_2	<	>	=	≤	≥
<	<		<	<	
>		>	>		>
=	<	>	=	≤	≥
≤	<		≤	≤	
≥		>	≥		≥

$r_1, /, r_2$	<	>	=	≤	≥
<		<	<		<
>	>		>	>	
=	>	<	=	≥	≤
≤		<	≤		≤
≥	>		≥	≥	

Las extensiones a estos axiomas permiten manejar los casos en que los argumentos de los operadores multiplicativos \times y $/$ son negativos. No hay axiomas para el conjunto de operadores \times , \cap y \cup . Estos axiomas permiten llevar a cabo inferencias más potentes gracias a una prueba completa de las relaciones para ambos argumentos de las expresiones binarias; por ejemplo, pueden llevar a cabo inferencias como la siguiente:

$$a \geq b, 5 > 4 \Rightarrow a + 5 > b + 4$$

Los axiomas para una aritmética de expresiones fuerte tienen un coste mayor que la forma débil, porque se necesita una búsqueda adicional en el grafo. Veremos más adelante que hay características de los módulos Espacio Cuantitativo y Espacio Temporal que hacen que los procesos débiles sean suficientes en la mayoría de los casos.

Tanto la aritmética relacional como la aritmética de expresiones están dirigidas por objetivos de modo que los procesos aplican los axiomas relevantes. Pueden aplicarse ciertas técnicas de programación para mejorar el rendimiento de estos procesos (y también la propagación de restricciones numéricas y la búsqueda gráfica en el módulo Grafo Dirigido). La implementación que se ha hecho del módulo Red de Cuantitativa sirve principalmente para ilustrar el

algoritmo más que para proporcionar una eficiente realización del mismo. Si los niveles de rendimiento fueran críticos en alguna aplicación, debería entonces emplearse un lenguaje procedural y reimplementar el módulo Retícula Cuantitativa usando técnicas de programación convencionales para evitar las búsquedas repetitivas. El uso de arcos de aparición en el Grafo Dirigido es una técnica que se ha implementado para mejorar el rendimiento; permite obviar búsquedas lineales para nodos de expresión relevantes.

Mientras que nosotros declaramos una complejidad de orden $O(exr)$ en el peor de los casos para la aritmética relacional y de orden $O(e^2 \times r)$ para la aritmética de expresiones débiles, Simmons declara órdenes $O(r)$ y $O(exr)$ respectivamente para los dos procesos. El factor adicional e en nuestro cálculo de la complejidad refleja el hecho de que estamos considerando el procesamiento completo. Parece que Simmons sólo aplica la aritmética relacional y de expresiones cuando se crea un nodo expresión. Esto no tiene en cuenta el hecho de que la creación de una nueva relación entre dos nodos puede originar la inferencia de una nueva relación entre otros dos nodos cualesquiera (todo lo cual debe llevarse a cabo mediante búsquedas en el grafo). Es debido al hecho de permitir esta posibilidad por lo que tenemos el factor adicional e en nuestros términos de complejidad. Simmons considera que los requerimientos de completitud no son razonables desde la perspectiva de la computacionalidad. Nosotros manejamos la complejidad adicional de la solución completa dando explícitamente el control al usuario del módulo Retícula Cuantitativa del momento en que estos procesos deben llevarse a cabo, y qué grupo de nodos expresión deben tenerse en cuenta.

3.3.5.- Inferencias hacia atrás

La aritmética de Intervalos permite a la propagación de restricciones numéricas hacer inferencias sobre el valor real de un nodo expresión dada información sobre el valor real de sus nodos argumentos. El Grafo Dirigido proporciona arcos de aparición de modo que los nodos expresión relevantes pueden encontrarse más fácilmente. Algunas veces, no obstante, puede proporcionarse información acerca del valor real de un nodo expresión y el módulo Retícula Cuantitativa debe hacer inferencias sobre dichos argumentos, es decir en dirección hacia atrás. La funcionalidad de habilitar esto ya existe en la Retícula Cuantitativa; sin embargo, cuando se crea un nodo expresión se deben

formar nodos adicionales para facilitar estas Inferencias hacia atrás. Por ejemplo, supongamos que tenemos los nodos a y b y queremos crear el nodo $a+b$ de modo que se posibilite la Inferencia hacia atrás. El módulo Retícula Cuantitativa formará los siguientes nodos, relaciones y arcos de aparición:

$$a + b$$

$$a \sigma a + b$$

$$b \sigma a + b$$

$$(a + b) - a$$

$$(a + b) - a = b$$

$$a + b \sigma (a + b) - a$$

$$b \sigma (a + b) - a$$

$$(a + b) - b$$

$$(a + b) - b = a$$

$$a + b \sigma (a + b) - b$$

$$b \sigma (a + b) - b$$

Proporcionando información sobre el intervalo real de $a + b$, los nodos $(a + b) - a$ y $(a + b) - b$ permitirán inferencias sobre los intervalos reales para b y a respectivamente.

Oblvamente hay una sobrecarga computacional al permitir inferencias hacia atrás y es un derroche crear una estructura adicional Innecesariamente. Por lo tanto, la estructura para la inferencia hacia atrás sólo se incluye si se solicita en el momento en que se crea un nodo expresión. Indicamos la estructura normal que se crea en el módulo Retícula Cuantitativa cuando se solicita la creación de un nodo :

$$-a: -a, a \sigma -a$$

$$a + b: a + b, a \sigma a + b, b \sigma a + b$$

$$a - b: a - b, a \sigma a - b, b \sigma a - b$$

$$\begin{aligned}
 a \times b: & \quad -a, -(-a), -(-a) = a, -a \sigma -(-a), \\
 & \quad -b, -(-b), -(-b) = b, -b \sigma -(-b), \\
 & \quad a \times b, a \sigma a \times b, b \sigma a \times b
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a / b: & \quad -a, -(-a), -(-a) = a, -a \sigma -(-a), \\
 & \quad -b, -(-b), -(-b) = b, -b \sigma -(-b), \\
 & \quad a / b, a \sigma a / b, b \sigma a / b
 \end{aligned}$$

$$\sqrt{a}: \sqrt{a}, a \sigma \sqrt{a}$$

$$e^a: e^a, a \sigma e^a$$

$$\ln a: \ln a, a \sigma \ln a$$

$$\bar{a}: \bar{a}, a \sigma \bar{a}$$

$$a \cup b: a \cup b, a \sigma a \cup b, b \sigma a \cup b$$

$$a \cap b: a \cap b, a \sigma a \cap b, b \sigma a \cap b$$

$$M^{*a}: M^{*a}, a \sigma M^{*a}$$

$$M^{-a}: M^{-a}, a \sigma M^{-a}$$

Siempre se crean las negaciones de los argumentos de las expresiones multiplicativas (junto con sus estructuras de inferencia hacia atrás) puesto que se necesitan para los axiomas de la aritmética relacional y de expresiones. Para cada tipo de nodo expresión, indicamos la lista de estructura adicional necesaria para soportar la inferencia hacia atrás:

$$-a: -(-a), -(-a) = a, -a \sigma -(-a)$$

$$\begin{aligned}
 a + b: & \quad (a + b) - a, (a + b) - a = b, a + b \sigma (a + b) - a, a \sigma (a + b) - a, \\
 & \quad (a + b) - b, (a + b) - b = a, a + b \sigma (a + b) - b, b \sigma (a + b) - b
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a - b: & \quad a - (a - b), a - (a - b) = b, a - b \sigma a - (a - b), a \sigma a - (a - b), \\
 & \quad (a - b) + b, (a - b) + b = a, a - b \sigma (a - b) + b, b \sigma (a - b) + b
 \end{aligned}$$

$$a \times b: (a \times b)/a, (a \times b)/a = b, a \times b \sigma (a \times b)/a, a \sigma (a \times b)/a,$$

$$(a \times b)/b, (a \times b)/b = a, a \times b \sigma (a \times b)/b, b \sigma (a \times b)/b$$

$$a/b: a/(a/b), a/(a/b) = b, a/b \sigma a/(a/b), a \sigma a/(a/b),$$

$$(a/b) \times b, (a/b) \times b = a, a/b \sigma (a/b) \times b, b \sigma (a/b) \times b$$

$$\sqrt{a}: \sqrt{a} \times \sqrt{a}, \sqrt{a} \times \sqrt{a} = \sqrt{a} \sigma \sqrt{a} \times \sqrt{a}$$

$$e^a: \ln e^a, \ln e^a = a, e^a \sigma e \ln e a$$

$$\ln a: e^{\ln a}, e^{\ln a} = a, \ln a \sigma e^{\ln a}$$

$$\bar{a}: \bar{a}, \bar{a} = a, \bar{a} \sigma \bar{a}$$

No hay estructuras adicionales para $a \cup b$, $a \cap b$, M^{*a} o M^a . Se observará que los nodos expresión multiplicativas $a \times b$ y a/b imponen una sobrecarga considerable en términos de estructura adicional necesaria para manejar la inferencia hacia atrás en el módulo Retícula Cuantitativa.

El módulo Retícula Cuantitativa no maneja de forma automática todos los aspectos de los operadores conmutativos. Si creamos el nodo $a+b$, no se atenderán cuestiones sobre la expresión $b+a$ de forma automática. Sin embargo, si creamos a continuación el nodo $b+a$, la aritmética de expresiones deducirá que $a+b = b+a$ y se creará el arco correspondiente en el Grafo Dirigido. El módulo Retícula Cuantitativa no desarrolla ninguna simplificación de las expresiones compuestas, y además no se ha adoptado ninguna forma estándar; por ejemplo, el módulo Retícula Cuantitativa es incapaz de deducir que $a+(b+c) = b+(a+c)$. Tales inferencias son responsabilidad del usuario al crear los nodos y relaciones de igualdad apropiadas.

3.3.6.- Razonamiento No-monotónico

El módulo Retícula Cuantitativa no gestiona ninguna forma de razonamiento no-monotónico; no mantiene dependencias o justificaciones. Un efecto de esto es que si la Retícula Cuantitativa alcanza un estado inconsistente no puede recuperar automáticamente al estado anterior consistente. El borrado y nueva creación de los nodos por el usuario es en la actualidad el único método de conseguirlo. Cuando se borra un nodo, todas las expresiones en que aparece y todos los arcos que inciden en él se eliminan también de modo recursivo. Por contraste, el sistema de Simmons mantiene dependencias y es más elegante a la hora de recuperarse de información inconsistente. La razón principal de no soportar dependencias en el módulo Retícula Cuantitativa es el uso de intervalos reales como única representación del efecto de las relaciones ordinales con los nodos de valor real (pseudo-nodos). Una vez que el intervalo real se altera, toda la información sobre el valor anterior se pierde. Dado que no almacenamos los nodos reales como nodos actuales en el sistema, no hay modo de recrear el intervalo previo si se elimina la relación de un nodo actual a uno real.

Si se hiciera necesario un correcto manejo de la monotonidad en el módulo Retícula Cuantitativa, deberíamos considerar el uso de alguna forma de Sistema de Mantenimiento de Verdad (TMS - Truth Maintenance System) (Doyle 1979 a) de modo que los resultados previos no se perdieran y pudiéramos recuperar estados anteriores. Puede aparecer un problema con el uso de TMS cuando se consideran intervalos múltiples mutuamente consistentes; entonces tenemos que seleccionar la unión más restrictiva de ellos; véase a (Davis 1987 b) para una discusión detallada de este problema. Una posible solución podría ser almacenar los nodos reales y actuales; esto parece ser lo que se hace en el sistema de Simmons. Hemos decidido no crear nodos para las cantidades reales para ahorrar espacio no llenando la Retícula Cuantitativa con un gran número de nodos con un intervalo simple.

3.3.7.- Funcionalidad del módulo Retícula Cuantitativa

Computacionalmente, los nodos se crean en un tiempo constante. Cuando se da la relación entre dos nodos, el módulo Retícula Cuantitativa considera en primer lugar el tipo de los nodos. Si un nodo es un valor real (pseudo) entonces, la modificación del Intervalo del otro nodo se lleva a cabo en un tiempo constante. Si ambos nodos son simbólicos (actuales) el módulo Retícula Cuantitativa comprueba en primer lugar si la relación ya es conocida; es en el peor de los casos de orden $O(r)$ donde r es el número de arcos ordinales en el Grafo Dirigido, si se necesita la búsqueda en el grafo. Habiendo comprobado y aceptado la nueva relación, el módulo Retícula Cuantitativa desarrolla la propagación de restricciones numéricas (junto con la aritmética de intervalos) que es de orden $O(r + o)$ donde o es el número de arcos de aparición. Esto significa que todo el proceso de creación de una nueva relación en la Retícula Cuantitativa es de orden $O(r + o)$. Para la completitud, siempre que hay una nueva relación, debería desarrollarse una nueva aritmética de relaciones y expresiones, pero debido a la naturaleza polinomial del procesamiento combinado esto debe solicitarse explícitamente por el usuario.

El Interface del módulo Retícula Cuantitativa permite hacer lo siguiente:

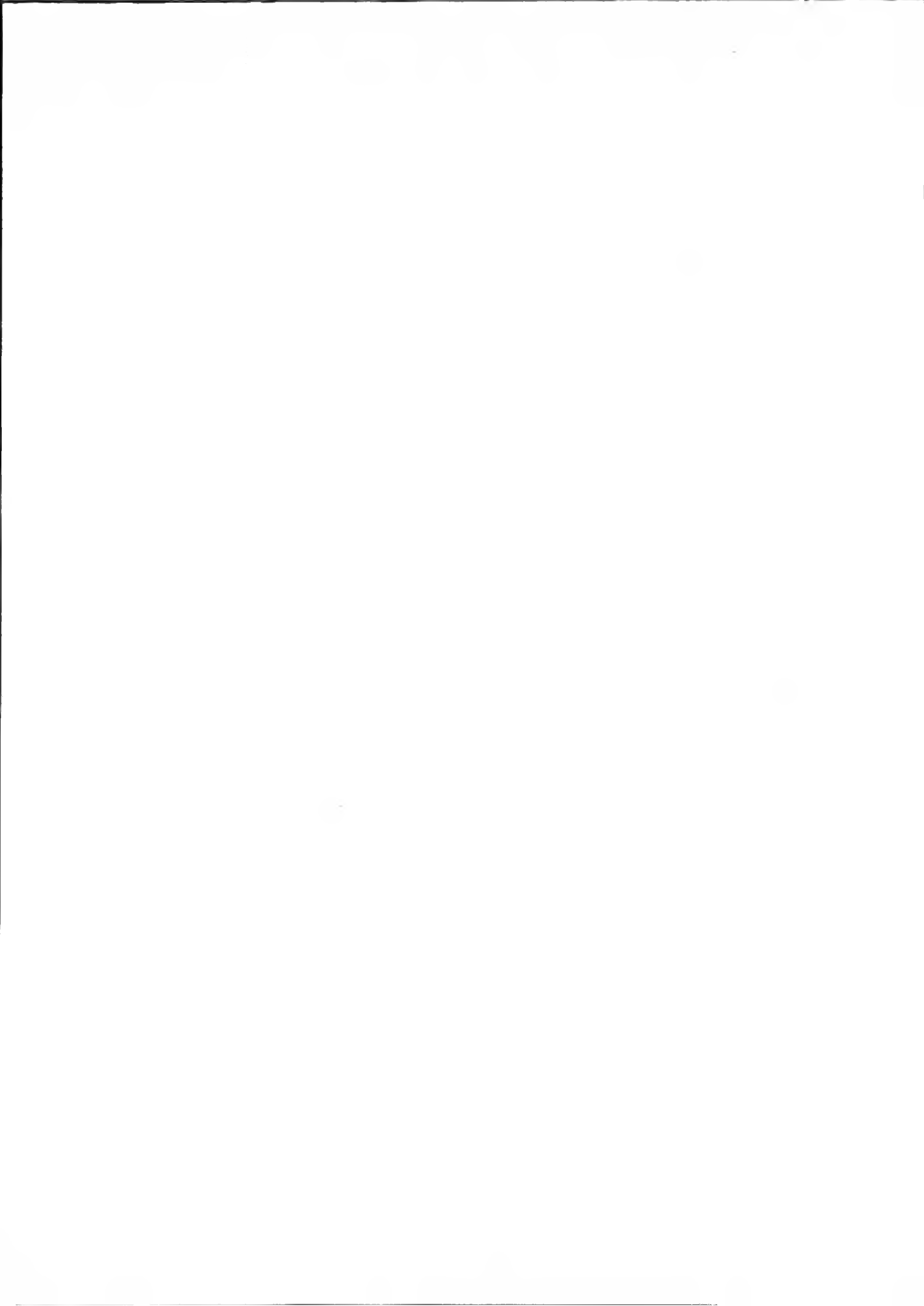
- (i) Cargar un modelo precompilado.
- (ii) Crear nodos, con o sin estructura de Inferencia hacia atrás.
- (iii) Borrar nodos.
- (iv) Crear relaciones ordinales entre nodos.
- (v) Aritmética de relaciones y expresiones, posibilitando especificar un suconjunto de nodos expresión.
- (vi) Examinar los Intervalos de los nodos.
- (vii) Buscar relaciones ordinales (relaciones de transición/combinación)

3.4.- Resumen

El módulo Retícula Cuantitativa es un sistema de razonamiento aritmético de potencia Intermedia. Integra el razonamiento simbólico y cuantitativo, y combina el razonamiento con desigualdades con el razonamiento sobre expresiones de aritmética simples. El módulo Retícula Cuantitativa emplea el módulo de Grafo Dirigido para mantener el conocimiento de las relaciones ordinales entre nodos simbólicos. Si está disponible cualquier información real sobre los valores de nodos puede almacenarse en el intervalo real asociado con cada nodo en el módulo Retícula Cuantitativa. Esta información real puede emplearse para inferir una relación entre dos nodos, y está completamente integrada en el proceso de razonamiento. El intervalo real se mantiene consistente a través de los arcos ordinales mediante el proceso de propagación de restricciones numéricas a medida que se proporciona nueva información a la Retícula Cuantitativa. Este proceso emplea la aritmética de intervalos para construir los intervalos reales asociados con los nodos expresión.

Las relaciones entre los nodos expresión se encuentran procesando la aritmética de relaciones y la aritmética de expresiones. La aritmética de expresiones tiene dos formas: débil y fuerte. La aritmética de expresión fuerte tiene un mayor costo desde el punto de vista de procesamiento que la débil. La aritmética relación y ambas formas de aritmética de expresiones operan bajo control total del usuario en el módulo Retícula Cuantitativa.

El sistema BOUNDER descrito en (Sacks 1987a) puede emplearse también para desarrollar funciones similares a las de nuestra Retícula Cuantitativa. Sin embargo, BOUNDER se concentra más en la provisión de mecanismos de razonamiento para el manejo de expresiones que contemplan operadores funcionales. No maneja el conjunto de operaciones algebraicas que necesitamos que contemple la Retícula Cuantitativa. Para nuestros propósitos, el módulo Retícula Cuantitativa proporciona funcionalidad suficiente con una eficiencia más que razonable y parece que por lo tanto está muy ajustado a lo que se necesita.



4.- ARQUITECTURA DEL MOTOR PREDICTIVO

4.1.- Introducción

Ya hemos presentado en el capítulo 3 la arquitectura del Motor Predictivo con el fin de explicar el papel que desempeña el módulo Retícula Cuantitativa. En este capítulo discutiremos la funcionalidad de los módulos Espacio Cuantitativo y Espacio Temporal dentro de esta arquitectura y mostraremos cómo el mismo mecanismo de la Retícula Cuantitativa se emplea para representar y razonar tanto sobre los valores como sobre el tiempo.

El módulo Espacio Cuantitativo es responsable de todas las inferencias relacionadas con los valores cuantitativos. En particular, puede desarrollar operaciones aritméticas y funcionales con los valores de las variables del sistema. El término "espacio cuantitativo" es original de [Forbus 1984a] y se refiere al conjunto de valores cuantitativos que se han empleado. La información que permite al módulo Espacio Cuantitativo desarrollar operaciones con valores cuantitativos se obtiene mediante un compilador separado. El usuario especifica la información acerca de los espacios cuantitativos así como las ecuaciones del modelo en un fichero que el compilador se encarga de procesar. Los ficheros objetos producidos se cargan en los módulos apropiados antes de desarrollar una simulación del modelo.

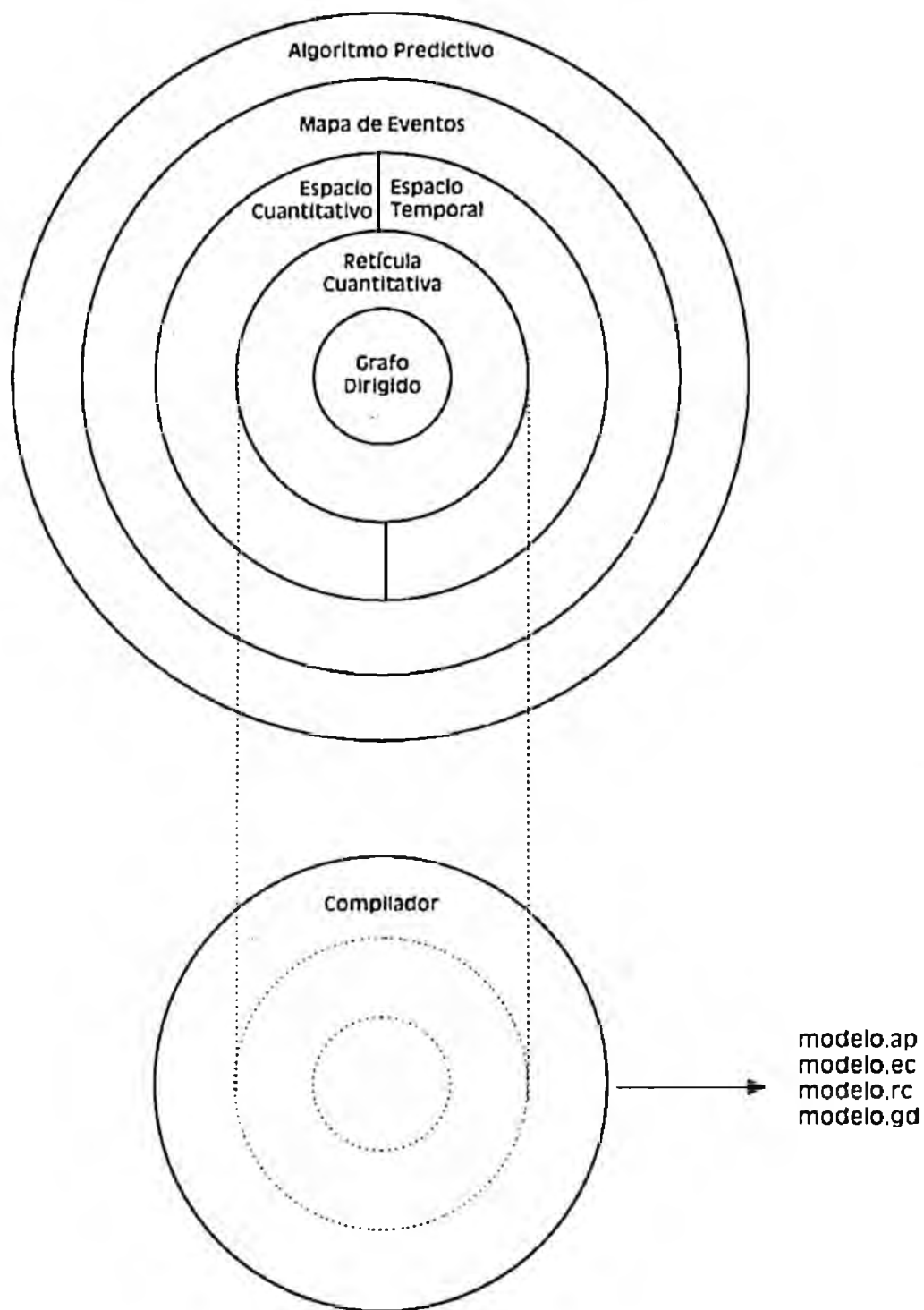


Figura 4-1 Arquitectura del Motor Predictivo y el compilador

En la Figura 4-1 hemos representado la relación entre el Compilador y la arquitectura del Motor Predictivo. Ya hemos descrito en el capítulo 3 los módulos Grafo Dirigido y Retícula Cuantitativa; en las secciones 4.2 y 4.3 de este capítulo describiremos respectivamente el módulo Espacio Cuantitativo y el Compilador.

La idea de separar las inferencias relacionadas con los valores de las relacionadas con el tiempo se debe a (Williams 1986a). Williams también empleó un mecanismo que denominó "Time Box" para realizar inferencias sobre el tiempo, que se basaba también en el "Quantity Lattice" de Simmons (Simmons 1986a). Hemos extendido esta noción utilizando nuestro módulo Retícula Cuantitativa para hacer inferencias sobre los valores cualitativos. En el Algoritmo Predictivo empleamos una noción de la Ordenación de Transiciones diferente de la aportada por Williams, y como resultado tenemos unos requerimientos diferentes de la funcionalidad del Espacio Temporal. En la sección 4.4 puede encontrarse una descripción del módulo Espacio Temporal.

4.2.- El Espacio Cuantitativo

4.2.1.- Valores Cualitativos

El módulo Espacio Cuantitativo es el encargado de manejar todas las Inferencias acerca de los valores cualitativos. Utilizamos una noción de los valores cualitativos similar a la empleada para describir la magnitud de las variables del sistema en el algoritmo QSIM (Kulpers 1986 a).

El espacio de definición de los valores reales de una variable de sistema está limitado por un número de puntos simbólicos o reales en los que se considera que el valor de la variable se vuelve cualitativamente diferente. En QSIM estos puntos se llaman *valores marca*, sin embargo, para mantener la consistencia con el resto de esta tesis nos referiremos a ellos como *puntos cualitativos*. Consideraremos que el valor cualitativo de una variable es un punto cualitativo o un intervalo cualitativo entre dos puntos. También permitiremos que un valor cualitativo sea una unión convexa de puntos e intervalos. Estas ambigüedades aparecen siempre que, por alguna razón, no puede determinarse un punto cualitativo único o un intervalo: esto se discutirá más adelante. Más formalmente, y siguiendo a (Struss 1988c), si una variable x tiene un conjunto finito de puntos cualitativos L , entonces, un espacio cuantitativo de x , denotado como Q_x es un subconjunto convexo de los intervalos:

$$\{ (a, b) \mid a, b \in L \cup \{-\infty, \infty\}, a < b, \neg (c \in L, a < c < b) \} \cup \{ [a, a] \mid a \in L \}$$

Permitiremos que el espacio cuantitativo sea un subconjunto del conjunto anterior en caso que el espacio de definición real de la variable no cubra completamente la recta real. El valor cualitativo de una variable es bien un elemento (punto o intervalo) o su espacio cuantitativo, o bien un subconjunto convexo del espacio cuantitativo. En la Figura 4-2 mostramos el espacio de definición real de la variable x , que encuentra dividido por dos puntos cualitativos, 0 y *normal* (punto simbólico). El espacio cuantitativo de la variable x es por lo tanto el conjunto $\{ (-\infty, 0), 0, (0, normal), normal, (normal, \infty) \}$.

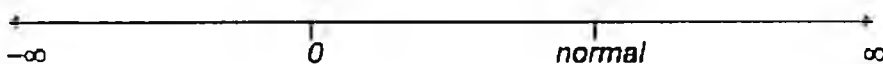


Figura 4-2 Espacio Cuantitativo de x

Cada variable en el modelo del sistema puede tener un espacio cuantitativo único. En QSIM, los espacios cuantitativos de las diferentes variables están relacionados por el uso de los valores correspondientes asociados con las ecuaciones del modelo. Emplearemos este mismo método para enlazar los espacios cuantitativos de las variables de sistema en el Motor Predictivo. El usuario especifica la información sobre los espacios cuantitativos para las variables en un fichero modelo (junto con las ecuaciones del sistema). En el capítulo 6 explicaremos con detalle los requerimientos de formateo de este fichero modelo. La especificación del espacio cuantitativo de una variable consiste en un conjunto ordenado de puntos e intervalos alternativamente. Esta lista de valores cualitativos debe ser convexa, contigua y debe cubrir el espacio de definición de la variable. El espacio de definición de una variable no es preciso que sea toda la recta real, por ejemplo, si sabemos que la variable x del caso anterior es siempre no negativa, podemos especificar su espacio cuantitativo como $\{ 0, (0, normal), normal, (normal, \infty) \}$.

En el capítulo 2 señalamos que la integración cualitativa en QSIM se desarrolla de modo no constructivo. Los cambios de los valores de las variables del sistema en el tiempo son sugeridos por el algoritmo, y se utiliza la información sobre el modo en que los espacios cuantitativos de las variables están relacionados (mediante los valores correspondientes) como prueba para filtrar transiciones de estado no válidas. En contraste con todo esto, en el Algoritmo Predictivo empleamos una fase de Integración Cualitativa constructiva. Este aspecto, como ya hemos mencionado en el capítulo 2 resulta crucial para la utilización del Algoritmo Predictivo en Sistemas de Entrenamiento Inteligente, puesto que es lo que le permitirá construir explicaciones sobre el comportamiento del sistema proporcionando de esta manera material para formar el modelo mental del alumno sobre el sistema físico en estudio. Además, estructuramos el modelo del sistema como una secuencia de ecuaciones direccionales. Uno de los requerimientos del Espacio Cuantitativo es que pueda ser consultado constructivamente para desarrollar las operaciones sobre los valores cualitativos determinados por las ecuaciones del sistema. Todo esto lo presentaremos con detalle en el capítulo 5 donde se analizará el Algoritmo Predictivo.

El hecho de permitir que los espacios cuantitativos de todas las variables del sistema se especifiquen de forma similar nos conduce a la consideración de las álgebras basadas en intervalos, lo que no debería confundirse con la técnica del análisis de intervalos [Moore 1966a]. En el análisis de intervalos, un intervalo real se utiliza para representar una aproximación a algún valor real que se encuentra dentro de dicho intervalo. El análisis de intervalos está relacionado con el modo en que esta aproximación está afectada por las operaciones aritméticas y funcionales que se desarrollan sobre ellas. En un álgebra basada en intervalos sin embargo, el intervalo cualitativo no representa una aproximación a algún valor subyacente; es una abstracción cualitativa intencional, y por lo tanto un valor por derecho propio. El objetivo del razonamiento cualitativo es aplicar operadores en un espacio cuantitativo más abstracto que los reales.

Un caso particular de álgebra basada en intervalos se produce cuando el único punto cualitativo es el valor real 0. Esto último origina un espacio cuantitativo $\{ (-\infty, 0), 0, (0, \infty) \}$ sobre el espacio de definición de la recta real. El módulo Espacio Cuantitativo soporta una notación abreviada de los intervalos de este espacio cuantitativo, así - representa $(-\infty, 0)$ y + representa $(0, \infty)$. El espacio cuantitativo $\{ -, 0, + \}$ es muy común en la simulación cualitativa; es el espacio empleado en el análisis TQ [Williams 1984a] (aunque pueden construirse espacios más complejos) y en los trabajos de de Kleer y Bobrow [de Kleer 1984a]. Es también el espacio empleado para describir la derivada de una variable en QSIM, aunque en este caso con una notación simbólica diferente $\{ dec, std, inc \}$. El álgebra resultante de utilizar este espacio cuantitativo se denomina álgebra de signos. Nuestro módulo de Espacio Cuantitativo supone como espacio cuantitativo $\{ -, 0, + \}$ para una variable en caso de no especificarse ningún otro.

Podemos encontrar una comparación detallada del álgebra de signos y el álgebra más general de intervalos en [Struss 1990a]. Se ha demostrado que un álgebra basada en intervalos no es generalmente asociativa ni distributiva, y en este sentido, quizás el caso particular del álgebra de signos es ligeramente más fuerte. Por ejemplo, para las variables a , b y c en un álgebra general basada en intervalos no siempre ocurre que $a + (b + c)$ produzca siempre el mismo resultado que $(a + b) + c$. En el Motor Predictivo, el usuario puede especificar estas expresiones compuestas en diferentes formas, y el Algoritmo Predictivo determinará el valor más específico de la Intersección de todas las formas equivalentes.

El usuario puede proporcionar también información sobre el valor real de un punto simbólico cualitativo. En el ejemplo anterior de la variable x , el punto 0 es obviamente el valor real 0 , pero el punto *normal* es puramente simbólico, representando un valor importante dentro del espacio de definición de x . Si no se conoce nada acerca del valor real de un punto cualitativo, también esto puede expresarse en la sección de restricciones del fichero modelo (para más detalles acerca de esto último puede consultarse el capítulo 6). En el caso anterior, el hecho de que *normal* sea positivo se deduce de la especificación del espacio cuantitativo y esta necesidad no está expresada en la sección de restricciones. Sin embargo, si sabemos por ejemplo que *normal* estaba entre 45 y 49.5, podemos proporcionar dicha información al Motor Predictivo.

4.2.2.- Mantenimiento de valores cualitativos

La primera funcionalidad importante del módulo Espacio Cuantitativo es mantener la Información de los espacios cuantitativos de las variables en el modelo del sistema. El módulo Espacio Cuantitativo utiliza a su vez el módulo Retícula Cuantitativa para almacenar y manejar esta Información. Cada punto cualitativo de los espacios cuantitativos se almacena como un nodo en la Retícula Cuantitativa. Cualquier Información sobre el valor real de este punto se mantiene en el Intervalo real asociado con el nodo de la Retícula Cuantitativa. Para intervalos en el espacio cuantitativo de una variable, se crea un nodo en la Retícula Cuantitativa para representar algún punto dentro de ese intervalo. Se hace referencia a estos nodos Intervalos de la Retícula Cuantitativa desde una tabla simbólica ordenada por la variable y el intervalo cualitativo. Las relaciones ordinales entre los nodos intervalos y los nodos puntos se determinan a partir de la especificación del espacio cuantitativo y son almacenados en la Retícula Cuantitativa.

	índice	nodo
x	$(-\infty, 0)$	<i>intervalo1_x</i>
x	$(0, normal)$	<i>intervalo2_x</i>
x	$(normal, \infty)$	<i>intervalo3_x</i>

Tabla 4-1: Tabla simbólica de x

El Compilador, que describiremos en la sección 4.3, lleva a cabo la construcción de la Retícula Cuantitativa (Incluyendo Indirectamente el Grafo Dirigido) y de la tabla simbólica a partir del fichero modelo. El módulo Espacio Cuantitativo se carga con la especificación del espacio cuantitativo para cada variable, y con la tabla simbólica que contiene la referencia a todos los nodos intervalos ya construidos. A modo de ejemplo, la compilación del espacio cuantitativo de la variable x anterior, junto con la restricción de que el valor real de *normal* esté entre 45 y 49.5 , generaría una tabla simbólica como la que aparece en la Tabla 4-1. En la Figura 4-3 mostramos los contenidos resultantes de la Retícula Cuantitativa.

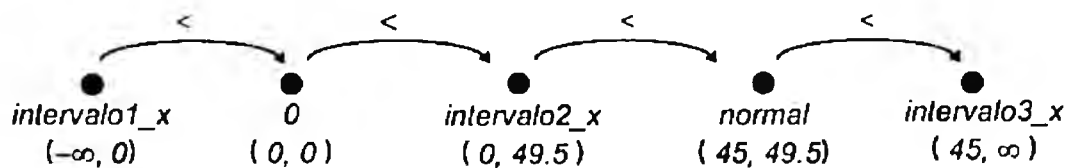


Figura 4-3: Retícula Cuantitativa dex

Podemos emplear la información acerca de los valores reales de los puntos e intervalos en el espacio cuantitativo para determinar nuevas relaciones utilizando la funcionalidad de la Retícula Cuantitativa. De este modo, el módulo Retícula Cuantitativa puede soportar el uso de la Información cuantitativa para mejorar el razonamiento cualitativo. En la Figura 4-3 los nodos representan valores en el álgebra basada en intervalos, donde el intervalo real asociado con cada nodo representa una aproximación al valor real del nodo, y como tal, este intervalo real pertenece al dominio del análisis de intervalos (álgebra no basada en intervalos). Los nodos *0* y *normal* representan puntos cualitativos. Los nodos *intervalo1_x*, *intervalo2_x* e *intervalo3_x* representan, a su vez, intervalos cualitativos. En el módulo Retícula Cuantitativa nos referiremos a los intervalos reales asociados con estos nodos como intervalos cualitativos.

Consideremos una nueva variable, y , con el espacio cuantitativo por defecto $\{-, 0, +\}$; Su tabla simbólica sería la siguiente:

Índice		nodo
x	$(-\infty, 0)$	<i>intervalo1_x</i>
x	$(0, normal)$	<i>intervalo2_x</i>
x	$(normal, \infty)$	<i>intervalo3_x</i>
x	-	<i>intervalo1_y</i>
x	+	<i>intervalo2_y</i>

Tabla 4-2 Tabla Simbólica de x e y

La Figura 4-4 muestra el contenido de la Retícula Cuantitativa correspondiente a las variables x e y.

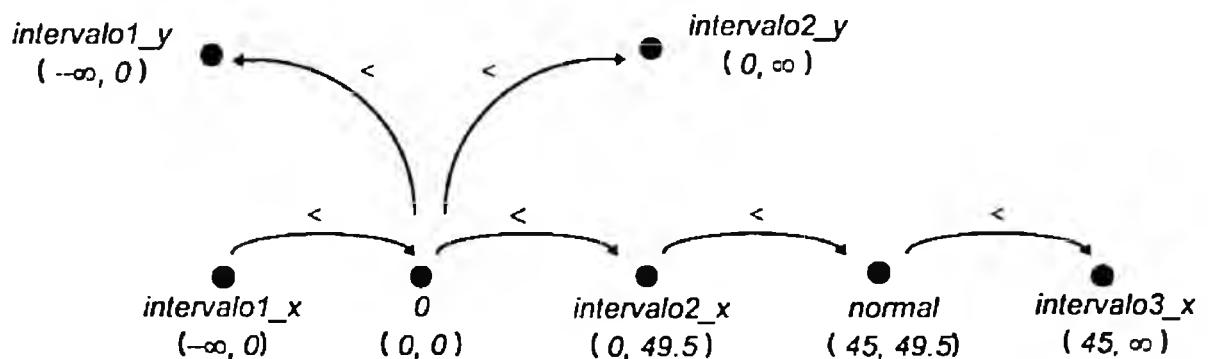


Figura 4-4: Retícula Cuantitativa de x e y

Debería haber quedado claro en este punto porqué empleamos como índice en la tabla simbólica tanto el intervalo cualitativo como la variable: el nodo Intervalo representa algún punto dentro del intervalo cualitativo. Mientras que *intervalo1_x* = *intervalo1_x*, puesto que referencian al mismo punto, no es cierto, necesariamente, que *intervalo1_x* = *intervalo1_y*, aunque ambos estén limitados por 0. Esto significa que el que x tenga el valor $(-\infty, 0)$ no tiene el mismo significado que el que y tenga el valor - en la Retícula Cuantitativa, y es absolutamente correcto que no sea así.

Esto nos obliga a cuidar la formulación de las relaciones ordinales entre valores cualitativos. Si x tiene el valor cualitativo 0 e y tiene el valor cualitativo 0, debemos Inferir que x e y tienen el mismo valor real. Sin embargo, si x tiene un

valor cualitativo $(-\infty, 0)$ e y tiene el valor cualitativo $-$, no podemos inferir que x e y tienen el mismo valor real. La primera inferencia es válida porque 0 es un punto cualitativo, pero la segunda no lo sería porque $(-\infty, 0)$ y $-$ son intervalos cualitativos que representan un espacio de definición de posibles valores reales. El índice dual a la tabla simbólica nos permite tener en cuenta esta cuestión semántica; debería combinarse un valor cualitativo con la variable a la que se refiere en todas las peticiones efectuadas al módulo Espacio Cuantitativo.

Debemos preparar algún mecanismo para relacionar un punto cualitativo en el espacio cuantitativo de una variable con los puntos cualitativos en los espacios cuantitativos de otras variables. Para hacer esto hemos utilizado el mismo dispositivo que QSIM, permitiendo que se especifiquen un conjunto de valores correspondientes mediante una ecuación en el fichero modelo. Los valores correspondientes se emplean para restringir el valor de una variable en una ecuación, dando los valores de las otras variables. Por ejemplo, supongamos que tenemos las siguientes variables y sus espacios cuantitativos:

a con el espacio cuantitativo $\{ -, 0, + \}$

b con el espacio cuantitativo $\{ 0, (0, \max_b), \max_b \}$

c con el espacio cuantitativo $\{ 0, (0, \max_c), \max_c \}$

y la siguiente ecuación y los valores correspondientes:

$a = b - c$ con los valores correspondientes $(0, \max_b, \max_c)$

Esto especifica que cuando b tiene el valor \max_b y c tiene el valor \max_c , a tiene el valor 0 . También especifica el valor de b dados a y c , o c dados a y b , aunque encontraremos que esto no resulta relevante en el Algoritmo Predictivo porque las ecuaciones son dirigidas. La información sobre los valores correspondientes se procesa por el Compilador, que construye un nodo expresión (con inferencias hacia atrás) en la Retícula Cuantitativa para representar $\max_b - \max_c$ y hace esto igual a 0 . Una petición a la aritmética relacional y de expresiones permite al módulo Retícula Cuantitativa deducir que $\max_b = \max_c$, creándose en la Retícula Cuantitativa la estructura indicada en la Figura 4-5 (no hemos mostrado los intervalos cuantitativos, ni hemos incluido todos los arcos de relación asociados). No es necesario especificar los valores correspondientes $(0, 0, 0)$ para la ecuación $a = b - c$, puesto que la Retícula

Cuantitativa ya es capaz de deducir que $0 = 0 + 0$. Otros tipos de ecuaciones se manejan de forma similar cuando se especifican los valores correspondientes, pero desde luego, la estructura creada depende de la primitiva funcional o aritmética implicada.

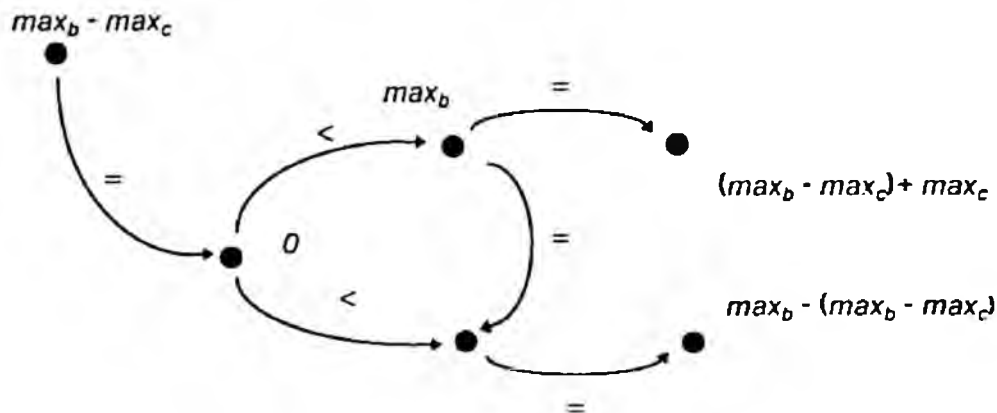


Figura 4-5: Valores correspondientes para a , b y c

La información sobre los valores correspondientes de QSIM se emplean como filtro para reconocer transiciones de estado no válidas. Sin embargo, en el Algoritmo Predictivo el Espacio Cuantitativo se emplea de modo constructivo para propagar directamente los valores del álgebra basada en intervalos. Esto nos conduce a la segunda funcionalidad principal del módulo Espacio Cuantitativo: debe contener información sobre el álgebra basada en intervalos para soportar la propagación de valores mediante operaciones aritméticas y funcionales. Si consideramos cada valor cualitativo (tomando los espacios cuantitativos de todas las variables del sistema) y cada primitiva aritmética y funcional que se soporta por el Motor Predictivo, vemos que todo el álgebra de intervalos puede ser muy grande. Por razones de eficiencia, el Espacio Cuantitativo sólo contiene el subconjunto del álgebra que puede ser necesaria para dar respuesta a las peticiones del Algoritmo Predictivo (mediante el Mapa de Eventos). El subconjunto apropiado se determina a partir de las ecuaciones del modelo por parte del Compilador, y este subconjunto del álgebra completa se carga en el Espacio Cuantitativo antes de la simulación. El proceso de compilación depende de la estructura que se crea en la Retícula Cuantitativa para describir los valores correspondientes. Los valores correspondientes de los nodos expresión actúan como puntos pivotantes en la determinación del álgebra. Los detalles de este proceso aparecen en la sección 4.3 describiendo el módulo Compilador. El álgebra

de signos no se considera como un caso especial, pero se crea del mismo modo que el álgebra general basada en intervalos.

Una de las propiedades mejor conocidas del álgebra de intervalos es el problema de la ambigüedad. Podemos considerar dos causas de este problema. La primera es la ambigüedad natural de la aritmética cualitativa. Si consideramos la operación de suma binaria por ejemplo, con operandos y resultados expresados en el espacio cuantitativo $\{ -, 0, + \}$, podemos encontrar que el resultado de

$$'+' + '-'$$

puede ser $+$, 0 ó $-$, siendo expresada esta ambigüedad como un valor resultado de $\{ -, 0, + \}$. Una segunda causa de ambigüedad en el álgebra de intervalos concierne a la creación de puntos cualitativos que no pueden enlazarse apropiadamente en construcciones de valores correspondientes. Si consideramos la operación de sustracción unaria en el espacio cuantitativo de la variable x anterior, es decir $\{ (-\infty, 0), 0, (0, normal), normal, (normal, \infty) \}$, encontraremos que el resultado de :

$$-'(-\infty, 0)'$$

puede ser $(0, normal)$, $normal$, o $(normal, \infty)$, esta ambigüedad es expresada como un valor resultado de $\{ (0, normal), normal, (normal, \infty) \}$. El problema es que *normal* no tiene un valor correspondiente en el intervalo $(-\infty, 0)$. (Este segundo problema puede estar asociado con la creación de valores marca específicamente temporales [Forbus 1988a]). Los valores ambiguos están soportados en el módulo Retícula Cuantitativa, el único requerimiento es que sean convexos. El Espacio Cuantitativo no intenta resolver la ambigüedad, pero la provisión del conocimiento cuantitativo adecuado en la sección de restricciones del fichero modelo es tenido en cuenta cuando el Compilador construye el álgebra. El módulo Espacio Cuantitativo permite que las peticiones a su Interface se hagan en términos de valores tanto cualitativos como ambiguos, y proporciona una función comparación que determina cual es el más específico (el menos ambiguo) de los dos valores. Las ambigüedades están soportadas porque no son necesariamente problemáticas hasta el punto de impedir que se lleve a cabo la simulación; Incluso una ambigüedad multiplicada por 0 da como resultado 0 .

4.2.3.- Funcionalidad del módulo Espacio Cuantitativo

El Interface del módulo Espacio Cuantitativo permite desarrollar las siguientes funciones:

- i. Cargar un fichero modelo pre-compilado.
- ii. Determinar si un valor es un punto cualitativo, un Intervalo cualitativo o una ambigüedad.
- iii. Determinar si un elemento puede constituir un valor para una variable, convirtiendo a una forma estándar si es necesario.
- iv. Determinar la relación ordinal entre dos valores.
- v. Devolver el espacio de definición real de un valor.
- vi. Determinar si dos valores son adyacentes y contiguos en el espacio cuantitativo de una variable (usado para determinar el movimiento de una variable continua a través de su espacio cuantitativo).
- vii. Determinar entre dos valores cuál es el más específico para una variable (el menos ambiguo).
- viii. Determinar la intersección de dos valores (generalmente ambiguos) para una variable.
- ix. Determinar el resultado de propagar valores para las variables argumentos de una expresión aritmética o funcional (consultando el álgebra pre-definida).

4.2.4.- Conceptos alternativos del valor cualitativo

En esta sección hemos incluido una breve discusión sobre conceptos alternativos del espacio cuantitativo. Empleamos originalmente el término "cualitativo" para enfatizar que las propiedades importantes de los valores reales debían reflejarse mediante un valor simbólico. Una propiedad importante puede ser si el valor es menor que, igual a, o mayor que 0, reflejadas, respectivamente mediante los valores simbólicos { -, 0, + }.

Este álgebra de signos tiene ciertas manifestaciones en la literatura, que consideraremos a continuación.

Algunas investigaciones han tomado un modelo estático de un sistema físico, describiendo relaciones algebraicas entre variables en un estado estable, y han intentado determinar el modo en que un cambio en ciertas variables del sistema originaría un cambio en otras variables (Gallanti 1986a, Gallanti 1989a). El valor cualitativo se utiliza para reflejar el cambio neto en una variable en el siguiente estado de equilibrio, si es que éste existe. Los valores del álgebra de signos se interpretan dando el signo de la diferencia entre los valores reales en los equilibrios respectivos, es decir - para "decrementado", 0 para "igual" y + para "aumentado". Debería tenerse en cuenta que esta interpretación particular ha conducido a una gran confusión en el ámbito del razonamiento cualitativo. Esto se ha debido, principalmente, a que muchos investigadores han buscado presentar sus trabajos como si estuvieran calculando la dirección del cambio de la variable, en el sentido de su derivada temporal (de Kleer 1984b). De hecho, una parte importante de este trabajo se basa en modelos de sistemas que no emplean ninguna primitiva dinámica, y no es posible determinar un comportamiento dinámico a partir de esos modelos. Si no se especifican los modelos dinámicos en el fichero modelo para el Motor Predictivo, los valores cualitativos pueden ser interpretados con esta semántica de "cambio neto en equilibrio", puesto que el modelo sólo es válido en equilibrio.

El valor cualitativo se emplea algunas veces para reflejar el signo de la primera derivada temporal de una variable. El signo de la primera derivada está relacionado implícitamente con la dirección del cambio de una variable, es decir - para "decreciente", 0 para "estacionario" y + para "creciente". En este caso, se han empleado primitivas dinámicas en el modelo, y es válido para interpretar valores en un comportamiento transitorio. Cuando se utiliza esta semántica de "dirección de cambio", debe tenerse cuidado de utilizar una semántica compatible para la interpretación de la magnitud de la variable (no diferenciable); en particular, las semánticas "dirección de cambio" y "cambio neto en equilibrio" no deberían mezclarse. El algoritmo QSIM (Kulpers 1986a) emplea una semántica de álgebra basada en intervalos para las magnitudes de las variables del sistema, y una semántica de "dirección del cambio" para la primera derivada temporal, aunque con una representación simbólica diferente, es decir *dec* para "decreciente", *std* para "estacionario" e *inc* para "creciente". En el Motor

Predictivo, podremos asumir por defecto el espacio cuantitativo $\{-, 0, +\}$ para la derivada y de este modo obtener la potencia de la interpretación de la "dirección del cambio" sin usar una representación simbólica separada.

Algunas investigaciones han considerado distintas formas de conseguir más granularidad (menos abstracción) en la noción del valor cualitativo sin llegar a la línea real densa. El área conocida como razonamiento sobre el orden de magnitud se introdujo en (Rainman 1986a). Hay ciertas nociones alternativas asociadas con el término "orden de magnitud" (tres de las cuales se describen en (Murphy 1988a)), con investigadores que enfatizan distintas propiedades de sus sistemas dependiendo de sus motivaciones.

Un área de trabajo en el razonamiento del orden de magnitud es el uso del "análisis no estándar" (Robinson 1966a, Robert 1988a) para interpretar un espacio de valor simbólico $\{ \text{pequeño}, \text{mediano}, \text{grande} \}$. La recta real es extendida para incluir grupos de cantidades infinitas e infinitesimales que se adscriben respectivamente a grande y pequeño, con los reales positivos descritos por mediano. Esto conduce a un álgebra que permite la interpretación de operaciones aritméticas y funcionales con dichas cantidades. Muchas áreas de razonamiento cualitativo han encontrado aplicación a esta interpretación, como por ejemplo el análisis comparativo (Weld 1988a), "exaggeration" (Weld 1988b), razonamiento sobre discontinuidades (Nishida 1987a).

Otras investigaciones han adoptado la aproximación de definir axiomáticamente nuevas relaciones ordinales entre cantidades. uno de los primeros ejemplos de esto se presenta en (Rainman 1986a) que introduce las relaciones del orden de magnitud N_a para "despreciable con respecto de a ", V_a para "próximo a a " y C_a para "mismo signo y orden de magnitud que a ". Se ha descrito un marco lógico que permite hacer inferencias a partir de las relaciones del orden de magnitud entre cantidades del sistema.

En algunos campos de aplicación del razonamiento cualitativo, especialmente la ingeniería, la confianza en bases puramente lógicas para la definición de las relaciones del orden de magnitud puede considerarse débil. Movrovouniotis y Stephanopoulos (Movrovouniotis 1987a, Stephanopoulos 1989a) proponen semánticas para las relaciones del orden de magnitud basadas en la ubicación de la relación de dos cantidades en intervalos de la recta real; se define una relación $A \Gamma B$ mediante un intervalo real que contiene el valor absoluto de la

relación A / B , y esto conduce a una escala logarítmica. Definen una gran variedad de relaciones primitivas del orden de magnitud por este concepto, y pueden construirse los intervalos reales definidos de diversas formas. Otro método de construcción es una Interpretación heurística que relaja los requerimientos de contigüidad, diluyendo la distinción entre las relaciones. En ambos métodos se construyen los intervalos considerando la relación de la relación a la unidad. El método de separación estricta está relacionado con el concepto del álgebra de intervalos empleado en el módulo Espacio Cuantitativo.

Existe una interpretación conceptualmente diferente del término "cualitativo" fundamentado en el uso de álgebras difusas [Zadeh 1973a]. En este caso, los valores simbólicos tienen un conjunto difuso subjetivo asociado con ellos. El dominio subyacente de estos conjuntos es la recta real, y por esta razón se denominan algunas veces "números difusos". Es posible definir las operaciones aritméticas y funcionales en términos de sus efectos sobre los números difusos y puede representarse las propiedades esenciales de un número difuso mediante un intervalo real. Algunas investigaciones recientes han empleado esta posibilidad para implementar la Interpretación difusa del término "cualitativo" para el espacio valor de las variables del sistema dentro del marco de estilo de QSIM [Shen 1990a, Shen 1990b]. La relación entre varios conceptos de espacio cuantitativo, incluyendo el razonamiento del orden de magnitud y los números difusos aparecen descritos en [Shen 1991a].

Hay un modo interesante de caracterizar valores cualitativos desde la consideración de predicados lógicos asociados con los valores de las variables del sistema, por ejemplo "aumentando(x)". Se proporciona un riguroso desarrollo de este concepto en [Francis 1986a]. Este trabajo ha conducido al desarrollo de uno de los primeros sistemas de control reallimentado basado en conocimiento.

De forma menos rigurosa, muchos sistemas expertos basados en reglas toman prestados los estilos de representación del cálculo de predicados de primer orden, que permite definir y usar nociones abstractas de "cualitativo" mucho más expresivas, por ejemplo "peligroso(x)". Vemos aquí la posibilidad de permitir predicados lógicos definidos por el usuario en el interface del Espacio Cuantitativo. Podría implementarse esto último incluyendo un nivel adicional de abstracción al existente en el interface, o permitiendo proporcionar definiciones de macros de predicados lógicos adicionales de forma dinámica al Espacio Cuantitativo por medio del interface.

4.3.- El Compilador

4.3.1.- Análisis del Fichero Modelo

El usuario del sistema debe crear un fichero modelo para expresar toda la información relativa a los espacios cuantitativos de las variables del sistema, cualquier restricción sobre los valores reales de los puntos cualitativos, las ecuaciones estructuradas del sistema, y cualquier valor correspondiente de las variables en dichas ecuaciones. El fichero modelo debe compilarse antes de que se lleve a cabo la simulación; los avisos y mensajes de error que genera el Compilador pueden emplearse como ayuda para la creación del fichero modelo. La compilación correcta del fichero "modelo" generará cuatro nuevos ficheros: "model.ap", "model.ec", "model.rc" y "model.gd". Estos cuatro ficheros se cargarán (cuando se solicite) en el Algoritmo Predictivo, el módulo Espacio Cualitativo, la Retícula Cuantitativa y el Grafo Dirigido respectivamente. La creación de fichero "model.ap" pretende aprovechar el trabajo del Compilador, pero no es éste su principal propósito.

El objetivo principal del compilador es la construcción de un álgebra de intervalos para el módulo Espacio Cuantitativo a partir de la información que se incluye en el fichero modelo. Hemos explicado en la sección 4.2 que el Espacio Cuantitativo debe ser capaz de interpretar estas álgebras de una manera constructiva. El Compilador lleva a cabo dos funciones principales para el Espacio Cuantitativo:

1. Construye las representaciones del espacio cuantitativo en la Retícula Cuantitativa (y el grafo dirigido);
2. Construye las representaciones de los valores correspondientes en la Retícula Cuantitativa, y usa estos para generar las álgebras basadas en intervalos.

Ya hemos discutido con algún detalle la primera de estas funciones en la sección 4.2 del Espacio Cuantitativo. Los espacios cuantitativos, como listas de valores cualitativos, están contenidas en el Espacio Cuantitativo. Los valores cualitativos son de dos tipos: puntos e intervalos. Los puntos cualitativos se representan como nodos en la Retícula Cuantitativa. Los intervalos cualitativos emplean un nodo en la Retícula Cuantitativa para representar algún punto dentro

del intervalo. Se construye una tabla simbólica con doble índice de variables e intervalos, y esta tabla se emplea para asociar un Intervalo cualitativo con su nodo de la Retícula Cuantitativa. La tabla simbólica se mantendrá también en el Espacio Cuantitativo.

Vamos a construir un ejemplo que utilizaremos posteriormente a lo largo de toda la sección. Supongamos que tenemos las variables a , b , y c con los siguientes espacios cuantitativos:

a con el espacio cuantitativo $\{ 0, (0, nom_a), nom_a, (nom_a, \infty) \}$

b con el espacio cuantitativo $\{ 0, (0, nom_b), nom_b, (nom_b, \infty) \}$

c con el espacio cuantitativo $\{ 0, (0, nom_c), nom_c, (nom_c, \infty) \}$

El compilador construye la tabla simbólica indicada en la Tabla 4-3. Cualquier restricción de los valores reales de los puntos cualitativos se manejan pasando simplemente esta información al módulo Retícula Cuantitativa. Los arcos ordinales entre los nodos se construyen en el Grafo Dirigido. Los espacios cuantitativos y las tablas de símbolos se ubican en el fichero "model.ec", y los nodos y los arcos en los ficheros "model.rc" y "model.gd" respectivamente.

Índice		Nodo
a	$(0, nom_a)$	<i>intervalo_a 1</i>
a	(nom_a, ∞)	<i>intervalo_a 2</i>
b	$(0, nom_b)$	<i>intervalo_b 1</i>
b	(nom_b, ∞)	<i>intervalo_b 2</i>
c	$(0, nom_c)$	<i>intervalo_c 1</i>
c	(nom_c, ∞)	<i>intervalo_c 2</i>

Tabla 4-3: Tabla simbólica de a , b y c

La segunda función importante del Compilador es el procesamiento de las ecuaciones del sistema. Todos los valores correspondientes en la ecuación se procesan mediante la creación de un nodo expresión apropiado con inferencia hacia atrás en la Retícula Cuantitativa. Por ejemplo, si tenemos la siguiente ecuación:

$a = b + c$ con los valores correspondientes (nom_a, nom_b, nom_c)

se crearían los siguientes nodos expresión y arcos en la Retícula Cuantitativa y el Grafo Dirigido:

$$nom_a = nom_b + nom_c$$

$$nom_b = (nom_b + nom_c) - nom_c$$

$$nom_c = (nom_b + nom_c) - nom_b$$

La sección de restricciones puede emplearse también para proporcionar los valores correspondientes mediante restricciones de igualdad que incluyan expresiones aritméticas y funcionales sobre los puntos cualitativos. No es necesario expresar los valores correspondientes de ($0, 0, 0$) en el caso anterior dado que el módulo Retícula Cuantitativa es capaz de Inferir que $0 = 0 + 0$. Cuando se han procesado los valores correspondientes a cada ecuación del sistema de forma similar, se invocan aritméticas relacionales y de expresión fuerte dentro del módulo Retícula Cuantitativa. Esto asegura que se obtiene la máxima capacidad de inferencia, y la estructura que resulta en la Retícula Cuantitativa y el Grafo Dirigido se incluye en los ficheros "model.rc" y "model.gd" respectivamente. Estos dos ficheros se cierran a continuación para escritura; cualquier estructura creada más adelante en la Retícula Cuantitativa y el Grafo Dirigido por el Compilador, no se cargará en estos módulos para su uso en la simulación. El compilador continúa usando la funcionalidad de la Retícula Cuantitativa (y el Grafo Dirigido) para crear álgebras basadas en Intervalos, pero una vez que se ha compilado el álgebra, no es necesario mantener la estructura que permite esta compilación, toda vez que no tiene ninguna utilidad durante la simulación.

El álgebra permite preguntar directamente al Espacio Cuantitativo (de forma constructiva) por el valor cualitativo obtenido al aplicar operadores aritméticos, funcionales y monótonos a los valores cualitativos. Dado que sabemos cuáles son las ecuaciones del sistema, conocemos el subconjunto del álgebra completa del Espacio Cuantitativo que puede ser utilizada durante la simulación. Esta observación permite construir un álgebra parcial efectiva que es suficiente para manejar cualquier petición que pueda hacerse al Espacio Cuantitativo.

4.3.2.- Compilación de las ecuaciones del sistema

Cada ecuación del sistema del fichero modelo se estructura de forma que describe el modo en que la variable de la parte izquierda de la ecuación está afectada por las variables en la expresión de la parte derecha. Por ejemplo, la ecuación:

$$a = b + c$$

describe cómo b y c afectan a a . Esto significa que durante la simulación, se pedirá al Espacio Cuantitativo que proporcione un valor para a dados los valores de b y c , y el álgebra parcial debe proporcionar esta información. El compilador construye el álgebra creando nodos expresiones en la Retícula Cuantitativa para cada posible estado de la parte derecha de la ecuación. La aritmética de expresiones débil de la Retícula Cuantitativa interrelaciona por tanto estos nodos expresión de la parte derecha de las ecuaciones. De acuerdo con esto, los nodos expresión están relacionados con el espacio cuantitativo de a mediante la Interrogación de la Retícula Cuantitativa. Debemos tener en cuenta que son los correspondientes valores de los nodos expresión los que permiten a estas instancias de la parte derecha de las ecuaciones relacionarse con el espacio cuantitativo de a ; es por esta razón que se hace referencia a ellos como nodos pivotes. Podemos emplear un ejemplo de este procedimiento de compilación para clarificar todo lo anterior. Consideremos la ecuación anterior, los nodos expresión se crean para cada posible instancia de $b + c$, dando los siguientes nodos expresión en el módulo Retícula Cuantitativa:

$$0 + 0$$

$$0 + \text{intervalo_c } 1$$

$$0 + \text{nomc}$$

$$0 + \text{intervalo_c } 2$$

$$\text{intervalo_b } 1 + 0$$

$$\text{intervalo_b } 1 + \text{intervalo_c } 1$$

$$\text{intervalo_b } 1 + \text{nomc}$$

$$\text{intervalo_b } 1 + \text{intervalo_c } 2$$

nomb + 0

nomb + intervalo_c 1

nomb + nomc

nomb + intervalo_c 2

intervalo_b 2 + 0

intervalo_b 2 + intervalo_c 1

intervalo_b 2 + nomc

intervalo_b 2 + intervalo_c 2

Debemos darnos cuenta que la aritmética de expresiones débil (más que la fuerte) es suficiente para interrelacionar estos nodos expresión porque se basan sobre todas las posibles instancias de un formato de expresión común de unos espacios cuantitativos totalmente ordenados. Por ejemplo, el módulo Retícula Cuantitativa puede deducir que:

nomb + intervalo_c 2 > intervalo_b 1 + intervalo_c 1

de una búsqueda gráfica transitiva de :

nomb + intervalo_c 2 > nomb + nomc

> nomb + intervalo_c 1

> intervalo_b 1 + intervalo_c 1

donde cada uno de los pasos se obtiene mediante la aritmética de expresiones débil. Aunque la forma débil de la aritmética de expresiones es algo más eficiente que la forma fuerte, aún es exigente desde el punto de vista computacional. Un operador binario / (tal como el anterior) aplicado sobre dos espacios cuantitativos con cardinalidades n_1 y n_2 requerirá $n_1 n_2$ nodos expresión para crearse. La aritmética de expresiones débil es cuadrática en $n_1 n_2$; puede consultarse el capítulo 3 para detalles. Si sumamos estos requerimientos para todas las ecuaciones de sistema, encontraremos que la exigencia de cómputo originada al construir simplemente un álgebra parcial es ya muy considerable. Es por esta razón que se incluye el módulo Compilador, de forma que pueda cargarse el modelo compilado y desarrollar la simulación con retardos mínimos para el usuario.

4.3.3.- Generación del álgebra parcial

El módulo Retícula Cuantitativa relaciona los nodos expresión de la parte derecha de las ecuaciones de la lista anterior con los puntos cualitativos del espacio cuantitativo de a (es decir 0 y nom_a). El nodo expresión $nom_b + nom_c$ ya existe a partir del procesado de los valores correspondientes, y se sabe que $nom_a = nom_b + nom_c$ y $0 = 0 + 0$. Pueden deducirse las siguientes relaciones con los nodos expresión:

$$0 = 0 + 0$$

$$0 < 0 + intervalo_c\ 1 < nom_a$$

$$0 < 0 + nom_c < nom_a$$

$$0 < 0 + intervalo_c\ 2$$

$$0 < intervalo_b\ 1 + 0 < nom_a$$

$$0 < intervalo_b\ 1 + intervalo_c\ 1 < nom_c$$

$$0 < intervalo_b\ 1 + nom_c < nom_a$$

$$0 < intervalo_b\ 1 + intervalo_c\ 2$$

$$0 < nom_b + 0 < nom_a$$

$$0 < nom_b + intervalo_c\ 1 < nom_a$$

$$nom_a = nom_b + nom_c$$

$$nom_a < nom_b + intervalo_c\ 2$$

$$0 < intervalo_b\ 2 + 0$$

$$0 < intervalo_b\ 2 + intervalo_c\ 1$$

$$nom_a < intervalo_b\ 2 + nom_c$$

$$nom_a < intervalo_b\ 2 + intervalo_c\ 2$$

Los nodos que se emplean en la Retícula Cuantitativa hacen referencia a las tuplas de valores variable/cualitativo mediante la tabla simbólica. Las relaciones anteriores permiten generar un álgebra constructiva que produce un resultado en el espacio cuantitativo de a a partir de la suma de dos valores cualitativos de los espacios cuantitativos de b y c respectivamente. Es posible que el valor de

este resultado sea ambiguo. El álgebra está realmente expresada en términos de tuplas variable/valores de modo que no hay confusión entre álgebras para diferentes ecuaciones (no es necesario que los valores cualitativos sean únicos y siempre deberían estar referidos a una variable cuando se consulta al módulo Espacio Cuantitativo). Para clarificar, presentamos el álgebra sólo en término de valores, dado que sabemos que se refiere a la ecuación $a = b + c$:

$$0 = 0 + 0$$

$$(0, nom_a) = 0 + (0, nom_c)$$

$$(0, nom_a) = 0 + nom_c$$

$$\{(0, nom_a), nom_a, (nom_a, \infty)\} = 0 + (nom_a, \infty)$$

$$(0, nom_a) = (0, nom_b) + (0, nom_c)$$

$$(0, nom_a) = (0, nom_b) + (0, nom_c)$$

$$(0, nom_a) = (0, nom_b) + nom_c$$

$$\{(0, nom_a), nom_a, (nom_a, \infty)\} = (0, nom_b) + (nom_c, \infty)$$

$$(0, nom_a) = nom_b + (0, nom_c)$$

$$(0, nom_a) = nom_b + (0, nom_c)$$

$$nom_a = nom_b + nom_c$$

$$(nom_a, \infty) = nom_b + (nom_c, \infty)$$

$$\{(0, nom_a), nom_a, (nom_a, \infty)\} = (nom_b, \infty) + (nom_c, \infty)$$

$$\{(0, nom_a), nom_a, (nom_a, \infty)\} = (nom_b, \infty) + (nom_c, \infty)$$

$$(nom_a, \infty) = (nom_b, \infty) + (nom_c, \infty)$$

$$(nom_a, \infty) = (nom_b, \infty) + (nom_c, \infty)$$

El Compilador construye de esta forma un álgebra de forma individual para cada sistema de ecuaciones. El álgebra de intervalos resultante de este proceso de compilación se almacena en el fichero "model.ec". Estas álgebras se cargan entonces en el módulo Espacio Cuantitativo antes de la simulación, junto con los espacios cuantitativos y la tabla simbólica.

4.3.4.- Posibles mejoras

La ambigüedad del álgebra del ejemplo anterior se debe a la ambigüedad de la aritmética cualitativa (y la no existencia de puntos cualitativos sin los valores correspondientes). No es posible evitar esta ambigüedad en álgebras basadas en intervalos de esta misma forma. En algunos casos, es posible permitir la resolución de la ambigüedad del álgebra a partir de Información cuantitativa sobre dos puntos cualitativos. Si éste es el caso, esta Información debe proporcionarse en la sección de restricciones del fichero modelo, y se tendrá en cuenta de forma automática durante la Inferencia de las relaciones ordinales en la Retícula Cuantitativa. Esta es una de las ventajas principales del uso de una Retícula Cuantitativa como mecanismo de representación de los datos esenciales. A este respecto, podemos considerar dos posibles mejoras del Motor Predictivo.

La primera de las mejoras posibles sería permitir el descubrimiento de nuevos puntos cualitativos en el espacio cuantitativo durante la simulación. En esencia, se trataría de crear un nuevo punto cualitativo si una variable pasa a ser estacionaria (su primera derivada es nula) mientras el valor de la variable es un intervalo cualitativo (aunque podría emplearse otro criterio). QSIM permite este proceso de descubrimiento de nuevos puntos de marca, aunque Kuipers indica la posible contención originada (Kuipers 1985a). En el Motor Predictivo, las álgebras que incluyen el espacio cuantitativo aumentado deben ser reconstruidas de forma Interactiva.

La segunda mejora sería permitir la Incorporación de Información cuantitativa adicional durante la simulación. En el modelo actual, la sección de restricciones del fichero modelo puede usarse para proporcionar Información sobre valores reales a priori. El uso de esta Información está totalmente Integrada en la Retícula Cuantitativa. En general, la adición de nueva Información cuantitativa debería requerir que se rehiciera completamente el álgebra, y la necesidad de llevar esto a cabo durante la simulación haría imposible aprovechar la ventaja de tener un Compilador separado.

Finalmente, el uso extensivo que hace el Compilador de la aritmética de expresiones en la Retícula Cuantitativa sugiere que una Implementación más eficiente de este proceso supondría un beneficio considerable.

4.4.- El Espacio Temporal

4.4.1.- Representación del Tiempo

El módulo Espacio Temporal mantiene las estructuras de datos que se usan para representar el tiempo. Nuestra representación del tiempo se deriva del modo en que las variables evolucionan dentro de sus espacios cuantitativos. La noción basada en intervalos que empleamos de "cualitativo" tiene la interesante y útil propiedad de que si consideramos los espacios de definición de las variables del sistema divididas en espacios cuantitativos, podemos considerar sus dominios de tiempo divididos de la misma forma, es decir, como una variable de sistema evoluciona siguiendo puntos e intervalos dentro de su espacio de definición, podemos identificar puntos e intervalos en su dominio temporal. Por motivos de claridad, nos referiremos a los puntos e intervalos del dominio temporal como momentos y periodos respectivamente. El algoritmo QSIM emplea una representación similar del tiempo, donde se identifican los "puntos de tiempo distinguidos" con el hecho de que una variable tome un valor marca (punto cualitativo). Debería estar claro que hay interpretaciones del término cualitativo discutidas en la sección 4.2.4 que no admiten esta propiedad.

Es función del módulo Espacio Temporal mantener las relaciones ordinales existentes entre los momentos de tiempo que marcan los cambios en los valores cualitativos de las variables, y proporcionar una abstracción que permita consultas considerando esta estructura temporal de diversas maneras. El Espacio Temporal emplea el módulo Retícula Cuantitativa para proporcionar esta funcionalidad. Los momentos se representan como nodos en la Retícula Cuantitativa, que mantiene así las relaciones ordinales entre ellas. A medida que se desarrolla la simulación, se genera un conjunto de momentos M que corresponden a los instantes en que se producen cambios cualitativos en las variables del sistema. Los valores cualitativos están relacionados con los momentos y los períodos entre ellos y el módulo Mapa de Eventos (que se describe en el capítulo 5); el Espacio Temporal sólo es responsable de mantener la estructura ordinal de los momentos M .

Asociamos a cada momento de M una noción de medida del tiempo (lo cual también podemos representar en la Retícula Cuantitativa) y definimos la relación de orden \leq entre momentos de forma apropiada. El conjunto de momentos M está limitado inferiormente por τ_{pasado} y por encima por

$\tau_{\text{persistente}}$. Estos límites no son momentos en sí mismos y no se guardan como nodos en la Retícula Cuantitativa, pero se mantienen en la abstracción proporcionada por el Espacio Temporal, podemos pensar en ellos como $-\infty$ e ∞ respectivamente en un modelo del tiempo extendido a la recta real. Esto nos conduce a una noción de retícula temporal (Ψ, \leq) (Rutherford 1965a), donde:

$$\Psi = M \cup \{ \tau_{\text{pasado}}, \tau_{\text{persistente}} \}$$

Los momentos se crean durante la simulación para marcar, simbólicamente, los Instantes en los que se producen transiciones en los valores cualitativos. En el capítulo 2 ya discutimos el modo en que los diversos algoritmos de simulación cualitativa descubren el orden temporal de estas transiciones. En un algoritmo que lleva a cabo la Ordenación de Transiciones de forma constructiva, los momentos que marcan cada transición individual a un punto cualitativo puede crearse en el Espacio Temporal y ordenarse después con respecto a los demás (por ejemplo aplicando las reglas de la ordenación de Transiciones). Sin embargo, el Algoritmo Predictivo emplea una Ordenación de Transiciones no constructiva. Consideramos subconjuntos que pueden cambiar simultáneamente en el mismo instante, y usando el algoritmo recursivamente investigamos cada subconjunto posible; si el algoritmo falla, el subconjunto que se está considerando no es válido. No necesitamos descubrir que dos momentos son iguales; o bien son idénticos por hipótesis o están relacionados por la ordenación parcial $<$. Si se emplea una Ordenación de Transiciones no constructiva podemos considerar la igualdad como una relación de equivalencia, y considerar la retícula temporal (Ψ, \leq) dividida en clases equivalentes con la ordenación parcial $(\Psi / \sim, <)$. El módulo Espacio Temporal puede usarse con una Ordenación de Transiciones constructiva o no-constructiva, pero la consideración anterior debería ser útil para entender el modo en que el Espacio Temporal se emplea en el Algoritmo Predictivo. En ambos casos, uno de los objetivos de una simulación cualitativa es identificar una cadena totalmente ordenada en la retícula temporal.

En la estructura temporal que nosotros empleamos, un período es un intervalo abierto (t_1, t_2) entre dos instantes $t_1, t_2 \in \Psi, t_1 < t_2$. Si el mayor de los límites inferiores de un período es τ_{pasado} , por ejemplo $(\tau_{\text{pasado}}, t_2)$, podemos considerar que el período cubre todo el tiempo en el pasado previo a $t_2 \in \Psi$. De una forma similar, si el menor de los límites superiores es $\tau_{\text{persistente}}$, por ejemplo $(t_1, \tau_{\text{persistente}})$, podemos considerar que el período cubre todo el tiempo futura

después de $t_1 \in \Psi$, y el período se dice que es persistente. Un período por defecto ($\tau_{\text{pasado}}, \tau_{\text{persistente}}$) cubre todo el tiempo pasado, presente y futuro.

4.4.2.- El tiempo y las discontinuidades

El hecho de que nuestros períodos de tiempo siempre sean intervalos abiertos tiene importantes ramificaciones en el modo en que los períodos y los momentos pueden sucederse. No representamos períodos semi-cerrados, de modo que dos períodos siempre tienen un momento entre ellos. Por ejemplo, consideremos que se produce una discontinuidad por la izquierda en una variable del sistema. Podemos tener un período (t_1, t_2) en la cual la variable tienen un valor p , seguida por un período ($t_2, \tau_{\text{persistente}}$) en el cual la variable tienen un nuevo valor q . Esto significa que no pueden construirse historias (secuencias de tuplas valor/tiempo) concisas, en el sentido descrito por [Williams 1986a]. Si pudiéramos representar períodos semi-cerrados, deberíamos tener (t_1, t_2) seguido por ($t_2, \tau_{\text{persistente}}$), es decir, deberíamos permitir que dos períodos fueran adyacentes sin un momento intermedio. Debemos tener en cuenta la importancia de que podamos especificar que un período es semi-cerrado.

Hay una parte importante de la lógica temporal relacionada con los axiomas de la relaciones temporales que no se ajusta a un modelo del tiempo como el de la recta real. A este respecto, Hayes y Allen [Hayes 1987a] caracterizaron los "momentos" y los "períodos" de tiempo de modo que dos períodos pudieran ser adyacentes con o sin momentos intermedios, sin más que cambiar el nivel de granularidad de la teoría. En otras palabras, el intervalo (t_1, t_2) seguido de ($t_2, \tau_{\text{persistente}}$), y (t_1, t_2) seguido t_2 , seguido de ($t_2, \tau_{\text{persistente}}$) son, en cualquier caso, interpretaciones consistentes de su teoría, pero no hay ningún mecanismo específico para expresar períodos semi-cerrados. Tsang [Tsang 1987a] va más allá al relacionar la implementación del tiempo mediante puntos base (del mismo modo que nuestro módulo Espacio Temporal) con estructuras basadas en intervalos, y se refiere a los problemas de los períodos semi-cerrados en una estructura de puntos densa (tal como el modelo de la recta real). La aproximación que hemos adoptado en el módulo Espacio Temporal es tener períodos abiertos y emplear un momento intermedio para indicar qué período puede considerarse como semi-cerrado, aún sabiendo que la historia resultante no es estrictamente concisa.

4.4.3.- Duración

El módulo Espacio Temporal soporta la noción de duración de un período de tiempo y de un momento, si bien no lo empleamos para ningún tipo de inferencia. Si consideramos un momento $t_1 \in M \subset \Psi$ como el intervalo cerrado $[t_1, t_1]$, podemos asociar una duración de $t_1 - t_1 = 0$ a cualquier momento. Para un período (t_1, t_2) con $t_1, t_2 \in M \subset \Psi$, $t_1 < t_2$, la duración se representa mediante la expresión $t_2 - t_1$. Esta expresión se almacena y manipula en la Retícula Cuantitativa. Actualmente no está definida la duración de los períodos que contienen τ_{pasado} y $\tau_{\text{persistente}}$, y también resulta muy difícil representar que la duración de $(t_1, t_2]$ es mayor que la de (t_1, t_2) en la versión actual del módulo Espacio Temporal.

Nuestro módulo Espacio Temporal comparte la forma de almacenamiento con el Espacio Cuantitativo en el módulo Retícula Cuantitativa. Esto nos permite proporcionar un espacio cuantitativo a las duraciones, que podemos emplear para soportar técnicas de razonamiento relacionadas con retrasos temporales o que consideren el tiempo que necesitan las transiciones para producirse, por ejemplo el uso de las nociones de "tiempo de persistencia" y "tiempo de llegada" (Weld 1988b). Actualmente, no llevamos a cabo esta clase de inferencias y, por lo tanto, el Espacio Temporal y el Espacio Cuantitativo podrían cada uno tener su propia Retícula Cuantitativa.

Allen (Allen 1983a) proporciona un conjunto de 13 relaciones primitivas entre los intervalos de tiempo (referidas a la estructura temporal basada en intervalos). Estas relaciones primitivas están implementadas en el módulo Espacio Temporal para soportar consultas en el interface. Las relaciones están implementadas considerando las relaciones ordinales entre los puntos finales de los momentos (considerados como intervalos cerrados degenerados) y períodos en nuestra estructura temporal basada en puntos. Ciertos investigadores en lógica temporal han considerado clases de relaciones entre intervalos formada por uniones disjuntas particulares de las trece relaciones primitivas entre intervalos, y se han publicado algunos resultados de complejidad (Vilain 1986a, van Beek 1990a). En particular, el trabajo de (Nökel 1989a) ha identificado la clase de relaciones entre intervalos compuestos disjuntos para las cuales puede comprobarse la consistencia global en un tiempo polinómico. Esta clase está asociada con las relaciones compuestas disjuntas que no requieren el uso de la relación \neq cuando se expresan como relaciones ordinales entre puntos finales de los intervalos de tiempo. Esto tiene relevancia con lo que encontramos en la

Retícula Cuantitativa; incluir la relación \neq haría que la complejidad de la comprobación de la consistencia global adquiriera proporciones exponenciales.

4.4.4.- Funcionalidad del módulo Espacio Temporal

El interface del módulo Espacio Temporal permite desarrollar las siguientes funciones:

- i. Determinar si un intervalo es un momento, un período y si es persistente.
- ii. Devolver el punto inicial y final de un período o momento.
- iii. Devolver el período por defecto (τ_{pasado} , $\tau_{\text{persistente}}$).
- iv. Examinar la relaciones ordinales entre momentos.
- v. Examinar las relaciones ordinales entre duraciones.
- vi. Examinar las relaciones entre períodos/momentos empleando las relaciones primitivas entre Intervalos de Allen.
- vii. Determinar las intersección de dos períodos/momentos.
- viii. Determinar cuál de dos períodos /momentos comienza primero (puede expresarse como una disjunción de las relaciones de Intervalos de Allen).
- ix. Generar los períodos/momentos que siguen a un momento/período especificado.
- x. Generar un nuevo período/momento (Puede servir para una Ordenación de Transiciones constructiva; los puntos finales del período/momento generado deben ser ordenadas en el Espacio Temporal por el usuario).
- xi. Hacer un período persistente (asegurar que su límite superior es $\tau_{\text{persistente}}$).
- xii. Hacer que un período termine en un momento especificado (empleado para terminar un período que no persistirá más tiempo).
- xiii. Crear relaciones ordinales entre momentos.
- xiv. Crear relaciones ordinales entre duraciones.

4.5.- Resumen

En este capítulo hemos discutido los módulos Espacio Cuantitativo y Espacio Temporal, empleados para razonar sobre los valores y el tiempo respectivamente en la arquitectura del Motor Predictivo. El módulo Mapa de Eventos emplea estos dos módulos para mantener la consistencia de los eventos que se propagan en el Algoritmo Predictivo. El capítulo 5 describiremos el algoritmo de simulación en detalle.

El módulo Compilador, separado del resto, construye un álgebra basada en intervalos parcial a partir de consideraciones sobre las ecuaciones del sistema y los espacios cuantitativos especificados por el usuario en un fichero modelo. Este álgebra parcial se carga en el Espacio Cuantitativo antes de desarrollar la simulación del modelo. De este modo, el Espacio Cuantitativo puede contestar las consultas acerca de la propagación de los valores cualitativos en un tiempo constante mediante expresiones algebraicas.

5.- EL ALGORITMO PREDICTIVO

5.1.- Introducción

Este capítulo presentaremos en detalle la operatoria del Algoritmo Predictivo. La implementación de este algoritmo reside en los dos módulos más exteriores de la arquitectura del Motor Predictivo, denominados Algoritmo Predictivo y Mapa de Eventos respectivamente. El módulo Retícula Cuantitativa, que constituye el núcleo del sistema, mediante las abstracciones proporcionadas por los módulos Espacio Temporal y Espacio Cuantitativo, se utiliza para mantener la consistencia de la Información generada durante la operación del algoritmo de simulación. El módulo Mapa de Eventos contiene un registro de la forma en que las variables del sistema cambian su valor durante la simulación: la estructura de datos primaria empleada en este registro es una tupla variable/valor/tiempo, denominada evento. Cada evento indica que una variable del sistema tiene un valor dado durante un cierto intervalo de tiempo (momento o período). Discutiremos el concepto de evento en la sección 5.2 de este mismo capítulo.

Para desarrollar la simulación, previamente debemos compilar y cargar en el Motor Predictivo el fichero que contiene el modelo cualitativo del sistema dinámico continuo. En el capítulo 6 daremos una indicación detallada de la estructura de la Información contenida en el fichero modelo. En este capítulo, nos concentraremos en el funcionamiento del Algoritmo Predictivo. Una vez que se ha cargado el modelo, pueden proporcionarse eventos de entrada (cambios

en los valores de las variables) y el Algoritmo Predictivo propaga dichos cambios a través de la estructura del modelo cualitativo (Propagación Causal) y a lo largo del tiempo (Integración Cualitativa) generando el comportamiento dinámico cualitativo del modelo. El algoritmo termina cuando la simulación alcanza el equilibrio. El Algoritmo Predictivo responde a los eventos de entrada, determinando la respuesta dinámica cualitativa del modelo y terminando cuando se alcanza un nuevo equilibrio. El algoritmo está implementado como un conjunto de fases distintas, denominadas Propagación Causal, Integración Cualitativa, Reconocimiento de Transiciones, Ordenación de Transiciones y Ordenación de Prioridades. Presentaremos la estructura de este algoritmo y su división en fases en la sección 5.3 de este mismo capítulo.

En el capítulo 2 comparábamos el Algoritmo Predictivo con otros algoritmos de simulación cualitativa; e indicamos que la fase de Integración Cualitativa era constructiva mientras que la fase de Ordenación de Transiciones era no constructiva. Lo que nos concierne en este momento es el modo en que el Algoritmo Predictivo y el Mapa de Eventos cooperan para desarrollar una Ordenación de Transiciones no constructiva. Investigamos el conjunto de transiciones posibles en una rutina de generación y prueba; la parte de prueba de esta rutina contiene una llamada recursiva al Algoritmo Predictivo, que se efectúa cuando investigamos como hipótesis cada conjunto de transiciones. La fase de Propagación Causal del algoritmo contiene unas comprobaciones de validez para asegurar que la transición considerada representa un comportamiento válido del sistema, un fallo de estas comprobaciones puede hacer que todo el Algoritmo Predictivo falle. Por lo tanto, la naturaleza no constructiva de la fase de Ordenación de Transiciones conduce a la necesidad de soportar el razonamiento no monotónico en el módulo Mapa de Eventos. Por ello, implementamos en el módulo Mapa de Eventos un rudimentario Sistema de Mantenimiento de la Verdad (TMS) basado en el uso de etiquetas supuestas para aumentar los eventos almacenados; presentaremos este TMS en la sección 5.3.5 de este mismo capítulo. Las comprobaciones de la validez pueden originar un fallo de la propagación causal, tal y como explicaremos en la sección 5.4.

Además de fallar por completo, la comprobación de validez en la Propagación Causal, puede descubrir no que la transición tomada como hipótesis es necesariamente inválida, sino que debe estar precedida de ciertas transiciones en otras variables del sistema (estas transiciones anteriores no fueron devueltas

por el Reconocedor de Transiciones). En este caso, el Algoritmo Predictivo entra en una fase de Ordenación de Prioridades, que considera las transiciones de prioridades de forma similar al modo de operación de la Ordenación de Transiciones. Presentaremos más adelante la fase de Ordenación de Prioridades, en la sección 5.5 de este capítulo.

El Algoritmo Predictivo y el Mapa de Eventos cooperan estrechamente para desarrollar el algoritmo de simulación. Sin embargo, hay una división clara entre las funcionalidades de ambos módulos: El Algoritmo Predictivo refleja la estructura de alto nivel del algoritmo mientras que el Mapa de Eventos es responsable de la gestión de bajo nivel del mismo. En las secciones 5.2 y 5.4 trataremos acerca del módulo Mapa de Eventos, mientras que la sección 5.3 y 5.5 describiremos el Algoritmo Predictivo. Esta discusión es difícil de llevar a cabo desde el punto de vista de la arquitectura, siendo más natural describir la operatoria del algoritmo; esto último es lo que juzgamos más importante en este capítulo.

5.2.- Eventos

Los eventos constituyen la principal estructura de datos sobre la que opera el algoritmo de simulación. Están inspirados en la noción de episodios proporcionada por Williams [Williams 1986a]. Williams empleó el término "episodio" para evitar la confusión con la "simulación discreta de eventos" dado que muchos de sus ejemplos de razonamiento basado en episodios están sacados de los dominios discretos. Otro uso del término "evento" procede del Cálculo de Eventos [Kowalski 1986a]. En este caso se emplea el término "evento" para referirse a una ocurrencia, mientras que nosotros lo utilizamos para referirnos a lo que queda después de la ocurrencia. Nuestra terminología presenta además otras diferencias, un evento el Mapa de Eventos es un tupla compuesta de tres campos:

$$(V, Q, T)$$

donde V es una variable del sistema con un espacio cuantitativo Q_v , Q es un valor de V y T es un Intervalo de tiempo. El valor Q puede ser bien un punto cualitativo, un Intervalo cualitativo, o una ambigüedad (un subconjunto convexo de Q_v); todos estos términos ya han sido definidos en la sección 4.2 del capítulo

4. El intervalo de tiempo T puede ser bien un momento $m \in M \subset \Psi$ o un período entre dos tiempos $t_1, t_2 \in \Psi, t_1 < t_2$. En el primero de los casos:

$$(V, Q, T), Q \in Q_v, m \in M \subset \Psi$$

nos referimos a él como un evento momento y en el segundo de los casos:

$$(V, Q, (t_1, t_2)), Q \in Q_v, t_1, t_2 \in \Psi, t_1 < t_2$$

nos referimos a él como un evento período. Si en este segundo caso $t_2 = \tau_{\text{persistencia}}$, entonces, se dice que el evento período:

$$(V, Q, (t_1, \tau_{\text{persistencia}})), Q \in Q_v, t_1 \in \Psi$$

persiste, y se denomina evento persistente. La terminología y la notación relacionada con el campo temporal de un evento fue definida completamente en la sección 4.4 del capítulo 4. El Mapa de Eventos utiliza el módulo Espacio Cuantitativo para desarrollar todo el razonamiento relacionado con los campos valor de los eventos, y éste utiliza el módulo Espacio Temporal para llevar a cabo todos los razonamientos relacionados con los campos temporales.

La principal funcionalidad del módulo Mapa de Eventos es mantener un registro de los eventos que describen cómo ha cambiado el valor de las variables del sistema a lo largo del tiempo que dura la simulación. Este registro de eventos está implementado como una pila, y los eventos de la Pila de Eventos están ordenados temporalmente de modo que los eventos más recientes aparecen más altos en la pila. A medida que el algoritmo de simulación descubre nuevos eventos según pasa el tiempo, los coloca en la parte superior de la Pila de Eventos. Si es necesario modificar el último evento registrada para una variable específica, La Pila de Eventos se deshace hasta alcanzar el evento para esa variable; tras modificarlo, los eventos extraídos de la pila vuelven a ponerse de nuevo en la misma. Este detalle de la implementación preserva la ordenación de la pila y también permite al usuario considerar que el Mapa de Eventos dispone una pila para cada una de las variables del sistema, aunque de hecho haya una sola pila. Emplearemos una ejemplo del modo en que se usa la Pila de Eventos para clarificar lo anterior.

En el siguiente ejemplo, supondremos para simplificar que todas las variables del sistema a , b y c tienen el espacio cuantitativo por defecto $\{-, 0, +\}$. Asumamos los siguientes contenidos de la pila de eventos:

SUPERIOR → $(b, +, (t_1, \tau_{persistente}))$
 $(b, 0, t_1)$
 $(a, 0, (\tau_{pasado}, \tau_{persistente}))$
 $(b, 0, (\tau_{pasado}, t_1))$
 $(c, 0, (\tau_{pasado}, \tau_{persistente}))$

Esto representa a las variables a y c manteniendo sus valores iniciales de 0 , y un incremento de b de 0 a $+$ en el instante t_1 . El evento momento $(b, 0, t_1)$ asegura el cierre apropiado de $(b, 0, (\tau_{pasado}, t_1))$; como se puede ver si consultamos la sección 4.4 del capítulo 4.

La fase de Propagación Causal del Algoritmo Predictivo la presentaremos en la sección 5.3.2, sin embargo, vamos a asumir en este momento que la ecuación del sistema $a = b - c$ y la Pila de Eventos anterior han llevado a la Propagación Causal a inferir el siguiente evento $(a, +, (t_1, \tau_{persistente}))$. Hemos inferido esto tomando la intersección de los campos temporales de los eventos persistentes de b y c (usando el módulo Espacio Temporal), y efectuando la operación aritmética $b - c$ con los campos valor de estos eventos (empleando el Espacio Cuantitativo). El Mapa de Eventos modifica el último evento registrado de a de modo que no persista más tiempo y asegura que el intervalo temporal semi-cerrado se represente correctamente empujando hacia abajo los momentos cerrados:

SUPERIOR → $(a, 0, t_1)$
 $(b, +, (t_1, \tau_{persistente}))$
 $(b, 0, t_1)$
 $(a, 0, (\tau_{pasado}, \tau_{persistente}))$
 $(b, 0, (\tau_{pasado}, t_1))$
 $(c, 0, (\tau_{pasado}, \tau_{persistente}))$

Finalmente, el último evento inferido para a se coloca en el parte alta de la Pila de Eventos:

SUPERIOR → (a , +, (t_1 , $\tau_{persistente}$))
 (a , 0, t_1)
 (b , +, (t_1 , $\tau_{persistente}$))
 (b , 0, t_1)
 (a , 0, (τ_{pasado} , $\tau_{persistente}$))
 (b , 0, (τ_{pasado} , t_1))
 (c , 0, (τ_{pasado} , $\tau_{persistente}$))

La operación que deja el último evento registrado de una variable y pone el último evento momento en la parte más alta de la Pila de Eventos es indivisible. Es un error que la parte superior de la Pila de Eventos sea un evento período no-persistente de cualquier variable. Los eventos momento nos permiten una licencia; no persisten, pero no puede saberse todavía lo que va a seguirles, de modo que pueden ocupar la parte alta de la Pila de Eventos. Esta noción de persistencia es muy importante para la operación del algoritmo de simulación; se asume que un nuevo evento inferido persiste hasta que otra inferencia determina que el valor de la variable ha cambiado. La comprobación de validez en la Propagación Causal asegura que el cambio es consistente con el comportamiento del sistema dinámico continuo (tal y como discutiremos en la sección 5.4). Durante la simulación, el valor actual de cualquier variable del sistema se obtiene fácilmente buscando el evento más elevado de esa variable en la Pila de Eventos. La historia de una variable del sistema es la secuencia ordenada temporalmente de los eventos de la variable. Por ejemplo, la historia de la variable a anterior sería:

(a , +, (t_1 , $\tau_{persistente}$))
 (a , 0, t_1)
 (a , 0, (τ_{pasado} , $\tau_{persistente}$))

5.3.- El Algoritmo Predictivo

5.3.1.- Introducción

El Algoritmo Predictivo se ejecuta para simular la respuesta dinámica cualitativa del sistema a cambios efectuados en los valores de las variables del sistema. Estos cambios pueden deberse al inicio de la simulación, a nuevos valores de las variables de entrada, o a la alteración del modelo del sistema. El Interface que hemos incluido en el Motor Predictivo ejecuta el algoritmo de forma automática en caso de que se produzca cualquiera de las situaciones anteriores. La petición del Algoritmo Predictivo es simular el comportamiento dinámico cualitativo del sistema hasta que detecta que se ha alcanzado el equilibrio, momento en el cual el algoritmo termina. El usuario puede interrumpir e interactuar con el algoritmo mientras éste se está ejecutando. Esto último puede servir, por ejemplo, para alterar las variables de entrada durante la simulación (una clase de proceso de convolución cualitativa).

El Algoritmo Predictivo se estructura como un conjunto de fases distintas, tal y como mostramos en el diagrama de la Figura 5-1. El ciclo principal se desarrolla con las fases de Propagación Causal y de Integración Cualitativa hasta que no pueden hacerse más inferencias; esta parte representa la analogía cualitativa a la simulación numérica convencional. Cuando estos dos procesos no pueden inferir nuevos eventos, se emplean las fases de Reconocimiento de Transiciones y la Ordenación de Transiciones (junto con la Ordenación de Prioridades) para determinar lo que ocurrirá a continuación en la simulación. Es la fase de Reconocimiento de Transiciones la que determina cuando se ha alcanzado el equilibrio para que el algoritmo termine. La fase de Propagación Causal contiene comprobaciones de validez que pueden hacer que el Algoritmo Predictivo falle. Además, la Ordenación de Transiciones y la Ordenación de Prioridades invocan al Algoritmo Predictivo de forma recursiva para investigar las transiciones hipotéticas, de modo que estas dos fases pueden también originar el fallo del algoritmo. En las secciones 5.3.5 y 5.5 presentamos diagramas de flujo separados para la Ordenación de Transiciones y la Ordenación de Prioridades respectivamente.

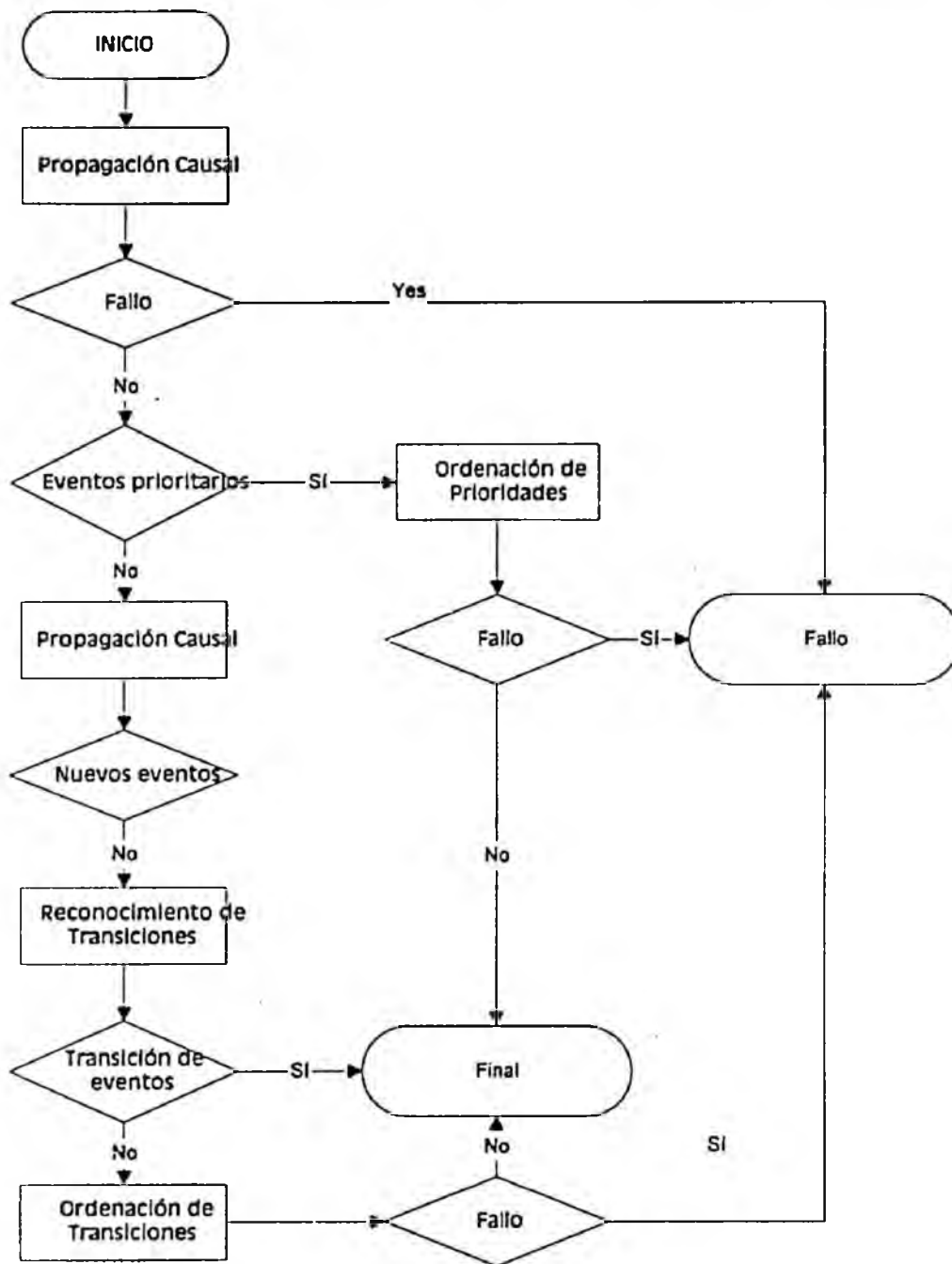


Figura 5 -1 Diagrama de flujo del Algoritmo Predictivo

La estructura del Algoritmo Predictivo se parece al modo en que la simulación numérica convencional utiliza los modelos dinámicos. La Propagación Causal considera las ecuaciones algebraicas del modelo del sistema e infiere nuevos eventos que se producen instantáneamente como respuesta a los eventos persistentes de las variables del sistema. Las ecuaciones algebraicas se estructuran para reflejar la estructura causal del sistema, tal y como veremos en el capítulo 6. Las otras fases del algoritmo reflejan el proceso de la Integración cualitativa, donde se considera que pasa cierto tiempo antes de la ocurrencia de nuevos eventos. Específicamente, la fase de Integración Cualitativa infiere nuevos eventos para las variables que comienzan en algún instante infinitesimalmente posterior a los eventos persistentes para las derivadas de esas variables. La fase de Reconocimiento de Transiciones encuentra nuevos eventos para las variables, que pueden producirse en un tiempo finito no-infinitesimal o en un tiempo infinito (asíntotas) después de los eventos persistentes de las derivadas de dichas variables. La Ordenación de Transiciones (y la Ordenación de Prioridades) llevan a cabo la investigación no-constructiva de estas posibles transiciones.

Desde el punto de vista de la arquitectura del Motor Predictivo, la estructura de alto nivel del algoritmo de simulación (incluyendo la Ordenación de Transiciones y las fases de Ordenación de Prioridades presentadas más adelante) se implementa completamente en el módulo Algoritmo Predictivo. La gestión de bajo nivel de las historias de eventos y la Interacción entre eventos persistentes se implementa en el módulo Mapa de Eventos. El Mapa de Eventos también proporciona la naturaleza no monotónica de la Ordenación de Transiciones y de la Ordenación de Prioridades.

5.3.2.- Propagación Causal

La fase de Propagación Causal del Algoritmo Predictivo es responsable de efectuar las Inferencias basadas en las restricciones algebraicas del modelo del sistema (diferenciadamente del proceso de Integración). Esto supone la propagación de los eventos persistentes mediante las ecuaciones algebraicas para determinar nuevos eventos (que se producirán instantáneamente como respuesta a los eventos persistentes). La Propagación Causal difiere de la propagación normal (restricciones) en que supone que las ecuaciones algebraicas que describen el modelo del sistema han sido manipuladas para que formen una secuencia ordenada de ecuaciones direccionales, reflejando una

Interpretación intuitiva de la estructura causal del sistema. Cada ecuación del modelo debería ser preparada y escrita de modo que las variables que aparezcan en la parte derecha puedan ser consideradas como causa de la única variable que aparece en la parte izquierda de la ecuación. Las propias ecuaciones, también, deberían ordenarse en una secuencia e_1, e_2, \dots , de modo que para cualquier ecuación e_i , la variable de la parte izquierda de e_i no aparezca en el lado derecho de ninguna de las ecuaciones e_j donde $1 \leq j < i$. Discutiremos más adelante esta estructura en la sección 6.3 del capítulo 6.

Normalmente, se considera a la Propagación de Restricciones un método general para determinar nuevos valores [Sussman 1980a] (en algún dominio) dado un conjunto de restricciones en el dominio apropiado. En nuestro dominio cualitativo, podemos considerar una restricción como una igualdad entre dos expresiones algebraicas que incluyen variables del sistema. En el método generalizado, la ecuación de restricciones se considera un modo de determinar el valor de cualquiera de las variables del sistema presente en cualquiera de los lados de la igualdad. Sin embargo, en la Propagación Causal, cada ecuación de restricción es considerada como una *ecuación direccional*; la tratamos como un método para determinar el valor de la variable única del lado izquierdo de la ecuación a partir de los valores persistentes de las variables que aparecen en la parte derecha de la expresión algebraica. Esta idea es similar al modo en que se estructuran las ecuaciones del sistema para la operación de algoritmos computacionales en la simulación numérica convencional.

Dada una ecuación direccional e_i del modelo del sistema a simular, de la forma $V = f (V_1, V_2, \dots, V_m)$ donde V, V_1, V_2, \dots, V_m son variables del sistema y f es una expresión algebraica permitida (ver capítulo 6), el paso de inferencia básico en la Propagación Causal consta de dos partes:

1. Calculamos la intersección temporal de los intervalos de tiempo de los eventos persistentes para los argumentos variables V_1, V_2, \dots, V_m , mediante la consulta del módulo Espacio Temporal.
2. Evaluamos la expresión algebraica f aplicada a los valores de los eventos persistentes para V_1, V_2, \dots, V_m , asegurando que el resultado se expresa en el espacio cuantitativo de la parte izquierda de la variable V , mediante la consulta del módulo Espacio Cuantitativo.

La Información que permite que se ejecute la segunda parte de esta Inferencia de forma eficiente ya se ha compilado con anterioridad en el módulo Espacio Cuantitativo desde el fichero modelo. El resultado de este paso básico de Inferencia es producir un evento para la variable V de la parte izquierda de la expresión algebraica. Dado que se sabe que V no aparece en la parte derecha de ninguna de las expresiones e_j , donde $1 \leq j < i$, no hay necesidad de reexaminar las ecuaciones del sistema en la secuencia ordenada. Así, la Propagación Causal se completa en una sola pasada lineal a través de las ecuaciones algebraicas direccionales del modelo del sistema.

En el Modelo Predictivo, las expresiones algebraicas permisibles son bien unitarias o binarias en sus argumentos variables ($m = 1$ ó $m = 2$). Esto significa que una ecuación del sistema direccional que tiene la parte derecha de la expresión algebraica de grado mayor a dos debe ser dividida en dos o más ecuaciones, con la introducción de variables ficticias para contener las propagaciones intermedias. Esto nos conduce a la cuestión de la asociatividad y distributividad de las expresiones algebraicas en los dominios cualitativos. Se ha demostrado que un álgebra basada en intervalos como la que empleamos aquí no es generalmente ni asociativa ni distributiva (Struss 1990a). Esto significa que para las variables del sistema A , B , y C ,

$(A + B) + C$ no es lo mismo que $A + (B + C)$

y tampoco

$A \times (B + C)$ no es lo mismo que $(A \times B) + (A \times C)$

En el fichero modelo, el usuario puede emplear ecuaciones adicionales para proporcionar estas expresiones algebraicas compuestas de formas diferentes, tanto asociadas por la izquierda como por la derecha, tanto distribuidas como no-distribuidas, y la fase de Propagación Causal determinará automáticamente el resultado más específico (menos ambiguo) para la variable de la parte izquierda, encontrado por examen de todas las ecuaciones. Por ejemplo, la ecuación:

$$V = A + B + C$$

puede expresarse en el fichero modelo como:

$$x = A + B$$

$$y = B + C$$

$$V = x + C$$

$$V = A + y$$

y la Propagación Causal determinará la Intersección cualitativa de los dos resultados para la variable V.

El Análisis Temporal Cualitativo (TQ) de Williams (Williams 1984a, Williams 1990a) también emplea una fase denominada Propagación Causal. Sin embargo, en el análisis TQ, las ecuaciones del sistema se proporcionan como un conjunto desordenado y en esta fase se debe buscar la ecuación apropiada a cada paso básico de Inferencia. Nuestra Propagación Causal explota la noción de la estructura causal del sistema para producir una mejora de la eficiencia. Además, el análisis TQ considera el flujo de la causalidad como algo que puede cambiar entre estados (es decir a medida que la simulación avanza entre los momentos de tiempo y los períodos). Cada estado tienen un conjunto de causas primarias asociadas a él, y la causalidad se considera con respecto a estas causas primarias. El efecto es que en el análisis TQ es posible que una ecuación se interprete en direcciones diferentes en distintos momentos. Sin embargo, en nuestra Propagación Causal hay una noción simple, estática, independiente del contexto del la causalidad del sistema que se especifica de antemano y que emplea para estructurar las ecuaciones del sistema apropiadamente. Una última diferencia es que en el análisis TQ hay una fase separada denominada análisis de realimentación que es responsable de resolver las ambigüedades cualitativas originadas en el punto de comparación de la estructura de realimentación del modelo. En nuestra Propagación Causal, se obvian las reglas separadas para el análisis de realimentación a tener una secuencia de ecuaciones estructuradas (y por el uso de derivadas de orden elevado; ver el capítulo 6). La separación de las ecuaciones algebraicas de los efectos de la Integración abre la estructura de realimentación del sistema evitando así ambigüedades debidas a la simultaneidad. Otras ambigüedades pueden reducirse para ciertas clases de sistemas por el uso explícito de derivadas de orden superior en las ecuaciones del modelo. Ilustraremos este último punto en el capítulo 7 con una serie de ejemplos.

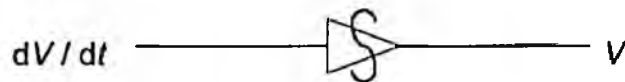
Las ecuaciones algebraicas deben arreglarse en el modelo del sistema y ordenarse manualmente por parte del usuario de forma que reflejen la estructura del sistema. El algoritmo de ordenación causal dinámico de [Iwasaki 1988b] puede emplearse como un método para la determinación de la estructura causal de ciertas clases de sistemas automáticamente. Consideraremos el uso de este algoritmo para proporcionar la información necesaria para reestructurar las ecuaciones en una forma manejable para el procesamiento de la Propagación Causal en la sección 6.3 del capítulo 6. El algoritmo requiere que las variables exógenas del modelo del sistema se especifiquen con anterioridad. Junto con las variables de estado independientes, las variables exógenas se consideran como las causas primarias en la determinación de una ordenación causal de las variables del modelo. La ordenación resultante es, por lo tanto independiente del contexto (mientras la variable exógena permanezca fija).

La acción básica de la Propagación Causal es generar un nuevo evento para la variable de la parte izquierda de cada una de las ecuaciones algebraicas direccionales del modelo. Durante el proceso de simulación, este nuevo evento representará cualquier cambio en el valor que puede tomar la variable a medida que el sistema se desplaza a un nuevo estado, y como tal, está restringido por el hecho de que estamos tratando con sistemas continuos dinámicos. El comportamiento cualitativo de cualquier variable del sistema debe ser consistente con una función temporal continuamente diferenciable que representa el comportamiento del valor real de una variable en dicho sistema. La Propagación Causal lleva a cabo ciertas comprobaciones para asegurar la validez de los cambios inferidos en los eventos; esas comprobaciones las discutiremos en posteriormente en la sección 5.4. Si se encuentra un cambio inválido, la Propagación Causal fallará. Esencialmente, este fallo indica que este conjunto de transiciones hipotéticas no son válidas, dado que han conducido a un cambio no válido en los eventos. El efecto del fallo dependerá del lugar desde el que se invocó al Algoritmo Predictivo; ver sección 5.3.5 sobre la Ordenación de Transiciones y la sección 5.5 sobre la Ordenaciones de Prioridades. Además de fallar por completo, la Propagación Causal puede ser capaz de determinar no sólo que el cambio de evento es necesariamente inválido sino que debe estar precedido por otro cambio de evento (continuo) en la variable correspondiente. En este caso, la investigación de la transición hipotética actual se pospone hasta que las transiciones que se han encontrado anteriormente son consideradas. Las

condiciones bajo las cuales dichas transiciones anteriores se determinan por parte de la Propagación Causal las discutiremos en la sección 5.5.

5.3.3.- Integración Cualitativa

En los sistemas físicos dinámicos y continuos, la capacidad de almacenar energía se modela empleando una primitiva dinámica como el operador Integral. Se dice que estos modelos tienen memoria y que la acción de la primitiva dinámica representa la acumulación y disipación de energía, produciendo la respuesta dinámica del sistema. En dichos sistemas, la causalidad siempre se considera dirigida del Integrand a la Integral. En los diagramas de bloques de los sistemas dinámicos la noción de causalidad se indica explícitamente mediante la siguiente notación:



Esta consideración es la principal extensión que debe hacerse para constituir el algoritmo de ordenación causal [Iwasaki 1988b] a partir del algoritmo de ordenación causal que se aplicó originalmente a los modelos estáticos [Iwasaki 1986a]. La Integración Cualitativa y el Reconocimiento de Transiciones son responsables de modelar los efectos de las primitivas dinámicas en el dominio cualitativo.

La fase de Integración Cualitativa modela el efecto cualitativo de la derivada de una variable sobre ella misma. Al hacer esto considera los eventos persistentes tanto para la variable como para su derivada e intenta inferir un cambio de evento para la variable basado en el valor de su derivada. Consideremos un variable de sistema V y su derivada dV/dt . Deben satisfacerse dos condiciones preliminares para el paso de Inferencia básico de la Integración Cualitativa.

1. La derivada dV/dt debe aparecer como una variable de sistema en las ecuaciones del modelo; si no lo hace, sólo podemos encontrar los efectos dinámicos de V mediante el reconocimiento de transiciones anteriores, como podemos ver en la sección 5.5.
2. El valor persistente de la variable V debe ser un punto cualitativo en el espacio cualitativo, $p \in Q_v$; si es un intervalo o una ambigüedad, serán el Reconocimiento de Transiciones quien encuentre los efectos dinámicos sobre V (ver sección 5.3.4).

Una vez satisfechos estos dos criterios, el paso de inferencia condicional es el siguiente (mediante consulta del Espacio Cuantitativo):

Si el valor persistente de dV/dt es mayor (menor) que 0 y hay un intervalo $i \in Q_v$ inmediatamente mayor (menor) que $p \in Q_v$, entonces hay un nuevo evento período para V con el valor i .

Si $p \in Q_v$ no tienen un intervalo adyacente apropiado no puede inferirse ningún cambio de evento y el valor de V permanece en p . Si puede inferirse un cambio de evento, el momento de inicio del nuevo período de V se determina a partir de los intervalos de tiempo de los eventos persistentes de V y dV/dt tal y como sigue (mediante consulta del Espacio Cuantitativo):

- I. Si el evento persistente de V se dio en el momento $t_1 \in \Psi$, el nuevo período del evento para V existe en $(t_1, \tau_{persistente})$;

en caso contrario:

- II. Si el evento persistente de dV/dt se dio en el momento $t_2 \in \Psi$, el nuevo período del evento de V existe en $(t_2, \tau_{persistente})$, dado que por la continuidad de dV/dt debe permanecer mayor (menor) que 0 en el siguiente período.

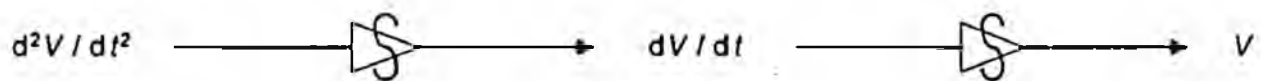
de otro modo:

- III. El nuevo período del evento de V existe en el mismo período que el evento persistente de dV/dt .

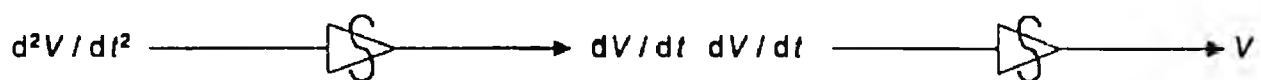
En cualquier caso el nuevo evento de V se considera que se produce en algún tiempo infinitesimal después del estado que ha conducido a que se produzca la inferencia. El período actual del nuevo evento depende de las circunstancias particulares de V y dV/dt . Es importante resaltar la naturaleza constructiva de las inferencias que se llevan a cabo; el integrando tiene un efecto causal sobre la Integral. En contraste, el algoritmo QSIM I Kulpers 1985a, Kulpers 1986a) considera todos los cambios posibles de V menos dV/dt ; el valor de dV/dt se usa más tarde como filtro para eliminar los cambios de V que serían imposibles. Si por alguna razón dV/dt no está fijado, QSIM no puede siempre eliminar los cambios imposibles de V , y esto es una de las causas del "ruido" en el comportamiento predicho (Kulpers 1987a). Volveremos sobre este hecho en el capítulo 7.

La fase de Integración Cualitativa considera todas las variables del sistema de una sola pasada. si se inflere un nuevo período del evento, el control pasa de nuevo a la Propagación Causal para investigar completamente el efecto instantáneo de los nuevos eventos. Sólo cuando la Integración Cualitativa no puede hacer más inferencias termina el ciclo principal pasando el control al Reconocimiento de Transiciones.

Tenemos una cierta capacidad de elección en el modo en que la Integración Cualitativa puede interpretar las derivadas de orden superior de las variables del sistema. Consideremos las variables V , dV/dt , y d^2V/dt^2 . La Integración Cualitativa puede hacer cualquiera de las siguientes inferencias en un solo paso:



o bien en varias fases:



En este segundo caso, se invoca a la Propagación Causal para que investigue el efecto de cualquier cambio de dV/dt antes de que la Integración Cualitativa infiera cualquier cambio de V . En el Algoritmo Predictivo seguimos este segundo esquema; el cambio de dV/dt precedería el cambio de V y éste se investiga por completo antes de que se produzca la segunda fase de la Integración. Sin embargo, de Kleer y Bobrow [de Kleer 1984a] obtienen V directamente de d^2V/dt^2 cuando dV/dt tiene el valor 0, sin pasar anteriormente por la Integración de dV/dt , lo que constituye una aplicación del primero de los esquemas anteriores. En el Algoritmo Predictivo, los dos esquemas pueden producir resultados diferentes.

5.3.4.- Reconocimiento de Transiciones

Al igual que la Integración Cualitativa, la fase de Reconocimiento de Transiciones modela el efecto cualitativo de la derivada de una variable dV/dt sobre la variable V . Sin embargo, en este caso, tenemos la condición preliminar de que el valor persistente de la variable V es un intervalo (o una ambigüedad) en el espacio cuantitativo, $i \in Q_v$. Satisfaciendo este criterio, el paso básico de Inferencia condicional es el siguiente (consultando al Espacio Cuantitativo):

Si el valor persistente de dV/dt es mayor (menor) que 0 y hay un punto cualitativo $p \in Q_v$ inmediatamente mayor (menor) que $i \in Q_v$, puede haber un nuevo momento evento de V con valor p

Si $i \in Q_v$ no tiene un punto adyacente apropiado no puede inferirse ningún cambio en el evento y el valor de V sigue siendo i .

Los resultados de este paso de la inferencia son hipotéticos; sólo podemos decir que la transición puede producirse. Informalmente, en la fase de Integración Cualitativa, el cambio debido a la Integración tendría lugar dentro de un tiempo infinitesimal y no podría ocurrir nada antes para prevenir el cambio. La fase de Reconocimiento de Transiciones es de interés para aquellos cambios debidos a la Integración que, por causa de la naturaleza de los valores cualitativos que empleamos, necesita un cierto tiempo infinito (asintótico) o finito no-infinitesimal para tener lugar. En este caso, es posible, que se produzca alguna otra cosa (otra transición) antes de que se infiera la transición, y esto puede impedir que se produzca en absoluto. Algunos investigadores han prestado particular atención al razonamiento asintótico [Nishida 1987a] mientras que

otros trabajos han considerado una disminución exponencial en su pureza teórica y no permiten transiciones que supondrían un tiempo infinito (de Kleer 1984a). En el Reconocimiento de Transiciones adoptamos una aproximación más pragmática. El modelo de ecuaciones diferenciales del sistema dinámico subyacente genera soluciones que son continuas en el tiempo e infinitamente diferenciables. Sin embargo, la continuidad de la recta real es un ideal teórico. En una disminución exponencial, estaríamos forzados en definitiva a considerar el valor en el nivel elemental y en el propio sistema la variable evolucionaría hasta su límite. Por esta razón, el Reconocimiento de Transiciones trata tanto a las transiciones de tiempo finitas como a las infinitas como transiciones temporales finitas.

La fase de reconocimiento de transiciones considera todas las variables del sistema de una sola pasada. Si no hay posibles nuevos eventos momentos, el sistema o bien ha alcanzado el equilibrio o tiene un comportamiento divergente, y el Algoritmo Predictivo termina. Si esta fase sugiere varios posibles eventos momentos nuevos que se producen después de un tiempo finito, debemos determinar qué subconjunto de estos se producirá realmente en primer lugar. El método empleado en el Algoritmo Predictivo para determinar el subconjunto de nuevos eventos momentos que cambiarán en primer lugar es el de generación y prueba; lo cual contemplaremos en la siguiente sección dedicada a la Ordenación de Transiciones.

El paso básico de Inferencia en el Reconocimiento de Transiciones sólo considera el signo de la derivada dV/dt ; no usamos información como la referente a la tasa relativa en que los Integrandos afectan a sus variables de la Integral. Ha habido muchas investigaciones en torno a la idea de utilizar información más detallada sobre el valor de la derivada dV/dt de modo que el conocimiento acerca del ritmo de cambio pueda emplearse para ordenar transiciones (Davis 1987a, Weld 1988b, Shen 1990a, Shen 1990a). La mayor parte de estos trabajos se han mantenido dentro del marco de la Integración no constructiva, donde el cálculo de los tiempos de "persistencia" y "llegada" se usa para analizar transiciones de valores cualitativos con el fin de eliminar comportamientos espúreos. Estos trabajos, sin embargo, no conducen fácilmente a un algoritmo de Integración constructivo.

5.3.5.- Ordenación de Transiciones

La fase de Ordenación de Transiciones debe determinar las transiciones a un nuevo eventos momentos que se producirán en primer lugar antes (si las hay) entre las que ha encontrado el Reconocimiento de Transiciones. El método que empleamos es generar un subconjunto posible de transiciones y probarlo invocando al Algoritmo Predictivo de forma recursiva. En la Figura 5.2 mostramos el diagrama de flujo de esta fase.

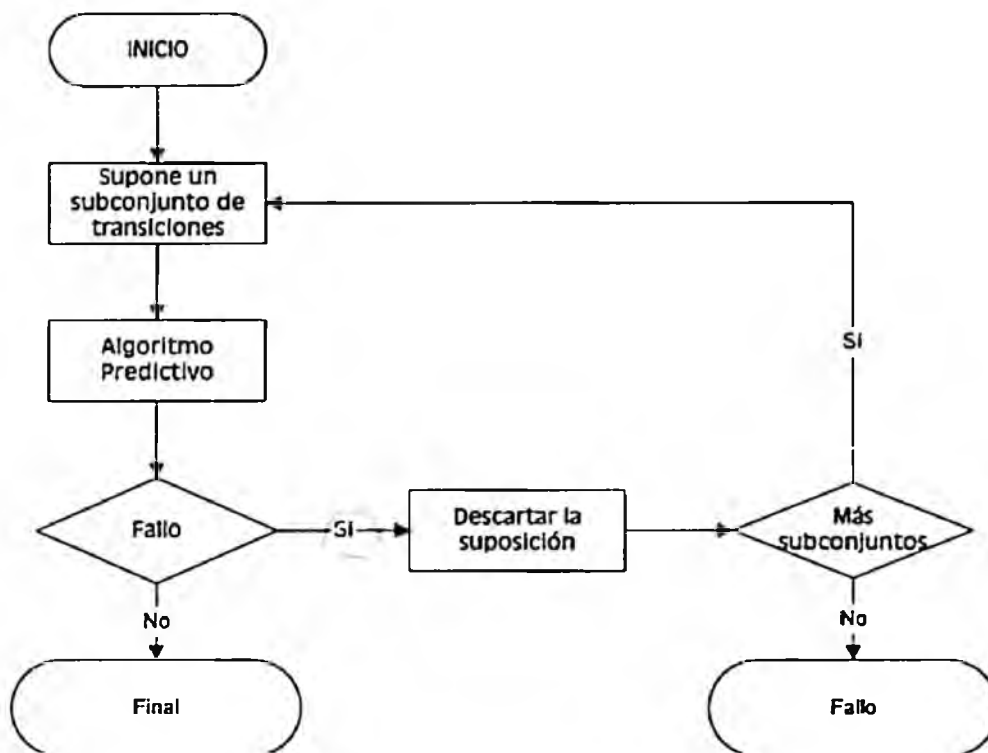


Figura 5-2 Diagrama de flujo de la Ordenación de transiciones

La verdadera prueba tiene lugar durante la fase de Propagación Causal; el chequeo de la validez puede terminar en fallo tal y como discutiremos en la sección 5.4. La forma recursiva en que empleamos el algoritmo genera un comportamiento cualitativo en forma de "primero en profundidad"; en contraste con esto, el algoritmo QSIM genera sucesivos estados mediante un mecanismo de "primero en anchura". La fase de Ordenación de Transiciones toma los posibles eventos momentos nuevos encontrados en el Reconocimiento de Transiciones y

produce el conjunto de estas transiciones. Cada miembro subconjunto se comprueba hasta encontrar un comportamiento válido.

La Ordenación de Transiciones aplica dos búsquedas heurísticas para determinar el orden en que se investigan las transiciones:

Compromiso mínimo

Cuando una variable experimenta una transición a un nuevo valor producirá generalmente que otras variables cambien instantáneamente con ella (lo cual investiga la Propagación Causal). Por lo tanto investigaremos el menor de los subconjuntos (menor cardinalidad) en primer lugar, implementando una política del menor compromiso.

Primero las derivadas de orden inferior de las variables de estado.

Las variables de salida y realimentación de un sistema son generalmente función de las variables de estado. Por lo tanto, la transición de una variable de estado producirá a menudo que las variables de salida y las derivadas de estado de orden superior cambien instantáneamente con ella (lo cual es averiguado en la Propagación Causal). Empleamos el principio de considerar las transiciones a las derivadas de estado de orden inferior en primer lugar. De Kleer y Bobrow consideran sólo las derivadas de variables de estado de orden inferior al investigar las transiciones.

La ordenación de las transiciones de acuerdo con las heurísticas anteriores se hace sólo por eficiencia, y no por completitud o corrección. Los resultados del Algoritmo Predictivo no están afectados por el orden en que se consideran las transiciones, pero se encontraría un comportamiento válido más rápidamente al emplearse la ordenación. Si se necesitan todos los comportamientos cualitativos posibles, la ordenación de los subconjuntos de transiciones no es tan importante puesto que hay que investigar todas ellas.

Un subconjunto de transiciones se investiga creando en el Espacio Temporal el momento en el que su produce la transición; esto será un único símbolo como $t_1, t_2, \dots \in \Psi$. Para cada variable del subconjunto transición, se crea un nuevo evento momento hipotético en el Mapa de Eventos. Se invoca al Algoritmo Predictivo de forma recursiva para "descargar" esta hipótesis, es decir para deducir un comportamiento cualitativo básico que siga a la transición. Si el

Algoritmo Predictivo falla, el subconjunto de transiciones hipótesis debe ser invalidada. En este caso, cada evento del Mapa de Eventos dependiente de (Inferido como resultado de) la transición hipótesis debe eliminarse. La Ordenación de Transiciones considera entonces el siguiente subconjunto de transiciones del conjunto ordenado de transiciones; si no hay más subconjuntos que examinar, la propia Ordenación de Transiciones fallará, devolviendo un fallo recursivo al Algoritmo Predictivo.

La operatoria de la Ordenación de Transiciones para asumir los subconjuntos de transiciones e intentar eliminar las suposiciones conducen a un requerimiento de manejo no-monotónico del Mapa de Eventos. Este requerimiento se cumple con la implementación de un Sistema de Mantenimiento de Verdad rudimentario (TMS) [Doyle 1979a] que utiliza algunas técnicas tomadas del desarrollo de los sistemas ATMS (Assumption-based Truth-Maintenance Systems) [de Kleer 1986b, de Kleer 1986c, de Kleer 1986d]. Una suposición de nuestro TMS es un símbolo único creado cuando se informa al Mapa de Eventos de algún tipo de ocurrencia. Los tipos de ocurrencia que llevan a la creación de suposiciones incluyen el proporcionar valores iniciales para la simulación, la alteración de los valores de las variables de entrada, y en el caso de la ordenación de Transiciones, hacer hipótesis sobre el subconjunto de transiciones. Cada evento en la Pila de Eventos tiene una "etiqueta" asociada que es simplemente un conjunto de símbolos supuestos. Esta etiqueta refleja las suposiciones de las que depende el evento, es decir, aquellas que han llevado a la creación del mismo. Se crea una etiqueta para cada nuevo evento formando el conjunto unión de las etiquetas de aquellos eventos que se utilizaron para inferir el nuevo evento. El proceso por el cual puede inferirse un nuevo evento está formado por la Propagación Causal, la Integración Cualitativa y el Reconocimiento de Transiciones. Consideremos de nuevo el ejemplo de la sección 5.2 donde ahora mostraremos las etiquetas asociadas a cada evento de la Pila de Eventos:

SUPERIOR	→	(b, +, (t ₁ , τ _{persistente}))	[a ₂ , a ₃]
		(b, 0, t ₁)	[a ₂]
		(a, 0, (τ _{pasado} , τ _{persistente}))	[a ₁ , a ₂]
		(b, 0, (τ _{pasado} , t ₁))	[a ₂]
		(c, 0, (τ _{pasado} , τ _{persistente}))	[a ₁]

Al igual que antes, supondremos que la ecuación del sistema $a = b - c$ y la Pila de Eventos anterior han llevado a la Propagación Causal a Inferir el evento $(a, +, (t_1, \tau_{\text{persistente}}))$. Este se pone en la parte superior de la Pila de Eventos con el siguiente resultado:

SUPERIOR	→	$(a, +, (t_1, \tau_{\text{persistente}}))$ $(b, +, (t_1, \tau_{\text{persistente}}))$ $(b, 0, t_1)$ $(a, 0, (\tau_{\text{pasado}}, \tau_{\text{persistente}}))$ $(b, 0, (\tau_{\text{pasado}}, t_1))$ $(c, 0, (\tau_{\text{pasado}}, \tau_{\text{persistente}}))$	$[a_1, a_2, a_3]$ $[a_2, a_3]$ $[a_2]$ $[a_1, a_2]$ $[a_2]$ $[a_1]$
----------	---	--	--

Siempre que se desestima una suposición durante la Ordenación de Transiciones, las etiquetas supuestas facilitan la búsqueda de los eventos que deben borrarse de la Pila de Eventos; la Pila de Eventos simplemente comprueba la correspondencia de la suposición inválida en la etiqueta asociada con cada evento y borra aquel donde la suposición está presente. Siempre que se borra un evento de la Pila de Eventos, el Mapa de Eventos debe asegurar que los eventos previos de la variable involucrada persisten todavía.

La naturaleza no constructiva de la generación y prueba de la ordenación de Transiciones es una fuente de ineficiencias. El requerimiento de investigar subconjuntos de posibles transiciones significa que esta fase es exponencial en el número de transiciones posibles. Por ejemplo, si el Reconocimiento de Transiciones devuelve cambios posibles en 4 variables, la Ordenación de Transiciones debería considerar $2^4 - 1 = 15$ subconjuntos de transiciones (no investigamos el conjunto vacío). La naturaleza recursiva de la ordenación de Transiciones compensa la ineficacia. Considerando sólo las derivadas de orden más bajo de las variables de estado, de Kleer y Bobrow reducían el factor exponencial como máximo al orden del sistema que se estaba simulando. Otro modo de aumentar la eficiencia de la ordenación de Transiciones es considerar métodos más constructivos. El análisis TQ emplea las Reglas de Ordenación de Transiciones que intentan determinar qué transformaciones se producirán en primer lugar de una forma constructiva, considerando la estructura de las ecuaciones del sistema. La independencia de las variables del sistema sugiere que tales métodos sólo serán capaces de determinar una ordenación parcial de las

transiciones posibles, y que el método no-constructivo y exponencial sería todavía necesario para considerar las derivadas de orden inferior de las variables de estado. Incluso así, esta aproximación evitaría aumentar la ineficacia con innecesarias llamadas recursivas. Existe una reserva mayor sobre utilizar técnicas constructivas similares y es que las Reglas de Ordenación de Transiciones sólo se han especificado hasta ahora con los espacios cualitativos más simples $\{-, 0, +\}$.

La extensión a espacios cuantitativos basados en intervalos más generales que los empleados requerirían un importante trabajo adicional en el Compilador para poder generar las reglas apropiadas de forma automática. Por esta razón, el Algoritmo Predictivo emplea solamente la Ordenación de Transiciones no constructiva.

5.4.- Comprobaciones de validez en la propagación causal

En esta sección describimos las comprobaciones de validez que se emplean en la fase de Propagación Causal para determinar si un cambio cualitativo inferido es consistente con el comportamiento de los valores reales de un sistema dinámico continuo. La respuesta de un sistema, considerado como función de tiempo, debería ser continuo e infinitamente diferenciable. Esta consideración es la base de las comprobaciones de validez que siguen. No exigimos que estas comprobaciones sean canónicas ni completas. De hecho, una extensión mayor de este trabajo sería el crear un conjunto de validaciones que garantizaran el control de comportamientos inválidos en al menos cierta clase de sistemas. Lo entendemos quizás mejor como parte de un intento de proporcionar una verificación formal del algoritmo de simulación, y presentaremos ejemplos de la aplicación de estas comprobaciones de validez en el capítulo 7.

1. El cambio inferido puede no afectar a la historia pasada de una variable. Esto significa que el intervalo de tiempo de un nuevo evento inferido no puede empezar antes del intervalo de tiempo del evento actual de una variable. El modo principal en que esto puede producirse es si hiciéramos la hipótesis de la transición de una variable de salida sin la correspondiente transición de las variables de estado del sistema. Dado que la salida es una función algebraica de las variables de estado, la Propagación Causal intentaría alterar la historia pasada de la variable de

salida que se supuso había cambiado. La comprobación de validez parece ser equivalente a la regla de Evitación de Contradicciones de de Kleer y Bobrow; pensamos que es más fácil de entender si la asociamos explícitamente a la noción temporal.

2. Una variable no puede permanecer en un punto cualitativo más de un período, a menos que mantenga ese valor idénticamente o el sistema haya alcanzado el equilibrio. Para que esto se produzca, debe haber una discontinuidad en una de las derivadas de orden superior de la variable, contradiciendo el hecho de que la variable sea infinitamente diferenciable. La prohibición de de Kleer y Bobrow de transiciones de tiempo infinitas representa el equivalente de esta regla de validación; un decrecimiento exponencial hacia su límite contradice la infinita diferenciable. Permitimos que una variable alcance un punto límite cualitativo en un período, pero sólo se vincula a un sistema que está alcanzando el equilibrio. En este caso, la extensión del momento de la transición final al siguiente período persistente se crea explícitamente al finalizar el Algoritmo Predictivo. Sostenemos que de Kleer y Bobrow pueden encontrar problemas innecesarios para tratar de evitar las transiciones asintóticas en primer lugar.
3. La dirección de los cambios de una variable inferidos no puede contradecir el signo de la derivada de la variable. La Propagación Causal puede inferir el cambio de una variable, cuya dirección no se corresponde con la dirección del cambio sugerido por el signo de la derivada de la variable. Esto puede producirse principalmente por el modo no-constructivo en que se desarrolla la Ordenación de Transiciones. En un método constructivo tal como el análisis TQ la dirección del cambio sugerido por la derivada se emplea directamente en el proceso de inferencia.
4. El cambio inferido no puede contradecir una transición asumida. Si dos transiciones del subconjunto asumido son mutuamente excluyentes, puede ocurrir que la Propagación Causal intente usar una para inferir una contradicción de la otra. Esto invalida el subconjunto de transiciones.

Las cuatro reglas de validación anteriores se llevan a cabo en la fase de Propagación Causal. Un fallo en una de ellas origina un fallo en la llamada al Algoritmo Predictivo, y en el caso de la Ordenación de Transiciones se investigaría un subconjunto alternativo de transiciones. La única excepción a estas reglas la constituye la aplicación de la Propagación Causal después de que el usuario haya cambiado los valores de las variables de entrada. Estas entradas exógenas pueden no ser consistentes con funciones de tiempo continuamente diferenciables. El Motor Predictivo examina las entradas del usuario y deduce automáticamente si el nuevo evento representa una discontinuidad en el comportamiento de la variable. Si es éste el caso, la suposición asociada con el evento de entrada se marca como discontinua. Cuando se emplea un evento discontinuo en el Propagación Causal, se dejan de lado las comprobaciones de la validez, dado que cualquier cambio de evento puede ser también discontinuo. La fase de Integración Cualitativa elimina la discontinuidad (dado que supone el paso del tiempo) quitando la suposición de discontinuidad, y se reintegran las comprobaciones de validez.

5.5.- Ordenación de Prioridades

El Algoritmo Predictivo falla en el caso de no haber satisfecho alguna de las comprobaciones de validez, además, la fase de Propagación Causal puede descubrir que un cambio de evento inferido debe ser precedido por un cambio de evento anterior para que se preserve la continuidad del comportamiento cualitativo del sistema. Dichas transiciones previas pueden tomar dos formas:

1. Si el valor persistente de una variable V es un punto $p \in Q_v$ y el cambio del evento inferido es mayor (menor) que el Intervalo adyacente $i \in Q_v$, entonces, debe haber un período anterior donde V cambia a i ;
2. Si el valor persistente de una variable V es un Intervalo (o ambigüedad) $i \in Q_v$ y el cambio de evento inferido es mayor (menor) que el punto adyacente apropiado $p \in Q_v$, debe haber un momento anterior donde V cambie a p .

En ambos casos, la continuidad demanda que el evento anterior preceda al subconjunto de transiciones supuesto que lleva al cambio de evento discontinuo inferido por la Propagación Causal. El Algoritmo Predictivo nos devuelve cualquier evento anterior encontrado por estas dos reglas. Si hubiera eventos períodos anteriores, estos deberían preceder a los eventos momentos previos; en este caso no se consideran los eventos momentos anteriores y se tienen en cuenta los eventos períodos previos conjuntamente como un conjunto de transiciones previas (dado que todos ellos deben cambiar dentro de un tiempo infinitesimal). Si no hay eventos períodos anteriores, se genera el conjunto de eventos momentos anteriores, y los subconjuntos de transiciones anteriores se investigan recursivamente invocando al Algoritmo Predictivo de forma similar a la operación de la Ordenación de Transiciones. El diagrama de flujo de esta fase de Ordenación de Prioridades se presenta en la Figura 5.3. Tanto la Ordenación de Transiciones como la Ordenación de Prioridades contemplan la suposición de un conjunto de transiciones, y la retirada de la suposición del Mapa de Eventos si el algoritmo falla. La diferencia entre las dos fases se debe a que la Ordenación de Transiciones inicia una investigación encontrada por el Reconocimiento de Transiciones (Integración), mientras que la Ordenación de Prioridades intenta sustituir una transición supuesta que ya está siendo investigada. Ambas fases emplean un algoritmo no constructivo y tiempo exponencial.

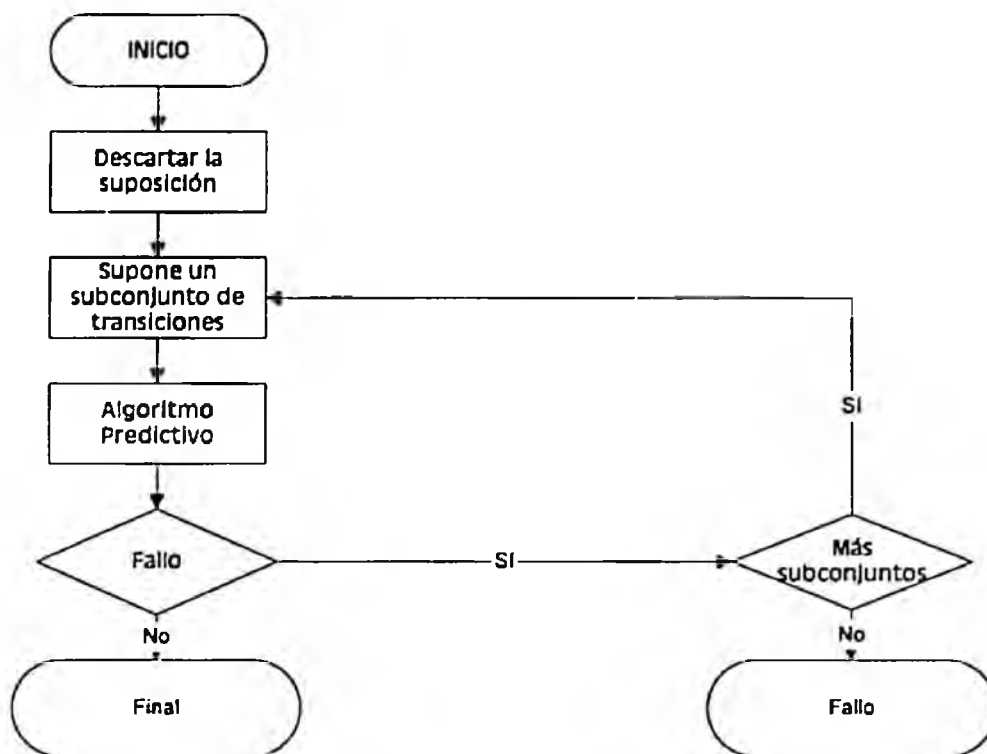


Figura 5-3 Diagrama de flujo de la Ordenación de Prioridades

La Ordenación de Prioridades es la fase donde pueden tener lugar las mayores ganancias en la adopción de modelos más constructivos. En particular, el análisis *TQ* contiene Reglas de Ordenación de Transiciones que encuentran muchas transiciones anteriores directamente de la consideración de las ecuaciones del sistema (damos un ejemplo ya de esto en el capítulo 2). Dichas reglas constructivas permiten una ordenación parcial de las transiciones a obtener antes de que sea necesario emplear técnicas no constructivas exponenciales; esto reduciría la complejidad del algoritmo substancialmente.

5.6.- Resumen

Hemos presentado el Algoritmo Predictivo y discutido las fases en que se puede dividir. El principal ciclo de la Propagación Causal y de la Integración Cualitativa emplea técnicas constructivas y es relativamente eficiente (tiempo lineal). Las fases de Ordenación de Transiciones y de Ordenación de Prioridades emplean técnicas no constructivas que suponen una complejidad temporal exponencial. Hay un carga substancial de complejidad debida a la naturaleza recursiva de estas dos fases.

Hemos revisado algunas técnicas de ordenación constructivas (también en el capítulo 2), y hemos apuntado algunas razones para el uso de métodos de ordenación no constructivos. Las técnicas constructivas sólo se han aplicado con álgebras simples de signo, y no parece que manejen sistemas reallimentados con naturalidad. Sin embargo, la Investigación de la posibilidad de empleo de ordenaciones constructivas en futuros trabajos debe ser un objetivo de primer orden, particularmente en la fase de Ordenación de Prioridades.

Otra área donde pueden resultar provechosos nuevos desarrollos es la conservación en alguna forma de la transición original supuesta que se sustituye durante la Ordenación de Prioridades. La transición sustituida simplemente se elimina y la llamada recursiva al Algoritmo Predictivo debe reinvestigarla mediante el mecanismo de ordenación exponencial. Esto puede resultar innecesariamente Ineficiente, puesto que el conjuntos de transiciones sustituidas conducen a la Inferencia de la transición anterior; puede ser prudente retomar su Investigación, si todavía es válida, en lugar de Invocar de nuevo y a ciegas al Algoritmo Predictivo.

6.- ESPECIFICACION DE LOS MODELOS CUALITATIVOS

6.1.- Introducción

En este capítulo trataremos acerca del modo en que podemos modelar y simular los sistemas continuos dinámicos haciendo uso las facilidades del Motor Predictivo. Emplearemos dos sistemas físicos a pequeña escala como ejemplos para ilustrar las ideas que vamos a presentar que describiremos en la sección 6.3. Posteriormente, presentaremos otros ejemplos de mayor envergadura en el capítulo 7 con el fin de demostrar el funcionamiento del Motor Predictivo.

En las secciones 6.3 y 6.4 de este capítulo discutiremos el modo en que podemos desarrollar y especificar los modelos cualitativos para el Motor Predictivo. En la sección 6.3 discutiremos el modo en que deben presentarse las ecuaciones del modelo de forma estructurada para que la Propagación Causal pueda manejarlas. En la sección 6.4 describimos cómo especificar modelos cualitativos en el fichero del modelo; debemos emplear el Compilador para procesar este fichero antes de que pueda operar sobre él el Algoritmo Predictivo. Las construcciones proporcionadas para la especificación de los modelos cualitativos permiten un mayor grado de flexibilidad para soportar experimentación con el proceso a modelar.

Tendremos en consideración el uso explícito de derivadas de orden elevado de variables del sistema en el modelo en la sección 6.5 donde discutiremos el uso de planos diferenciales de orden elevado. En la sección 6.6 describiremos las características de las funciones de entrada que están permitidas. En los ejemplos de la sección 7.2.1 del capítulo 7 mostraremos que los planos diferenciales de orden elevado pueden usarse para tratar la ambigüedad cualitativa de ciertos tipos de funciones de entrada y para reducir el factor exponencial de la complejidad de la Ordenación de Transiciones. La sección 7.2.2 del capítulo 7 mostrará cómo el uso de planos diferenciales para modelar la estructura de orden superior de un sistema puede revelar importantes efectos en el comportamiento cualitativo que se está simulando.

6.2.- Ejemplos de Sistemas Físicos

Vamos a presentar dos sistemas hidráulicos simples que utilizaremos como ejemplos para ilustrar las ideas principales relativas a la modelización de un sistema a lo largo de este capítulo. De estos dos sistemas extraeremos tres modelos cuantitativos basados en ecuaciones diferenciales que utilizaremos posteriormente en las secciones siguientes, donde discutiremos la derivación de los modelos cualitativos apropiados de estos ejemplos

6.2.1.- Tanque simple con flujo laminar

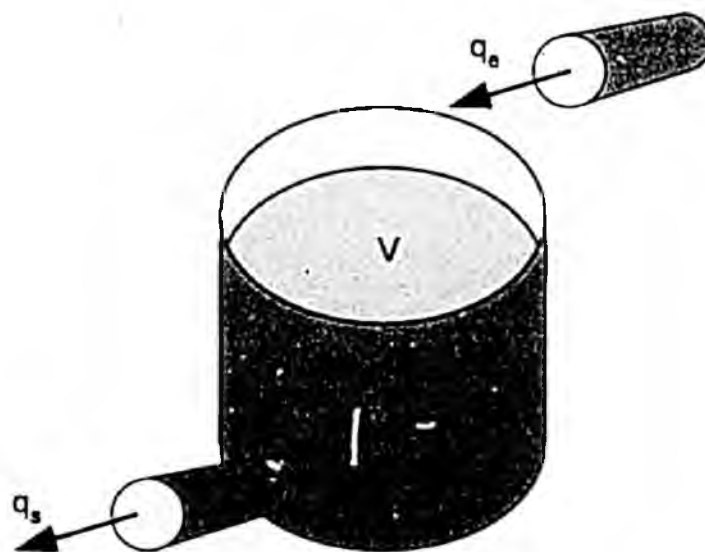


Figura 6-1 Tanque simple

El sistema se compone de un tanque hidráulico con un flujo de entrada simple q_e y un flujo de salida q_s ; como ilustramos en la Figura 6.1. La ecuación principal relaciona el flujo neto a través del tanque con el cambio del volumen V del fluido contenido en el tanque:

$$q_e - q_s = \left(\frac{dV}{dt} \right) \quad (1)$$

Supondremos que hay un flujo laminar a través de la apertura de salida. Esto se modela mediante una relación lineal entre la altura del fluido en el tanque V/A y el flujo de salida q_s :

$$q_s = \left(\frac{\rho g}{R} \right) \left(\frac{V}{A} \right) \quad (2)$$

donde A es el área de la sección transversal del tanque, ρ es la densidad del fluido en el tanque, g es la aceleración de la gravedad y R es la resistencia laminar del fluido en la apertura de salida.

6.2.2.- Tanque simple con flujo turbulento

Emplearemos el mismo sistema de tanque simple anterior, pero esta vez, supondremos que hay un flujo turbulento a través de la apertura de salida. En este caso tendremos también la ecuación:

$$q_e - q_s = \left(\frac{dV}{dt} \right) \quad (1)$$

pero hay una relación no lineal entre la altura del fluido dentro del tanque y el flujo de salida:

$$q_s = C_d a \sqrt{2g \left(\frac{V}{A} \right)} \quad (3)$$

donde C_d es el coeficiente de flujo en la apertura de salida, y a es el área de la sección de la apertura de salida.

6.2.3.- Dos tanques acoplados con flujos laminares

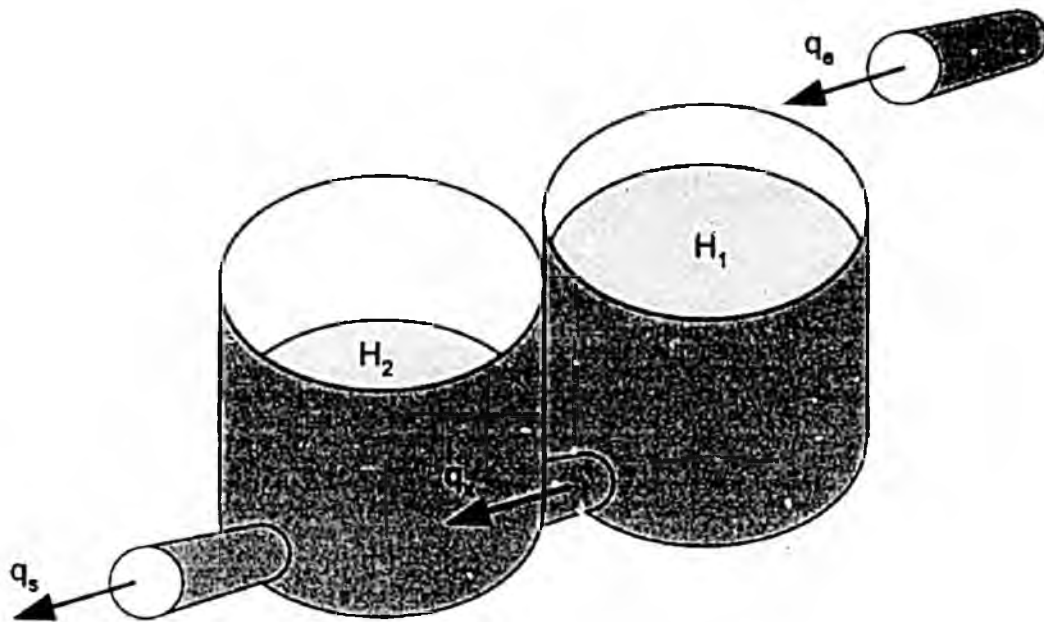


Figura 6-2 Tanques acoplados

El sistema se compone de dos tanques hidráulicos acoplados mediante una abertura con un flujo a través de ella q_x , con un solo flujo de entrada al primer tanque q_e y un flujo de salida del segundo tanque q_s , tal y como mostramos en la Figura 6.2. Las ecuaciones de los dos dispositivos relacionan el flujo a través de los tanques con la variación del volumen de fluido contenido en ellos:

$$q_e - q_x = A_1 \left(\frac{dH_1}{dt} \right) \quad (4)$$

$$q_x - q_s = A_2 \left(\frac{dH_2}{dt} \right) \quad (5)$$

donde A_1 y A_2 son las áreas respectivas de las secciones transversales de los tanques y H_1 y H_2 son las alturas del fluido en los tanques respectivamente. Suponiendo que el flujo sea laminar en todas las aberturas:

$$q_x = \left(\frac{\rho g}{R_x} \right) (H_1 - H_2) \quad (6)$$

$$q_s = \left(\frac{\rho g}{R_s} \right) H_2 \quad (7)$$

donde R_x y R_s son las resistencias laminares del fluido en las aberturas de acoplamiento y de salida respectivamente.

6.3.- Estructura de las ecuaciones del modelo

El primer paso para desarrollar un modelo cualitativo apropiado para un sistema es ordenar las ecuaciones del sistema de una forma estructurada para que pueda operar la Propagación Causal. Esta tarea resulta familiar para aquellos que se dedican a implementar simulaciones numéricas, donde también se deben estructurar las ecuaciones algebraicas de este modo. Aunque la estructuración se lleva a cabo manualmente, existe la posibilidad de automatizarlos mediante la aplicación del algoritmo de ordenación causal, tal y como se reporta en (Iwasaki 1988b). Este algoritmo requiere que las variables (y parámetros) que se determinan desde fuera del modelo (variables exógenas) se declaren de antemano. Además, pueden identificarse aquellas variables que están directamente afectadas por la acción de la Integración; las salidas de los Integradores son generalmente variables de estado Independientes del sistema. Estos dos grupos de variables juntos son consideradas como un conjunto inicial de causas primarias en las ecuaciones algebraicas del modelo. El algoritmo Identifica un segundo conjunto de variables mediante la Inspección de las ecuaciones, como aquellas que pueden ser determinadas a partir de los valores de las variables del conjunto Inicial. Se construye de este modo una secuencia de estos subconjuntos completos mínimos hasta que existe una ordenación causal parcial entre las variables de las ecuaciones del sistema, donde una variable que está en la parte inferior de la secuencia se dice que causa una variable en el conjunto superior si ambas variables aparecen juntas en una ecuación. Ilustraremos este proceso con las ecuaciones (1) y (2) de la sección 6.2.1:

$$q_e - q_s = \left(\frac{dV}{dt} \right) \quad (1)$$

$$q_s = \left(\frac{\rho g}{R} \right) \left(\frac{V}{A} \right) \quad (2)$$

el flujo de entrada q_e , y los parámetros ρ , g , R y A se consideran exógenos. El volumen V es el resultado de Integrar $\frac{dV}{dt}$. Esto nos proporciona el conjunto Inicial:

$$S_0 = \{ q_e, \rho, g, R, A, V \}$$

El algoritmo determina que el valor de q_s puede calcularse a partir de S_0 y (2), dando el segundo conjunto:

$$S_1 = \{ q_s \}$$

Finalmente, el valor de $\frac{dV}{dt}$ puede determinarse de $S_0 \cup S_1$ y (1), dando como resultado un tercer conjunto:

$$S_2 = \left\{ \frac{dV}{dt} \right\}$$

En la Figura 6-3 proporcionamos una interpretación de la ordenación causal parcial que resulta. Debemos tener en cuenta que la figura muestra la ordenación sólo mediante ecuaciones algebraicas. Una variable integral como V se considera causada por su derivada $\frac{dV}{dt}$, pero esto ya lo asumimos a priori.

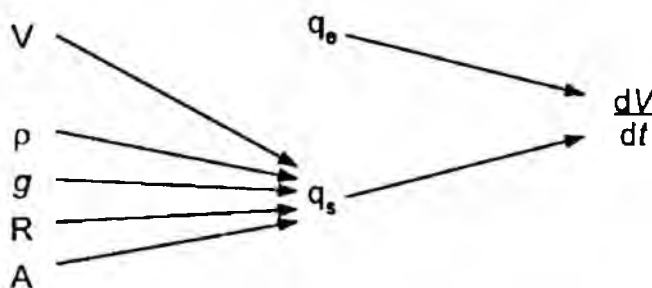


Figura 6-3 Ordenación Causal Dinámica en el Tanque simple con flujo laminar

Si estuviéramos utilizando un modelo estático, reemplazando $\frac{dV}{dt}$ por 0 en la ecuación (1), el algoritmo de Ordenación Causal habría proporcionado la ordenación intuitiva que mostramos en la Figura 6-4. El debate sobre el carácter intuitivo de las ordenaciones causales de los modelos estáticos ha sido objeto de una prolífica literatura [Iwasaki 1986a, de Kleer 1986a, Iwasaki 1986b]. En los modelos estáticos, el concepto de dispositivo se ha perdido, y no debería sorprendernos demasiado que el concepto de causalidad no parezca intuitivo cuando lo consideramos exclusivamente a través de las ecuaciones algebraicas. Se han desarrollado algunas investigaciones para percibir el concepto de un dispositivo en los modelos estáticos [de Kleer 1983a, de Kleer 19984b] y esto ha llevado a una gran confusión.

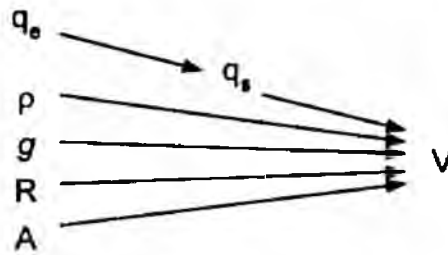


Figura 6-4 Ordenación Causal Estática en un Tanque simple con flujo laminar

Habiendo obtenido una ordenación causal dinámica, cada ecuación debería organizarse de forma que cada variable individual de la parte derecha fuera causada por la variable o variables de una expresión algebraica situada en la parte izquierda. Por ejemplo, podríamos expresar la ecuación (1) de la forma siguiente:

$$\frac{dV}{dt} = q_e - q_s \quad (1.a)$$

La ecuación (2) ya está en una forma correcta. Finalmente, las ecuaciones deberían organizarse en una secuencia e_1, e_2, \dots, e_n de modo que para cualquier ecuación e_i , las variables de la parte izquierda de la ecuación e_i no aparecen en la parte derecha de ninguna de las ecuaciones e_j , donde $1 \leq j < i$. Por ejemplo, podríamos estructurar las ecuaciones (1.a) y (2) de la forma siguiente:

$$q_s = \left(\frac{\rho g}{R} \right) \left(\frac{V}{A} \right) \quad (8)$$

$$\frac{dV}{dt} = q_e - q_s \quad (9)$$

Si aplicamos el método anterior a la estructuración causal a las ecuaciones (1) y (3) con las variables exógenas q_e, C_d, a, g, A y la variable integral V , obtenemos:

$$q_s = C_d a \sqrt{2g \left(\frac{V}{A} \right)} \quad (10)$$

$$\frac{dV}{dt} = q_e - q_s \quad (11)$$

De la misma forma, si aplicamos el algoritmo de Ordenación Causal Dinámico a las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) con las variables exógenas q_0 , A_1 , A_2 , ρ , g , R_x y R_s y las variables integrales H_1 , y H_2 , obtenemos la siguiente secuencia de subconjuntos completos mínimos:

$$S_0 = \{ q_0, A_1, A_2, \rho, g, R_x, R_s, H_1, H_2 \}$$

$$S_1 = \{ q_x, q_s \}$$

$$S_2 = \left\{ \frac{dH_1}{dt}, \frac{dH_2}{dt} \right\}$$

La Figura 6-5 representa la Ordenación Causal parcial que resulta en este caso particular.

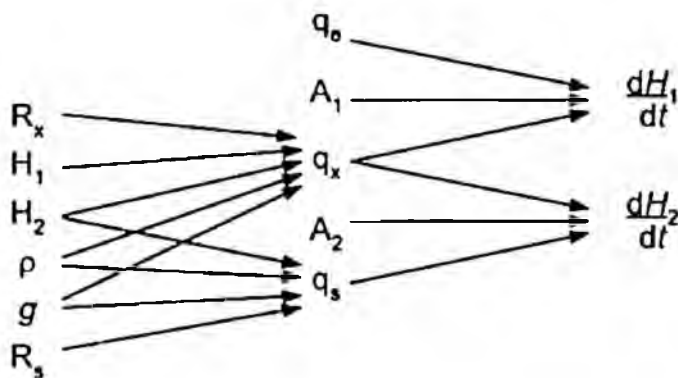


Figura 6-5 Ordenación Causal en los Tanques acoplados con Flujo laminar

Estructurando las ecuaciones de acuerdo con esta ordenación podemos hacer alguna elección. Con el uso de la siguiente secuencia (las otras posibilidades dan resultados equivalentes en la propagación Causal):

$$q_x = \left(\frac{\rho g}{R_x} \right) (H_1 - H_2) \quad (12)$$

$$q_s = \left(\frac{\rho g}{R_s} \right) H_2 \quad (13)$$

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{q_0 - q_x}{A_1} \quad (14)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{q_x - q_s}{A_2} \quad (15)$$

La Implementación Intuitiva del algoritmo de ordenación causal dinámica anterior es de complejidad exponencial. En [Porté 1988a] podemos encontrar el desarrollo de una implementación más eficiente de tiempo polinomial. Este algoritmo más eficiente representa el concepto de una variable apareciendo en una ecuación como un arco en un grafo dirigido. Las técnicas de flujo de red (por ejemplo el algoritmo de Dinic) [Even 1979a] se emplean para computar una secuencia de concordancias perfectas, a partir de las cuales puede derivarse una ordenación causal [Gondran 1984a].

No hemos investigado en profundidad un algoritmo de ordenación causal que produzca un resultado para cualquier sistema particular, y existe la posibilidad de que haya sistemas que no se ajusten a esta forma de procesamiento, lo cual se ha comprobado en varias ocasiones. Hemos observado que los requerimientos de la fase de Propagación Causal son algo más débiles que los requerimientos para producir una Ordenación Causal Dinámica. Es posible arreglar las ecuaciones en una forma más apropiada si la Ordenación Causal no puede ser aplicada al sistema.

6.4.- Especificación de los Modelos Cualitativos

En esta sección describimos el modo en que debe especificarse un modelo cualitativo en el fichero de modelos. Incluiremos la información necesaria en un fichero de texto con una notación adecuada. Compliaremos a continuación este fichero de modelos, creando cuatro ficheros objetos, que se cargarán en los módulos respectivos del Motor Predictivo antes de llevar a cabo la simulación. Ya hemos explicado en el capítulo 4 la funcionalidad del compilador.

No existe un modelo cualitativo definitivo para un sistema dinámico. En los ejemplos de este capítulo estaremos considerando la abstracción de los modelos de ecuaciones diferenciales para proporcionarnos la información cualitativa que nosotros requerimos. Sin embargo, un área que suscita gran interés en el uso de simulación cualitativa son aquellos sistemas donde no existe un modelo cuantitativo, bien porque hay incertidumbre en las relaciones funcionales entre variables o debido a la complejidad de las relaciones. Un objetivo de la simulación cualitativa es poder proporcionar información sobre la respuesta de un sistema de forma apropiada al nivel de detalle en el que el sistema puede ser descrito de forma realista.

La información que puede especificarse en un fichero de modelos está compuesta por tres secciones, siendo irrelevante el orden en el que las secciones aparecen en el fichero. El usuario tiene un grado de libertad importante para especificar el contenido del modelo cualitativo utilizado para soportar la experimentación. En los apartados siguientes de este capítulo nos concentraremos principalmente en los requerimientos sintácticos del fichero de modelos.

6.4.1.- Espacios Cuantitativos

Cualquier variable del modelo puede tener especificado un espacio cuantitativo general basado en intervalos. Esto identifica un conjunto de puntos cualitativos (valores marca) y los intervalos abiertos entre ellos, constituyendo los valores cualitativos que la variable puede tomar. La cobertura de estos valores sobre la recta real debe formar un conjunto convexo, y los valores deben ser contiguos. En la especificación, debemos proporcionar los valores comprendidos en el espacio cuantitativo en orden creciente.

Un punto cualitativo dentro de un espacio cuantitativo puede ser un valor simbólico o real, o la negación de uno de estos. Sintácticamente, un símbolo debe comenzar con una letra (bien mayúscula o minúscula). Un intervalo cualitativo se especifica mediante una tupla formada por los puntos finales del mismo. Además "&" (o "+&") y "-&" se emplean para representar ∞ y $-\infty$ respectivamente, y pueden emplearse para especificar intervalos abiertos. Por ejemplo, supongamos que estamos interesados en los instantes en que el tanque simple con flujo laminar del ejemplo de la sección 6.2.1 está lleno y vacío, y también en algún punto cualitativo intermedio. Podemos especificar el siguiente espacio cuantitativo para el volumen V en el fichero de modelos:

```
espacio_cuantitativo ( 'V', [ vacio, ( vacio, 'V1' ), 'V1', ( 'V1', lleno ), lleno ] ).
```

A modo de ejemplo, si estuviéramos interesados simplemente en el signo de dV/dt , especificaríamos:

```
espacio_cuantitativo ( d( 'V' ), [ ( (&, 0 ), 0, ( 0, & ) ] )
```

Debemos incidir en que empleamos la sintaxis $d()$ para expresar la derivada de una variable del sistema. Podemos emplear la abreviación "-" en lugar de $(-\&, 0)$ y "+" en lugar de $(0, \&)$. Si no especificamos el espacio cuantitativo para una variable, se sobreentiende el espacio $[-, 0, +]$ de forma automática.

6.4.2.- Restricciones

Podemos utilizar las restricciones para proporcionar información sobre los valores reales de los puntos simbólicos cualitativos empleados en la sección de espacios cuantitativos del fichero del modelo. Esta información se tiene en cuenta cuando el Compilador computa las álgebras para el módulo Espacio Cuantitativo. La sección de restricciones comprende una lista de igualdades y desigualdades entre las expresiones algebraicas y funcionales incluyendo los puntos simbólicos cualitativos y los valores reales. En la tabla siguiente mostramos los operadores funcionales que pueden emplearse en estas expresiones.

Funciones	Representación
$-a$	$-(a)$
$a + b$	$a + b$
$a - b$	$a - b$
$a \times b$	$a * b$
a / b	a / b
\sqrt{a}	$sqrt(a)$
e^a	$exp(a)$
$\ln a$	$log(a)$

Si en el ejemplo anterior quisiéramos restringir el punto en que el tanque está vacío al valor 0, y el punto de llenado del tanque a la medida de la altura máxima de 65.2 y la medida del área de la sección transversal del depósito entre los valores de 10.3 y 10.65, introduciríamos las siguientes restricciones:

restricciones ([
vacio=0,
 $65.2 * 10.3 < \textit{lleno}$, $\textit{lleno} < 65.2 * 10.65$]).

Los efectos de estas restricciones sobre otros puntos del espacio cuantitativo, es decir " V_1 " se calculan automáticamente (en el módulo Retícula Cuantitativa). En ciertas circunstancias, la Información de las restricciones permitirá la resolución de las ambigüedades cualitativas del álgebra. El uso de la información cuantitativa en la simulación cualitativa es un área de Investigación actualmente muy activa. El sistema Q3 (anteriormente Q2) [Berleant 1990a, Kuipers 1988a] hace uso de una aproximación similar a nuestro uso en el módulo Retícula Cuantitativa. El sistema BOUNDER [Sacks 19987a] está diseñado para manejar expresiones funcionales más complejas que la Retícula Cuantitativa, pero no es quizás tan eficiente para nuestras necesidades específicas. El álgebra MINIMA descrita en [Williams 1988a] considera tanto el signo de la variable { -, 0, + } como el valor real de la variable, usando lo que sea más apropiado en cada etapa concreta. Un área de futura Investigación sería delimitar la aplicabilidad del método empleado en la Retícula Cuantitativa a la sección de restricciones del fichero de modelos.

6.4.3.- Ecuaciones del Sistema

Las ecuaciones del modelo se especifican en forma de planos diferenciales. Cada plano representa la estructura del sistema considerada en un orden diferencial diferente, y esto nos permite simular el comportamiento cualitativo del sistema de orden más elevado. Discutiremos más adelante el desarrollo y la utilización de planos diferenciales de orden superior, en las secciones 6.5 y 6.6 de este capítulo. En esta sección, consideraremos tan solo el desarrollo del modelo cualitativo básico del sistema que se especifica en el plano 0.

Funciones	Representación
$-a$	$-(a)$
$a + b$	$a + b$
$a - b$	$a - b$
$a \times b$	$a * b$
a / b	a / b
\sqrt{a}	$sqrt(a)$
ea	$exp(a)$
$\ln a$	$log(a)$
M_a^+	$minc(a)$
M_a^-	$mdec(a)$

En la tabla anterior hemos presentado las funciones que pueden emplearse en las expresiones de la parte derecha de las ecuaciones del sistema estructuradas causalmente. La representación que utilizamos, $minc(\cdot)$ significa "monótonamente creciente con respecto a", mientras que $mdec(\cdot)$ significa "monótonamente decreciente con respecto a". Estas primitivas son las relaciones cualitativas débiles que se introducen en [Kulpers 1986a].

Las primitivas anteriores nos resultan particularmente útiles cuando desarrollamos los modelos cualitativos con relaciones funcionales imprecisas entre las variables del sistema. Las primitivas de modelado débiles pueden escribirse en formato binario " $minc(\dots)$ " y " $mdec(\dots)$ " donde el primer argumento es un identificador proporcionado por el usuario que indica que dos

o más primitivas con el mismo Identificador representan la misma relación funcional entre variables (aunque esa relación no se conozca de forma precisa).

Hay dos restricciones que vienen Impuestas por el uso de las primitivas algebraicas de modelado anteriores. La primera es que los argumentos que tienen deben ser variables del sistema. Esto supone que los parámetros constantes deben ser representados como variables con espacios cuantitativos antes de que puedan utilizarse en las ecuaciones del sistema. Por ejemplo, la constante real 2 podría representarse así:

espacio_cuantitativo (n2, [2]).

y hacer referencia a él por medio de la variable "n2" en los planos diferenciales. De forma similar, el parámetro constante exógeno g , podría representarse como :

espacio_cuantitativo (g, [g1]).

restricciones ([9.8 < g1, g1 < 9.81]).

Empleamos la sección de restricciones para representar la Incertidumbre acerca del valor real de g . Si hubiéramos deseado permitir que g variara dentro de un cierto rango real, podríamos haber especificado:

espacio_cuantitativo (g, [(9.8, 9.81)]).

que no es equivalente semánticamente a la primera forma.

Ya hemos hecho referencia a la segunda restricción en la sección 5.3.2 del capítulo 5, y está relacionada con el hecho de que sólo podemos permitir, como mucho, operadores binarios en las primitivas algebraicas de modelado. Esto significa que debemos especificar la asociatividad y distributividad de expresiones más complejas por medio de la inclusión de variables ficticias. Ya hemos mostrado que nuestra álgebra basada en intervalos no es generalmente ni asociativa ni distributiva [Struss 1990a]. Si se especifican múltiples formas de una expresión compleja, la fase de Propagación Causal tiene la posibilidad de determinar el valor más específico (menos ambiguo) para la variable de la parte izquierda. De acuerdo con lo anterior, es quizás mejor que futuras versiones del Motor Predictivo conserven esta restricción en particular.

Un plano en el fichero modelo es una secuencia estructurada de ecuaciones algebraicas que emplean las representaciones de funciones de la tabla anterior en la parte derecha de las expresiones. A modo de ejemplo, introduzcamos las variables ficticias "rhog", "rhogR" y "VA" para representar las ecuaciones del modelo (8) y (9) en el plano 0:

```
plano ( 0, [
    rhog = rho * g,
    rhogR = rhog / 'R',
    'VA' = 'V' / 'A',
    qs = rhoR * 'VA',
    d ( 'V' ) = qe - qo ] ).
```

Cada ecuación del plano puede tener asociada una lista de valores correspondientes (Kuipers 1986a). Cada tupla de valores correspondientes en la lista describe una instancia válida de la ecuación con puntos cualitativos de los espacios cuantitativos de las variables relacionadas. Esta instancia identifica un punto pivote en el espacio cuantitativo de la variable de la parte izquierda, permitiendo generar un álgebra para la ecuación. Supongamos que en el ejemplo anterior hemos especificado:

```
espacio_cuantitativo ( 'V', [ vacio, ( vacio, 'V1' ), 'V1', ( 'V1', lleno ), lleno ] ).
espacio_cuantitativo ( 'VA', [ 'VA1', ( 'VA1', 'VA2' ), 'VA2', ( 'VA2', 'VA3' ), 'VA3' ] ).
espacio_cuantitativo ( 'A', [ 'A1' ] ).
restricciones ( [
    10.3 < 'A1', 'A1' < 10.65,
    vacio = 0,
    65.2 * 10.3 < lleno, lleno < 65.2 * 10.65 ] ).
```

podemos relacionar entonces los espacios cuantitativos de "V" y "VA" empleando un lista de valores correspondientes asociados con la ecuación adecuada:

```
( 'VA' = 'V' / 'A', [ ( 'VA1', vacio, 'A1' ), ( 'VA2', 'V1', 'A1' ), ( 'VA3', lleno, 'A1' ) ] ).
```

Es muy común asociar los valores correspondientes de "(0, 0)" con las primitivas "minc(.)" y "mdec(.)", exigiendo que las relaciones funcionales subyacentes pasen a través del origen. El sistema QSIM proporciona una notación simplificada específicamente para esto, pero no nuestro modelo.

Una ecuación en un plano puede ser condicional especificando una lista de comprobaciones con pruebas que deben ser satisfechas antes de interpretar la ecuación durante la Propagación Causal. Cada una de las pruebas de comprobación es una igualdad o desigualdad que involucra variables del sistema, valores reales y/o puntos cualitativos. Cuando una variable en la comprobación, la prueba estará referida a cual es el valor persistente de dicha variable cuando se efectúa la comprobación durante la operación del algoritmo. Podemos utilizar las comprobaciones, por ejemplo, para evitar las divisiones entre 0:

$$['R' > 0] (: rhogR = rhog / 'R' ;$$

Otro uso de las comprobaciones podría ser la modificación de la estructura del sistema condicionada al valor de alguna variable; esto podría emplearse para implementar relaciones funcionales parciales entre variables del sistema. Debemos advertir que en el Motor Predictivo, la suposición de una discontinuidad no está asociada con el cambio de estado de la comprobación, de modo que el comportamiento resultante puede ser consistente aún en un sistema dinámico continuo. La implementación total de las comprobaciones requerirá algún trabajo posterior sobre el modelo actual del Motor Predictivo.

Las semánticas actuales del modelo cualitativo están restringidas por los requerimientos sintácticos expuestos en esta sección. Por ello, nos referiremos a las distintas semánticas que se han asociado con esquemas de valores cualitativos aparentemente similares en anteriores trabajos de investigación. Por ejemplo, el trabajo relacionado con la propagación de los valores cualitativos en modelos estáticos tiene nociones asociadas de "decrecimiento", "permanecer igual" e "incremento" con los valores de los signos de { -, 0, + } respectivamente (Gallant 1986a, Gallant 1989a). Podría darse el caso de que la respuesta del sistema fuera tan lenta que pudiera considerarse siempre que el sistema estaba en un equilibrio estático. Alternativamente, las semánticas de valores pueden significar que se ha aplicado algún cambio (discontinuidad) a las variables exógenas del sistema, y la Propagación Causal determina el efecto cualitativo resultante sobre otras variables suponiendo que el sistema vuelve al estado de equilibrio de modo que

el modelo estático sea válido de nuevo. Otras Investigaciones se han centrado en los enfoques de las nociones de "decrecimiento", "mantenimiento" e "incremento" con los valores de los signos de $\{-, 0, +\}$ respectivamente; el uso principal de este tipo de semántica son los modelos basados en la confluencia (de Kleer 1984b). En ellos se muestra la dirección de alguna perturbación que se está produciendo en una variable y la Propagación Causal determina como resultado las direcciones en las que dichas variables evolucionan. Esta noción de valor cualitativo se refiere realmente al signo de la primera derivada de una variable, como si la simulación se desarrollase realmente sobre el plano diferencial de primer orden del sistema; discutiremos esto posteriormente en la sección 6.5. Por esta razón, las confluencias se han denominado "ecuaciones diferenciales cualitativas", pero todo ello resulta muy confuso puesto que los modelos basados en confluencias se derivan realmente de ecuaciones de sistemas estáticos. Es la semántica del valor cualitativo la que lleva la noción de comportamiento dinámico en la aproximación basada en confluencias, y no la aplicación de una primitiva de modelado dinámica.

El usuario del Motor Predictivo tiene mucha libertad al especificar las ecuaciones del sistema, tanto como sea posible observando los requerimientos de estructuración causal. Por esta razón, debe tenerse cuidado de evitar mezclar las semánticas de los valores cualitativos. Los ficheros de modelo pueden especificarse para investigar cambios en los modelos estáticos, para las aproximaciones basadas en confluencias, o para el uso directo de las ecuaciones de sistemas cualitativos, donde $\{-, 0, +\}$ significa justamente eso. No es deseable sin embargo confundir diferentes semánticas en el mismo fichero del modelo.

Hay también ciertas decisiones a tomar en las primitivas algebraicas de modelado. Si conocemos las relaciones funcionales entre las variables del sistema podemos emplear "*sqrt*(.)", "*exp*(.)" y "*log*(.)". Sin embargo, si desconocemos la forma precisa de las relaciones, o si no tenemos información cuantitativa y sólo estamos interesados en la relación cualitativa que puede expresarse mediante los valores correspondientes, podemos preferir la utilización de primitivas débiles "*minc*(.)" y "*mdec*(.)". Igualmente, podemos querer simplificar las ecuaciones que incluyen multiplicaciones y/o divisiones por parámetros constantes utilizando "*minc*(.)" y "*mdec*(.)" en su lugar, dado que la relación cualitativa importante no es afectada por estas transformaciones. Si sólo empleamos signos $\{-, 0, +\}$ las propias primitivas débiles pueden sustituirse empleando la igualdad y "*-(.)*" en

las ecuaciones cualitativas. Por ejemplo, si permitimos que las variables V , q_0 y q_s tengan el espacio cuantitativo por defecto $\{-, 0, +\}$ podemos emplear las siguientes ecuaciones cualitativas para representar las ecuaciones (8) y (9) en el plano 0:

$$\begin{aligned} \text{plano } (0, [\\ q_s = 'V', \\ d('V') = q_0 - q_s]) \end{aligned}$$

La especificación de un modelo cualitativo apropiado para un sistema se debe a varios factores, que reflejan tanto la información disponible como el propósito que se persigue con la simulación.

6.5.- Planos Diferenciales de orden elevado

Hemos contemplado la posibilidad de especificar en el fichero del modelo planos diferenciales adicionales para representar la estructura de orden superior del sistema. El uso de derivadas de orden superior de las variables del sistema ya se ha considerado anteriormente por parte de ciertos investigadores (de Kleer 1984a, Williams 1984a, Morgan 1988a), pero no existe un criterio general firmemente aceptado sobre cuándo, y en particular en qué orden, deben considerarse dichos planos diferenciales de orden elevado y cuándo excluirllos o borrarlos.

Obtenemos un plano diferencial de orden superior diferenciando cada una de las ecuaciones del modelo del sistema. Estas ecuaciones diferenciadas se estructuran y formulan un modelo cualitativo del mismo modo que lo hacíamos para el plano 0. El modelo cualitativo diferenciado se especifica como plano 1 en el fichero modelo. Repitiendo el proceso sobre el plano 1, podemos especificar el siguiente nivel diferencial, plano 2, y así sucesivamente para planos de orden superior. No hay distinción entre planos diferenciales separados durante la operación de la fase de Propagación Causal, son simplemente un dispositivo de información estructurada. La decisión acerca de cuántos planos incluir en el modelo está basada en ciertos criterios. Esencialmente, se incluyen planos diferenciales de orden superior para eliminar la ambigüedad cualitativa asociada a funciones de entrada aditivas, tal y como analizaremos en la sección 6.6. Los planos, a su vez, se eliminan para reducir el factor exponencial en la Ordenación de Transiciones, tal y como ilustramos en la sección 7.2.1. del capítulo 7.

El procedimiento de diferenciación, como operación lineal, tiene el efecto de preservar la linealidad estructural en las ecuaciones algebraicas del modelo del sistema. Además, si tenemos un modelo lineal como el representado por las ecuaciones (8) y (9) y lo diferenciamos obtendremos:

$$\frac{dq_s}{dt} = \left(\frac{\rho g}{RA} \right) \left(\frac{dV}{dt} \right), \quad (8.a)$$

$$\frac{d^2V}{dt^2} = \frac{dq_e}{dt} - \frac{dq_s}{dt} \quad (9.a)$$

y diferenciando de nuevo:

$$\frac{d^2q_s}{dt^2} = \left(\frac{\rho g}{RA} \right) \left(\frac{d^2V}{dt^2} \right), \quad (8.b)$$

$$\frac{d^3V}{dt^3} = \frac{d^2q_e}{dt^2} - \frac{d^2q_s}{dt^2} \quad (9.b)$$

Como vemos, la estructura del sistema lineal se conserva en los planos diferenciales de orden superior. Si consideramos el modelo cualitativo (más simple) empleando los espacios cuantitativos { -, 0, + } para todas las variables, podemos especificar los siguientes planos en el fichero del modelo:

plano (0, [

$$q_s = 'V',$$

$$d('V') = q_e(q_s]).$$

plano(1, [

$$d(q_s) = d('V'),$$

$$d(d('V')) = d(q_e) (d(q_s)]).$$

plano(2, [

$$d(d(q_s)) = d(d('V')),$$

$$d(d(d('V'))) = d(d(q_e)) (d(d(q_s))]).$$

Si ignoramos la organización introducida por la separación entre planos, la secuencia que comprende todas las ecuaciones satisface los requerimientos de la estructuración causal para la fase de Propagación Causal.

Si usamos un modelo cuantitativo no lineal como origen de las ecuaciones del modelo, tales como las representadas por las ecuaciones (10) y (11), veremos que la diferenciación produce una estructura de orden superior del modelo diferente:

$$\frac{dq_s}{dt} = C_{da} \sqrt{\frac{g}{2A}} \frac{1}{\sqrt{V}} \frac{dV}{dt}, \text{ si } V > 0, \quad (10.a)$$

$$\frac{d^2V}{dt^2} = \frac{dq_e}{dt} - \frac{dq_s}{dt} \quad (11.a)$$

y diferenciando de nuevo:

$$\frac{d^2q_s}{dt^2} = C_{da} \sqrt{\frac{g}{2A}} \left[\frac{1}{\sqrt{V}} \frac{d^2V}{dt^2} - \frac{1}{2V\sqrt{V}} \left[\frac{dV}{dt} \right]^2 \right], \text{ si } V > 0, \quad (10.b)$$

$$\frac{d^3V}{dt^3} = \frac{d^2q_e}{dt^2} - \frac{d^2q_s}{dt^2} \quad (11.b)$$

La estructura de este sistema no lineal no se conserva en los planos diferenciales de orden superior. Suponiendo de nuevo el modelo cualitativo más simple empleando los espacios cuantitativos { -, 0, + } para todas las variables, podemos especificar los siguientes planos en el fichero del modelo:

plano (0, {

$$q_s = 'V',$$

$$d('V') = q_e(q_s).$$

Plano (1, {

$$'V' > 0 \text{ -- } d(q_s) = d('V'),$$

$$d(d('V')) = d(q_e) (d(q_s)).$$

plano(2,{

$$d V2 = d('V') * d('V'),$$

$$'V' > 0 \text{ -- } d(d(q_s)) = d(d('V')) (d V2$$

$$d(d(d('V'))) = d(d(q_e)) (d(d(q_s))).$$

Debemos hacer notar la introducción una variable ficticia " δV^2 " en el plano 2, y la estructura modificada obtenida por la diferenciación repetida del operador no lineal de la raíz cuadrada. No hay necesidad de actualizar el modelo del operador división con los espacios cuantitativos que estamos empleando (la variable V no puede tomar valores negativos), pero debemos evitar el uso de la ecuación cuando el denominador sea nulo.

Los modelos basados en la confluencia de la simulación cualitativa [de Kleer 1984b] emplean un noción de los valores cualitativos que puede interpretarse como el signo de la primera derivada de una variable. De acuerdo con lo anterior, el primer plano diferencial es el nivel apropiado en que estructurar un modelo de confluencias. El plano 0 puede usarse para esto, dado que es claro que la semántica del valor cualitativo no es estrictamente el signo algebraico de una variable real, sino que se refiere a la dirección de la perturbación de la variable.

El Algoritmo Predictivo sólo puede referirse a derivadas de orden superior de una variable si las empleamos explícitamente en las ecuaciones del modelo del sistema. Estas derivadas se tratan como cualquier otra variable durante la Propagación Causal; sus efectos se implementan únicamente mediante la operación de integración durante las fases de Integración Cualitativa y Reconocimiento de Transiciones. El algoritmo supone que no existe conocimiento sobre las derivadas de orden superior a menos que estén explícitamente incluidas en un plano diferencial del modelo. El uso de planos diferenciales se desarrolló como un medio de investigar una metodología para razonar con derivadas de orden superior en la simulación cualitativa. En la siguiente sección consideramos los criterios para incluirlos; en la sección 7.2.1 del capítulo 7 mostraremos cuándo resulta adecuado eliminar los planos de las consideraciones.

6.6.- Funciones de entrada

Las funciones de entrada que vamos a considerar pueden ser descritas por funciones de singularidad tal y como se definen en [D'azzo 1981a, Oppenheim 1983a]. De esta forma se contemplan una serie de entradas, como las funciones escalón, rampas lineales y rampas parabólicas, que son las que generalmente se emplean para caracterizar sistemas dinámicos. A este respecto, la respuesta del sistema a una de estas funciones con singularidades es de particular interés en la teoría convencional de sistemas; veremos en el capítulo 7 que éste es también el caso de sistemas descritos empleando modelos cualitativos. Convencionalmente, la respuesta de un sistema a funciones de entrada periódicas es también importante. Dichas funciones sólo pueden describirse mediante aproximaciones parciales en la simulación cualitativa; no consideraremos en esta tesis las funciones de entrada periódicas. El interface que se describe en el Apéndice A permite al usuario interactuar con el Algoritmo Predictivo y alterar los valores de las variables de entrada en el modelo a medida que se lleva a cabo la simulación. Esta posibilidad puede emplearse para generar aproximaciones a funciones periódicas; puede emplearse también para desarrollar un cierto tipo de convolución cualitativa, alterando las entradas durante la respuesta cualitativa transitoria del sistema.

Para nuestros propósitos, las funciones de singularidad puede considerarse parametrizadas en el tiempo de acuerdo a la siguiente fórmula general:

$$u(t) = \begin{cases} A(t-t_0)^n & \text{si } t > t_0, n \geq 0, A \text{ constante distinta de } 0 \\ 0 & \text{si } t \leq t_0 \end{cases}$$

Podemos obtener esto integrando el efecto de una función impulso singular idealizada de área $A_n!$ aplicada a $\frac{d^{(n+1)}u(t)}{dt^{(n+1)}}$ en el instante t_0 , produciendo un cambio en escalón continuo a la izquierda (Heaviside) a $\frac{d^{(n)}u(t)}{dt^{(n)}}$, una función rampa lineal a $\frac{d^{(n-1)}u(t)}{dt^{(n-1)}}$, etc. Para una función de entrada descrita por un cambio escalón en el instante t_0 tenemos $n = 0$; para una rampa lineal tenemos $n = 1$; para una rampa parabólica tenemos $n = 2$, y así sucesivamente. Lo realmente importante de observar es que $\frac{d^{(n+1)}u(t)}{dt^{(n+1)}}$ es idénticamente igual a 0 excepto en el instante $t = t_0$. Si la estructura del sistema tiene una entrada aditiva,

la ecuación del sistema donde aparece la variable puede ser diferenciada $(n+1)$ veces y $\frac{d^{(n+1)}u(t)}{dt^{(n+1)}}$ desaparecerá de la estructura en este orden diferencial. De esta forma, podemos asegurar que se elimina la ambigüedad cualitativa del plano $(n+1)$, originada por la aparición de la variable de entrada en la ecuación algebraica aditiva. Esto nos proporciona un criterio firme de como incluir muchos planos diferenciales en el modelo cualitativo del sistema, basado en el orden de la función singular de entrada.

Ilustraremos este proceso considerando, por su sencillez, el modelo cualitativo de un tanque aislado con flujo laminar (lineal) que presentamos en las secciones 6.4.3 y 6.5:

$$\begin{aligned} \text{plano(0, [} \\ & q_s = V', \\ & d(V') = q_e - q_s]). \end{aligned}$$

Si consideramos la aplicación de una función rampa lineal a la variable de entrada q_e , es decir $n = 1$, deberíamos incluir hasta un plano diferencial de orden $n+1=2$ en el modelo del sistema:

$$\begin{aligned} \text{plano(1, [} \\ & V' > 0 (: d(q_s) = d(V'), \\ & d(d(V')) = d(q_e) - d(q_s)]). \\ \text{plano(2, [} \\ & d V^2 = d(V') * d(V'), \\ & V' > 0 (: d(d(q_s)) = d(d(V')) (d V^2 \\ & d(d(d(V'))) = d(d(q_e)) (d(d(q_s)))]). \end{aligned}$$

Cuando aplicamos la función rampa a q_e , lo representamos realmente como un cambio discontinuo de $\frac{dq_e}{dt}$ manteniendo el valor de entrada de $\frac{d^2q_e}{dt^2}$ idénticamente nulo. El efecto de la Integración sobre $\frac{dq_e}{dt}$ simulará la rampa lineal de q_e , permaneciendo $\frac{d^2q_e}{dt^2}$ idénticamente nula. El efecto del plano 2 durante la Propagación Causal es como si $d(d(q_e))$ no estuviera presente, es decir, hemos eliminado una ambigüedad cualitativa potencial de la estructura de

orden superior del plano 2. En el capítulo 7 presentaremos ejemplos de los efectos de esto último.

6.7.- Resumen

En este capítulo hemos considerado el desarrollo y la especificación de modelos cualitativos para el Motor Predictivo. Hemos ilustrado los requerimientos sintácticos del fichero modelo con ejemplos a escala reducida, dejando para el capítulo 7 el estudio de los modelos cualitativos de mayor alcance.

Hemos mostrado la aplicación del algoritmo de Ordenación Causal Dinámica para ayudar a estructurar las ecuaciones algebraicas del modelo en la operación de la Propagación Causal. La posibilidad de automatizar el proceso de estructuración sería un área en el cual desarrollar una Investigación que completase la presente tesis.

Hemos descrito igualmente el uso de planos diferenciales para especificar la estructura de orden superior del modelo, y hemos indicado que las expresiones funcionales algebraicas no lineales pueden producir estructuras diferentes en planos de orden superior. En el capítulo 7 compararemos los comportamientos cualitativos generados por estas distintas estructuras. La idea de usar planos diferenciales de orden superior fue motivada en parte por la consideración de los tipos de funciones de entrada pueden querer considerar en el Motor Predictivo. Hemos visto que los planos diferenciales de orden superior pueden emplearse para eliminar la ambigüedad originada por una entrada aditiva en el sistema descrita mediante una función singular. En la sección 7.2.1. del capítulo 7 mostraremos el aumento de la complejidad de la Ordenación de Transiciones cuando se especifican demasiados planos diferenciales. Pensamos que estos resultados proporcionan un firme criterio para regir la Inclusión de Información sobre derivadas de orden superior en los modelos cualitativos.

7.- RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION

7.1.- Introducción

En este capítulo presentaremos los resultados de la aplicación del Modelo Predictivo a ciertos ejemplos, comenzando desde un simple sistema hidráulico al estudio de un sistema industrial de gran escala.

En la sección 7.2 consideraremos los sistemas hidráulicos que ya presentamos anteriormente en la sección 6.2 del capítulo 6. En los ejemplos de la sección 7.2.1 mostraremos cómo pueden emplearse planos diferenciales de orden superior para hacer frente a ciertas forma de ambigüedad cualitativa y para reducir el factor exponencial de la complejidad de la Ordenación de Transiciones. En la sección 7.2.2 revisaremos el modo de utilizar los planos diferenciales para modelar la estructura de orden elevado de un sistema, lo que puede tener efectos importantes en el comportamiento cualitativo que se está simulando. Finalmente, en la sección 7.2.3 discutiremos los requerimientos para una validación adicional en la Propagación Causal, necesaria para hacer frente a ciertos tipos de sistemas acoplados [Kulpers 1987a].

En la sección 7.3 consideraremos una simulación a escala de laboratorio de un conducto de fluidos y un Intercambiado de calor. Consideraremos separadamente los ciclos del flujo del fluido y del Intercambio de calor en las secciones 7.3.1. y 7.3.2.

Finalmente, en la sección 7.4 presentaremos el estudio de un caso a escala industrial, consistente en el subsistema de la caldera de la Planta Térmica de Santurce de Iberdrola.

7.2.- Sistemas hidráulicos simples

En este apartado vamos a aplicar el Motor Predictivo a los ejemplos de sistemas simples de flujo de fluido que presentamos anteriormente en la sección 6.2 del capítulo 6. Estos ejemplos nos servirán para ilustrar ciertos hechos relacionados con la aproximación hecha por el Algoritmo Predictivo. En particular, ilustramos el uso del nivel apropiado de planos diferenciales de orden elevado para solucionar el problema de entradas descritas por funciones singulares. También mostramos el modo en que pueden eliminarse planos para reducir la complejidad de la Ordenación de Transiciones. Además, explicaremos el modo de utilizar los planos diferenciales para razonar acerca de las estructuras de orden superior de un sistema, aspecto este último de gran importancia en relación con la utilización del Algoritmo Predictivo para la generación de explicaciones; para ilustrar la importancia de esta capacidad aplicaremos el Algoritmo Predictivo al modelo de un sistema no lineal. Finalmente, hemos identificado los requerimientos para una nueva comprobación de validez que se añade a las cuatro ya presentadas en la sección 5.4 del capítulo 5. Esta comprobación de que no se produce oscilación es necesaria para manejar correctamente ciertos tipos de sistemas acoplados.

7.2.1.- Tanque simple con flujo laminar

En esta sección vamos a considerar el tanque simple descrito en la sección 6.2.1 del capítulo 6 con las siguientes ecuaciones cuantitativas:

$$q_o - q_s = \left(\frac{dV}{dt} \right) \quad (1)$$

$$q_s = \left(\frac{\rho g}{R} \right) \left(\frac{V}{A} \right) \quad (2)$$

donde el significado de las variables es el siguiente:

q_e	flujo de entrada al tanque
q_s	flujo de salida del tanque
V	Volumen de fluido en el tanque
A	Area de la sección del tanque
ρ	Densidad del fluido del tanque
g	Aceleración debida a la gravedad
R	Resistencia laminar del fluido

Supondremos el modelo cualitativo más simple, empleando los espacios cuantitativos $\{ -, 0, + \}$ para las variables q_e , q_s , V y dV / dt , ignorando los parámetros constantes positivos ρ , g , R y A . Queremos simular la respuesta cualitativa de este modelo a una rampa lineal positiva aplicada al flujo de entrada q_e . Inicialmente, consideraremos el modelo cualitativo que incluye sólo el primer plano diferencial, tal y como lo desarrollamos en la sección 6.5 del capítulo 6. Este modelo puede encontrarse en el fichero 'modelos/tanque/laminar_2' del directorio del Motor Predictivo:

```
plano( 0, [
    qs = 'V',
    d ( 'V' ) = qe - qs ] ).
plano( 1, [
    'V' > 0 -: d (qs) = d ( 'V' ),
    d ( d ( 'V' ) ) = d ( qe ) - d ( qs ) ] ).
```

Modelamos la rampa lineal introduciendo un cambio escalón positivo a $\frac{dq_e}{dt}$ en un punto simbólico t_i ; no podemos especificar completamente un cambio de este tipo porque no tenemos $\frac{d^2q_e}{dt^2}$ en el modelo. En la Figura 7-1 mostramos la respuesta cualitativa generada por el ciclo principal del Algoritmo Predictivo de la Propagación Causal y la Integración Cualitativa, para lo cual lo cual representamos el resultado de salida del módulo Mapa de Eventos del Interface del Motor Predictivo (utilizaremos este mismo método de representación a lo largo de todo este capítulo).

qe'	0	t1	+
qe	0	t1	+
V''	0	t1	+
V'	0	t1	+
V	0	t1	+
qs'	0	t1	+
qs	0	t1	+

Figura 7-1 Tanque simple con Flujo Laminar - Planos insuficientes

En el período que sigue a t_1 , el módulo Reconocimiento de Transiciones no devuelve transiciones posibles y por lo tanto termina allí mismo. La información existente acerca de la estructura de orden elevado del modelo cualitativo es insuficiente para que el algoritmo produzca una respuesta más detallada del sistema.

Consideremos ahora el modelo cualitativo que surge de incluir el primero y segundo plano diferencial:

```
plano( 0, [
    qs = 'V',
    d('V') = qe - qs ]),
plano( 1, [
    'V' > 0 -: d(qs) = d('V'),
    d(d('V')) = d(qe) - d(qs) ]),
plano( 2, [
    dV2 = d('V') * d('V'),
    'V' > 0 -: d(d(qs)) = d(d('V')) - dV2
    d(d(d('V'))) = d(d(qe)) - d(d(qs)) ]).
```

Modelamos la rampa lineal de nuevo, introduciendo un cambio escalón positivo en $\frac{dq_e}{dt}$ en el punto simbólico t_i ; en este ejemplo, podemos mantener $\frac{d^2q_e}{dt^2}$ idénticamente nula para poder especificar completamente este paso. En la Figura 7-2 podemos ver la respuesta cualitativa generada por el Algoritmo Predictivo. Los efectos detallados de cada fase del algoritmo cuando se aplica a

este ejemplo figuran en el apéndice B. Manteniendo nula $\frac{d^2q_e}{dt^2}$ tenemos información suficiente en el segundo plano diferencial para reconocer una transición posible de $\frac{d^2V}{dt^2}$ después de t_1 . La investigación de esta transición nos lleva a t_2 , instante en que se infiere se alcanza el equilibrio y el algoritmo termina. Después de la transición entre t_1 y t_2 , tanto el flujo de salida q_s como la variable de estado V se ajustan a una respuesta en rampa lineal tras t_2 .

q_e''	0		
q_e'	0	t_1	+
q_e	0	t_1	+
V'''	0	t_1	t_2
V''	0	t_1	+
V'	0	t_1	+
V	0	t_1	+
q_s''	0	t_1	t_2
q_s'	0	t_1	+
q_s	0	t_1	+

Figura 7.2 Tanque Simple con Flujo Laminar - Respuesta a una rampa

Consideremos ahora la respuesta cualitativa de este modelo a una rampa lineal aplicada a q_e . Podemos modelar esto introduciendo un escalón negativo a $\frac{dq_e}{dt}$, que vuelve a cero en el instante simbólico t_3 . En la Figura 7-3 presentamos la respuesta cualitativa que genera el ciclo principal de la Propagación Causal y la Integración Cualitativa. En el período que sigue a t_3 , el Reconocimiento de Transiciones identifica tres posibles transiciones: $\frac{dV}{dt}$, $\frac{d^2V}{dt^2}$, y $\frac{dq_s}{dt}$. Esto nos daría $2^3 - 1 = 7$ subconjuntos de transiciones a examinar por la Ordenación de Transiciones. Podemos observar un esquema de signos alternados en las derivadas de orden superior de la variable de estado V después de t_3 ; $\frac{dV}{dt}$ es positivo, $\frac{d^2V}{dt^2}$ es negativa y $\frac{d^3V}{dt^3}$ es positiva. Este esquema extendido a un orden infinito debe preceder la transición al equilibrio.

Si consideramos planos diferenciales adicionales podremos reconocer otras transiciones posibles, aumentando la complejidad de la Ordenación de Transiciones. Eliminando los planos diferenciales más elevados, de modo que sólo reconozcamos la transición en las derivadas de orden más bajo de las variables de estado, reducimos el factor exponencial en la complejidad de la Ordenación de Transiciones. En la Figura 7-4 presentamos el efecto de eliminar el segundo plano diferencial de nuestro ejemplo. El reconocimiento de transiciones identifica ahora una transición posible de $\frac{dV}{dt}$ después de t_3 . La investigación de esta transición conduce al equilibrio en t_4 , donde todas las variables constantes del sistema con valores positivos.

q_e''	0			
q_e'	0	t_1		t_3
q_e	0	t_1	+	0
V'''	0	t_1	+	t_2
V''	0	t_1	+	0
V'	0	t_1	+	t_3
V	0	t_1	+	-
q_s''	0	t_1	+	t_2
q_s'	0	t_1	+	0
q_s	0	t_1	+	-

Figura 7-3 Tanque simple con Flujo Laminar - Demasiados planos

q_e'	0	t_1	+	t_3	0
q_e	0	t_1	+		
V''	0	t_1	+	t_2	t_3
V'	0	t_1	+	0	t_4
V	0	t_1	+		0
q_s'	0	t_1	+		t_4
q_s	0	t_1	+		0

Figura 7.4 Tanque Simple con Flujo Laminar - Respuesta a una rampa

7.2.2.- Tanque simple con flujo turbulento

Vamos a considerar en esta sección un tanque simple como el descrito en la sección 6.2.2. del capítulo 6 con las siguientes ecuaciones:

$$q_e - q_s = \left(\frac{dV}{dt} \right) \quad (1)$$

$$q_s = C_d a \sqrt{2g \left(\frac{V}{A} \right)} \quad (3)$$

donde

C_d Coeficiente de flujo en la abertura de salida

a Area de la sección transversal de la abertura de salida

Vimos con anterioridad, en la sección 6.5 del capítulo 6 que la diferenciación repetida del operador raíz cuadrada de la ecuación anterior produce ecuaciones donde V aparece en el denominador:

$$\frac{dq_s}{dt} = C_d a \sqrt{\frac{g}{2A}} \frac{1}{\sqrt{V}} \frac{dV}{dt}, \text{ si } V > 0, \quad (10.a)$$

$$\frac{d^2 q_s}{dt^2} = C_d a \sqrt{\frac{g}{2A}} \left[\frac{1}{\sqrt{V}} \frac{d^2 V}{dt^2} - \frac{1}{2V\sqrt{V}} \left[\frac{dV}{dt} \right]^2 \right], \text{ si } V > 0, \quad (10.b)$$

Estas ecuaciones no son válidas cuando V es 0, de modo que se contemplan en el primer y segundo plano diferencial del modelo cualitativo más simple empleando los espacios cualitativos $\{-, 0, +\}$ tal y como desarrollamos anteriormente en la sección 6.5 del capítulo 6.

plano (0, [

$$qs = 'V',$$

$$d('V) = qe - qs]).$$

plano (1, [

$$'V > 0 - : d(qs) = d('V),$$

$$d(d('V)) = d(qe) - d(qs)]).$$

plano(2, [

$$d V^2 = d('V) * d('V),$$

$$'V > 0 - : d(d(qs)) = d(d('V)) - d V^2$$

$$d(d(d('V))) = d(d(qe)) - d(d(qs))]).$$

Deseamos simular la respuesta cualitativa del modelo a una rampa lineal aplicada al flujo de entrada q_e . La rampa lineal se modela como antes introduciendo un cambio positivo en $\frac{dq_e}{dt}$ en el instante simbólico t_r . Hay, sin embargo, un problema con este modelo: la ecuación que proporciona $\frac{d^2q_s}{dt^2}$ no es válida hasta que V es positivo, instante en que $\frac{d^2V}{dt^2}$ y $\frac{dV}{dt}$ son también positivas, de modo que el resultado de la ecuación es ambiguo. Para evitar este problema comenzaremos desde un estado inicial donde hay un volumen residual muy pequeño V mantenido por unos flujos de entrada y salida muy pequeños q_e y q_s . Introduciremos los espacios cuantitativos que permitan la expresión de este estado inicial, proporcionando más detalle sobre las relaciones funcionales entre las variables del sistema. Esto nos proporciona el siguiente modelo cualitativo que se encuentra en el fichero 'modelos/tanque/turbulent_2' del Motor Predictivo:

```

espacio_cuantitativo ( qe, [ smalle, ( smalle, & ) ] ).
espacio_cuantitativo ( 'V', [ small, ( small, & ) ] ).
espacio_cuantitativo ( sqrt V, [ smallr, ( smallr, & ) ] ).
espacio_cuantitativo ( qs, [ smalls, ( smalls, & ) ] ).
restricciones ( [
    0 < small, small < 0.001,
    0 < smalle, smalle < 0.001 ] ).
plano( 0, [
    ( sqrt V = sqrt( 'V' ), ( smallr, small ) ),
    ( qs = minc ( sqrt V ), ( smalls, smallr ) ),
    ( d ( 'V' ) = qe - qs, ( 0, smalle, smalls ) ) ] )
plano( 1, [
    d qs = d ( 'V' ),
    ( d ( qs ) = minc ( dqs ), ( 0, 0 ) ),
    d ( d ( 'V' ) ) = d ( qe ) - d ( qs ) ] )
plano ( 2, [
    ddqsa = d ( d ( 'V' ) ) / sqrt V,
    ( ddqsa = minc ( ddqsa ), ( 0, 0 ) ),
    sqrt V = d ( 'V' ) * d ( 'V' ),
    sqrt V3 = "V" * sqrt V,
    sqrt V3 > 0 -: ddqsb = sqrt V / sqrt V3,
    ( ddqsb = minc ( ddqsb ), ( 0, 0 ) ),
    d ( d ( qs ) ) = ddqsa - ddqsb,
    d ( d ( d ( 'V' ) ) ) = d ( d ( qe ) ) - d ( d ( qs ) ) ] ).

```

q_e''	0		
q_e'	0	t_1	+
q_e	$small_e$	t_1	$(small_e, \delta)$
V'''	0	t_1	t_3 0
V''	0	t_1	+
V'	0	t_1	+
V	$small$	t_1	$(small, \delta)$
$\sqrt{q_e V}$	$smallr$	t_1	$(smallr, \delta)$
q_s''	0	t_1	t_3 0
q_s'	0	t_1	+
q_s	$small_s$	t_1	$(small_s, \delta)$
dq_s	0	t_1	+
$ddq_s a$	0	t_1	+
$ddq_s a a$	0	t_1	+
$\sqrt{q_e V}$	0	t_1	+
$\sqrt{q_e V^3}$	+		
$ddq_s b$	0	t_1	+
$ddq_s b b$	0	t_1	+

Figura 7-5 Tanque Simple con Flujo Turbulento - Respuesta a una rampa

En la Figura 7-5 mostramos la respuesta cualitativa de este modelo a la aplicación de una rampa lineal positiva a q_e en el instante simbólico t_1 . El algoritmo reconoce una posible transición de $\frac{d^2 V}{dt^2}$ después de t_1 , y la investigación de esta transición permite inferir una transición anterior de $\frac{d^2 q_s}{dt^2}$ que hace que el sistema alcance el equilibrio. Después del período transitorio entre t_1 y t_3 , el flujo de salida q_s se ajusta a una rampa lineal como en la sección 7.2.1. Sin embargo, la variable de estado Volumen V se ajusta a una rampa parabólica a diferencia de la respuesta de la sección 7.2.1.. Esta diferencia en la forma cualitativa de la respuesta entre las secciones 7.2.1 y 7.2.2 se obtiene como resultado del uso de planos diferenciales para representar y razonar sobre la estructura de orden superior de los modelos. El uso de primitivas de modelado débiles "minc (.)" y "mdec (.)" por sí solas, no permitiría proporcionar información suficiente para generar más que el primer plano diferencial; hemos

supuesto que conocemos las relaciones funcionales en nuestros ejemplos, y hemos utilizado este conocimiento para generar el segundo plano en ambos casos.

7.2.3.- Dos tanques acoplados con flujo laminar

Esta sección vamos a considerar el caso de los dos tanques acoplados descritos en la sección 6.2.3 del capítulo 6 con las siguientes ecuaciones cualitativas:

$$q_e - q_x = A_1 \left(\frac{dH_1}{dt} \right) \quad (4)$$

$$q_x - q_s = A_2 \left(\frac{dH_2}{dt} \right) \quad (5)$$

$$q_x = \left(\frac{\rho g}{R_x} \right) (H_1 - H_2) \quad (6)$$

$$q_s = \left(\frac{\rho g}{R_s} \right) H_2 \quad (7)$$

donde

- q_x Flujo entre los dos tanques
- A_1 y A_2 Areas de las secciones transversales de los tanques
- R_x y R_s Resistencias laminares de los fluidos
- H_1 y H_2 Alturas del fluido en los tanques

Supondremos, al igual que en los casos anteriores el modelo cualitativo más sencillo, empleando los espacios cuantitativos $\{-, 0, +\}$ para las variables $q_e, q_s, q_x, H_1, H_2, \frac{dH_1}{dt}, \frac{dH_2}{dt}$, ignorando los parámetros constantes positivos ρ, g, R_x, R_s, A_1 y A_2 . Queremos simular la respuesta cualitativa de este modelo a un cambio positivo aplicado al flujo de entrada q_e en el instante simbólico t_1 . Por lo tanto consideraremos el modelo cualitativo incluyendo su primer plano diferencial. Podemos encontrar este modelo en el fichero 'modelos/tanq_ac/laminar_2' del directorio del Motor Predictivo:

plano (0, [

$$q_x = 'H1' - 'H2',$$

$$q_s = 'H2',$$

$$d ('H1') = q_e - q_x,$$

$$d ('H2') = q_x - q_s]).$$

plano(1, [

$$d (q_x) = d ('H1') - d ('H2'),$$

$$d (q_s) = d ('H2'),$$

$$d (d ('H1')) = d (q_e) - d (q_x),$$

$$d (d ('H2')) = d (q_x) - d (q_s)]).$$

qe'	0		
qe	0	t1	+
H1''	0	t1	-
H1'	0	t1	+
H1	0	t1	+
H2''	0	t1	+
H2'	0	t1	+
H2	0	t1	+
qx'	0	t1	+
qx	0	t1	+
qe'	0	t1	+
qe	0	t1	+

Figura 7-6 Dos Tanques acoplados - Respuesta a un escalón en t_1

La Figura 7-6 muestra cómo la simulación alcanza un estado donde se encuentra la transición previa de $\frac{d^2 H_2}{dt^2}$ en el instante t_1 . Una rutina de Integración no constructiva como la del algoritmo QSIM [Kuipers 1986a] no Investigaría la posibilidad de que $\frac{d^2 H_2}{dt^2}$ cambie de + a - en el período que sigue a t_1 . Dado que $\frac{d^3 H_2}{dt^3}$ no está restringido por el modelo, el uso de un esquema no constructivo infiere que los cambios de $\frac{d^2 H_2}{dt^2}$ a + o - son ambos posibles. Esto conduce a un fenómeno conocido como "chattering" [Kuipers 1987a]. En el sistema QSIM, se aplica una restricción de curvatura para restringir los valores de

$\frac{d^3 H_2}{dt^3}$ de modo que el paso de $\frac{d^2 H_2}{dt^2}$ a + se invalide. En nuestra rutina de Integración constructiva, Investigamos la transición de $\frac{dH_1}{dt}$ que aún persiste en t_4 , y se infiere una transición en un período anterior que hace pasar a $\frac{d^2 H_2}{dt^2}$ a - en el período que sigue a t_4 .

El Reconocimiento de Transiciones Identifica dos transiciones posibles en el período que sigue a t_4 : $\frac{dH_1}{dt}$ y $\frac{dH_2}{dt}$. Esto proporciona tres subconjuntos de transiciones que deben Investigarse $\left\{ \frac{dH_1}{dt} \right\}$, $\left\{ \frac{dH_2}{dt} \right\}$ y $\left\{ \frac{dH_1}{dt}, \frac{dH_2}{dt} \right\}$. La Investigación del primer subconjunto permite inferir una transición en t_6 como se muestra en la Figura 7-7.

qe'	0			
qe	0	11	+	
H1''	0	11	-	18 0
H1'	0	11	+	
H1	0	11	+	
H2''	0	11	+	14 0
H2'	0	11	+	
H2	0	11	+	
qx'	0	11	+	18 0
qx	0	11	+	
qe'	0	11	+	
qe	0	11	+	

Figura 7-7 Dos tanques acoplados. Respuesta a una escalón en t_6

El algoritmo infiere entonces que $\frac{d^2 H_1}{dt^2}$ cambia de nuevo a - en el período anterior a t_6 . Esta oscilación de $\frac{d^2 H_1}{dt^2}$ representa otra forma de "chattering". En esta ocasión es la simetría cualitativa del acoplamiento entre $\frac{dH_1}{dt}$ y $\frac{dH_2}{dt}$ lo que origina la oscilación. Consideremos el plano 1 del modelo

cualitativo: dado que tenemos que $\frac{dq_e}{dt}$ es idénticamente nulo podemos sustituir $\frac{dq_r}{dt}$ y $\frac{dq_s}{dt}$ para derivar la siguiente forma simplificada:

plano (1, [

$$d (d ('H1')) = d ('H2') - d ('H1'),$$

$$d (d ('H2')) = d ('H1') - d ('H2')]).$$

Esta estructura simétrica está representada en la Figura 7-8.

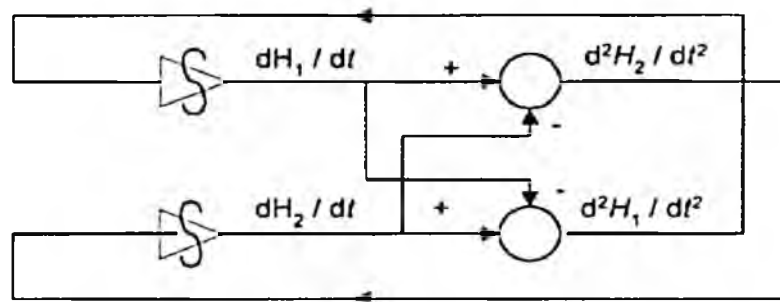


Figura 7-8 Dos Tanques Acoplados. Estructura simétrica

Si una de las transiciones $\frac{dH_1}{dt}$ o $\frac{dH_2}{dt}$ se produce antes que la otra, el efecto forzará a una transición previa de $\frac{d^2H_1}{dt^2}$ o $\frac{d^2H_2}{dt^2}$ respectivamente. El algoritmo Investigará entonces la otra transición, originando una oscilación en $\frac{d^2H_1}{dt^2}$ o $\frac{d^2H_2}{dt^2}$. La investigación del segunda subconjunto infiere una transición previa de $\frac{d^2H_2}{dt^2}$ en t_{11} , como mostramos en la Figura 7-9.

Como podemos observar estas oscilaciones identifican el máximo local, de modo que $\frac{d^3H_1}{dt^3}$ es 0 en t_a en la Figura 7-7 y $\frac{d^3H_2}{dt^3}$ es 0 en t_{11} , en la Figura 7-9. Para un sistema lineal como el de este ejemplo la estructura simétrica del plano cualitativo 1 se preserva en los planos diferenciales de orden superior, es decir:

plano (2, [

$$d (d (d ('H1'))) = d (d ('H2')) - d (d ('H1')),$$

$$d (d (d ('H2'))) = d (d ('H1')) - d (d ('H2'))]).$$

Por lo tanto, cuando $\frac{d^2 H_1}{dt^2} = \frac{d^3 H_1}{dt^3} = 0$ en t_s , debemos tener que $\frac{d^2 H_2}{dt^2}$ es también 0. Por inducción podemos inferir que $\frac{d^{(n)} H_2}{dt^{(n)}}$ es 0 para toda $n \geq 2$, es decir $\frac{dH_1}{dt}$ está en reposo. Podemos aplicar un argumento similar a $\frac{d^2 H_2}{dt^2}$ en t_{11} .

qe'	0			
qe	0	t1	+	
H1''	0	t1	-	
H1'	0	t1	+	
H1	0	t1	+	
H2''	0	t1	+	t4 0
H2'	0	t1	+	t11 0
H2	0	t1	+	
qx'	0	t1	+	
qx	0	t1	+	
qe'	0	t1	+	
qe	0	t1	+	

Figura 7-9 Dos tanques acoplados. Respuesta a una escalón en t_1 .

qe'	0			
qe	0	t1	+	
H1''	0	t1	-	t14 0
H1'	0	t1	+	t14 0
H1	0	t1	+	
H2''	0	t1	+	t4 0
H2'	0	t1	+	t14 0
H2	0	t1	+	
qx'	0	t1	+	t14 0
qx	0	t1	+	
qs'	0	t1	+	t14 0
qs	0	t1	+	

Figura 7-10 Dos tanques acoplados. Respuesta a una escalón

Hemos trasladado esta observación a la comprobación de validez de la fase de Propagación Causal del Algoritmo Predictivo. Esta quinta comprobación se añade a las cuatro descritas en la sección 5.4 del capítulo 5.

5. La derivada de orden superior de una variable de estado no puede oscilar en 0. Dicha oscilación identifica un extremo local en la derivada de orden más alto, y este comportamiento no se considera válido.

Es importante tener en cuenta que esta comprobación de validez sólo se prueba para sistemas lineales de segundo orden como el del ejemplo. Aunque consideramos que es de aplicación más general, puede considerarse nada más que como una heurística en esta etapa.

La comprobación de no oscilación prohíbe los dos primeros subconjuntos de transiciones anteriores.

En la Figura 7-10 mostramos el comportamiento válido que produce la investigación del subconjunto final $\left\{ \frac{dH_1}{dt}, \frac{dH_2}{dt} \right\}$. En la Figura 7-11 ilustramos la aplicación detallada de las fase de Ordenación de Transiciones y de Ordenación de Prioridades en este ejemplo; en ella indicamos la traza del Algoritmo Predictivo (a efectos de hacer más sencillo leer y entender la traza, hemos incluido líneas en blanco).

algoritmo-predictivo : modo verbose on
 algoritmo-predictivo : nuevas entradas - {(qi,+)}
 algoritmo-predictivo : conjunto de transiciones posibles - {(d(H1),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando transiciones {(d(H1),0)}
 algoritmo-predictivo : conjunto de momentos anteriores posibles {(d(qx),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando momentos anteriores [d(qx),0]
 algoritmo-predictivo : conjunto de momentos anteriores posibles {(d(d(H2)),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando momentos anteriores [(d(d(H2)),0)]
 algoritmo-predictivo : conjunto de transiciones posibles {(d(H1),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando transición [(d(H1),0)]
 algoritmo-predictivo : nuestro conjunto de momentos anteriores posibles {(d(qx),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando momentos anteriores [(d(qx),0)]
 algoritmo-predictivo : investigando periodos anteriores [(d(d(H2)),-)]
 algoritmo-predictivo : conjunto de transiciones posibles {(d(H1),0), (d(H2),0), (d(H1),0), (d(H2),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando transición [(d(H1),0)]
 algoritmo-predictivo : nuestro conjunto de momentos anteriores posibles {(d(qx),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando momento anterior [d(qx),0]
 algoritmo-predictivo : conjunto de transiciones posibles {(d(H2),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando transición [(d(H2),0)]
 algoritmo-predictivo : investigando periodo anterior [(d(qx),+)]
 ***ERROR : mapa_de_eventos:propagar - para d(d(H1)) oscilación h.o.s.
 algoritmo-predictivo : transición no valida - [(d(H2),0)]
 algoritmo-predictivo : nogood prior moment [(d(qx),0)]
 algoritmo-predictivo : transición no valida - [(d(H1),0)]
 algoritmo-predictivo : investigando transición [(d(H2),0)]
 algoritmo-predictivo : conjuntos de momentos anteriores posibles{(d(d(H2)),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando momento anterior [(d(d(H2)),0)]
 algoritmo-predictivo : conjuntos de transiciones posibles {(d(H1),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando transición [(d(H1),0)]
 algoritmo-predictivo : conjuntos de momentos anteriores posibles {(d(qx),0)}
 algoritmo-predictivo : investigando momento anterior [(d(qx),0)]
 ***ERROR : mapa_de_eventos:propagar - para d(d(H2)) oscilación h.o.s
 algoritmo-predictivo : momento anterior no valido [(d(qx),0)]
 algoritmo-predictivo : transición no valida - [(d(H1),0)]
 algoritmo-predictivo : transición no valida [(d(d(H2)),0)]
 algoritmo-predictivo : transición no valida - [(d(H2),0)]
 algoritmo-predictivo : conjunto de transiciones posibles{(d(H1),0), (d(H2),0)},
 algoritmo-predictivo : conjunto de transiciones posibles[]
 algoritmo-predictivo : algoritmo terminado

Figura 7-1 I Dos Tanques Acoplados. Traza del Algoritmo

7.3.- Intercambiador de calor

En esta sección aplicaremos el Algoritmo Predictivo a un Intercambiador de calor de tipo industrial construido a escala de laboratorio. La Figura 7-12 muestra las principales características del proceso. Las ecuaciones diferenciales del modelo están desarrolladas en [Quek 1990a]. Utilizaremos estos modelos como el origen de nuestro modelo cualitativo, y trataremos separadamente el ciclo de temperatura y el de flujo en las siguientes secciones.

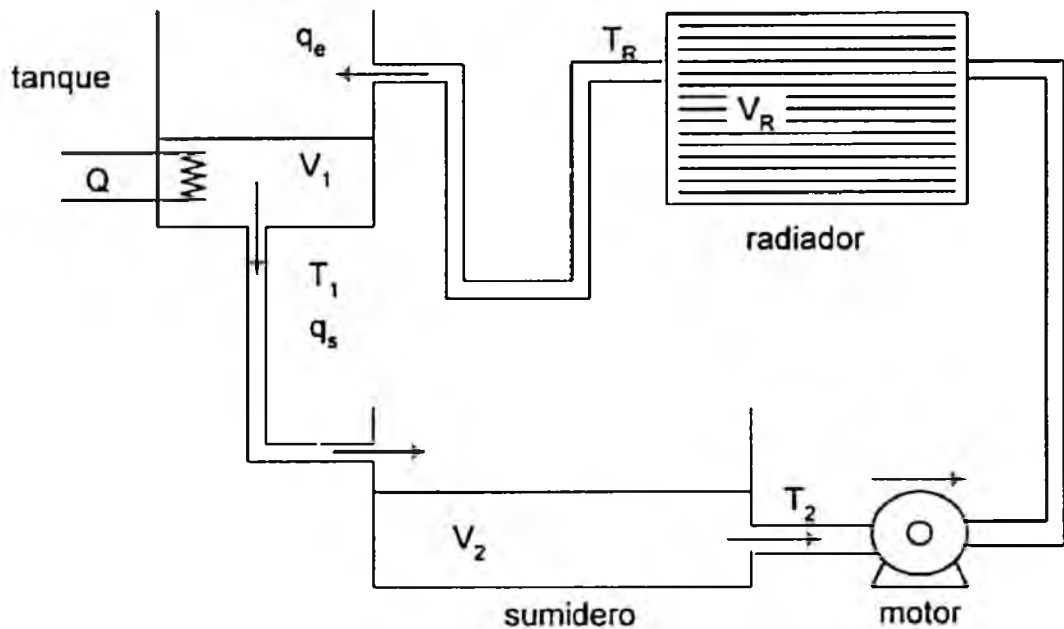


Figura 7-12 El proceso del Intercambiador de Calor

7.3.1.- Circuito del fluido

El modelo de ecuaciones diferenciales que emplearemos como punto de arranque es el siguiente:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q_e - q_s}{A} \quad (16)$$

$$q_s = C_d a \sqrt{2gh} \quad (17)$$

$$V_1 = Ah \quad (18)$$

$$V_2 = V_T - V_R - V_1 \quad (19)$$

donde

h	Altura del fluido en el tanque
q_e	Flujo de entrada al tanque
q_s	Flujo de salida del tanque
A	Area de la sección transversal del tanque
C_d	Coefficiente de flujo en la apertura de salida del tanque
a	Area de la sección transversal de la apertura del tanque
g	Aceleración debida a la gravedad
V_1	Volumen del fluido en el tanque
V_2	Volumen del fluido en el sumidero
V_T	Volumen total del fluido en el proceso del Intercambiador
V_R	Volumen del fluido en el radiador

El volumen de fluido todo el sistema V_T es constante, y está repartido entre el tanque V_1 , el sumidero V_2 y el radiador V_R , no habiendo flujo de entrada q_e en el tanque. Queremos simular la respuesta cualitativa del ciclo del flujo a un salto positivo en el flujo de entrada q_e (creado aumentando la velocidad del motor del Intercambiador). Para ello, especificaremos nuestro modelo cualitativo incluyendo el primer plano diferencial. Usaremos los espacios cuantitativos apropiados para las variables del sistema para que nuestra simulación puede inicializarse a un estado nominal previo. El modelo cualitativo que empleamos se encuentra en el directorio 'modelos/int/flujo_1' del Motor Predictivo:

```

espacio_cuantitativo( qe, [ ( 0, qen ), qen, ( qen, & ) ] ).
espacio_cuantitativo ( qs, [ ( 0, qsn ), qsn, ( qsn, & ) ] ).
espacio_cuantitativo ( h, [ ( 0, hn ), hn, ( hn, & ) ] ).
espacio_cuantitativo ( sqrth, [ ( 0, srhn ), srhn, ( srhn, & ) ] ).
espacio_cuantitativo ( 'V1', [ ( 0, v1n ), v1n, ( v1n, & ) ] ).
espacio_cuantitativo ( 'V2', [ ( 0, v2n ), v2n, ( v2n, & ) ] ).
espacio_cuantitativo ( 'V12', v ).

```

```

restricciones ( [
    vt > 0, vr > 0, vr < vt, v = vt - vr ] ).

```

```

plano ( 0, [
    ( sqrth = sqrt ( h ), ( srhn, hn ) ),
    ( q0 = minc ( sqrth ), ( qsn, srhn ) ),
    ( 'V1' = minc ( h ), ( v1n, hn ) ),
    ( 'V2' = 'V12' - 'V1', ( v2n, v, v1n ) ),
    ( qd = qe - qs, ( 0, qen, qsn ) ),
    ( d ( h ) = minc ( qd ), ( 0, 0 ) ) ] ).

```

```

plano ( 1, [
    d ( qs ) = d ( h ) / sqrth,
    d ( 'V1' ) = d ( h ),
    d ( 'V2' ) = -d ( 'V1' ),
    d ( qd ) = d ( qe ) - d ( qs ),
    d ( d(h) ) = d ( qd ) ] ).

```

Esta estructura cualitativa se refleja en la Figura 7.13. Con los espacios cualitativos que hemos empleando, las funciones `minc(.)` y `sqrt(.)` del modelo cualitativo podrían reemplazarse directamente por igualdades. En este caso, los valores correspondientes de la ecuación llevarían toda la información necesaria para relacionar los espacios cuantitativos respectivos. Hay que tener en cuenta sin embargo, que esta transformación no sería válida si fuéramos a especificar los valores reales de los puntos cualitativos nominales en los espacios, dado que la igualdad no tiene aplicación sobre el dominio real. Hemos aplicado esta transformación al plano 1 anterior, pero dejamos las funciones en el plano 0 por motivo de completitud.

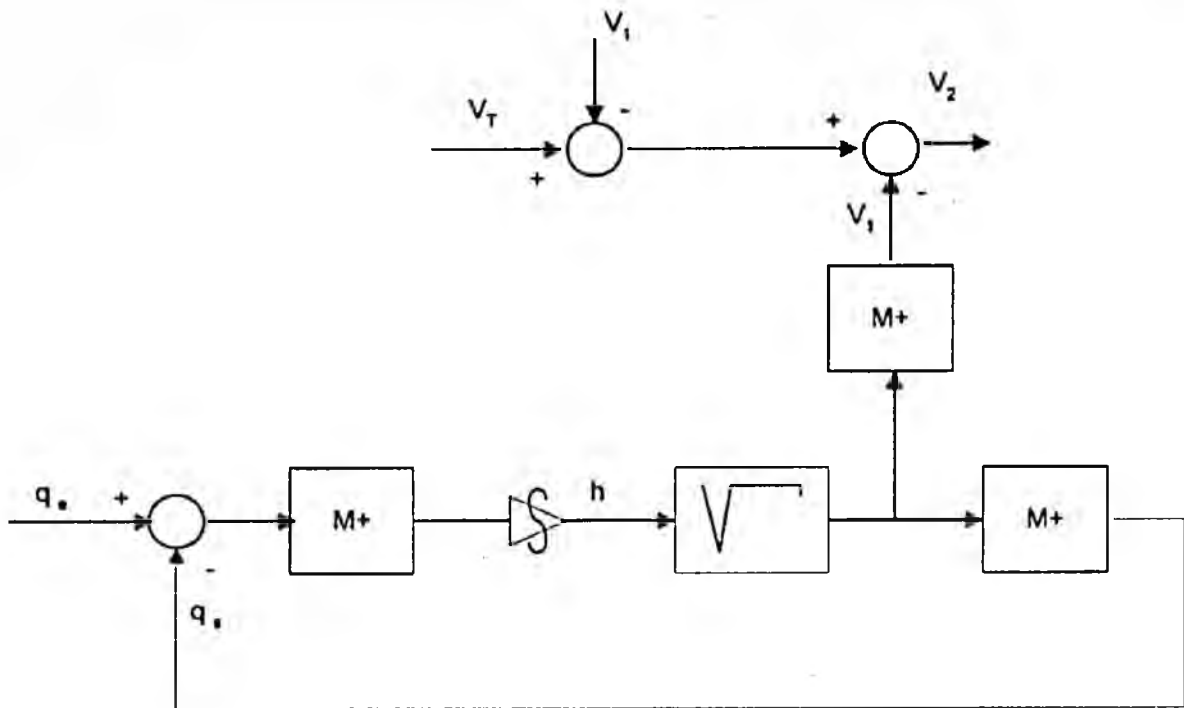


Figura 7-13: Estructura Cualitativa del Flujo

V12	v		
qe'	0		
qe	t1	(qen,&)	
h''	0	t1	t3
h'	0	t1	t3
h	0	+	0
h	hn	(hn,&)	
sqrth	srhn	(srhn,&)	
qs'	0	t1	t3
qs	0	+	0
qs	qsn	(qsn,&)	
V1'	0	t1	t3
V1	0	+	0
V1	v1n	(v1n,&)	
V2'	0	t1	t3
V2	0	-	0
V2	v2n	(0,v2n)	
qd'	0	t1	t3
qd	0	-	0
qd	0	+	0

Figura 7-14: Flujo: respuesta a un escalón.

Se introduce un salto positivo en q_a en el instante simbólico t_1 . La respuesta cualitativa generada por el Algoritmo Predictivo se muestra en la Figura 7-14. Hay que tener en cuenta que entre t_1 y t_2 hay dos transiciones posibles: $\frac{dh}{dt}$ y q_d . El subconjunto de transiciones $\left\{\frac{dh}{dt}\right\}$ no es válido porque $\frac{dh}{dt}$ está originado por q_a en el plano 0 del modelo; la propagación del valor positivo persistente de q_a afecta al pasado de $\frac{dh}{dt}$ invalidando la hipótesis mediante la correspondiente comprobación de validez. Los otros dos posibles subconjunto de transiciones $\{q_d\}$ y $\left\{\frac{dh}{dt}, q_d\right\}$ conducen ambos a la misma respuesta cualitativa que representada en la Figura 7-14.

7.3.2.- Ciclo de temperatura

El modelo de ecuaciones diferenciales que empleamos como punto de partida es el siguiente:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{Q - q_1 \rho c (T_1 - T_R)}{\rho c V_1} \quad (12)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{q_a \rho c (T_1 - T_2)}{\rho c V_2} \quad (13)$$

$$T_R = T_2 + \frac{U(T_2 - T_A)}{q_a \rho c} \quad (14)$$

donde:

- Q Calor aplicado al tanque
- T_1 Temperatura del fluido que abandona el tanque
- T_2 Temperatura del fluido que abandona el sumidero
- T_R Temperatura del fluido que abandona el radiador
- T_A Temperatura ambiente
- ρ Densidad del fluido en el proceso
- c Calor específico del fluido en el proceso
- U Coeficiente térmico del radiador

Vamos a aplicar este modelo a la instalación anterior, suponiendo que se ha alcanzado previamente el estado de equilibrio, y emplearemos los espacios cuantitativos adecuados para cada variable. Supondremos que las variables q_0 , q_3 , V_1 y V_2 son constantes, considerado desacoplados el ciclo del flujo del fluido del ciclo de temperaturas. Queremos simular la respuesta cualitativa del ciclo de temperatura (aislado) a un salto positivo aplicado en el entrada de calor Q . Por lo tanto, especificaremos nuestro modelo cualitativo incluyendo el primer plano diferencial. El modelo que empleamos puede encontrarse en el fichero 'modelos/inter/temperatura_1' del directorio del Motor Predictivo:

```

espacio_cuantitativo ('Q', [(0,qn), qn, (qn,&)]).
espacio_cuantitativo ('T1', [(0,t1n), t1n, (t1n,&)]).
espacio_cuantitativo ('T2', [(0,t2n), t2n, (t2n, &)]).
espacio_cuantitativo ('TR', [(0,tm), tm, (tm,&)]).
espacio_cuantitativo ('T1R', [(0,t1m), t1m, (t1m, &)]).
espacio_cuantitativo(dum1, [(0,d1), d1, (d1,&)]).

```

```

Plano ( 0, [
    ('TR' = minc ('T2'), (tm, t2n)),
    ('T1R'='T1' - 'TR', (t1m, t1n, tm)),
    (dum1 = minc(T1R), (d1, t1m)),
    (d('T1')='Q' - dum1, (0, qn, d1)),
    (d('T2') = 'T1' - 'T2', (0, t1n, t2n))] ).

```

```

plano( 1, [
    d('TR')=d('T2'),
    d('T1R')=d('T1') - d('TR'),
    d(d('T1'))= d('Q') - d('T1R'),
    d(d('T2')) = d('T1') - d('T2')]).

```

Hemos aplicado ciertas transformaciones para simplificar en cierta medida las ecuaciones del sistema: la multiplicación por un parámetro constante se ha reemplazado por una igualdad en las ecuaciones cualitativas. Esta estructura cualitativa aparece representada en la Figura 7-15.

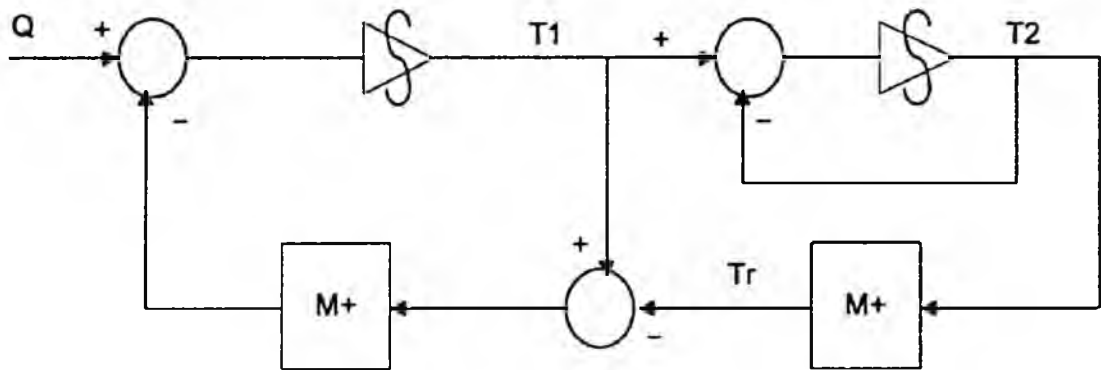


Figura 7-15 Estructura Cualitativa del Ciclo de Temperatura

El Algoritmo Predictivo genera tres comportamientos posibles para este sistema, que representamos respectivamente en las figuras 7-16, 7-17 y 7-18. De éstas, la respuesta de la figura 7-17 es similar al comportamiento obtenido en el sistema de tanques acoplados de la sección 7.2.3. Si en el plano 1 anterior hacemos la sustitución de $\frac{dT_R}{dt}$ y $\frac{dT_{1R}}{dt}$, siendo $\frac{dQ}{dt}$ idénticamente nulo, obtenemos la siguiente estructura:

$$\text{plano(1, [$$

$$d(d('T1')) = d('T2') - d('T1'),$$

$$d(d('T2')) = d('T1') - d('T2')]).$$

que es similar a la que aparecía en la sección 7.2.3 para el modelo de los tanques acoplados. En dicho sistema, la diferencia cualitativa entre las variables de estado $H_1 - H_2$ estaba asociada con la variable simple q_x ; aprovechando esta estructura en el plano 1 podíamos ordenar completamente las transiciones produciendo un comportamiento cualitativo simple. Sin embargo, en el ciclo de Temperatura la diferencia cualitativa $T_1 - T_2$ se produce en dos formas separadas y no pueden juntarse en el modelo de ecuaciones diferenciales; las transiciones anteriormente generadas por las dos formas de esta diferencia no pueden ordenarse completamente durante la simulación, y por lo tanto, se generan como posibilidades las figuras 7-16 y 7-17.

Q'	0		
Q	qen	t1 (qn,&)	
T2''	0	t1 +	
T2'	0	t1 +	
T2	hn	t1 (t2n,&)	
T1''	srhn	t1 -	t3 0
T1'	0	t1 +	
T1	qsn	t1 (t1n,&)	
TR'	0	t1 +	
Tr	v1n	t1 (tm,&)	
T1R'	0	t1 -	t3 0
T1R	v2n	t1 (t1m,&)	
dum1	0	t1 (d1,&)	

Figura 7-16 Ciclo de Temperatura: Primera respuesta a un escalón

Q'	0			
Q	qen	t1 (qn,&)		
T2''	0	t1 +	t4 0	t12 0
T2'	0	t1 +		t12 0
T2	hn	t1 (t2n,&)		
T1''	srhn	t1 -		t12 0
T1'	0	t1 +		t12 0
T1	qsn	t1 (t1n,&)		
TR'	0	t1 +		t12 0
Tr	v1n	t1 (tm,&)		
T1R'	0	t1 -		t12 0
T1R	v2n	t1 (t1m,&)		
dum1	0	t1 (d1,&)		

Figura 7-17 Ciclo de Temperatura: Segunda respuesta a un escalón

El conocimiento de los valores reales de los parámetros constantes de la ecuación diferencial puede permitir la resolución de las dos formas de la variable de estado diferencia de modo que se pueda conseguir una ordenación total de las transiciones. Alternativamente, mediante técnicas heurísticas podrían prohibirse comportamientos divergentes en los sistemas pasivos, dejando la Figura 7-17 como la única posibilidad. Estas técnicas heurísticas han de tener en cuenta el orden de la singularidad de entrada; entradas divergentes producirían respuestas divergentes. Cualquiera de estas dos soluciones posibles requerirían un trabajo adicional sobre el Motor Predictivo con el fin de implementarlas.

Q'	0		
Q	t1	(qn, &)	
T2''	0	t1	t13 0
T2'	0	t1	+
T2	hn	t1	(l2n, &)
T1''	srhn	t1	t13 0
T1'	0	t1	+
T1	qsn	t1	(l1n, &)
TR'	0	t1	+
Tr	v1n	t1	(lm, &)
T1R'	0	t1	t13 0
T1R	v2n	t1	(l1m, &)
dum1	0	t1	(d1, &)

Figura 7-18 Ciclo de Temperatura: Segunda respuesta a un escalón

El enfoque adoptado en el algoritmo QSIM [Kuipers 1986a] es emplear una restricción de curvatura para proporcionar el valor de $\frac{d^3T_1}{dt^3}$ cuando $\frac{d^2T_1}{dt^2}$ es nulo (e igualmente para $\frac{d^3T_2}{dt^3}$). Este mismo enfoque, aplicado al Motor Predictivo no serviría para invalidar ninguna de las figuras, ni la 7-16 ni la 7-18; No sabemos si QSIM generaría una sólo comportamiento cualitativo para este sistema. Sin embargo, el uso del filtro heurístico de no divergencia en el algoritmo QSIM invalidaría estos comportamientos si fueran generados.

7.4.- Complejo de la caldera de la Central de Santurce

En esta sección vamos a aplicar el Motor Predictivo al estudio de un caso real a escala industrial. El sistema que consideraremos forma parte del sistema de calderas de la Central Térmica de Santurce. La idea principal sería la utilización del Motor Predictivo para la generación de comportamientos cualitativos de sistemas físicos reales como éste. Estas respuestas cualitativas serían empleadas para el entrenamiento de los operadores de planta.

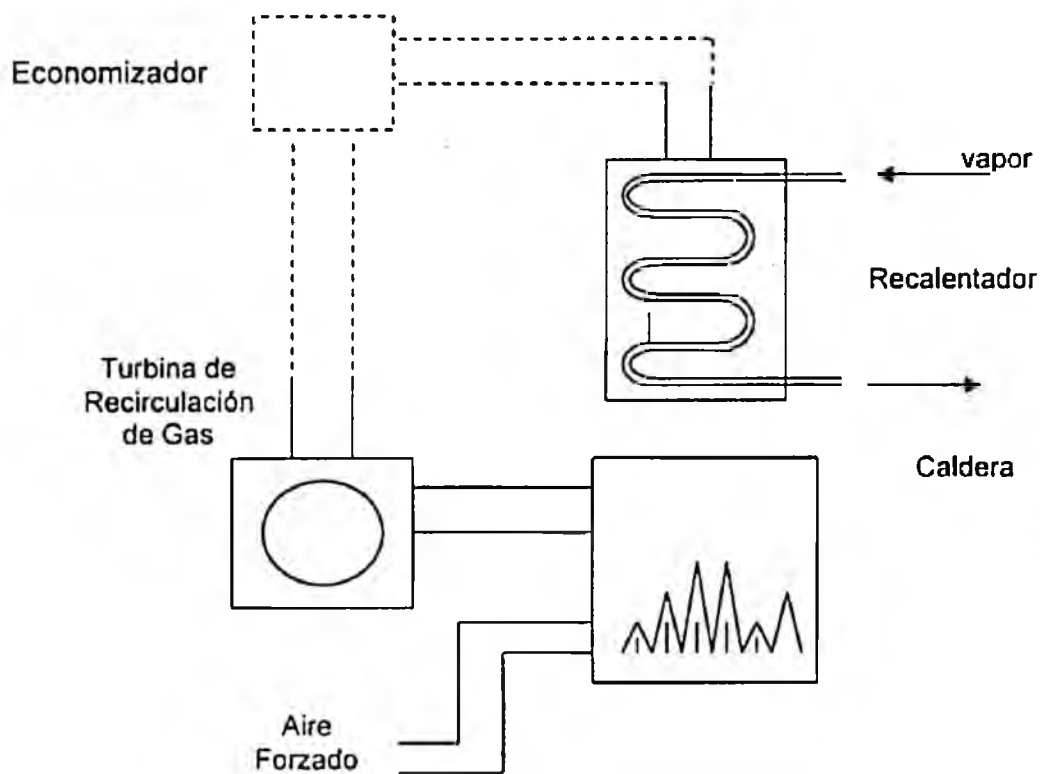


Figura 7-19 Complejo de Caldera de la Planta de Santurce

El diagrama de la figura 7-19 muestra de forma simplificada el sistema de la caldera que vamos a estudiar. El gas caliente del Horno circula por la acción de una Turbina de Recirculación de Gas. Los gases pasan a través del Intercambiador de calor donde se produce el Intercambio de calor entre el gas y el vapor de agua. El gas circula también a través de un economizador, aunque con el fin de simplificar no vamos a introducir este último elemento en nuestro modelo. El gas reciclado vuelve a la Caldera, donde se mezcla con una corriente de aire forzada antes de la combustión. La operación de la Turbina de Recirculación de Gas está controlada por un control de regulación de apertura *cra* cuyo valor puede ajustarse entre el 0 y el 100%.

Ya han sido desarrollados con anterioridad algunos modelos cuantitativos de orden bajo para este sistema, que fueron implementados por Iberdrola en el paquete de simulación numérica SIMNON. Nuestro caso de estudio tiene dos fuentes de conocimiento disponibles:

1. Los modelos de ecuaciones diferenciales de orden bajo a partir de los cuales podemos determinar las relaciones cualitativas entre las variables del sistema.
2. Los resultados de la simulación SIMNON, a partir de los cuales puede obtenerse información empírica que sirva para evitar ambigüedades cualitativas.

Los modelos de SIMNON están organizados en cuatro subsistemas: Turbina de Recirculación de Gas, Entrada al Intercambiador de Calor (Caldera), Gas del Intercambiador y Vapor del Intercambiador. De estos subsistemas, dos son modelos de orden cero (la Turbina de Recirculación de Gas y el Gas del Intercambiador). Por lo tanto, dividiremos el caso a estudiar en dos subsistemas:

- Turbina de Recirculación de Gas que comprende los modelos de SIMNON de la Turbina de Recirculación de Gas, y la Entrada al Intercambiador (Caldera).
- Intercambiador que comprende los modelos), Gas del Intercambiador y el Vapor del Intercambiador.

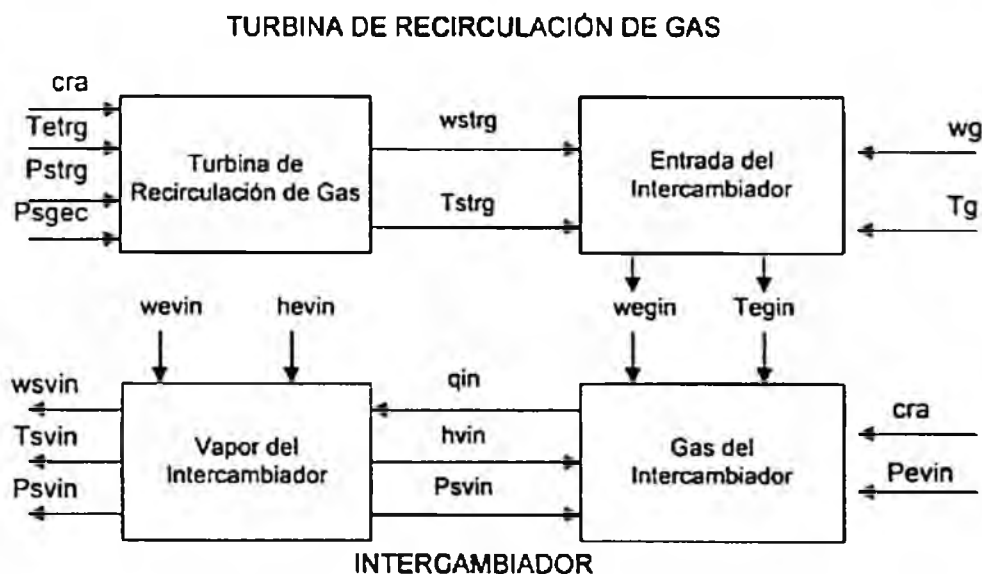


Figura 7-20 Relación entre los Subsistemas de la Caldera

En la Figura 7-20 mostramos la relación entre los modelos de la Turbina de Recirculación de Gas y el intercambiador. Los resultados que se han obtenido de la simulación numérica (empleando datos tabulares para las variables de entrada) aparecen representados gráficamente en el apéndice C; aunque el lector de esta tesis no esté interesado en este grado de detalle, puede ser una fuente de información empírica muy útil.

7.4.1.- Modelo SIMNON de la Turbina de Recirculación de Gas

El punto de arranque para nuestra consideración del modelo de la Turbina de Recirculación de Gas (TRG) es el siguiente modelo de simulación numérica:

$$A_2 = \frac{Acra}{100} \quad (15)$$

$$DP_2P_1 = Pstrg - Psgec \quad (16)$$

$$wstrg = \begin{cases} \frac{DPtrg - DP_2P_1}{\frac{1}{K_2A_2} + \frac{2}{K_1A}}, & \text{si } A_2 > 0 \\ 0, & \text{si } A_2 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$DP_d = \begin{cases} \frac{wstrg}{K_2A_2}, & \text{si } A_2 > 0 \\ DPtrg - DP_2P_1, & \text{si } A_2 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$Tstrg = Tetrg \quad (19)$$

$$wegin = wg + wstrg \quad (20)$$

$$Tegin_0 = \frac{Tgwg + Tstrg * wstrg}{wegin} \quad (21)$$

$$\frac{dTegin}{dt} = \frac{Tegin_0 - Tegin}{Ts} \quad (22)$$

donde:

cra	Control de regulación de apertura (%)
$A=176.22$	Area de las tuberías de la Turbina de Recirculación de Gas (ft ²)
A_2	Area del regulador de control de apertura (ft ²).
P_{strg}	Presión de salida del gas de la TRG (PSI)
P_{sgec}	Presión de salida del gas del economizador (PSI)
DP_2P_1	Diferencia de presiones a través del TRG (PSI)
w_{strg}	Flujo de salida del gas del TRG (lb/seg)
$DP_{trg}=4.857$	Diferencia de presiones en el TRG (PSI)
DP_d	Diferencia de presión en el control de apertura (PSI)
$K_1=0.273$	Constante (seg-1)
$K_2=0.223$	Constante (persec)
T_{etrg}	Temperatura de entrada del gas al TRG (° celsius)
T_{strg}	Temperatura de salida del gas del TRG (° celsius)
w_g	Flujo de aire forzado (lb/seg)
w_{egin}	Flujo de entrada de gas al Intercambiador (lb/seg)
T_g	Temperatura del aire forzado (° celsius)
T_{egin}	Temperatura del gas que entra al Intercambiador (° celsius)
T_{egin_0}	Temperatura del gas a la entrada al Intercambiador (° celsius)
$T_s=180$	Constante de tiempo (seg)

7.4.2.- Modelo SIMNON del Intercambiador

El punto de inicio para nuestra consideración del subsistema del Intercambiador en estudio es el siguiente modelo de simulación numérica:

$$aux = Tegin + cra \quad (23)$$

$$RTegin = 18 * aux + 49167 \quad (24)$$

$$Tvin = 0.07399 \frac{(Pevin + Psvin)}{2} + 192233 * hsin - 1494.83535 \quad (25)$$

$$qin = \frac{Ain + Kin(RTegin - Tgin)}{1 + \frac{1000Kin}{Cgr * wegin}} \quad (26)$$

$$kwevin = \frac{wevin}{1000} \quad (27)$$

$$Tsvin = \frac{1985568 * hsvin + 149.759 * dvin - 587.41}{1 + 0.06911 * dvin} \quad (28)$$

$$CTsvin = \frac{Tsvin - 49167}{18} \quad (29)$$

$$Psvin = -0.01008 * hsvin - 84.35181 * dvin + 0.64091 * dvin.Tsvin + 17.46638 \quad (30)$$

$$wsvin = \frac{K3 + Psvin}{\sqrt{Tsvin}} \quad (31)$$

$$\frac{ddvin}{dt} = \frac{kwevin - wsvin}{Vin} \quad (32)$$

$$\frac{dhvin}{dt} = \frac{qin - 2 * kwevin(hvin - hevin)}{Min} \quad (33)$$

$$\frac{dhsvin}{dt} = \frac{qin - (hwevin - wsvin)(hsvin - hvin)}{Min} \quad (34)$$

donde:

<i>Tegin</i>	Temperatura del gas de entrada al Intercambiador (° C)
<i>aux</i>	Temperatura del gas de ajuste que entra al Intercambiador (°C)
<i>RTegin</i>	Temp. del gas de ajuste que entra al Intercambiador (Rankine)
<i>Pevin</i>	Presión de entrada del gas al Intercambiador (PSI)
<i>Psvin</i>	Presión de salida del gas al Intercambiador (PSI)
<i>hevin</i>	Entalpía de entrada del gas al Intercambiador (btu/lb)
<i>hsvin</i>	Entalpía de salida del gas del Intercambiador (btu/lb)
<i>hvin</i>	Entalpía media del gas en el Intercambiador (btu/lb)
<i>Tvin</i>	Temperatura media del gas en el Intercambiador (Rankine)
<i>Tsvin</i>	Temperatura de salida del gas del Intercambiador (Rankine)
<i>CTsvin</i>	Temperatura media del gas en el Intercambiador (° Celsius)
<i>wegin</i>	Flujo de entrada de gas al Intercambiador
<i>Ain=0.41</i>	Constante (Kbtu/seg)
<i>Kin=1.9096</i>	Constante (Kbtu/seg Rankine)
<i>Cgr=0.255</i>	Constante (btu/lb Rankine)
<i>qin</i>	Tasa de transferencia de calor del gas al vapor en el Intercambiador (Kbtu/seg)
<i>wevin</i>	Flujo de entrada de vapor al Intercambiador (lb/seg)
<i>kwevin</i>	Flujo de entrada de vapor al Intercambiador (Klb/seg)
<i>wsvin</i>	Flujo de salida de vapor del Intercambiador (Klb/seg)
<i>dvin</i>	Densidad del vapor en el Intercambiador (lb/ft ³)
<i>K3=0.03179</i>	Constante (Klb Rankine / seg PSI)
<i>Vin=5.39588</i>	Constante (Kft ³)
<i>Min=202.363</i>	Constante (Klb)

7.4.3.- Turbina de Recirculación de Gas: modelo cualitativo y respuesta

Queremos considerar la respuesta cualitativa de este subsistema a un cambio en escalón en las variables de entrada P_{strg} , P_{sgcc} , cra , T_{strg} , wg y Tg . Supondremos que el sistema se inicializa en un punto nominal asociado con un valor del cra del 50%. Para evitar un nivel de detalle innecesario en el modelo cualitativo, omitiremos las derivadas de las variables de entrada del plano 1 puesto que se sabe que son iguales a 0. Discutiremos en primer lugar cómo obtener las relaciones cualitativas a partir de las ecuaciones (15) al (22) inclusive.

La ecuación (15) nos permite omitir A_2 , a partir del modelo, empleando cra en su lugar. Las ecuaciones (16), (19), (20) y (22) seguirán tal cual. Para la ecuación (17) crearemos unas variables ficticias en el numerador y el denominador, y tendremos especial cuidado en evitar las divisiones entre ∞ cuando $wstrg$ toma el valor 0. La ecuación (18) puede reescribirse como sigue sustituyendo $wstrg$:

$$DPd = \frac{DP_{trg} - DP_2 P_1}{1 + \frac{2K_2 A_2}{K_1 A}} \quad (18.1)$$

Empleamos variables ficticias para este numerador y denominador. En la ecuación (21) sustituimos $wegin$ y determinamos el efecto sobre $Tegin_0$ de los cambios de Tg , $Tstrg$, wg y $wstrg$ individualmente, es decir, con las otras tres variables constantes con sus valores nominales. Mediante Inspección, encontramos lo siguiente:

$Tegin_0$ aumenta cuanto Tg aumenta

$Tegin_0$ aumenta cuando $Tstrg$ aumenta (con $wstrg > 0$)

A partir de los datos gráficos incluidos en el apéndice C podemos ver que $Tg > Tstrg$, de modo que sin pérdida de generalidad podemos sustituir en la ecuación Tg y $Tstrg$ por sus valores nominales ($Tg = 620$ y $Tstrg = 420$), con lo que tenemos:

$$Tegin_0 = \frac{620 * wg + 420 * wstrg}{wg + wstrg} \quad (21.1)$$

A partir de los datos gráficos tenemos también que $wg > wstrg$ con valores nominales de $wg = 530$ y $wstrg = 30$. Sustituyendo $wstrg$ por 30:

$$Tegin_0 = \frac{620 \cdot wg + 12600}{wg + 30} = 620 - \frac{6000}{wg + 30}$$

Sustituyendo wg por su valor, 530:

$$Tegin_0 = \frac{328600 + 420 \cdot wstrg}{wstrg + 530} = 420 - \frac{106000}{wstrg + 530}$$

Inspeccionado estas expresiones podemos concluir lo siguiente:

Tegin aumenta si *wg* aumenta (con $wstrg > 0$)

Tegin disminuye si *wg* disminuye

Hemos empleado los datos del apéndice C para determinar límites realistas para los espacios cuantitativos de las variables.

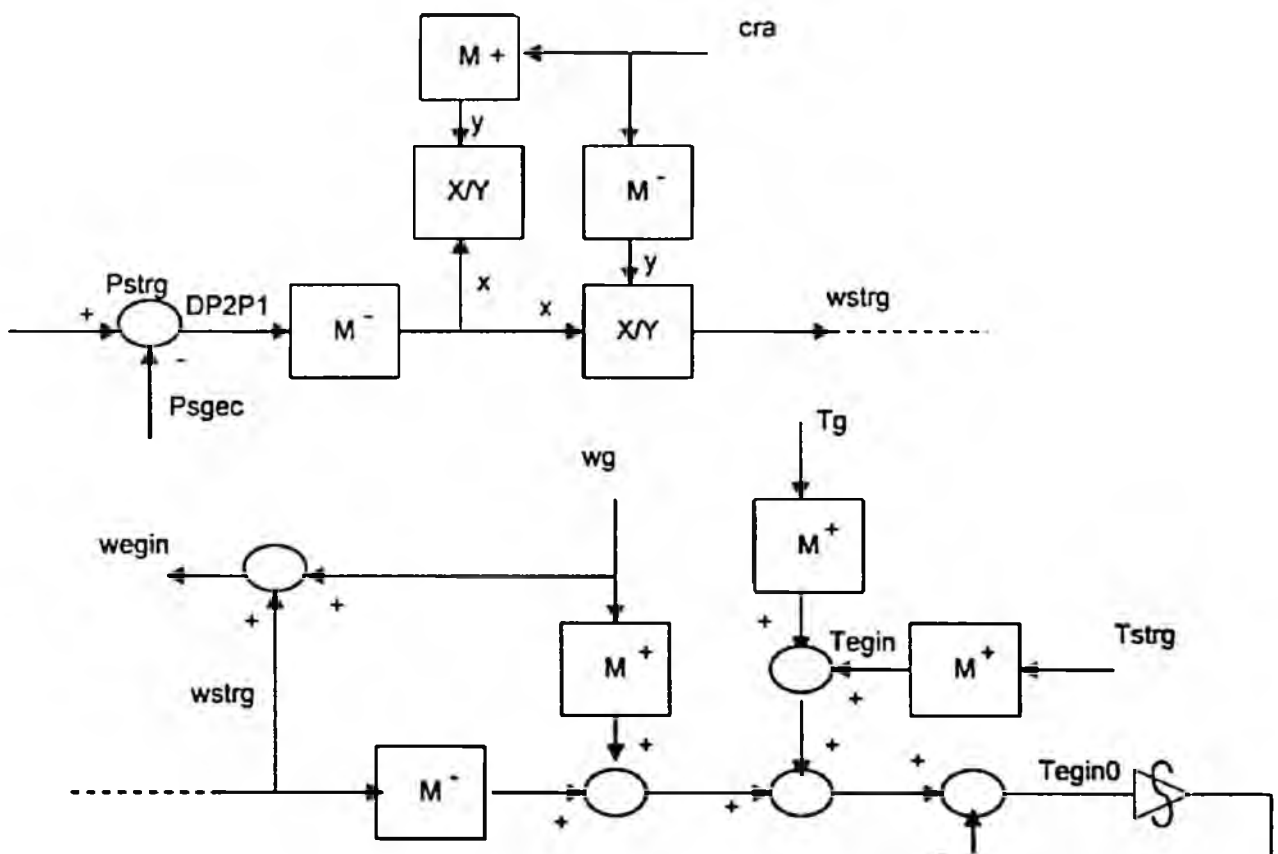


Figura 7-21 Estructura Cualitativa de la Turbina de recirculación de gas

Hemos representado la estructura cualitativa de nuestro modelo en la Figura 7-21; el modelo se encuentra en el fichero 'modelos/termica/graf0_1' del directorio del Motor Predictivo:

%entradas (de tablas)

```
espacio_cuantitativo(cra,[0,(0,50),50,(50,100),100]).
espacio_cuantitativo('Pstrg',[(1,psg),psg,(psg,12)]).
espacio_cuantitativo('Psgc',[(1,pgec),pgec,(pgec,12)]).
espacio_cuantitativo('Tetrg',[(300,tet),tet,(tet,500)]).
espacio_cuantitativo('Tg',[(400,tgg),tgg,(tgg,800)]).
espacio_cuantitativo(wg,[400,wgg),wgg,(wgg,1300)]).
```

%salidas (al Intercambiador)

```
espacio_cuantitativo('Tegin',[(200,teg),teg,(teg,800)]).
espacio_cuantitativo(wegin,[400,weg),weg,(weg,1400)]).
```

```
espacio_cuantitativo('DP2P1',[(0,p21),p21,(p21,4)]).
espacio_cuantitativo(wstrg,[0,(0,wst),wst,(wst,100)]).
espacio_cuantitativo('DPd',[(0,pd),pd,(pd,5)]).
espacio_cuantitativo('Tstrg',[(300,tst),tst,(tst,500)]).
espacio_cuantitativo('Tegin0',[(200,teg0),teg0,(teg0,800)]).
```

```
espacio_cuantitativo(dum1,[0,d1),d1,(d1,&)]).
espacio_cuantitativo(dum2,[0,d2),d2,(d2,big),big]).
restricciones(big>1000000.0).
espacio_cuantitativo(dum3,[0,d3),d3,(d3,&)]).
espacio_cuantitativo(dum4,[0,d4),d4,(d4,&)]).
espacio_cuantitativo(dum5,[0,d5),d5,(d5,&)]).
espacio_cuantitativo(dum6,[0,d6),d6,(d6,&)]).
espacio_cuantitativo(dum7,[0,d7),d7,(d7,&)]).
espacio_cuantitativo(dum8,[0,d8),d8,(d1,&)]).
espacio_cuantitativo(dum9,[0,d9),d9,(d9,&)]).
```

```

Plano ( 0, [
  ('DP2P1'='Pstrg'-Psgec', (p21,psg,pgec)),
  (dum1=mdec('DP2P1'), (d1,p21)),
  (dum2=mdec(cra), [(d2,50),(big,0)]),
  cra>0-:(wstrgf=dum1/dum2,(wst,d1,d2)),
  cra=0-:wstrg=cra

  (dum3=minc(cra), [(1,0),(d3,50)]),
  ('DPd'=dum1/dum3, (pd,d1,d3)),
  ('Tstrg'='Tetrg' tst,teg)),

  (wegin=wg+wstrg, (weg,wgg,wst)),
  (dum4=minc('Tg'), (d4,tgg)),
  (dum5=minc('Tstrg'), (d5,tof)),
  (dum6=dum4+dum5, (d6,d4,d5)),
  (dum7=minc(wg), (d7,wgg)),
  (dum8=mdec(wstrg), (d8,wof)),
  (dum9=dum7+dum8, (d9,d7,d8)),
  ('Tegin0'=dum6+dum9, (teg0,d6,d9)),
  (d('Tegin')='Tegin0'-'Tegin' (0,teg0,teg)) ]).

Plano (1, [
  d(d('Tegin'))=-d('Tegin') ]).

```

A partir de los datos empíricos del apéndice C hemos apreciar que *Pstrg* y *Psgec* siempre aumentan al mismo tiempo; esto origina en una suma de ambos una ambigüedad por la que no podemos determinar el valor de *DP2P1*. Sin embargo, también podemos ver a partir de los mismos datos que *DP2P1* aumenta a medida que aumentan *Pstrg* y *Psgec*; esto nos permite proporcionar una entrada apropiada a *DP2P1*. La respuesta cualitativa de este modelo a un cambio escalón en *DP2P1* (*Pstrg* y *Psgec*), *cra*, *Tetrg*, *wg* y *Tg* aparece en las figuras 7-22 a la 7-26 (hemos omitido en estos resultados, para mayor claridad, la historia de las variables ficticias). Los comportamientos muestran todos las típicas respuestas de los sistemas de primer orden.

Pstrg	peg	11	(peg,12)
Psgec	pgec	11	(qgec,9)
cra	50		
Tetrg	tet		
wg	wgg		
Tg	lgg		
Tegin"	0	11	12 0
Tegin'	0	11	12 0
Tegin	teg	11	(teg,800)
DP2P1	p21	11	(p21,4)
wstrg	wst	11	(0,wst)
DPd	pd	11	(0,pd)
Tstrg	tst		
wegin	weg	11	(400,weg)
Tegin0	teg0	11	(teg0,800)

Figura 7-22: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un Escalón en DP2P1

Pstrg	peg		
Psgec	pgec		
cra	50	11	100
Tetrg	tet		
wg	wgg		
Tg	lgg		
Tegin"	0	11	12 0
Tegin'	0	11	12 0
Tegin	teg	11	(200,teg)
DP2P1	p21	11	
wstrg	wst	11	(wst,100)
DPd	pd	11	(0,pd)
Tstrg	tst		
wegin	weg	11	(weg,1400)
Tegin0	teg0	11	(200,teg0)

Figura 7-23: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un Escalón en cra

Pstrg	peg
Psgec	pgec
cra	50
Tetrg	t1 (tet,500)
wg	wgg
Tg	lgg
Tegin"	0 t1 - l2 0 0
Tegin'	0 t1 + l2 0 0
Tegin	teg (teg,800)
DP2P1	p21
wstrg	wst
DPd	pd
Tstrg	tst t1 (tst,500)
wegin	weg
Tegin0	teg0 t1 (teg0,800)

Figura 7-24: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un Escalón en *Tetrg*

Pstrg	peg
Psgec	pgec
cra	50
Tetrg	tet
wg	wgg t1 (wgg,1300)
Tg	lgg
Tegin"	0 t1 - l2 0 0
Tegin'	0 t1 + l2 0 0
Tegin	teg (teg,800)
DP2P1	p21
wstrg	wst
DPd	pd
Tstrg	tst
wegin	weg t1 (weg,1400)
Tegin0	teg0 t1 (teg0,800)

Figura 7-25: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un Escalón en *wg*

Pstrg	peg		
Psgec	pgec		
cra	50		
Tetrg	tet		
wg	wgg		
Tg	t1	(tgg,800)	
Tegin"	0	t1	t2
Tegin'	0	t1	t2
Tegin	0	t1	0
	teg	(teg,800)	
DP2P1	p21		
wstrg	wst		
DPd	pd		
Tstrg	tst		
wegin	weg		
Tegin0	teg0	t1	(teg0,800)

Figura 7-26: Turbina de Recirculación de Gas: Respuesta a un Escalón en Tg

7.4.4.- Intercambiador : modelo cualitativo y respuesta

Vamos a considerar ahora la respuesta cualitativa de este otro subsistema a una cambio escalón en las variables de entrada *hvin*, *wvin*, *Tegin*, *cra*, *Pevin* y *wegin*. Supondremos que se inicializa el sistema en algún punto nominal operativo, asociado con un valor del 50% de *cra*. Para evitar detalles Innecesarios en el modelo cualitativo, omitiremos las derivadas de las variables de entrada del plano 1 puesto que sabemos que son idénticamente nulas. Además, reemplazaremos las funciones del tipo de 'min(.)' mediante Igualdades en el modelo cualitativo; por lo tanto podemos asociar valores reales a los puntos cualitativos de los espacios cuantitativos. Discutiremos ahora la derivación de las relaciones cualitativas a partir de las ecuaciones (23) a (34) inclusive.

Las ecuaciones (23) y (24) nos permiten omitir *aux* en el modelo y asociar *RTegin* directamente con *Tegin* y *cra*. La ecuación (29) se mantiene, pero necesita que Introduzcamos una variable ficticia para *Pevin+Psvin*. La ecuación (26) necesita igualmente una variable ficticia para *RTegin-Tvin*; *qrh* se incrementa a medida que *wegin* aumenta. La ecuación (27) necesita que reemplacemos *kwevin* con *wvin* en el modelo. Las ecuaciones (28) y (29) nos permite omitir *Tsvin* del modelo, pero debemos determinar las Influencias de *hsvin* y *dvin*. inspeccionando vemos que:

CTsvin aumenta a medida que *hsvin* aumenta

A partir de los datos gráficos del apéndice C podemos ver la posibilidad de sustituir *hsvin* por su valor nominal 1500. La expresión resultante presenta *CTsvin* como función de *dvin* a partir de la cual podemos determinar,

CTsvin aumenta con *dvin*

Sustituimos *Tsvin* de las ecuaciones (29) y (30) para expresar *Psvin* como función de *hsvin* y *dvin*. A partir de esta expresión podemos sustituir los valores nominales de *dvin* = 0.725 y *hsvin* = 1500 para determinar,

Psvin aumenta cuando *hsvin* aumenta

Psvin aumenta cuando *dvin* aumenta

Sustituyendo *Psvin* y *Tsvin* en la ecuación (31) se presenta *wsvin* como función de *hsvin* y *dvin*, a partir de la cual podemos determinar:

wsvin aumenta cuando *hsvin* aumenta

wsvin aumenta cuando *dvin* aumenta

La ecuación (32) se mantiene. La aparición de *qin* como una entrada aditiva en ambos ciclos de las ecuaciones (33) y (34) originaría una ambigüedad en el plano 1 donde tanto $\frac{dhvin}{dt}$ como $\frac{dhsvin}{dt}$ cambian simultáneamente de valor. Por lo tanto, reemplazaremos las ecuaciones (33) y (34) con un cálculo de la media de *hvin* y un sólo ciclo entre *hevin* y *hsvin*:

$$h\bar{vin} = \frac{hevin - hsvin}{2} \quad (33-1)$$

$$\frac{dhsvin}{dt} = \frac{qin - kwevin(hsvin - hevin)}{Min} \quad (34-1)$$

Podemos ver, a partir de la Información contenida en el apéndice C que $hsvin > hevin$, de modo que:

$$\frac{dhsvin}{dt} \text{ disminuye cuando } wevin \text{ aumenta}$$

El modelo de este subsistema se encuentra en el directorio 'modelos/termica/Intercam_1' del Motor Predictivo. La estructura cualitativa se muestra en la Figura 7.27.

```
%entradas ( de Turbina Recirculación de Gas y tablas)
espacio_cuantitativo(cra,[0,(0,50),50,(50,100),100]).
espacio_cuantitativo('Pevin',[(0,pis),pis,(pis,&)]).
espacio_cuantitativo('Tegin',[(0,teg),teg,(teg,&)]).
espacio_cuantitativo(wegin,[0,weg),weg,(weg,&)]).
espacio_cuantitativo(wevin,[0,wiv),wiv,(wiv,&)]).
espacio_cuantitativo(hegin,[0,heg),heg,(heg,&)]).

%Salidas
espacio_cuantitativo('Psvin',[(0,psv),psv,(psv,&)]).
espacio_cuantitativo('CTsvin',[(0,ctsv),ctsv,(ctsv,&)]).
espacio_cuantitativo(wsvin,[0,wsv),wsv,(wsv,&)]).
```

```

espacio_cuantitativo('Tregin',[0,rteg],rteg,(rteg,&)).
espacio_cuantitativo(hvin,[0,hv],hv,(hv,&)).
espacio_cuantitativo('Tvin',[0,tv],tv,(tv,&)).
espacio_cuantitativo(qrh,[0,q],q,(q,&)).
espacio_cuantitativo(dvin,[0,dv],dv,(dv,&)).
espacio_cuantitativo(hsvin,[0,hsv],hsv,(hsv,&)).

```

```

espacio_cuantitativo(dum1,[0,d1],d1,(d1,&)).
espacio_cuantitativo(dum2,[0,d2],d2,(d2,&)).
espacio_cuantitativo(dum3,[0,d3],d3,(d3,&)).
espacio_cuantitativo(dum4,[0,d4],d4,(d4,&)).

```

```

plano(0,[
    ('CTsvin'=hsvin+dvin, (ctsv,hsv,dv)),
    ('Psvin'=hsvin+dvin, (psv,hsv,dv)),
    (wsvin=hsvin+dvin, (wsv,hsv,dv)),
    (d(dvin)=wevin-wsvin, (0,wiv,wsv)),
    ('RTegin'='Tegin'+cra, (rteg,teg,50)),
    (hvin=hevin+hsvin, (hv,his,hsv)),
    (dum1='Pevin'+ 'Psvin', (d1,pis,psv)),
    ('Tvin'=dum1+hvin, (rs,d1,hv)),
    (dum2='RTegin'- 'Tvin', (d2,rteg,ts)),
    (qrh=dum2+wegin, (q,d2,weg)),
    (dum3=hsvin-hevin, (d3,hsv,his)),
    (dum4=wevin+dum3, (d4,wiv,d3)),
    (d(hsvin)=qrh-dum4, (0,q,d4)) ])].

```

```

plane(1,[
    d('CTsvin')=d(hsvin);d(dvin),
    d('Psvin')=d(hsvin)+d(dvin),
    d(wsvin)=-d(wsvin),
    d(hvin)=d(hsvin),
    d('Tvin')=d('Psvin')+d(hvin),
    d(qrh)=-d('Tvin'),
    d(d(hsvin))=d(qrh)-d(hsvin) ])].

```

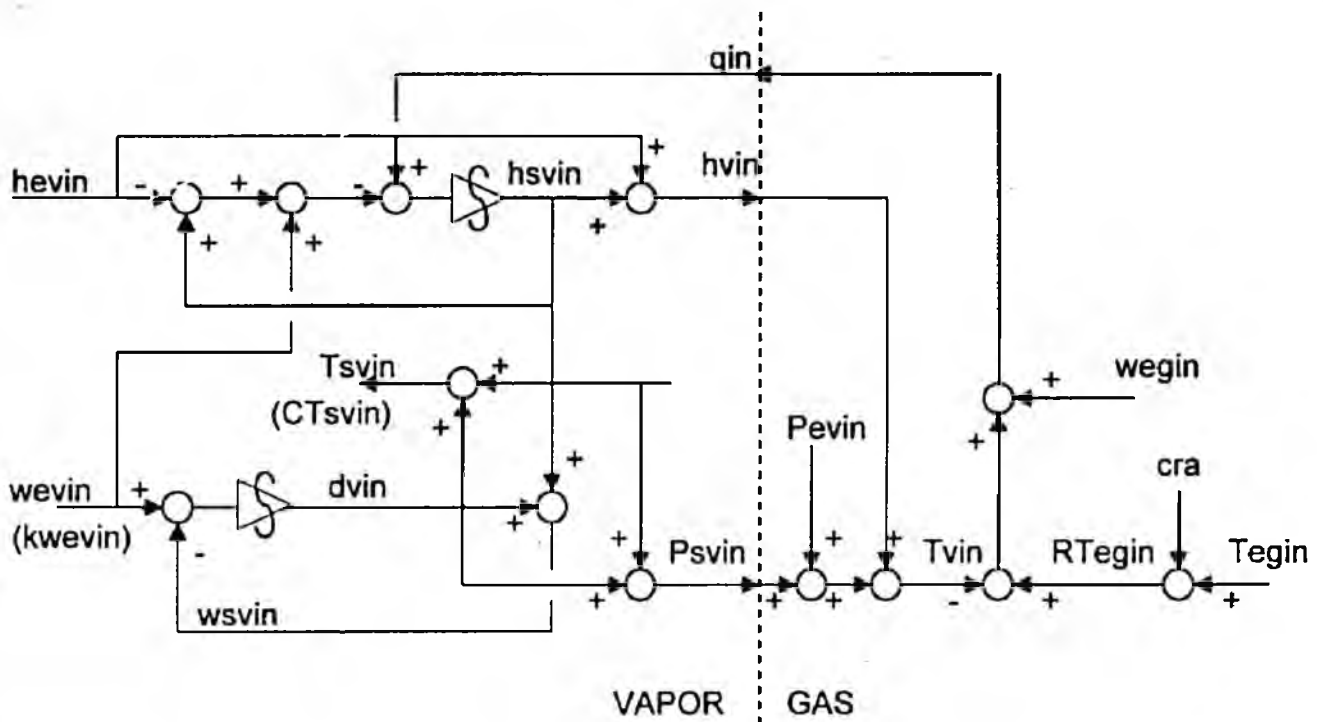


Figura 7-27 Estructura cualitativa del recalentador

Un cambio escalón en $hevin$ produce un efecto positivo en $\frac{dhsvin}{dt}$ y uno negativo, a través de $hvin$, en $Tvin$ y qin . Esta ambigüedad impide la generación de cualquier respuesta útil. Un cambio escalón positivo en $wevin$ produce un efecto positivo en $\frac{ddvin}{dt}$ y uno negativo en $\frac{dhsvin}{dt}$. Como resultado, el estado derivado de la suma $\frac{dhsvin}{dt} + \frac{ddvin}{dt}$ es ambiguo, impidiendo la generación de una respuesta.

Las entradas en las variables $Tegin$, cra , $Pevin$ y $wegin$ afectarán todas ellas a qin . Consideremos un escalón positivo aplicado a cra en el instante simbólico t , como es típico en este grupo de entradas. El estado derivado de la suma de $\frac{dhsvin}{dt} + \frac{ddvin}{dt}$ aparece al menos de tres formas diferentes en el modelo cualitativo (para $\frac{dCTsvin}{dt}$, $\frac{dPsvin}{dt}$ y $\frac{dwsvin}{dt}$). Veremos más adelante, en la sección 7.3.2, que esto está asociado con la ordenación parcial de las transiciones. En este ejemplo encontramos que el algoritmo genera un gran número de comportamientos, cada uno de ellos asociado con una ordenación total diferente

muestra la respuesta cualitativa que resulta de que primero cambie $\frac{dwsvin}{dt}$ (hemos omitido las variables ficticias y las entradas constantes en la figura).

cra	50	t1	100	
hsvin''	0	t1	-	t9
hsvin'	0	t1	+	0
hsvin	hsv	t1	(hsv,&)	
dvin''	0	t1	-	15 0 +
dvin'	0	t1	-	t9 0
dvin	dv	t1	(0,dv)	
CTsvin'	0	t1	+	t9 0
CTsvin	ctsv	t1	(ctsv,&)	
Psvin'	0	t1	+	t9 0
Psvin	psv	t1	(psv,&)	
wsvin'	0	t1	+	15 0 -
wsvin	wsv	t1	(wsv,&)	wsv
RTegin	rtcg	t1	(rtcg,&)	
hvin'	0	t1	+	t9 0
hvin	hv	t1	(hv,&)	
Tvin'	0	t1	+	t9 0
Tvin	tv	t1	(tv,&)	
qin'	0	t1	-	t9 0
qin	q	t1	(q,&)	

Figura 7-28: Intercambiador: Respuesta (1) a un escalón en *cra*.

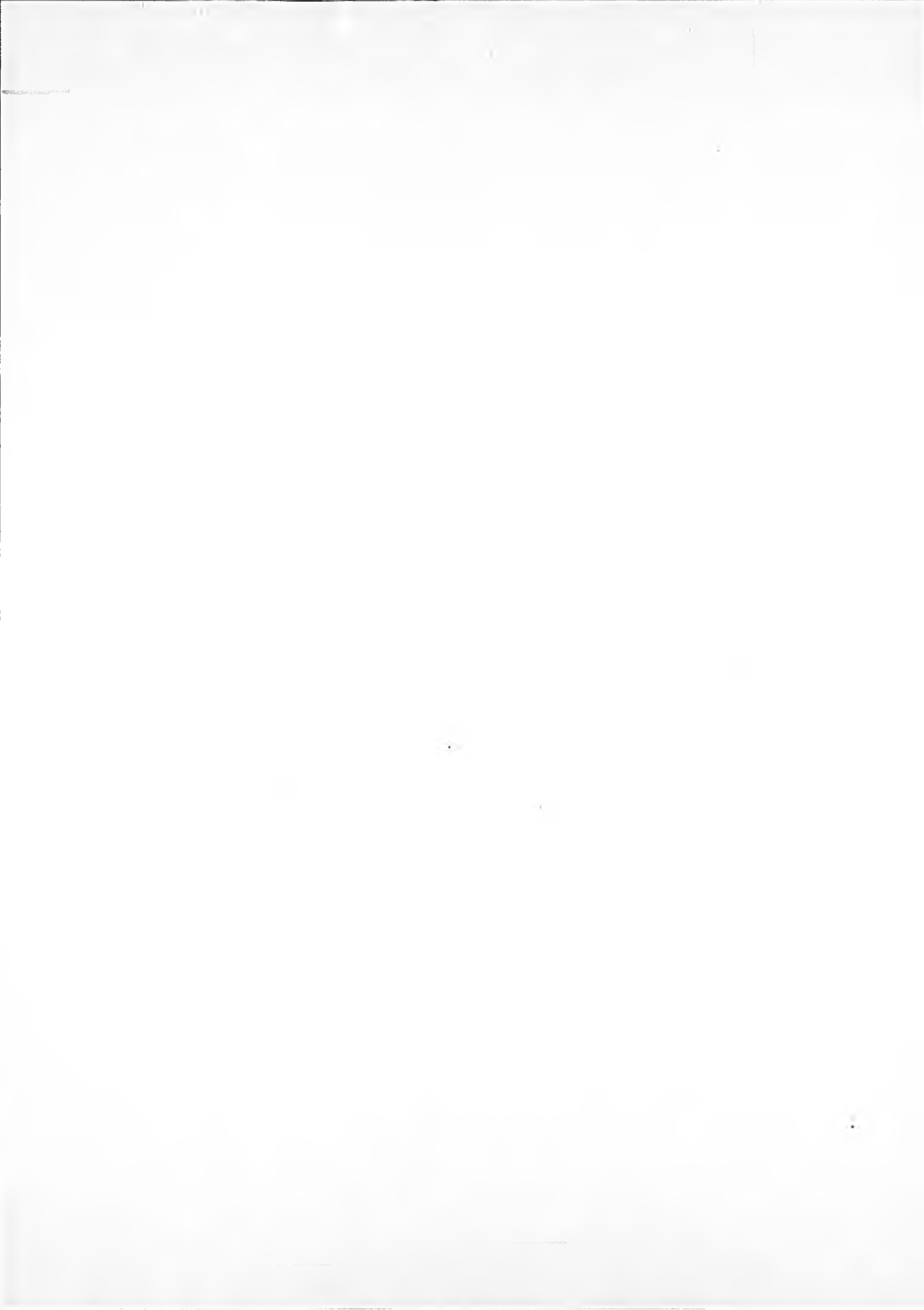
La Figura 7-29 muestra la respuesta a con una ordenación total de las transiciones diferente. Podemos apreciar que la variable *CTsvin* se calcula solo como una variables de salida, de modo que las transiciones de *CTsvin* después de *t3* puede producirse de modo Inordenable; esto incrementa de nuevo exponencialmente el número de comportamientos posibles.

cra	50	11	100		
hsvin"	0	11			116
hsvin'	0	11			0
hsvin	hsv	11			116
			(hsv,&)		
dvin"	0	11		112	116
dvin'	0	11		0 +	0
dvin	dv	11			116
			(0,dv)		
CTsvin"	0	11	13		116
CTsvin'	0	11	0 -		0
CTsvin	ctsv	11			116
			(ctsv,&)		
Psvin"	0	11		16	116
Psvin'	0	11		0 -	0
Psvin	psv	11			116
			(psv,&)		
wsvin"	0	11		112	116
wsvin'	0	11		0 +	0
wsvin	wsv	11			116
			(wsv,&)		wsv
RTegin	rteg	11			116
			(rtcg,&)		
hvin"	0	11			116
hvin'	0	11			0
hvin	hv	11			116
			(hv,&)		
Tvin"	0	11		19	116
Tvin'	0	11		0 -	0
Tvin	tv	11			116
			(tv,&)		
qin"	0	11		19	116
qin'	0	11		0 +	0
qin	q	11			116
			(q,&)		

Figura 7-29: Intercambiador: Respuesta (2) a un escalón en *cra*

Cuando se utiliza un modelo de orden bajo para representar un sistema complejo, tal y como aquí hemos hecho, a la hora de producir respuestas en una simulación cualitativa, resulta de gran importancia obtener información detallada sobre los valores reales con el fin de poder compensar la falta de representación de la estructura real en el modelo. Los modelos cualitativos se abstraen de los detalles de los valores reales, pero suele resultar frecuente, como en este ejemplo, que no se conozca la estructura del dispositivo con suficiente detalle para generar una predicción cualitativa única. La aparición de sumas de variables de estado (o diferencias) en varios puntos separados hace imposible una ordenación de transiciones, y por lo tanto no se puede reducir el número de comportamientos que el modelo genera. La solución a este problema puede ser incluir técnicas para determinar el efecto relativo de las transiciones de las

variables de estado en distintas formas de sumas (o diferencias). Por ejemplo, las expresiones de CT_{svin} , P_{svin} y w_{svin} podría analizarse de antemano para determinar su sensibilidad relativa a h_{svin} y d_{vin} , y emplear esta información durante la simulación cualitativa para determinar menos y más adecuadas ordenaciones de transiciones. Otra posibilidad sería suprimir la generación de ordenaciones totales de transiciones cuando no hay información suficiente para permitir determinarlas de forma inequívoca. Esto requeriría el uso de una fase constructiva de Ordenación de Transiciones (como la esbozada en Williams 1986a). Nuestro esquema no constructivo precisa una ordenación total sobre la que luego investigará; no hay ningún medio de fusionar las distintas ordenaciones posibles de modo que cada una de ellas genera un estado cualitativo posible.



8.- CONCLUSIONES

8.1.- Resumen

En esta tesis hemos analizado las técnicas de simulación cualitativa publicadas hasta el momento y hemos empleado los resultados de esta revisión para proponer una nueva forma de clasificar estos métodos, de acuerdo a su utilización de algoritmos constructivos o no constructivos. Tal y como hemos visto, esto supone un modo de comparar las ventajas relativas entre estos métodos considerándolos en términos de su eficiencia computacional: los algoritmos constructivos son generalmente más eficientes que los no constructivos, además de que algunas de las fases no constructivas son de una complejidad en tiempo exponencial. Además, y lo que es más importante desde el punto de vista del objetivo de esta tesis, sostenemos que esta división contribuye a esclarecer el entendimiento del área de la simulación cualitativa, especialmente en su aplicación al área del entrenamiento inteligente, donde para su utilización resulta clave la posibilidad de generar explicaciones y por lo tanto del utilizar un algoritmo de tipo constructivo.

Hemos presentado a lo largo de esta memoria la arquitectura modular de nuestro sistema de razonamiento cualitativo que sirve para satisfacer los requerimientos de generalidad y extensibilidad, pero que sobre todo ha sido fruto del estudio de las características de un sistema de simulación cualitativa que debe ser empleado en el campo de los Sistemas de Entrenamiento Inteligentes, especialmente en la enseñanza del comportamiento de los sistemas físicos.

Aunque el objetivo del Motor Predictivo sea la simulación cualitativa de sistemas continuos dinámicos, creemos que la arquitectura del sistema es lo bastante general para ser modificada sin grandes dificultades y ser utilizado en la investigación de otras técnicas de razonamiento cualitativo, tales como el análisis comparativo, si bien esta posibilidad no se ha explotado en absoluto en esta tesis. En la arquitectura hemos separado el razonamiento relacionado con los valores cualitativos del relacionado con el tiempo; este primero está gestionado por el módulo Espacio Cualitativo, mientras que el segundo es objeto del módulo Espacio Temporal. Este aspecto se ha revelado de gran utilidad para su utilización en el entrenamiento, con el fin de poder explicar la secuencia en la modificación del estado del sistema, es decir cómo y en qué orden se modifican las variables de estado del sistema.

Hemos preparado un Compilador para analizar el modelo preparado sobre el sistema y proporcionar Información al Espacio Cualitativo mediante ecuaciones algebraicas. Este Compilador se beneficia del hecho de que el algoritmo de simulación utilice una fase de propagación constructiva, y de este modo sólo es necesario crear un subconjunto de todas las álgebras basadas en intervalos. El módulo Espacio Temporal implementa una retícula de puntos de tiempo (momentos) y puede ser empleado de modo general como un sistema de razonamiento temporal basado en puntos. Sólo hemos empleado el Espacio Temporal para mantener la consistencia de la información temporal, y hemos aprovechado en parte su capacidad de hacer Inferencias sobre duraciones temporales. Específicamente, hemos empleado el Espacio Temporal para registrar la Información acerca de cuándo se producen los cambios de los valores cualitativos de las variables del sistema durante la simulación.

Los módulos Espacio Cuantitativo y Espacio Temporal emplean ambos la funcionalidad del módulo Retícula Cualitativa. Este es una implementación del razonador general basado en Inecuaciones presentado en [Simmons 1986a] que permite manejar expresiones que involucran tanto términos simbólicos como valores reales. El módulo Retícula Cualitativa proporciona al Espacio Cuantitativo la posibilidad de asociar aproximaciones de valores reales a puntos cualitativos simbólicos de los espacios cuantitativos de las variables del sistema, e integrar completamente este conocimiento cuantitativo en el proceso de razonamiento. La Información real sobre puntos temporales simbólicos también puede ser empleada de forma similar, si bien no hemos explorado esta posibilidad en esta

tesis. Puede considerarse que los módulos Espacio Cuantitativo y Espacio Temporal presentan abstracciones de la funcionalidad del módulo Red de Cualitativa.

Hemos presentado también un algoritmo de simulación que emplea esta arquitectura. El Motor Predictivo hace uso del proceso constructivo para implementar la Integración Cualitativa (y por tanto la Propagación Causal) de modo que el algoritmo pueda ser contemplado como la analogía cualitativa de la simulación numérica convencional. La fase de Ordenación de Transiciones de este algoritmo (que determina que conjunto de cambios de valores cualitativos posibles se produce en primer lugar) emplea un enfoque no constructivo que es en el peor de los casos de complejidad de cálculo exponencial. Aunque hemos revisado en la literatura algunos métodos constructivos, hemos preferido no emplearlos en el módulo de Ordenación de Transiciones por varios motivos, principalmente, porque deseamos investigar un modo natural de razonar acerca de la realimentación en los sistemas físicos.

Las ecuaciones del fichero modelo deben estar estructuradas para la operación del Algoritmo Predictivo. En la implementación de esta tesis, la estructuración es realizada manualmente por el usuario. Sin embargo, hemos reflejado la posibilidad de automatizar el proceso de escritura de las ecuaciones algebraicas del sistema empleando los resultados de un algoritmo de ordenación causal.

Hemos introducido la idea de los Planos Diferenciales de orden elevado en el fichero de modelo del sistema. El Algoritmo Predictivo hace uso de la información de estos planos para simular el comportamiento de los sistemas de orden elevado. Hemos indicado el modo en que estos planos pueden emplearse para eliminar la ambigüedad cualitativa de variables de entrada aditivas al sistema cuando dicha entrada está descrita por una función de singularidad. También hemos mostrado cómo los planos pueden ser eliminados (excluidos de consideración) para reducir el factor exponencial en la complejidad de la Ordenación de Transiciones. Estas dos observaciones nos han llevado a establecer un criterio para la inclusión de información acerca de la estructura de orden superior de los sistemas que hemos considerado.

Hemos aplicado el Motor Predictivo a algunos sistemas físicos, y hemos presentado y examinado con detalle el proceso de desarrollo de los modelos cualitativos. Los resultados que hemos obtenido muestran la importancia del razonamiento acerca del comportamiento de sistemas de orden elevado. Sostenemos que la estructuración de los sistemas de ecuaciones, y la aplicación de un ciclo constructivo de Integración Cualitativa y Propagación Causal, conduce a un modo natural de modelizar los efectos de la realimentación en el sistema. Sin embargo, el uso de una Ordenación de Transiciones no constructiva resulta costoso en esfuerzo computacional cuando no puede determinarse una ordenación total de las transiciones, dado que cada ordenación posible debe ser investigada separadamente. Los resultados que hemos presentado sugieren una clasificación de tres tipos de ambigüedad cualitativa que pueden presentarse en la estructura del sistema:

1. Operaciones algebraicas que involucran variables de entrada al sistema. En este caso, la ambigüedad debe resolverse obteniendo información empírica acerca de los resultados de la operación y empleando esta información para soslayar la ambigüedad. Por ejemplo, puede considerarse el caso de $DP2P1 = Psvtrrg - Psgec$ de la sección 7.4.1. del capítulo 7, donde empleamos los resultados experimentales para determinar el modo en que $DP2P1$ responde a los cambios en $Psvtrrg$ y $Psgec$.
2. El punto de comparación de realimentación en la estructura del sistema. Hemos indicado que la ambigüedad asociada con este punto de comparación puede resolverse restringiendo la consideración de entradas que son descritas como funciones de singularidad, y por el uso apropiado de los planos diferenciales.
3. Operaciones algebraicas que involucran variables de estado. Hemos encontrado que éstas son críticas en la capacidad de ordenación previa de transiciones en nuestro esquema no constructivo, y creemos que son también el origen de ordenaciones parciales incluso en enfoques constructivos. Los criterios que parecen ser importantes son el número de formas distintas en que están involucradas las variables de estado del sistema. Por ejemplo, en el sistema de tanques acoplados de la sección 7.2.3. del capítulo 7, empleábamos la diferencia de variables de estado $H_1 - H_2$ de forma simple como q_x . Sin embargo, en el ejemplo de la sección 7.3.2. utilizábamos la diferencia $T_1 - T_2$ en dos formas distintas que no podían ser

agrupadas. Hay un problema similar en la sección 7.4.4.. Las formas distintas están relacionadas exponencialmente con las ordenación totales alternativas de transiciones previas. Hemos demostrado que algunas veces, el método heurístico de Ignorar comportamientos divergentes puede eliminar en algunos casos estas posibilidades, de cualquier manera, debe tratarse con cuidado cualquier caso donde existan entradas divergentes. Otras técnicas pueden involucrar la utilización de información empírica para incluir más detalle acerca de las distintas operaciones algebraicas de modo que pueda determinarse la ordenación previa.

8.2.- Futuros Desarrollos

El módulo Retícula Cuantitativa no es capaz de soportar razonamiento no-monotónico. La única manera en que puede eliminarse del sistema es borrando los nodos adecuados y sus relaciones correspondientes. El desarrollo original de la retícula cualitativa de [Simmons 1986a] en el cual nos hemos inspirado para nuestro desarrollo era capaz de efectuar inferencias no-monotónicas, si bien en las referencias no se aporta ningún detalle sobre ello. Un problema que surge al implementar esta capacidad en el módulo Retícula Cualitativa es manejar los cambios no-monotónicos que se producen en los intervalos reales asociados con nodos en la retícula. Este área ha sido estudiada por [Davis 1987b], y su trabajo debería ser consultado con el fin de investigar la posibilidad de extender la funcionalidad del módulo Retícula Cuantitativa.

El Compilador del módulo Espacio Cuantitativo es actualmente bastante primitivo en su operatoria, puesto que considera cada ecuación del sistema independientemente. Cuando varias variables comparten la misma especificación de espacio cuantitativo, por ejemplo $\{-, 0, +\}$, el Compilador debe repetir la misma construcción del álgebra para varias ecuaciones. Esto es una pérdida de tiempo y podría evitarse relacionando álgebras a especificaciones particulares de espacio cualitativo en lugar de hacerlo particularmente a variables de sistema (ecuaciones).

Otro desarrollo posible del Espacio Cuantitativo y del Compilador podría ser la posibilidad de descubrir nuevos puntos cualitativos (valores marca) durante la simulación. Esto supondría utilizar el Compilador en modo on-line, lo cual presenta numerosos problemas. La generación de álgebra llevada a cabo por el compilador off-line es exhaustiva, pero de complejidad de cálculo polinomial.

Para replicar partes de esta funcionalidad en modo on-line de manera exhaustiva haría falta una capacidad de cálculo muy importante por la complejidad que supondría. Una alternativa podría ser generar sólo partes de las álgebras modificadas cuando son requeridas por la Propagación Causal. Esta alternativa no ha sido investigada en detalle y puede suponer una modificación sustancial de la funcionalidad del Espacio Cuantitativo.

El Espacio Temporal está preparado para razonar sobre duraciones temporales, construyendo la diferencia algebraica entre dos puntos temporales (momentos) en la Retícula Cuantitativa. Sin embargo no hemos hecho uso de esta funcionalidad. Las especificaciones del espacio cuantitativo para el tiempo podrían ser aportadas en el fichero modelo del sistema, habilitando las ecuaciones del sistema para ser parametrizadas en el tiempo. Esto introduciría la posibilidad de manejar sistemas que presentan retrasos temporales. Esta funcionalidad podría potenciarse por el hecho de que el Espacio Cuantitativo y el Espacio Temporal comparten el espacio de representación en el módulo Retícula Cuantitativa.

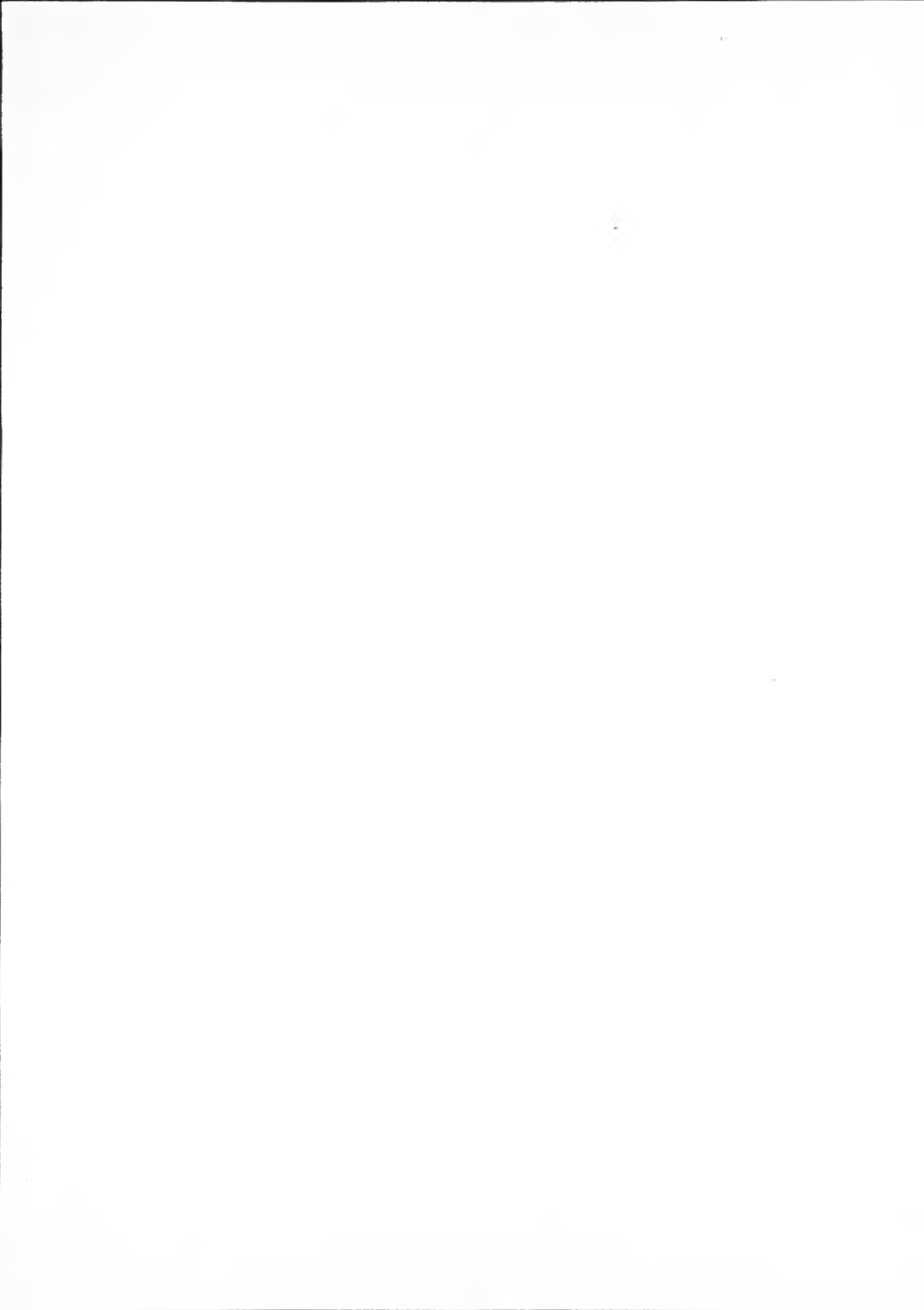
La generalidad de nuestra quinta regla de validación en la fase de Propagación Causal del Algoritmo Predictivo, presentada en la sección 7.2.3. del capítulo 7 es cuestionable. Esta comprobación impide la oscilación alrededor de 0 de las derivadas de orden elevado de una variable de estado. Si bien hemos verificado que esta comprobación es válida para sistemas lineales de segundo orden, no está probado en general, y puede ser considerado como una simple heurística. Sugerimos que deberían desarrollarse nuevas validaciones en el contexto de la verificación formal de la operación del Algoritmo Predictivo.

El uso de ecuaciones condicionales en el fichero modelo no ha sido investigado completamente. En particular, el comportamiento del sistema está restringido a ser continuo e indefinidamente diferenciable en el caso de que el estado de la ecuación se modifique durante la simulación. Esto puede prevenir el uso del mecanismo de modelizar cambios estructurales discontinuos en el sistema, y podrían realizarse futuros trabajos encaminados a eliminar esta restricción. Las ecuaciones condicionales podrían emplearse para delimitar diferentes regiones de operación en el modelo del sistema. Otro uso posible sería cambiar a una restricción de curvatura [Kulpers1987a] como alternativa a la comprobación de validez de oscilación anteriormente citada.

La aplicación del Motor Predictivo a sistemas oscilatorios no se ha presentado en esta tesis. Esto se debe principalmente a que se ya se han presentado otras investigaciones en este área que emplean métodos de simulación que permiten el descubrimiento de puntos cualitativos (valores marca), y esto no está soportado en la actualidad en nuestro sistema. Sin embargo, debemos tener en cuenta que las técnicas cualitativas de retratos de fase [Struss 1988b, Lee 1988a] no se basan en el descubrimiento de valores marca. Si el estado inicial de un sistema oscilatorio está representado por un punto cualitativo, el primer ciclo del comportamiento debería permitir la determinación de si la oscilación es creciente, estacionaria o decreciente, utilizando la heurística específica "una vez amortiguado, amortiguado para siempre".

Existe la posibilidad de que el Algoritmo Predictivo utilice Información sobre velocidades relativas de cambio de las variables del sistema (comparando las magnitudes de sus derivadas). Sin embargo, el uso de este tipo de Inferencia para permitir una Ordenación de Transiciones constructiva no se ha investigado en esta tesis. Esta posibilidad debería ser considerada en futuros trabajos. Relacionado con esto último se encuentra la posibilidad de manejar derivadas parciales en sistemas distribuidos [Weld 1988a].

Sería muy recomendable la Implementación de técnicas que posibiliten que ciertos aspectos de la Ordenación de Transiciones se desarrollen de manera constructiva. La fase no constructiva actual de la Ordenación de Transiciones representa el motivo principal de las Ineficiencias del Algoritmo Predictivo. El deseo de manejar la realimentación de los sistemas de una manera natural puede restringir la consideración de las técnicas para mejorar exclusivamente la fase de Ordenación. Incluso simplemente esto produciría mejorar sustanciales cuando sólo deben obtenerse ordenaciones temporales parciales. El principal obstáculo para Implementar reglas de ordenación de transiciones constructivas [Williams 1984a, Williams 1990a] es que sólo se han tenido en cuenta los espacios cuantitativos ($-$, 0 , $+$). Sería necesaria una fase de análisis en el Compilador para derivar reglas de ordenación de transiciones para las álgebras generales basadas en Intervalos que empleamos.



APENDICE A

EL INTERFAZ DEL MOTOR PREDICTIVO

En la versión que hemos construido del Motor Predictivo no hemos profundizado en el desarrollo de un interfaz de usuario adecuado, aspecto que sería de especial relevancia para su utilización directa en un Sistema de Entrenamiento Inteligente; entendimos que esto constituiría una fase posterior que no era relevante en este instante donde el objetivo principal era el planteamiento de la arquitectura y la prueba de sus características.

Es por ello que el interfaz de usuario trabaja en un entorno de comandos salvo para producir la representación gráfica de las salidas del módulo Mapa de Eventos.

El comando "pe" sirve para arrancar el sistema del Motor Predictivo. El interfaz con que nos encontramos es realmente adecuado para programadores, toda vez que el usuario debe estar habituado al manejo de un interfaz funcional de tipo "Tell_and_Ask" como éste para hacer uso de esta sesión. A continuación revisaremos las opciones principales de que disponemos en este interfaz, además de la opción *Salir* que nos devuelve al sistema operativo.

FICHERO MODELO

En primer lugar debemos especificar el nombre del fichero modelo que se desea procesar, bien mediante un nombre de fichero absoluto o un nombre de fichero relativo al directorio actual del usuario desde el que ejecutamos el comando "pe".

El Interfaz nos permite las opciones *Compilar* o *Cargar el fichero modelo* para compilar o cargar en el Motor Predictivo respectivamente el fichero indicado. Es necesario compilar el fichero modelo al menos una vez antes de realizar la simulación. El proceso de compilación generará cuatro ficheros objeto que permanecerán en el mismo directorio que el fichero modelo especificado. En las siguientes ocasiones, sólo será necesario cargar el fichero modelo, con lo que se accederá automáticamente a los cuatro ficheros objeto.

La carga de los ficheros puede necesitar cierto tiempo, durante el cual el Interfaz no responderá a nuevos comandos. La compilación puede requerir una cantidad de tiempo importante, dependiendo de la complejidad del fichero modelo. La recompilación sobrescribe cualquier fichero objeto existente anteriormente para el fichero modelo.

Cuando se ha cargado el fichero modelo, se muestra en pantalla el nombre del fichero modelo y una representación de los planos diferenciales, apareciendo a continuación el "prompt" del Interfaz.

INICIALIZACIÓN

Antes de que el algoritmo de simulación pueda proceder debemos inicializar el modelo cargado. Con el comando *INIT*, el Interfaz presenta al usuario un menú de inicialización de las variables del sistema. Este menú nos permite especificar el valor inicial de cualquier variable. Cuando seleccionamos una variable del menú, el Interfaz presenta el espacio cuantitativo de la variable con su valor inicial por defecto, pudiendo modificarlo a continuación. Después de inicializar de esta forma todas las variables necesarias, finalizaremos la inicialización mediante la opción *SALIR*; con ello enviaremos los datos al Algoritmo Predictivo. En la aplicación hemos considerado tomar los valores iniciales por defecto para todas aquellas variables que no hayan sido modificadas.

Después de la inicialización, el Interfaz ejecuta el Algoritmo Predictivo automáticamente. Esto asegura la consistencia de los datos iniciales con el sistema de ecuaciones, y simula entonces la evolución del sistema a partir del estado inicial especificado.

ENTRADA

Podemos modificar los valores de las variables seleccionando la opción *ENTRADA*. No estamos limitados a las variables de entrada del sistema, podemos experimentar alterando variables que normalmente no son consideradas como entradas al sistema. Al seleccionar la opción *ENTRADA*, aparece un menú con las variables del sistema, para cada una de las cuales podemos especificar cualquier valor de entrada. Cuando seleccionamos una variable, se muestra el espacio cuantitativo con el valor actual, después de lo cual podemos introducir un nuevo valor para la variable. Cuando hemos actualizado todas las variables y escogemos la opción *SALIR*, se envían los datos al Motor Predictivo. Después de introducir los nuevos valores de entrada, el Interfaz ejecuta de nuevo el Motor Predictivo de forma automática, con lo que simulamos la respuesta del sistema a una nueva entrada.

Si introducimos nuevos valores de entrada, el efecto sería simplemente ejecutar el Motor Predictivo. Siempre que finaliza el Motor Predictivo, el Interfaz nos preguntará si se desea terminar o bien ha habido algún fallo en el resultado del algoritmo. Si seleccionamos la opción *CONTINUAR*, el algoritmo terminará normalmente. Si elegimos la opción *FALLO*, el algoritmo retrocederá para buscar una solución cualitativa alternativa en una búsqueda en profundidad; el resultado es como si se descartara del Mapa de Eventos la última suposición efectuada por la Ordenación de Transiciones o la Ordenación de Prioridades.

BORRAR

Seleccionando la opción *BORRAR*, podemos excluir el plano diferencial de orden más elevado del modelo cargado. Se presentará en pantalla el nuevo modelo sin el plano eliminado y el Interfaz ejecutará el Motor Predictivo automáticamente para investigar esta nueva estructura de ecuaciones. Esto supone que sólo es necesario crear un fichero para una modelo particular; este fichero contendría el número máximo de planos que pueden ser necesarios. Una vez cargado, todos los planos que no son necesarios para la función de entrada pueden eliminarse mediante este procedimiento.

EVENTO

La opción *EVENTO* permite representar una Interpretación gráfica el contenido de la Pila de Eventos. La presentación no es Interactiva, y lo que se muestra es el estado actual de la Pila de Eventos, puesto que no se actualiza durante la ejecución del Algoritmo Predictivo. En la figura A-1 mostramos una salida gráfica generada por el Mapa de Eventos. En ella se muestra cómo han evolucionado los valores de las variables del sistema hasta su estado actual en la simulación. Por ejemplo, en la figura, la variable q_i era 0 antes del Instante t_i ; en el Instante t_i era todavía 0; e inmediatamente después de t_i pasó a ser positiva, valor que todavía persiste

qe''	0		
qe'	0	t_1	+
qe	0	t_1	+
V'''	0	t_1	t_2 +
V''	0	t_1	t_2 +
V'	0	t_1	+
V	0	t_1	+
qs''	0	t_1	t_2 +
qs'	0	t_1	+
qs	0	t_1	+

Figura A-1: Un Mapa de Eventos

Debemos tener en cuenta que las derivadas de las variables pueden representarse de formas diferentes. En el texto de esta tesis hemos representado a la derivada segunda de la variable V como d^2V/dt^2 . En el contenido textual del fichero modelo que crea el usuario, esta derivada debe representarse como "d(d('V'))"; Finalmente, en esta representación gráfica de la derivada es V'' ; esta representación de la derivada es también la que hemos empleado en la Ordenación de Transiciones y en la Ordenación de Prioridades. Este sería también un trabajo a realizar para mejorar nuestro Motor Predictivo, unificar la representación al menos de las dos últimas representaciones, lo que supondría emplear un nuevo intérprete para el fichero modelo para la nueva notación.

El examen de las historias de q_0'' , q_0' y q_0 de la figura muestran la forma cualitativa [Morgan 1988a] de la variable q_i ; la respuesta es una rampa lineal que empieza en el instante t_1 . En relación con las historias de V' , V'' , V y V_0 , vemos que después de una transición entre los instantes t_1 y t_2 , la variable cambia a una rampa lineal después de t_2 . Este ejemplo particular ya lo consideramos en la sección 7.2.1 del Capítulo 7.

MAPA

La opción *MAPA* presenta al usuario un menú con las variables del sistema. Debemos emplear este menú para especificar las variables que aparecerán en la representación gráfica del Mapa de Eventos. Por defecto, todas las variables del sistema aparecerán inicialmente en el Mapa de Eventos, y podemos emplear esta opción para centrarnos en un grupo particular de variables. Esto resulta especialmente útil para eliminar de la pantalla variables ficticias introducidas en el modelo y visualizar más adecuadamente las variables del sistema.

DETALLAR

Cada módulo de la arquitectura del Motor Predictivo tiene un *modo detallado* asociado con él. Cuando está activado este modo, se presentan en pantalla una traza con mensajes de estado. Cada mensaje de estado está predefinido con el nombre del módulo que lo originó. Seleccionando la opción *DETALLAR*, el usuario puede elegir el módulo que cambiará entre el modo detallado y el modo normal.

Los mensajes detallados de los módulos Grafo Dirigido, Retícula Cuantitativa, Espacio Cuantitativo y Espacio Temporal son muy útiles para poder depurar información que no es necesaria generalmente para el usuario. Estos modos detallados deberían estar normalmente desactivados. Los mensajes del Algoritmo Predictivo y del Mapa de Eventos proporcionan información que ilustra el algoritmo de simulación. El usuario puede encontrar útil tener estos dos módulos en modo detallado, al menos hasta que se familiarice con el algoritmo.



APENDICE B

OPERACIÓN DEL ALGORITMO PREDICTIVO

Este apéndice muestra el efecto de cada fase del Algoritmo Predictivo en respuesta a una entrada el tanque con flujo laminar presentado en las secciones 6.2.1. y 7.2.1. de los capítulos 6 y 7 respectivamente. El modelo cualitativo que hemos empleado es el siguiente:

```
plano( 0, [  
    qs = 'V',  
    d ('V') = qe - qs ] ).  
plano( 1, [  
    'V' > 0 -> d ( qs ) = d ( 'V' ),  
    d ( d ( 'V' ) ) = d ( qe ) - d ( qs ) ] ).  
plano( 2, [  
    d V2 = d ( 'V' ) * d ( 'V' ),  
    'V' > 0 -> d ( d ( qs ) ) = d ( d ( 'V' ) ) - d V2  
    d ( d ( d ( 'V' ) ) ) = d ( d ( qe ) ) - d ( d ( qs ) ) ] ).
```

La entrada aplicada a este modelo es una rampa lineal en el flujo de entrada q_e comenzando en el instante (simbólico) t_1 . Modelizamos esto aplicando un cambio en escalón en q_e' comenzando en el instante t_1 , manteniendo q_e'' idénticamente igual a 0. El contenido del Mapa de Eventos después de cada fase del Algoritmo Predictivo viene recogido en las siguientes figuras:

qe''	0	
qe'	0	11 +
qe	0	
V'''	0	
V''	0	
V'	0	
V	0	
qs''	0	
qs'	0	
qs	0	

Figura B-1: Entrada aplicada a q₀'

qe''	0	
qe'	0	11 +
qe	0	
V'''	0	11 -
V''	0	11 +
V'	0	
V	0	
qs''	0	11 +
qs'	0	
qs	0	

Figura B-2: Propagación Causal (1)

qe''	0	
qe'	0	11 +
qe	0	11 +
V'''	0	11 -
V''	0	11 +
V'	0	11 +
V	0	
qs''	0	11 +
qs'	0	11 +
qs	0	

Figura B-3: Integración Cualitativa (1)

qe''	0	
qe'	0	t1 +
qe	0	t1 +
V'''	0	t1 -
V''	0	t1 +
V'	0	t1 +
V	0	
qs''	0	t1 +
qs'	0	t1 +
qs	0	

Figura B-4: Propagación Causal (2)

qe''	0	
qe'	0	t1 +
qe	0	t1 +
V'''	0	t1 -
V''	0	t1 +
V'	0	t1 +
V	0	t1 +
qs''	0	t1 +
qs'	0	t1 +
qs	0	t1 +

Figura B-5: Integración Cualitativa (2)

qe''	0	
qe'	0	t1 +
qe	0	t1 +
V'''	0	t1 -
V''	0	t1 +
V'	0	t1 +
V	0	t1 +
qs''	0	t1 +
qs'	0	t1 +
qs	0	t1 +

Figura B-6: Propagación Causal (3)

qe''	0		
qe'	0	t1	
qe	0	t1	
V'''	0	t1	
V''	0	t1	t2
V'	0	t1	0
V	0	t1	
qs''	0	t1	
qs'	0	t1	
qs	0	t1	

Figura B-7: Reconocimiento de Transiciones

qe''	0		
qe'	0	t1	
qe	0	t1	
V'''	0	t1	t2
V''	0	t1	0
V'	0	t1	t2
V	0	t1	
qs''	0	t1	t2
qs'	0	t1	0
qs	0	t1	

Figura B-8: Propagación Causal

qe''	0		
qe'	0	t1	
qe	0	t1	
V'''	0	t1	t2
V''	0	t1	0
V'	0	t1	t2
V	0	t1	
qs''	0	t1	t2
qs'	0	t1	0
qs	0	t1	

Figura B-9: Fin del Algoritmo

APENDICE C

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA EL COMPLEJO DE LA CALDERA

En este apéndice hemos incluido algunos de los resultados obtenidos del modelo de simulación numérica desarrollado por Iberdrola para la Turbina de Recirculación de Gas y el sistema de Intercambiador de Calor de la Central de Santurce. En la sección 7.4 del capítulo 7 hemos presentado la aplicación del Motor Predictivo a este caso Industrial.

En los gráficos contenidos en este apéndice mostramos la respuesta de las variables obtenidas a partir de la simulación de los modelos que hemos reflejado en el capítulo 7.

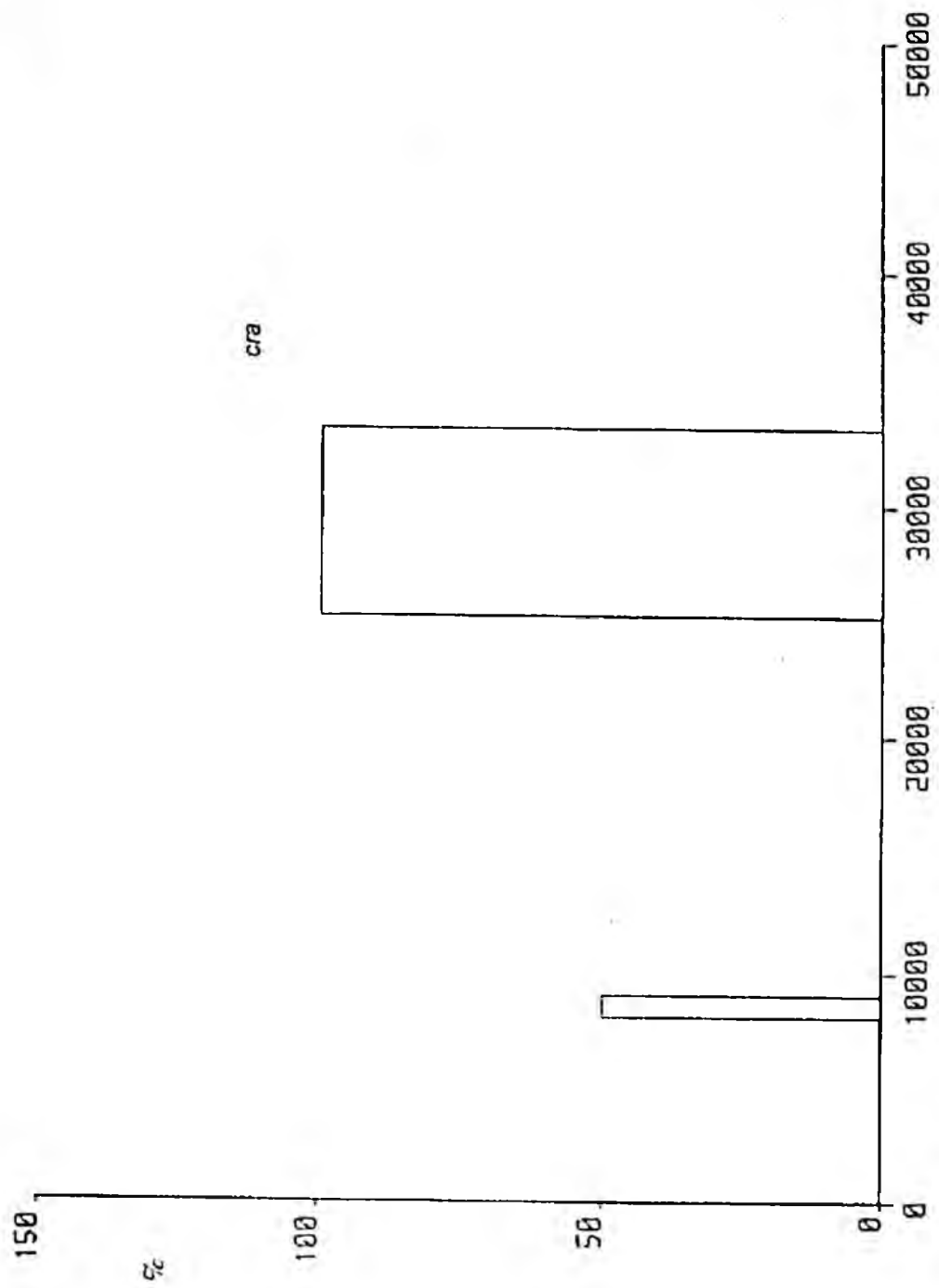


Figura C-1: Gráfico decre en %

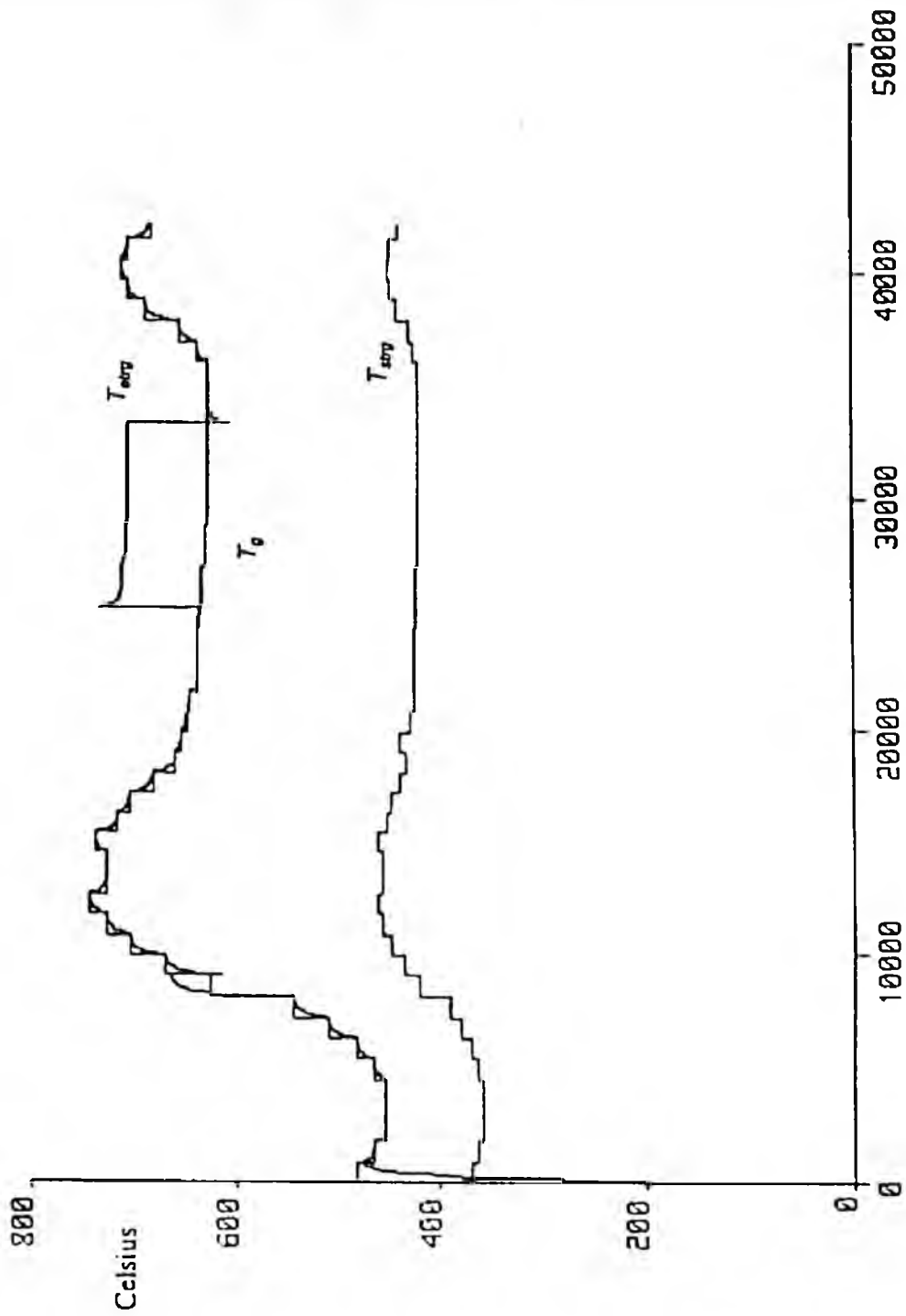


Figura C-2: Gráfico de Tetry, Tg y Tstrg en °Celsius

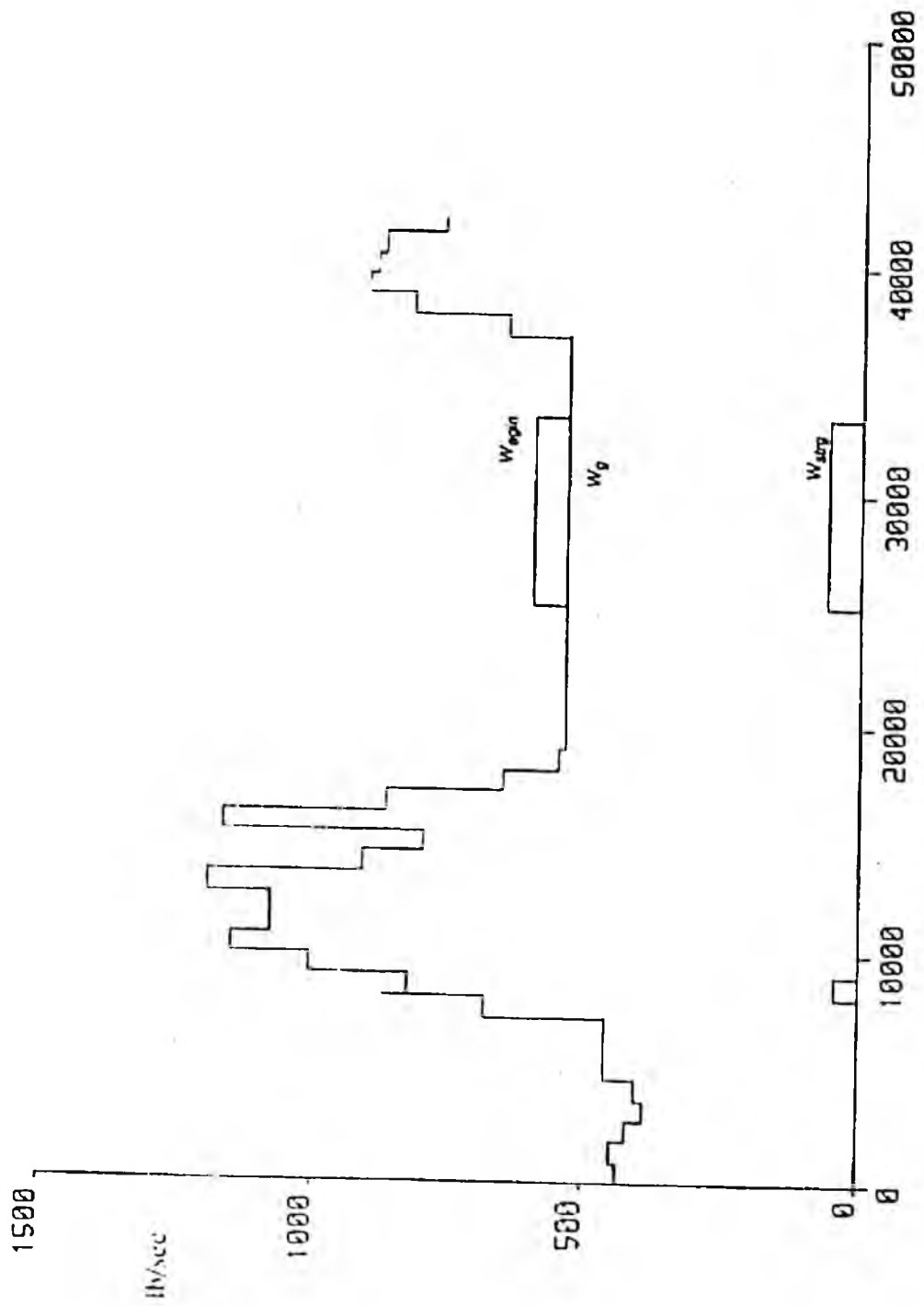


Figura C-3: Gráfico de *wegm*, *wg* y *wstrg* en lb/s

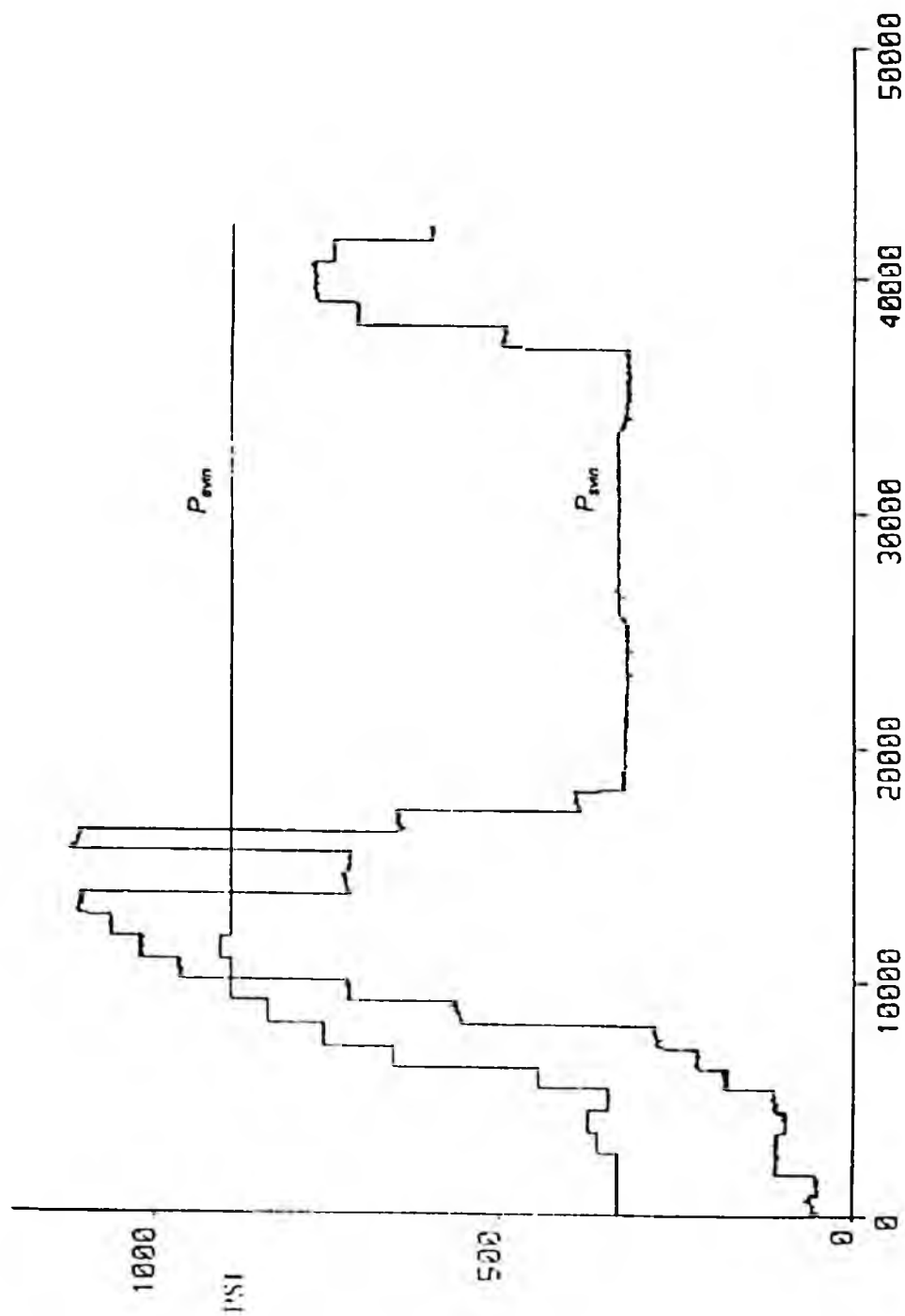


Figura C-4: Gráfico de p_{eym} , p_{svin} en PSI

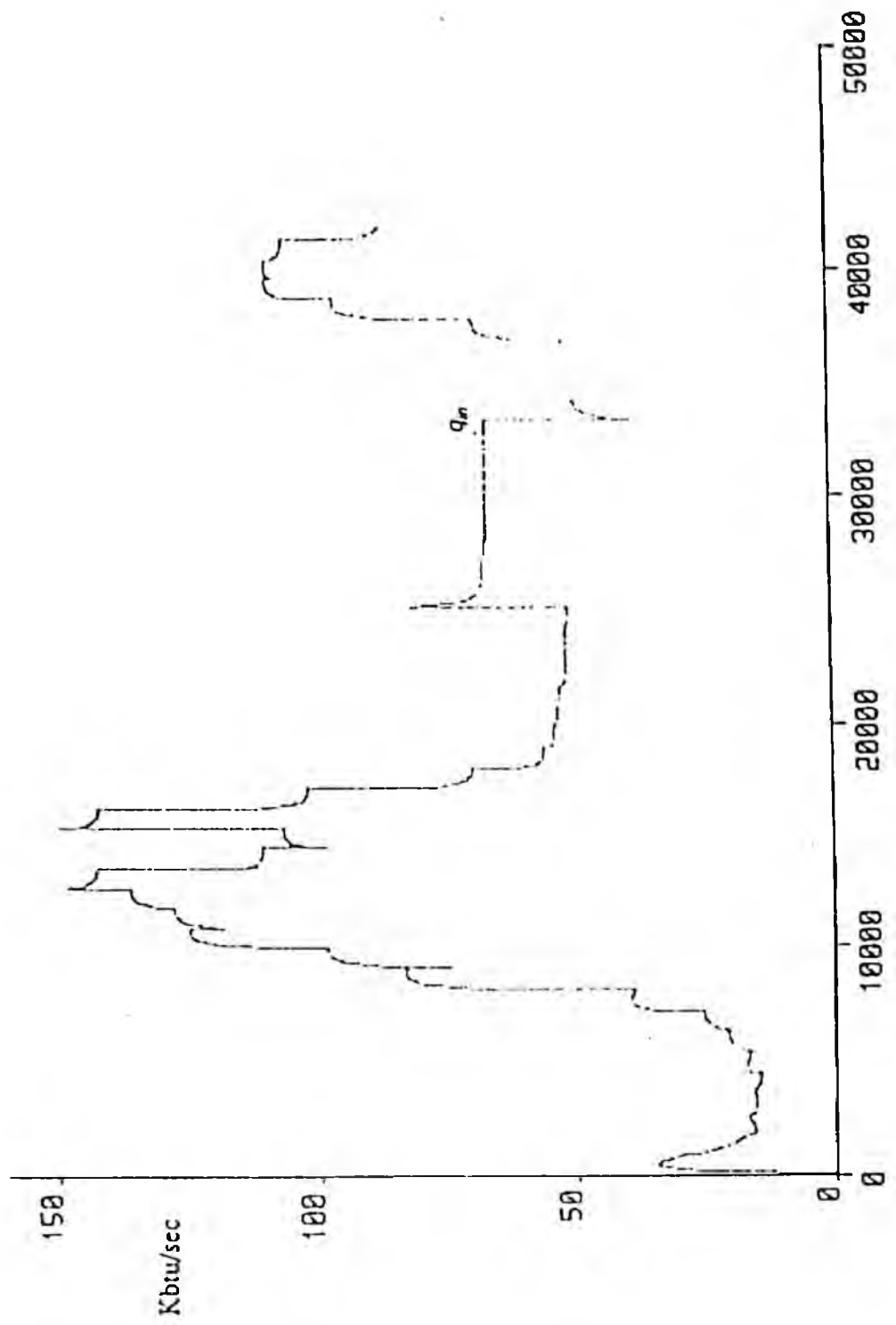


Figura C-5: Gráfico de q_n en Kbtu/s

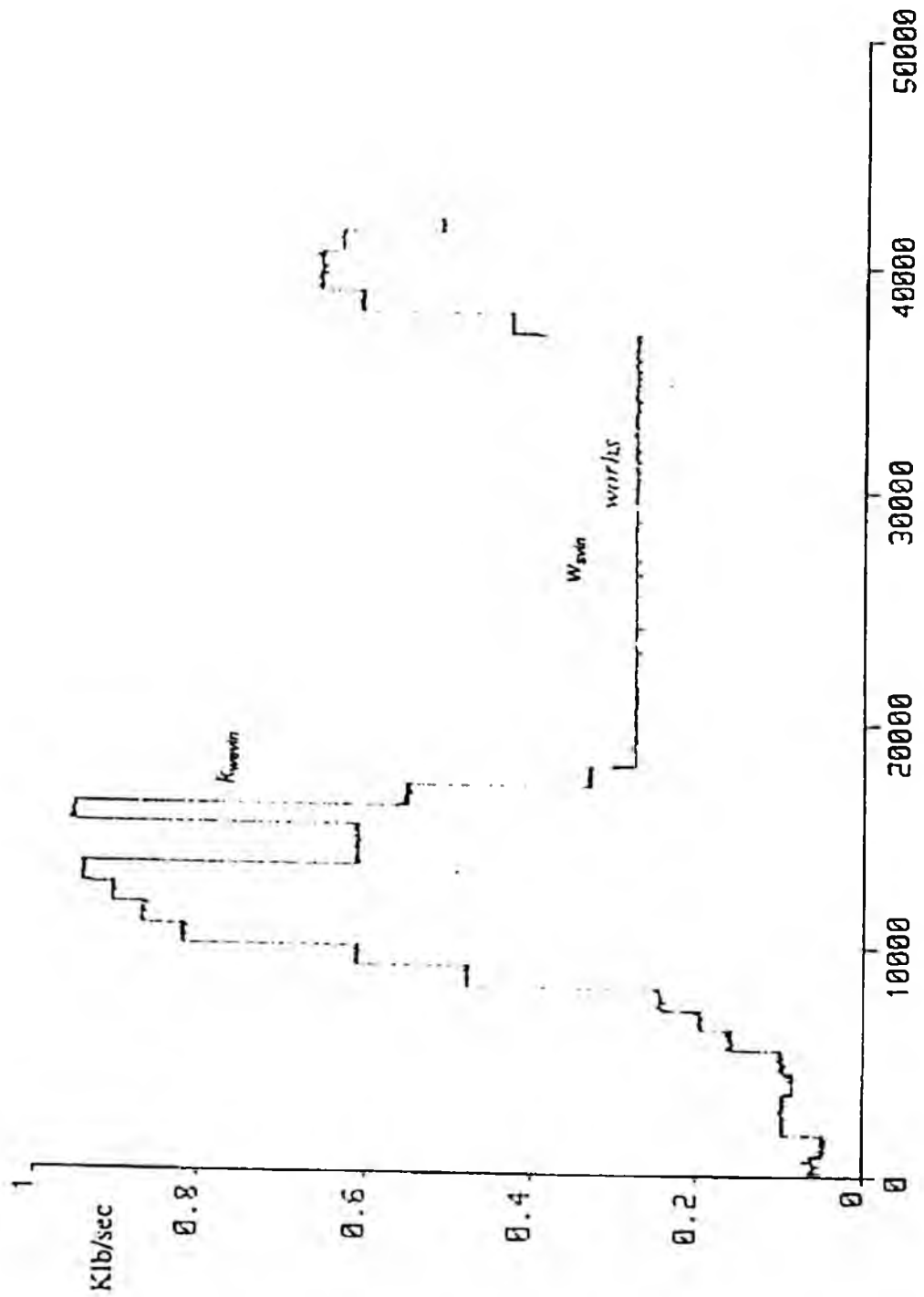


Figura C-6: Gráfico de *kwevin* y *wsvin* en Kib/s

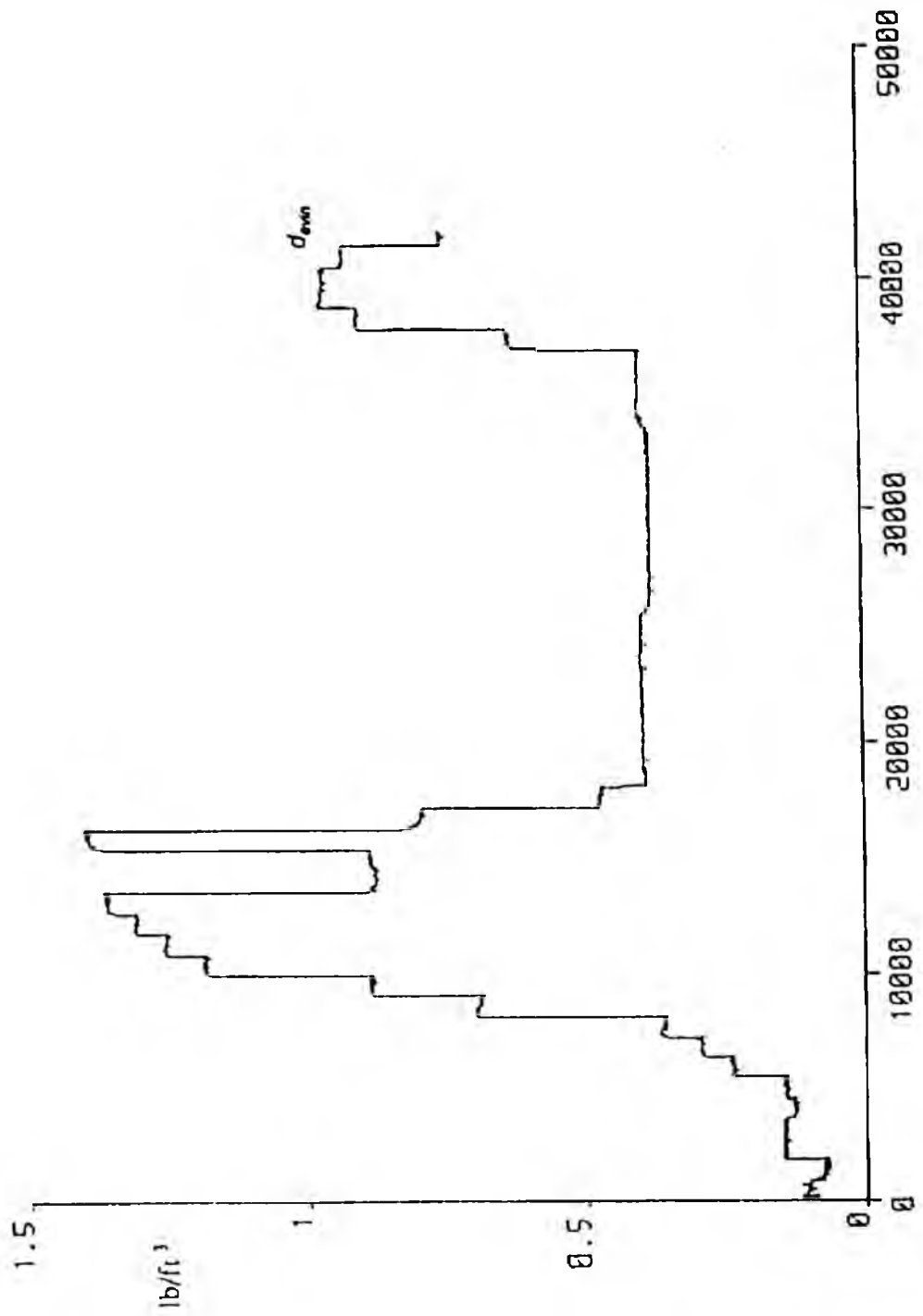


Figura C-7: Gráfico de devin en lb/ft³

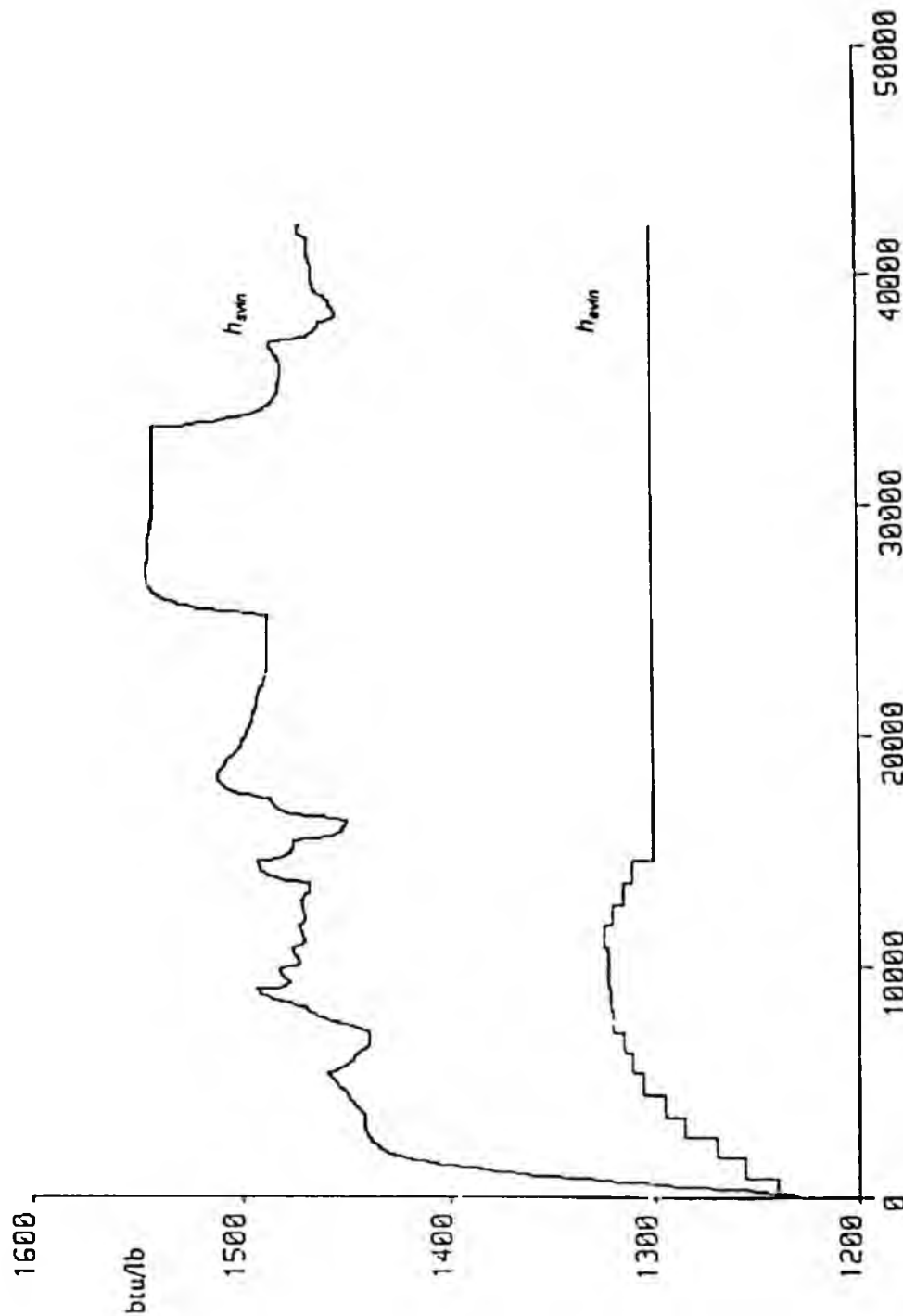


Figura C-8: Gráfico de h_{svin} y h_{vin} en %

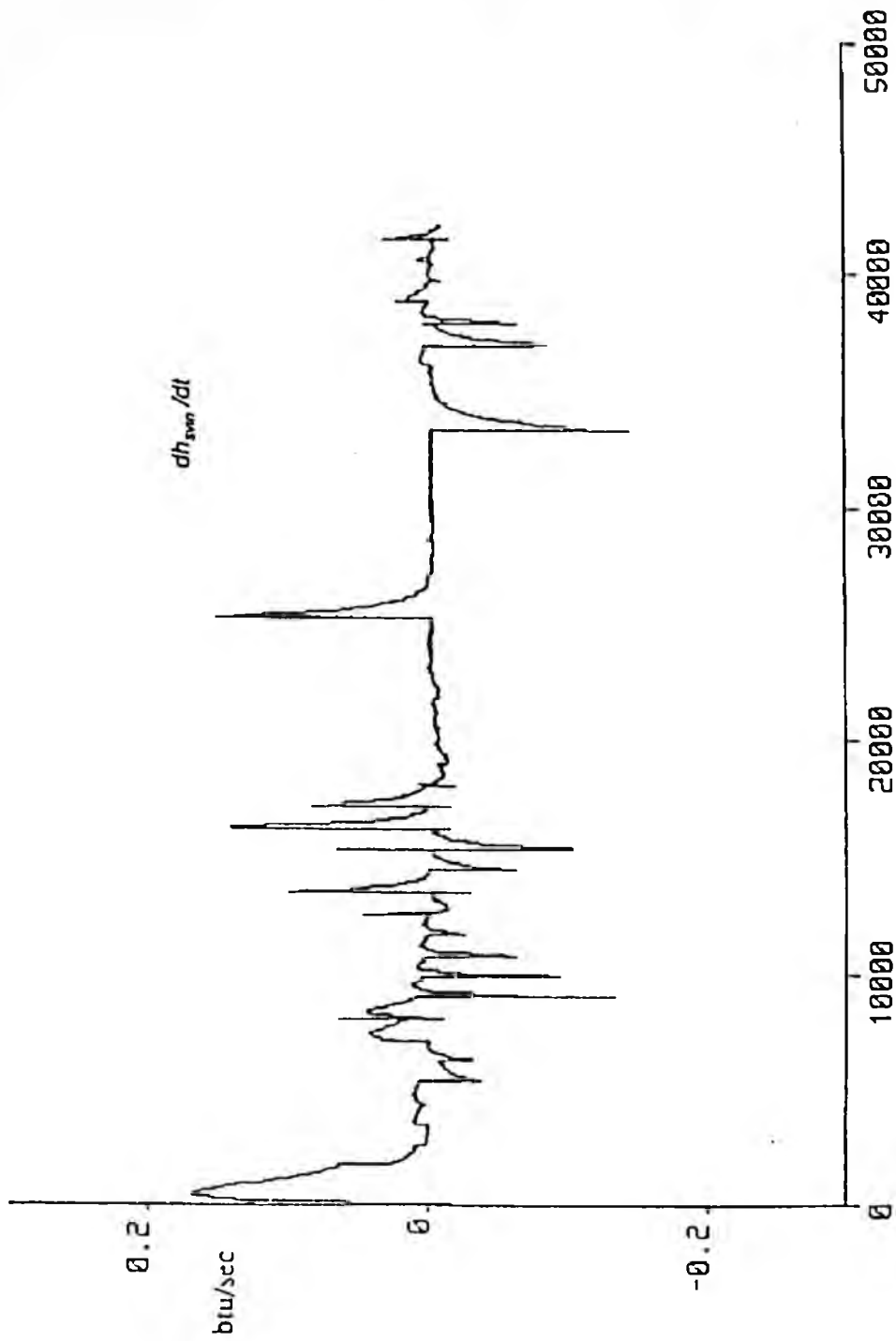


Figura C-9: Gráfico de dh_{svm}/dt en btu/s

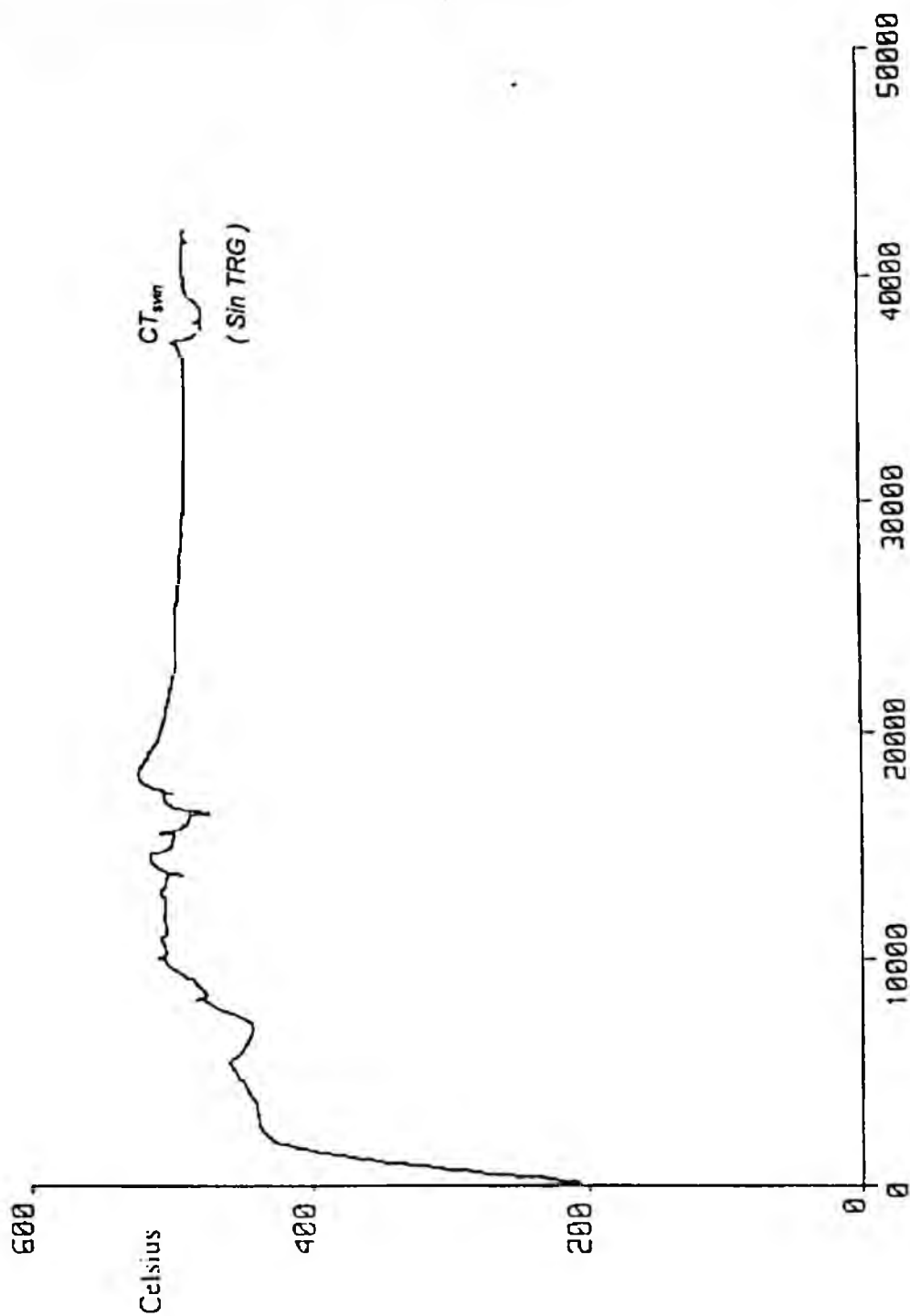


Figura C-10: Gráfico deCTsvin en °Celsius (Sin TRG)

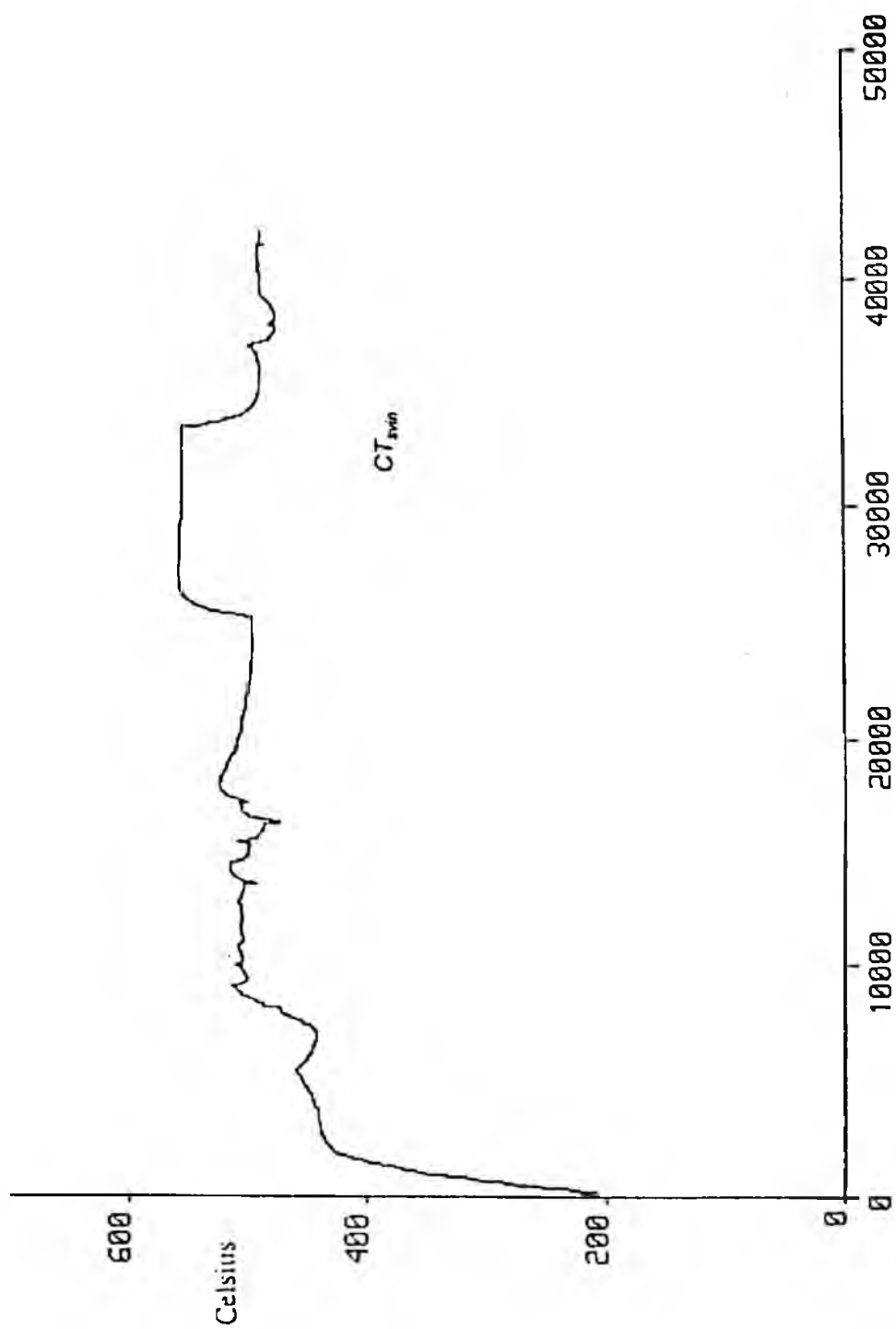


Figura C-11: Gráfico de CT_{svin} en °Celsius

BIBLIOGRAFÍA

[Acchione 1991a]

Acchione-Noel, Sylvia C. (1991) *"The Benefits of Training Radar Mechanics with an ITS"*. Proceedings of 6th International PEG Conference: Knowledge Based Systems In Teaching and Learning, Genova, Italia, 727-732.

[Addanki 1991a]

Addanki, S., Cremonini, R. & Scott Penberthy, J. (1991) *"Graphs of Models"*. Artificial Intelligence, 51, 145-177.

[Allen 1983a]

J.F. Allen, *"Maintaining Knowledge about Temporal Intervals"* Communications of the ACM, vol.26, no.11, pp.832-843, 1983.

[Bertin 1990a]

Bertin A., Burguera B., Scott D.M., 1990, *"Two Demonstrators as a Test-Bed for the Construction of Intelligent Training Systems in Industrial Environments"*. Esprit '90, Kluwer, 447-454.

[Berleant 1990a]

D. Berleant and B. Kulpers, *"Combined Qualitative and Numerical Simulation with Q3"*. Proceedings of the fourth Qualitative Physics Workshop (QP-90), pp. 140-152, Lugano, Switzerland, 1990.

[Brown 1982]

Brown, J.S., Burton, R.B. & de Kleer, J. (1982) *"Pedagogical, Natural Language and Knowledge Engineering Techniques In SOPHIE I, II & III"*. Chapter 11 en D. Sleeman, & J.S. Brown (eds) Intelligent Tutoring Systems, 227-282. Londres: Academic Press.

[Charniak 1985a]

E. Charniak and D. McDermott, *"Introduction to Artificial Intelligence"*, Addison-Wesley, 1985.

[Chi 1981a]

Chi, M.T.H., Feltovich, P. & Glaser, R. (1981) *"Categorisation and Representation of Physics Problems by experts and novices"*. Cognitive Science, 5, 121-152.

[Chi 1991a]

Chi, M.T.H. & Van Lehn K. (1991) *"The Content of Physics Self-Explanations"*.
Journal of the Learning Sciences, 1 (1), 69-105.

[Chi 1994a]

D. Chi and Y. Iwasaki, *"Abstraction Framework for Compositional Modeling"*,
Working Notes of the Eighth International Workshop on Qualitative Reasoning
about Physical Systems, Junio 1994.

[Davis 1987a]

E. Davis, *"Order of Magnitude Reasoning in Qualitative Differential Equations"*,
Tech. Rep. 312, New York University, New York, U.S.A., 1987

[Davis 1987b]

E. Davis, *"Constraint Propagation with Interval Labels"*, Artificial Intelligence,
vol.32, pp. 281-331, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1987

[de Kleer 1982a]

J. de Kleer and J.S. Brown, *"Foundations of Envisioning"*, Proceedings of the
Second National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-82), pp. 434-437,
Pittsburgh, Penn., U.S.A. 1982.

[de Kleer 1983a]

J. de Kleer and J.S. Brown, *"The Origin, Form and Logic of Qualitative Physical
Laws"*, Proceedings of Eighth International Joint Conference on Artificial
Intelligence (IJCAI-83), vol.2, pp. 1158-1169, Karlsruhe, Alemania, 1983.

[de Kleer 1984a]

J. de Kleer and D.G. Bobrow, *"Qualitative Reasoning with Higher-Order
Derivatives"*, Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence
(AAAI-84), pp. 86-91, William Kaufmann, Los Altos, Ca., USA., 1984.

[de Kleer 1984b]

J. de Kleer and J.S. Brown, *"A Qualitative Physics Based on Confluences"*,
Qualitative Reasoning about physical Systems, de. D.G. Bobrow pp. 1-83, North-
Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1984.

[de Kleer 1984c]

De Kleer J.H., Brown J.S., 1984, *"Qualitative reasoning about physical systems"*,
Artificial Intelligence, 24.

[de Kleer 1986a]

J. de Kleer and J.S. Brown, *"Theories of Casual Ordering"*, Artificial Intelligence,
Vol. 29, pp. 33-61, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1986.

[de Kleer 1986b]

J. de Kleer, *"Problem Solving with the ATMS"*, Artificial Intelligence, vol. 28, pp.
197-224, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1986.

[de Kleer 1986c]

J. de Kleer, *"Extending the ATMS"*, Artificial Intelligence, vol. 28, pp. 163-196,
North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1986.

[de Kleer 1986d]

J. de Kleer and B.C. Williams, *"Back to Backtracking: Controlling the ATMS"*, Proceedings of the Fifth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-86), vol.2, pp. 910-917, Philadelphia, USA, 1986

[Doyle 1979a]

J. Doyle, *"A Truth Maintenance System"*, Artificial Intelligence, vol. 12, pp. 231-272, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1979.

[D'Azzo 1981a]

J.J. D'Azzo and C.H. Houpls, *"Linear Control System Analysis and Design: Conventional and Modern"*, Electrical Engineering, McGraw-Hill, Tokyo, Japon, 1981.

[Elmqvist 1986a]

H. Elmqvist, K.J. Aström, and T. Schönthal, *"SIMNON: User's Guide for MS-DOS Computers, Department of Automatic Control"*, Lund Institute of Technology, Suecia, 1986.

[Even 1979a]

S. Even, *"Graph Algorithms"*, Computer Software Engineering Series, Computer Science Pres, Rockville, Mary., USA 1979.

[Falkenhainer 1988a]

Falkenhainer, B. & Forbus, K.D., *"Setting up Large Scale Qualitative Models"*. Proceedings of the 7th National Conference on Artificial Intelligence, AAAI-88.

[Falkenhainer 1991a]

Falkenhainer, B. & Forbus, K.D. *"Compositional Modeling: Finding the Right Model for the Job"*. Artificial Intelligence, 51, 95-143.

[Faltings 1992a]

Faltings, B., Struss, P., *"Recent Advances in Qualitative Physics"*. Cambridge-MA: MIT Press, 1992.

[Forbus 1984a]

K.D. Forbus, *"Qualitative Process Theory"*, Artificial Intelligence, vol. 24, pp. 85-168, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1984.

[Forbus 1984b]

Forbus, K.D. , *"Qualitative Process Theory"*. Artificial Intelligence, 24.

[Forbus 1988a]

K.D. Forbus, *"Commonsense Physics: A Review"*, Annual Review of Computer Science, ed. J.F. Traub, B.J. Grosz, B.W. Lampson and Nilsson, vol. 3, pp. 197-232, Annual Reviews Inc., Palo Alto, Ca., USA., 1988.

[Fouché 1990a]

P. Fouché and B. Kuipers, *"An Assessment of Current Qualitative Simulation Techniques"*, Proceedings of the fourth Qualitative Physics Workshop (QP-90), pp.195-209, Lugano, Suiza, 1990.

[Fouché 1990a]

P. Fouché and B. Kuipers, *"Introducing Energy Into Qualitative Simulation"*, Proceedings of the first European Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems, Genova, Italia, 1991.

[Francis1986a]

J.C. Francis, *"Qualitative System Theory: A Systems Approach to Modelling Complex Physical Processes"*, Ph.D. Thesis, Department of Electronic Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, U.K., 1986.

[Fruchter 1991a]

R. Fruchter, Y. Iwasaki, K. H. Law. *"Generating Qualitative Models for Structural Engineering Analysis and Design"*, Proceedings of the Seventh Conference on Computing in Civil Engineering, 1991.

[Fruchter 1992a]

R. Fruchter, Y. Iwasaki, H. Krawinkler, and K. H. Law. *"Qualitative Interpretation of Structures"*, 2nd International Conference on Artificial Intelligence in Design, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1992, pp. 15-21.

[Gallanti1986a]

M. Gallanti, L. Giarloni, G. Gulda, and A. Stefanini, *"Exploiting physical and Design Knowledge in the Diagnosis of Complex Industrial Systems"*, Proceedings of the European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-86), pp.335-349, Brighton, U.K., 1986

[Gallanti1989a]

M. Gallanti, M. Roncato, A. Stefanini, and G. Torielli, *"A Diagnostic Algorithm Based on Models at Different Levels of Abstraction"*, Proceedings of Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-89), vol.2, pp 1350-1355, Detroit, U.S.A., 1989

[Gallanti 1989b]

Gallanti, M., Roncato, M. Stefanini, A. & Torielli, G. , *"A Diagnostic Algorithm based on Models at Different Level of Abstraction"*. Working Paper of the 3rd International Workshop on Qualitative Physics.

[Garey1979a]

M.R. Garey and D.S. Johnson, *"Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness"*, A Series of Books In the Mathematical Sciences, W.H. Freeman and Company, New York, U.S.A., 1979

[Gentner 1988a]

Gentner, D. & Stevens, A. , *"Mental Models"*. Hillsdale, NJ: Lawrence-Erlbaum.

[Greer 1989a]

Greer, J. & McCalla, G., *"A Computational Framework for Granularity and Its Application to Educational Diagnosis"*. Proceedings of 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-89), Detroit, Michigan, vol 1, 477-482.

[Greer 1989b]

Greer, J. & McCalla, G. , *"A Computational Framework for Granularity and Its Application to Educational Diagnosis"*. Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-85. Agosto 18-23 1985, Los Angeles, CA.

[Gondran 1984a]

M. Gondran and M. Minoux, *"Graphs and Algorithms"*, Wiley-Interscience Series in Discrete Mathematics, John Wiley & Sons, Chichester, U.K., 1984

[Hayes1987a]

P.J. Hayes, *"The Naive Physics Manifesto"*, Expert Systems in the Microelectronic Age, ed. D. Michie, Edinburgh University Press, Edinburgh, U.K., 1978

[Hayes1985a]

P.J. Hayes, *"The Second Naive Physics Manifesto"*, Formal Theories of the Commonsense World, ed. J. Hobbs and B. Moore, pp 1-36, Ablex Publishing Corporation, 1985

[Hayes1987a]

P.J. Hayes and J.F. Allen, *"Short Time Periods"*, Proceedings of Tenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-87), vol.2, pp. 981-983, Milan Italy, 1987

[Heller 1995a]

Heller, U., Struss, P., Guerrin, F. and Roque, W., *"A Qualitative Modeling Approach to Algal Bloom Prediction"*. Workshop Notes of "Artificial Intelligence and the Environment" of IJCAI-95, Montreal, Canada, 1995.

[Henrici1964a]

P. Henrici, *"Elements of Numerical Analysis"*, John Wiley & Sons, New York, U.S.A., 1964

[Iwasaki1986a]

Y. Iwasaki and H.A. Simon, *"Causality in Device Behaviour"*, Artificial Intelligence, vol.29, pp. 3-32, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1986

[Iwasaki1986b]

Y. Iwasaki and H.A. Simon, *"Theories of Causal Ordering :Replay to de Kleer and Brown"*, Artificial Intelligence, vol. 29 pp. 63-72, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Hollanda, 1986

[Iwasaki1988a]

Y. Iwasaki and I. Bhandari, *"Formal Basis for Commonsense Abstraction of Dynamic Systems"*, Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88), vol.1, pp.307-312, Saint Paul, Minn, U.S.A., 1988

[Iwasaki1988b]

Y. Iwasaki, *"Causal Ordering in a Mixed Structure"*, Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88), vol. 1. pp. 313-318, Saint Paul, Minn, U.S.A. 1988

[Iwasaki. 1988c]

Y. Iwasaki. *"Qualitative, Causal Reasoning about Device Behavior"*, Proceedings of the International Workshop on Artificial Intelligence of Industrial Applications, 1988.

[Iwasaki 1989a]

Y. Iwasaki. *"Two model abstraction techniques based on temporal grain size: aggregation and mixed models"*, Proceedings of the Workshop on Qualitative Reasoning, Agosto 1989.

[Iwasaki 1990a]

Iwasaki, Y. "*Reasoning with Multiple Abstraction Models*". Working Paper of the 4th International Workshop on Qualitative Physics. July 9-12 1990, Lugano, Suiza.

[Iwasaki. 1990b]

Y. Iwasaki. "*On the relationship between model abstraction and causality*", Proceedings of The Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, 1990.

[Iwasaki 1991a]

Y. Iwasaki, and C. M. Low. "*Model Generation and Simulation of Device Behavior with Continuous and Discrete Changes*" Intelligent Systems Engineering, Vol 1, No. 2, 1993. A

[Iwasaki 1992a]

Y. Iwasaki. "*Reasoning with multiple abstraction models*" Recent Advances In Qualitative Physics. B. Faltings and P. Struss (eds.) . MIT Press. 1992.

[Iwasaki. 1992b]

Y. Iwasaki. "*Qualitative physics beyond automated mathematics*" Computational Intelligence, Vol 8, No. 2, May 1992.

[Iwasaki. 1993a]

Y. Iwasaki and H. A. Simon. "*Retrospective on Causality in Device Behavior*". Artificial Intelligence, Vol. 59, Nos 1-2, 1993.

[Iwasaki. 1993b]

Y. Iwasaki. "Causal Ordering Analysis." *Qualitative Simulation Modeling & Analysis*. Paul A. Fishwick and Paul A. Luker. Ed. Springer-Verlag. 1991.

[Iwasaki 1993c]

R. Fruchter, K. H. Law, and Y. Iwasaki. "*An Approach for Qualitative Structural Analysis*", AI EDAM, Vol 7(3), pp. 189-207, 1993.

[Iwasaki 1994a]

Y. Iwasaki and A. Levy. "*Automated Model Selection for Simulation*", Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence, 1994.

[Iwasaki 1994b]

Y. Iwasaki, R. Engelmores, G. Fehr, R. Fikes, A. Farquhar, and T. Gruber. "*Operator Procedure Verification with a Rapidly Reconfigurable Simulator*", Proceedings of the Third International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation for Space, 1994.

[Iwasaki. 1994c]

Y. Iwasaki and H. A. Simon. "*Causality and Model Abstraction*", Artificial Intelligence, Vol. 67(1), May 1994.

[Iwasaki 1995a]

Y. Iwasaki, A. Farquhar, V. Saraswat, D. Bobrow, and V. Gupta. "*Modeling Time in Hybrid Systems: How Fast is 'Instantaneous'?*", Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1995.

[Johnson & Soloway 1984a]

Johnson & Soloway, E. (1984) *"Intention-based Diagnosis of programming errors"*. Proceedings of the 5th American Association for Artificial Intelligence (AAAI-84), Austin, Texas, 162-168.

[Kalagnanam 1991a]

J. Kalagnanam, H. A. Simon., and Y. Iwasaki. *"The Mathematical Bases for Qualitative Reasoning"*, IEEE Expert, April, 1991.

[Kalagnanam 1991b]

J. Kalagnanam , Y. Iwasaki. *"Qualitative Physics"*. The Handbook of Artificial Intelligence, Vol. 4. Edited by A. Barr, P. Cohen, and E. Feigenbaum, 1989.

[Kieras 1988a]

Kieras, D.E. *"What Mental Models Should be Taught: Choosing Instructional Content for Complex Engineered Systems"*. Ch. 4 In J. Psozka, L.D. Massey, & S.A. Mutter (eds) *Intelligent Tutoring Systems: Lessons Learned*. Hillsdale, NJ: Lawrence-Erlbaum.

[Kowalski1986a]

R. Kowalski and M. Sergot, *"A Logic-Based Calculus of Events"*, New Generation Computing, vol.4, no. 1 pp 67-95, Springer-Verlag, Tokyo Japan, 1986

[Kuipers 1984a]

Kuipers, B. *"Common-Sense Reasoning About Causality"*. Artificial Intelligence, 24, 169-203.

[Kuipers 1984b]

Kuipers *"Commonsense Reasoning about Causality: Deriving Behaviour from Structure"*. Artificial Intelligence, 24, pp169-203.

[Kuipers1985a]

B. Kuipers, *"The Limits of Qualitative Simulation"*, Proceedings of Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-85), vol1,pp 128-136, Los Angeles, U.S.A.,1985

[Kuipers 1986a]

B. Kuipers, *"Qualitative Simulation"*, Artificial Intelligence, vol. 29, pp. 289-338, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda,1986

[Kuipers 1987a]

B. Kuipers and C. Chiu, *"Taming Intractible Branching In Qualitative Simulation"*, Proceedings of Tenth International Joint Intelligence, (IJCAI-87), vol 2, pp. 1079-1085; Milan, Italia, 1987.

[Kuipers 1987b]

B. Kuipers, *"Abstraction by Time-Scale In Qualitative Simulation"*, Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87), vol. 2, pp. 621-625, Seattle, Wash., USA. 1987.

[Kupiers 1988a]

B. Kupiers and D. Berleant, *"Using Incomplete Quantitative Knowledge In Qualitative Reasoning"*, Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88), vol. 1, pp. 324-329, Saint Paul, Minn., USA. 1988.

(Kurtland 1988a)

Kurland, L.C. & Tenney, Y.J. "Issues in Developing an Intelligent Tutor for a Real-World Domain: Training in Radar Mechanics". Ch 5. In J. Psozka, L.D. Massey, & S.A. Mutter (eds) Intelligent Tutoring Systems: Lessons Learned. Hillsdale, NJ: Lawrence-Erlbaum.

(Lambert 1988a)

H. Lambert, L. Eshelman, and Y. Iwasaki. "Using Qualitative Physics to Guide the Acquisition of Diagnostic Knowledge", Proceedings of The Third International Conference on Applications of Artificial Intelligence in Engineering, 1988.

(Lee 1988a)

W.W. Lee and B. Kulpers, "Non-Intersection of Trajectories in Qualitative Phase Space: A Global Constraint for Qualitative Simulation", Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88), vol. 1, pp. 286-290, Saint Paul, Minn., USA, 1988.

(Leitch 1988a)

R. Leitch and A. Stefanini, "QUIC: a development environment for Knowledge Based Systems in Industrial automation", Proceedings of Fifth Annual ESPRIT Conference (ESPRIT 88), ed. Commission of the European Communities, vol 1, pp. 674-696, North-Holland, Amsterdam, Holland, 1988

(Leitch 1989b)

R.R. Leitch and M.E. Wiegand, "Temporal Issues in Qualitative Reasoning", Proceedings of 5. Osterreichische Artificial-Intelligence-Tagung, ed. J. Retzl and K. Leidlmair, Informatik-Fachberichte 208, pp. 1-13, Springer-Verlag, Berlin, West Germany, 1989.

(Leitch 1989a)

R.R. Leitch and K. Horne, "Prospects for Intelligent Training Systems in Industrial Environments", Proceedings of ESPRIT Technical Conference, Brussels, Belgium, 1989.

(Leitch 1990a)

R.R. Leitch and M. Gallanti, "Task Classification for Knowledge-Based Systems in Industrial Automation", submitted to IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1990.

(Leitch 1992a)

Leitch R.R., "Recent Progress in Developing Qualitative Reasoning", Mathematics of the Analysis and design of Process Control (eds. P. Borne and S.G. Tzafestas), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1992.

(Leitch 1992b)

R. R. Leitch and Q. Shen, "Being Committed to Qualitative Simulation", : Proceedings of the 6th International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems, pp. 281-293, Edinburgh, Scotland, 1992.

(Leitch 1992c)

Leitch, R.R. & Slme, Julie-Ann (1991) "Specification Methodology for Intelligent Training Systems" 6th International PEG Conference on Knowledge Based Environments for Teaching and Learning. 31 May - 2 June 1991. Rapallo, Italy. Pp331-342.

[Leitch 1992d]

R.R. Leitch, P. Ponnappalli and A.F. Slater, *"The Representation of Domain Knowledge In Intelligent Training Systems"*, Proc. First IEE/BCS International Conference on Intelligent Systems Engineering, Edinburgh, pp269-275, 1992.

[Leitch 1993 a]

Leitch R.R. and J.A. Sime. *"A Specification Methodology for Intelligent Training Systems"*, Computers in Education Journal, Vol. 20, No1, pp 73-80, 1993

[Leitch 1993 b]

R. R. Leitch and Q. Shen, *"Prioritising Behaviours in Qualitative Simulation"*, Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vol. 2, pp. 1523-1528, Savona, Francia, 1993.

[Leitch 1993c]

R. R. Leitch, Q. Shen, G. M. Coghill, M. J. Chantler, and A. F. Slater, *"Qualitative Model Based Diagnosis of a Continuous Process"* Proceedings of the 8th International Conference on Artificial Intelligence in Engineering, pp. 291-309, Toulouse, Francia, 1993.

[Levy 1992a]

A. Levy, Y. Iwasaki and H. Motoda. *"Relevance reasoning to guide compositional modeling"*, Proceedings of the Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, 1992.

[Lipschutz 1974a]

S. Lipschutz, Linear Algebra, Schaum's, *"Outline of Theory and Problems"*, McGraw-Hill, New York, USA, 1974.

[Liu 1991a]

Liu, Z.Y. & Farley, A.M., *"Shifting Ontological Perspectives In Reasoning about Physical Systems"*. Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence, AAAI-90.

[Liu 1991b]

Liu, Z.Y. & Farley, A.M., *"Tasks, Models, Perspectives, Dimensions"*. Proceedings of the 5th International Workshop on Qualitative Reasoning. May 19-22 1991, Austin, Texas.

[McCalla 1992a]

McCalla, G., Greer, J., Barrie, B. & Pospisil, P., *"Granularity Hierarchies"*. Computers & Mathematics with Applications, 23, (2-5), 363-75.

[Massey 1988a]

Massey, L.D., de Bruin, J. & Roberts, B., *"A Training System for System Maintenance"*. Ch. 14 In J. Psotka, L.D. Massey, & S.A. Mutter (eds) *Intelligent Tutoring Systems: Lessons Learned*. Hillsdale, NJ: Lawrence-Erlbaum.

[Mavrovouniotis 1987a]

M.L. Mavrovouniotis and G. Stephanopoulos, *"Reasoning with orders of Magnitude and Approximate Relations"*, Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87), vol. 2, pp. 626-630, Seattle, Wash., USA., 1987.

[Mavrovouniotis 1989a]

M.L. Mavrovouniotis and G. Stephanopoulos, "Order-of-Magnitude Reasoning with O'IMI", *International Journal of Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 106-114, Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K., July 1989.

[McCarthy 1969a]

J. McCarthy and P.J. Hayes, "Some philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence", *Machine Intelligence*, vol. 4, pp. 463-502, Edinburgh University Press, Edinburgh, U.K. 1969.

[Molle 1989a]

D.T. dalle Molle, "Qualitative Simulation of Dynamic Chemical Processes", A189-107 (Ph.D. Thesis), Artificial Intelligence Laboratory, the University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, 1989.

[Moore 1966a]

R.E. Moore, "Interval Analysis, Automatic Computation", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. USA. 1966.

[Morgan 1988a]

A.J. Morgan, "The Qualitative Behaviour of Dynamic Physical Systems", Ph. Thesis, Cambridge University, Cambridge, U.K. 1988.

[Moyses 1989a]

Moyse, R (1989) "Multiple Viewpoints for Intelligent Tutoring Systems". *Interactive Learning International*, vol 5, 71-78.

[Murthy 1987a]

Murthy, S.S. & Addanki, S. (1987) "PROMPT: An Innovative Design Tool". *Proceedings of the 6th National Conference on Artificial Intelligence, AAAI-87*. July 13-17 1987.

[Murthy 1988a]

S.S. Murthy, "Qualitative Reasoning at Multiple Resolutions", *Proceedings of the second Qualitative Physics Workshop (QP-88)*, ed. O. Raiman and F. Gardin, IBM Paris Scientific Centre, Paris, France, 1988.

[Nayak 1991a]

Nayak, P.P., Joskowicz, L. & Addanki, S, "Automated Model Selection using Context-Dependent Behaviours". Working Paper of the 5th International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems. May 19-22 1991, Austin, Texas.

[Nishida 1987a]

T. Nishida and S. Doshita, "Reasoning about Discontinuous Change", *Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87)*, vol. 2, pp. 643-648, Seattle, Wash. USA. 1987.

[Nökel 1989a]

T. Nökel, "Convex Relations Between Time Intervals", In *Proceedings of 5. Österreichische Artificial-Intelligence-Tagung*, ed. J. Retzl and K. Leldimair, *Informatik-Fachberichte 208*, pp. 298-302, Springer-Verlag, Berlin, Alemania, 1989.

[Oppenheim 1983a]

A.V. Oppenheim, A.S. Willisky, and I.T. Young, *"Signals and Systems"*, Signal Processing Series, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA., 1983.

[Papert 1980a]

Papert, S., *"Mindstorms"*. Harvester Press.

[Piaget 1966a]

Piaget, J. , *"The Origin of Intelligence In the Child"*. Londres: Routledge & Kegan Paul.

[Ploetzner 1990a]

Ploetzner, R. Spada, H., Stumpf, M. & Opwis, K., *"Learning Qualitative Reasoning in a Microworld for Elastic Impacts"*. European Journal of Psychology of Education, V, (4), 501-516.

[Ploetzner 1992a]

Ploetzner, R. & Spada, H., *"Analysis-based Learning on Multiple Levels of Mental Domain Representation"*. E.De Corte, M.Linn, H. Mandl, & L. Verschaffel (eds) Computer-based Learning Environments and Problem-Solving. Berlin: Springer-Verlag.

[Raiman 1986a]

O. Raiman, *"Order of Magnitude Reasoning"*, Proceedings of the Fifth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-86), vol. 1, pp. 100-104, Philadelphia, USA, 1986.

[Rasmussen 1986a]

Rasmussen, J. , *"Information Processing and Human-Machine Interaction: An approach to Cognitive Engineering"*. North-Holland: Amsterdam.

[Ravindranathan]

Ravindranathan M. and R.R. Leitch, *"Multiple Reasoning Architecture for Intelligent Systems"*, Workshop on Architectures for Intelligent Systems at 2nd IEE International Conference on Intelligent Systems Engineering, Hamburgo, Alemania, Sept. 1994.

[Robert 1988a]

A. Robert, *"Nonstandard Analysis"*, John Wiley & Sons, New York, USA 1988.

[Robinson 1966a]

A. Robinson, *"Non-Standard Analysis"*, North-Holland, Amsterdam, Holland 1966.

[Rutherford 1965a]

D.E. Rutherford, *"Introduction to Lattice Theory"*, University Mathematical Monographs, Oliver & Boyd, Edinburgh, UK. 1965.

[Sacks 1987a]

E. Sacks, *"Hierarchical Reasoning about Inequalities"*, In Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87), vol. 2, pp. 649-654, Seattle, Wash., USA. 1987

[Shen 1990a]

Q. Shen and R.R. Leitch, "A *Semi-Quantitative Extension to Qualitative Simulation*", Proceedings of Special Conference on Second Generation Expert Systems (AVIGNON-90), Avignon, Francia 1990.

[Shen 1990b]

Q. Shen and R.R. Leitch, "*Integrating Common-Sense and Qualitative Simulation by the Use of Fuzzy Sets*", In Proceedings of the fourth Qualitative Physics Workshop (QP-90), p.p. 220-232, Lugano, Suiza, 1990.

[Shen 1991a]

Q. Shen and R.R. Leitch, "*Extending the Quality Space In Qualitative Reasoning*", Proceedings of the first European Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems, Genova, Italy, 1991.

[Shen 1992a]

Q. Shen and R. R. Leitch, "*On Extending the Quantity Space In Qualitative Reasoning*", International Journal of Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 167-173, Elsevier, 1992.

[Shen 1992b]

Q. Shen and R. R. Leitch, "*Application Studies of Fuzzy Qualitative Simulation*", P. Borne and S. G. Tzafestas (Eds.), Mathematics of the Analysis and Design of Process Control, Elsevier, 1992.

[Shen 1992c]

Q. Shen and R. R. Leitch, "*Combining Qualitative Simulation and Fuzzy Sets*", In: B. Faltings and P. Struss. Recent Advances In Qualitative Physics, pp. 83-100, MIT Press, 1992.

[Shen 1992d]

Q. Shen and R. R. Leitch, "*Qualitative Model Based Diagnosis of Continuous Dynamic Systems*". Proceedings of the 1st International Conference on Intelligent Systems Engineering, pp. 147-152, Edinburgh, Scotland, 1992.

[Sime 1992a]

Sime, J.A. & Leitch, R.R. "*A Learning Environment based on Multiple Qualitative Models*". Proceedings of the 2nd International Intelligent Tutoring Systems Conference. Montreal, Canada, 10-12 June 1992. Lecture Notes In Computer Science, *Intelligent Tutoring Systems*, 608. Springer-Verlag.

[Sime 1992b]

Sime, J.A., & Leitch, R.R. "*Multiple Models In Intelligent Training*". Proceedings of 1st Intelligent Systems Engineering Conference. Edinburgh, Scotland, 19-21 August 1992.

[Sime 1992c]

Sime, J.A. and Leitch, R.R. "*A Learning Environment Based on Multiple Qualitative Models*", ITS '92 Second International Conference on Intelligent Tutoring Systems, Montreal, pp116-124, 1992.

[Sime 1992d]

J.A. Sime and R.R. Leitch, "*Multiple Models In Intelligent Training*". Proc. IEE/BCS First International Conference on Intelligent Systems Engineering, Edimburgo, pp 263-269, 1992.

- [Simmon 1961a]
H.A. Simon and A. Ando, *"Aggregation of Variables in Dynamic Systems"*, *Econometrica*, vol. 29, no. 2, pp. 111-138, 1961.
- [Simmons 1986a]
R. Simmons, *"Commonsense, Arithmetic Reasoning"*, Proceedings of the Fifth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-86), vol. 1, pp. 118-124, Philadelphia, USA 1986.
- [Stevens 1983a]
Stevens, A. & Roberts, B., *"Quantitative and Qualitative Simulation In Computer Based Training"*. *Journal of Computer Based Instruction*, 10, (1 & 2), 16-19.
- [Spivak 1973a]
M. Spivak, *"Calculus"*, Addison-Wesley World Student Series Edition, W.A. Benjamin, Inc., Menlo Park, Ca., USA. 1973
- [Struss 1988a]
P. Struss, *"Reasons and Filters for Spurious Behaviours"*, Proceedings of the second Qualitative Physics Workshop (QP-88), ed. O. Raiman and F. Gardin, IBM ParisScientific Centre, Paris, France, 1988
- [Struss1988b]
P.Struss, *"Global Filters fo Qualitative Behaviours"*, Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88), vol. 1.pp.275-279, Saint Paul, Minn, U.S.A.,1988
- [Struss1988c]
P Struss, *"Mathematical Aspects of Qualitative Reasoning"*, *International Journal of Artificial Intelligence*, vol.3. no.3. pp. 156-169, July 1988
- [Struss1990a]
P.Struss, *"Problems of Interval-Based Qualitative Reasoning"*, *Readings In Qualitative Reasoning about Physical Systems*, ed. D.S. Weld and J. de Kleer, pp. 288-305, Morgan Kaufmann, San Mateo, Ca, U.S.A.,1990
- [Struss 1993a]
Struss, P., *"On temporal abstraction In qualitative physics"*. Proceedings of the Seventh International Workshop on Qualitative Reasoning, Orcas Island, Mayo 16 - 20,1993. Ed.: D. Weld. Seattle: Univ. of Washington, S. 219-227, 1993.
- [Struss 1993b]
Struss, P., *"Qualitative Modeling of Physical Systems in AI Research"*. *Artificial Intelligence and Symbolic Mathematical Computing*, Jacques Calmet, John A. Campbell (eds.), Springer-Verlag, 1993.
- [Struss 1994a]
Struss, P., *"Testing Physical Systems"*. Proceedings of AAAI-94, Seattle, Wa, USA, 1994.
- [Struss 1994b]
Struss, P., *"Qualitative Reasoning Based on Temporal Abstraction"*. 1. MATHMOD VIENNA (IMACS Symposium on Mathematical Modelling, Technical University Vienna), Viena, 1994.

[Sussman1990a]

G.J. Sussman and G.L. Steele, "*Constraints: A Language for Expressing Almost-Hierarchical Descriptions*", *Artificial Intelligence*, vol 14, pp 1-39, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda 1980

[Tenney 1988a]

Tenney, Y.J. & Kurland, L.C., "*The Development of Troubleshooting Expertise in Radar Mechanics*". C 3 In J. Psocka, L.D. Massey, & S.A. Mutter (eds) *Intelligent Tutoring Systems: Lessons Learned*. Hillsdale, NJ: Lawrence-Erlbaum.

[Tsang1987a]

E.P.K. Tsang, "*Time Structures for AI*", *Proceedings of Tenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-87)* vol.1 pp. 456-461, Milan, Italy 1987

[van Beek1990a]

P.van Beek, "*Reasoning about Qualitative Temporal Information*", *Proceedings of the fourth Qualitative Physics Workshop (QP-90)*, pp 68-81, Lugano, Suiza 1990

[Vilain1986a]

M.Vilain and H.Kautz, "*Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning*", *Proceedings of the Fifth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-86)*, vol,1. pp. 377-382, Philadelphia, U.S.A.,1986.

[Weld1988a]

D.S. Weld, "*Comparative Analysis*" *Artificial Intelligence*, vol 36, pp 333-373, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, Holanda, 1988

[Weld1988b]

D.S. Weld, "*Exaggeration*", *Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88)*, vol,1. pp. 291-295 Saint Paul, Minn, U.S.A.,1988

[Weld 1989a]

Weld, D. , "*Automated Model Switching*". Working Paper of the 3rd International Workshop on Qualitative Physics.

[Weld1990a]

D.S. Weld and J. De Kleer (eds) "*Readings In Qualitative Reasoning about Physical Systems*", Morgan Kaufmann, San Mateo, Ca, U.S.A.,1990

[Weld 1990b]

Weld, D. , "*Approximation Reformulations*". *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, AAAI-90.

[White 1990a]

White, B. & Frederiksen, J.R. , "*Causal Model Progressions as a Foundation for Intelligent Learning Environments*". *Artificial Intelligence*, 42, 99-157.

[Willam 1983a]

Williams, M.D., Hollan, J.D. & Stevens, A.L, "*Human Reasoning about a Simple Physical System*". C 7 In Gentner, D. & Stevens, A.L. (1983) *Mental Models*. LEA: Hillsdale, NJ.

[Williams1984a]

B.C. Williams, *"Qualitative Analysis of MOS Circuits"*, Qualitative Reasoning about Physical Systems, de. D.G. Bobrow, pp 281-346 North-Holland/Elsevier, Amsterdam Holland, 1984

[Williams1986a]

B.C. Williams, *"Doing Time : Putting Qualitative Reasoning on Firmer Ground"*, Proceedings of the Fifth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-86) vol1.pp.105-112, Philadelphia, U.S.A.,1986

[Williams1988a]

B.C. Williams, *"MINIMA : A Symbolic Approach to Qualitative Algebraic Reasoning"*, Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88), vol, 1.pp. 264-269, Saint Paul, Minn U.S.A.,1988

[Williams1990a]

B.C. Williams *"Temporal Qualitative Analysis : Explaining How physical System, Work"*, Qualitative Reasoning about Physical Systems ed. D.S. Weld and J. de Kleer ,pp.133-178, Morgan Kaufmann, San Mateo, Ca. U.S.A.,1990

[Willoughby1989a]

A.A. Willoughby, *"Graphical Intuition in Qualitative Scientific Reasoning"*, HCRL Report No. 50, The Open University, Milton Keynes U.K.1989

[Willoughby1989b]

A.A. Willoughby *"Making Qualitative Reasoning more Quantitative"* Proceedings of Ninth International Workshop on Expert Systems and their Applications (AVIGNON-89) Avignon, Francia 1989

[Wyatt 1993a]

Wyatt G.J., Leitch R.R. and A. Steele, *"Qualitative and Quantitative Simulation of Interacting Markets"* Proc. International Conference on Artificial Intelligence in Economics and Management, Portland, Oregon , Agosto 1993.

[Zadeh1973a]

L.A.Zadeh, *"Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes"*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol3,no.1,pp.28-44, Enero1973.