

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO

Trabajo de tesis para la obtención del grado de Licenciatura en Ciencias de la  
Computación

**Título : Verificación de modelos con Cálculo- $\mu$**

Autor  
Luciano Putruele

Director de Tesis: *Dr. Pablo F. Castro*  
Co-Director de Tesis: *Dr. Germán Regis*

Rio Cuarto, Argentina  
Abril 2016



# Resumen

En esta tesis desarrollaremos una herramienta de verificación de modelos (Model Checking), llamada MC2, sobre programas formalizados en un lenguaje lógico simple que también será desarrollado en este trabajo. La herramienta de verificación se encargará de, valga la redundancia, verificar propiedades, caracterizadas en la forma de la lógica temporal Calculo Mu, sobre dichos programa. Cabe destacar que el lenguaje de programación y el verificador funcionan como una sola unidad ya que en un mismo programa MC2 se define tanto el modelo como las propiedades a verificar (si las hay). A todo esto, el metalenguaje utilizado para el desarrollo de estas herramientas es Haskell.

Una motivación para el desarrollo de esta tesis fue la utilización de un lenguaje funcional (Haskell) para el desarrollo de la herramienta en su totalidad, en lugar de utilizar lenguajes imperativos u orientados a objetos.

Lo que se propone con este proyecto es explorar otras alternativas para especificar propiedades que un modelo deba satisfacer, siendo la alternativa en este trabajo el Cálculo Mu, en vez de las lógicas temporales más utilizadas en este tipo de herramientas, como ser LTL, CTL y CTL\*, ya que esto trae la ventaja de que el Cálculo Mu es más expresivo que los anteriormente nombrados. Adicionalmente los modelos de los programas MC2 se basan en la definición de reglas de transición usando proposiciones lógicas atómicas con lo cuál es transparente ver la estructura del modelo como una máquina de transición de estados más allá de que internamente se los trata simbólicamente como fórmulas para mejorar el rendimiento.

*Palabras clave:* .

# Agradecimientos

*Agradezco a ...*

*Una dedicatoria muy especial es para ...*

# List of Figures

2.1	Estructura de Kripke para este ejemplo. . . . .	11
2.2	Ejemplo de Estructura de Kripke. . . . .	15
2.3	Ejecución de operador de punto fijo mayor. . . . .	15
2.4	Algoritmo de verificación de modelos explícitos para Cálculo- $\mu$ . . . .	17
3.1	Árbol binario de decisión para este ejemplo. . . . .	19
3.2	OBDD con ordenamiento $a < b < c$ para el ejemplo dado. . . . .	21
3.3	OBDD con ordenamiento $b < a < c$ para el ejemplo dado. . . . .	21
3.4	Estructura de Kripke con dos estados. . . . .	22
3.5	Pseudocódigo e la función FIX. . . . .	24

# Contents

<b>Resumen</b>	<b>2</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>3</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>4</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>7</b>
1.1 Objetivos . . . . .	7
1.2 Estructura . . . . .	8
<b>2 Conceptos preliminares</b>	<b>9</b>
2.1 Modelado de sistemas . . . . .	10
2.2 Especificación de propiedades . . . . .	12
2.2.1 CTL* . . . . .	12
2.3 Cálculo- $\mu$ . . . . .	12
2.3.1 Sintaxis . . . . .	13
2.3.2 Semántica . . . . .	13
2.3.3 Algoritmo de verificación de modelos explícitos . . . . .	16
<b>3 Verificación simbólica de modelos</b>	<b>18</b>
3.1 Representación de fórmulas lógicas . . . . .	18
3.2 Representación de estructuras de Kripke . . . . .	21
3.3 Algoritmo de verificación de modelos simbólicos . . . . .	22
3.3.1 Complejidad . . . . .	24
<b>4 Lenguaje MC2</b>	<b>25</b>
4.1 Sintaxis . . . . .	25
4.2 Semántica . . . . .	27
4.3 Diseño . . . . .	27

Apéndices	29
A Código	30

# Chapter 1

## Introducción

La verificación de modelos o comunmente *model checking* es una técnica automática para verificar sistemas reactivos con una cantidad finita de estados, por ejemplo protocolos de comunicación y diseños de circuitos. Las especificaciones de las propiedades a verificar son expresadas en una lógica temporal proposicional, y el sistema esta modelado como un grafo. Se utiliza una búsqueda eficiente para determinar automáticamente si las especificaciones son satisfechas por el grafo. Esta técnica fue desarrollada originalmente en 1981 por Clarke y Emerson. Quielle y Sifakis descubrieron independientemente una técnica similar de verificación poco después. Esta técnica tiene varias ventajas importantes sobre probadores de teoremas para verificación de circuitos y protocolos. La mas importante es que es automática. Normalmente, el usuario provee una representación de alto nivel del modelo y una especificación de la propiedad que se desea verificar. El model checker terminará devolviendo la respuesta True indicando que el modelo satisface la especificación o dará una traza de ejecución a modo de contraejemplo si el modelo no satisface la propiedad. Esta es una propiedad muy importante a la hora de encontrar bugs sutiles.

### 1.1 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es explorar otras alternativas para especificar propiedades que un modelo deba satisfacer, siendo la alternativa en este trabajo el Cálculo- $\mu$ , en lugar de las lógicas temporales más utilizadas en este tipo de herramientas, como ser LTL, CTL y CTL\*, además de que esto trae la ventaja de que el Cálculo- $\mu$  es más expresivo que los anteriormente nombrados, por lo



tanto, las propiedades descritas en LTL,CTL y CTL\* pueden ser descritas también usando Cálculo- $\mu$ . Como objetivo secundario cabe destacar la utilización del paradigma funcional de programación para el desarrollo de la herramienta en su totalidad, en lugar de utilizar paradigmas imperativos u orientados a objetos que son normalmente mas utilizados en el área.

## 1.2 Estructura

Primero analizaremos conceptos básicos para la comprensión de esta tesis, conceptos como la verificación de modelos, representación de estos modelos, el concepto de lógicas temporales, y en particular el Cálculo- $\mu$ . Más tarde introduciremos la noción de verificación simbólica de modelos para así luego entrar en detalle sobre la implementación del model checker MC2. Luego estableceremos la idea detrás del lenguaje MC2, para entrar luego en detalle con la sintaxis y la semántica del lenguaje. Por último se analizará la implementación concreta del Por último veremos algunos ejemplos para afianzar el entendimiento de la aplicación práctica de esta herramienta.

## Chapter 2

# Conceptos preliminares

En el diseño de software y hardware para sistemas complejos, cada vez es más el tiempo y esfuerzo dedicado a la verificación en vez de la construcción. Se buscan técnicas para reducir y facilitar el trabajo de la verificación y a la vez incrementar su cobertura. Los métodos formales ofrecen un gran potencial para obtener una integración temprana de la verificación en el proceso de diseño, para proveer técnicas de verificación mas efectivas, y para reducir el tiempo de verificación en general.

La verificación de modelos o model checking es una técnica automática de verificación de propiedades sobre sistemas con una cantidad finita de estados. Es una alternativa interesante con respecto al testing o las simulaciones ya que a diferencia de estas técnicas, el model checking hace una prueba exhaustiva del sistema, es decir, analiza todas las trazas posibles de la ejecución del sistema en cuestión. Sin embargo, esto trae un problema, esto es el problema de la explosión de estados. Esto ocurre en sistemas con muchas interacciones internas, y que pueden hacer crecer exponencialmente el espacio de estados posibles del sistema, ya que la prueba es exhaustiva no se puede ignorar ningún estado posible. En los últimos años se ha logrado un gran progreso en cómo lidiar con este problema mediante formas más compactas de representar al sistema, como por ejemplo, una representación simbólica del modelo del sistema.

El modelo del sistema generalmente es generado automaticamente desde una descripción del modelo en un lenguaje similar a alguno de programación como C, Java, etc. Hay que notar que la especificación de la propiedad prescribe lo que el sistema debe y no debe hacer, en cambio la descripción del modelo señala como se comporta el sistema. El verificador de modelos examina todos los estados relevantes del sistema para verificar si satisface o no la propiedad deseada.

El proceso del verificación de modelos consta de varias fases diferenciables [1]:

Modelado: Hay que modelar el sistema en cuestión usando el lenguaje de descripción de modelos del verificador, y formalizar la propiedad que se desea verificar usando el lenguaje de especificación de propiedades.

Ejecución: Ejecutar el verificador para corroborar la validez de la propiedad en el modelo del sistema.

Análisis: Si la propiedad fue satisfecha, verificar la próxima propiedad (si la hay), si en cambio, no fue satisfecha, hay que refinar el modelo y/o la propiedad y finalmente, repetir el proceso.

## 2.1 Modelado de sistemas

En esta sección veremos cómo representar un modelo explícitamente mediante una estructura de Kripke, más tarde veremos otra forma de representación llamada simbólica que representa el modelo mediante una fórmula lógica de primer orden.

Sea  $AP$  un conjunto de proposiciones atómicas, una estructura de Kripke  $M$  sobre  $AP$  es una cuatro-upla  $M = (S, S_0, R, L)$  donde [2]:

1.  $S$  es un conjunto finito de estados.
2.  $S_0 \in S$  es el conjunto de estados iniciales.
3.  $R \in S \times S$  es una relación de transición total, es decir para cada estado  $s \in S$  existe un estado  $s' \in S$  tal que  $R(s, s')$  vale.
4.  $L: S \rightarrow 2^{AP}$  es una función que etiqueta a cada estado con el conjunto de proposiciones atómicas que son verdaderas en ese estado. Un camino en la estructura  $M$  desde un estado  $s$  es una secuencia infinita de estados  $p = s_0, s_1, s_2, s_3, \dots$ , tal que  $s = s_0$  y  $R(s_i, s_{i+1})$  vale para todo  $i > 0$ .

Sea  $V = v_1, v_2, \dots, v_n$  el conjunto de variables del sistema y sea  $D$  el dominio, llamaremos una valuación de  $V$  a una función que asocia a cada variable de  $V$  un valor de  $D$ .

Un estado del sistema se puede representar como una valuación de las variables del sistema. Una proposición atómica de la forma  $v = d$  donde  $v \in V$  y  $d \in D$  será verdadera en un estado  $s$  si y solo si  $s(v) = d$ . Dada una valuación, podemos escribir una fórmula que sea verdadera precisamente para esa valuación, por ejemplo si tenemos  $V = \{x, y, z\}$  y la valuación  $(x \leftarrow True, y \leftarrow True, z \leftarrow False)$  entonces derivamos la fórmula  $(x \wedge y \wedge !z)$ . En general, una fórmula puede ser verdadera para varias valuaciones. Si adoptamos la convención de que una fórmula representa el conjunto de todas las valuaciones que la hacen verdadera, entonces podremos describir ciertos conjuntos de estados como fórmulas de primer orden.

En particular, el conjunto de los estados iniciales del sistema puede describirse como una fórmula de primer orden  $S_0$  sobre las variables en  $V$ . Una transición del sistema se puede representar como un par ordenado de valuaciones, de forma similar podemos describir conjuntos de transiciones mediante una formula para ese par, pero para poder expresar la fórmula se necesita una copia  $V'$  de  $V$  para hablar de siguiente estado, en  $V'$  todas las variables estan primadas. Por ejemplo si tenemos una transición  $(x \leftarrow True, y \leftarrow True, z \leftarrow False, (x \leftarrow True, y \leftarrow True, z \leftarrow True))$ , podemos derivar la fórmula  $(x \wedge y \wedge \neg z \wedge x' \wedge y' \wedge z')$ .

Consideremos el siguiente ejemplo, tenemos  $V = \{x, y, z\}$  y  $D = \{True, False\}$ ,  $S_0(x, y, z) = (x = True \wedge y = True \wedge z = False)$ , y tenemos solo una transición:  $z := x \wedge y$ , consideremos  $False = 0$  y  $True = 1$  por una cuestión de facilidad de lectura. Definimos así la estructura de kripke (2.1) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} S &= D \times D \times D \\ S_0 &= \{(1, 1, 0)\} \\ R &= \{((1, 1, 0), (1, 1, 1)), ((1, 1, 1), (1, 1, 1))\} \\ L(1, 1, 0) &= \{x = 1, y = 1, z = 0\}, \\ L(1, 1, 1) &= \{x = 1, y = 1, z = 1\} \end{aligned}$$

El único camino posible en esta estructura partiendo del estado inicial es:  $(1, 1, 0), (1, 1, 1), (1, 1, 1), (1, 1, 1) \dots$

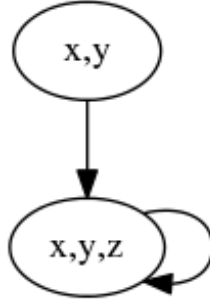


Figure 2.1: Estructura de Kripke para este ejemplo.

## 2.2 Especificación de propiedades

Ahora describiremos una lógica para especificar propiedades deseadas en una estructura de Kripke u otra máquina de transición de estados. La lógica utiliza proposiciones atómicas y operadores como la disyunción y la negación para construir expresiones más complicadas que describan propiedades sobre estados. La lógica temporal es un formalismo que permite describir secuencias de transiciones entre estados en un sistema reactivo, nos interesa saber si en algún momento se llega a un estado determinado o que nunca se llegue a un deadlock. Para esto introduce nuevos operadores especiales que permiten hablar sobre tiempo. Estos operadores pueden combinarse con los operadores lógicos conocidos.

### 2.2.1 CTL\*

Con el propósito de familiarizarnos con las lógicas temporales, observaremos una lógica temporal muy popular llamada CTL\* (Computational Tree Logic\*). Las fórmulas de estado CTL\* sobre el conjunto AP de proposiciones atómicas, están formadas de acuerdo a la siguiente gramática[1]:

$$\Phi ::= true | a | \Phi_1 \wedge \Phi_2 | \neg \Phi | \exists \varphi$$

donde  $a \in AP$  y  $\varphi$  es una fórmula de camino. La sintaxis de fórmula de camino CTL\* esta dada por la siguiente gramática:

$$\varphi ::= \Phi | \varphi_1 \wedge \varphi_2 | \neg \varphi | \bigcirc \varphi | \varphi_1 \cup \varphi_2$$

donde  $\Phi$  es una fórmula de estado, y  $\varphi, \varphi_1, \varphi_2$  son fórmulas de camino. Analizaremos a continuación una lógica temporal muy potente llamada Cálculo- $\mu$ , la cual es aun mas expresiva que CTL\*.

## 2.3 Cálculo- $\mu$

El Cálculo- $\mu$  es un poderoso lenguaje para expresar propiedades de sistemas de transición de estados al usar operadores de punto fijo. El Cálculo- $\mu$  ha generado mucho interés entre investigadores en verificación asistida por computadoras. Este interés surge del hecho de que muchas lógicas temporales pueden ser codificadas por el Cálculo- $\mu$ . Otra fuente de interés en el Cálculo- $\mu$  viene de la existencia de algoritmos eficientes de verificación de modelos para este formalismo. Como

consecuencia, los procedimientos de verificación para muchas lógicas temporales y modales pueden ser descriptas al traducirse al Cálculo- $\mu$ . Hay varias versiones del Cálculo- $\mu$ , concretamente usaremos la versión proposicional de Kozen[3].

### 2.3.1 Sintaxis

Sea  $M = (S, T, L)$  una estructura de Kripke y sea  $VAR = Q, Q1, Q2, \dots$  un conjunto de variables relacionales, donde a cada variable relacional se le puede asignar un subconjunto de  $S$ , construimos una  $\mu$ -fórmula como sigue:

- Si  $p \in AP$ , entonces  $p$  es una fórmula.
- Si  $Q \in VAR$ , entonces  $Q$  es una fórmula.
- Si  $f$  y  $g$  son fórmulas, entonces  $\neg f$ ,  $f \vee g$ , y  $f \wedge g$  son fórmulas.
- Si  $f$  es una fórmula, entonces  $\Box f$  y  $\Diamond f$  son fórmulas.
- Si  $Q \in VAR$  y  $f$  es una fórmula entonces  $\mu Q.f$  y  $\nu Q.f$  son fórmulas.

Las variables pueden estar libres o ligadas en una fórmula a través de un operador de punto fijo. Una fórmula cerrada es una fórmula sin variables libres.

### 2.3.2 Semántica

El significado intuitivo de  $\Diamond f$  es “Es posible realizar una transición a un estado donde  $f$  vale”, similarmente  $\Box f$  significa “ $f$  vale en todos los estados alcanzables por medio de una transición”. Los operadores  $\mu$  y  $\nu$  expresan puntos fijos menores y mayores respectivamente. El conjunto vacío de estados se denota con *False* y el conjunto de todos los estados  $S$  se denota con *True*.

Ejemplos:

- $\nu Z \cdot f \wedge \Box Z$  se interpreta como “ $f$  es verdadera siempre en todo camino”.
- $\mu Z \cdot f \vee \Diamond Z$  se interpreta como “existe un camino hacia un estado donde  $f$  vale”.
- $\nu Z \cdot \Diamond True \wedge \Box Z$  se interpreta como “no hay estados que no tengan transiciones hacia otros estados”.

Formalmente, una fórmula  $f$  se interpreta como un conjunto de estados donde  $f$  es verdadera, escribimos este conjunto como  $[[f]]$  sobre un sistema de transición de estados  $M$  y un ambiente  $e : VAR \rightarrow 2^S$ , denotaremos  $e[Q \leftarrow W]$  como un

ambiente que es igual a  $e$  solo que  $Q$  ahora tiene el valor  $W$ . el conjunto  $[[f]]$  sobre  $M$  y  $e$  se define recursivamente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
[[p]] M e &= \{s \mid p \in L(s)\} \\
[[Q]] M e &= e(Q) \\
[[\neg f]] M e &= S \setminus [[f]] M e \\
[[f \wedge g]] M e &= [[f]] M e \cap [[g]] M e \\
[[f \vee g]] M e &= [[f]] M e \cup [[g]] M e \\
[[\diamond f]] M e &= \{s \mid \exists t : s \rightarrow t \wedge t \in [[f]] M e\} \\
[[\square f]] M e &= \{s \mid \forall t : s \rightarrow t \rightarrow t \in [[f]] M e\}
\end{aligned}$$

$[[\mu Q.f]] M e$  es el menor punto fijo del predicado transformador  $t : 2^S \rightarrow 2^S$  definido como  $t(W) = [[f]] M e[Q \leftarrow W]$

$[[\nu Q.f]] M e$  es el mayor punto fijo del predicado transformador  $t : 2^S \rightarrow 2^S$  definido como  $t(W) = [[f]] M e[Q \leftarrow W]$

Observemos algunos ejemplos, supongamos que tenemos una estructura de Kripke  $M = (S, T, L)$  como la de la figura 2.2, donde  $L(s_0) = \{p, q, r\}$ ,  $L(s_1) = \{p, q\}$ ,  $L(s_2) = \{q, r\}$  y  $L(s_3) = \{r\}$ . Algunos ejemplos de propiedades que uno podría querer verificar son  $q \wedge r$ ,  $\diamond q$ ,  $\square r$ ,  $\mu Q.(r \wedge \neg p \vee \diamond Q)$ ,  $\nu Q.(p \wedge \square Q)$ .  $q \wedge r$  se cumple en  $\{s_2\}$ ,  $\diamond q$  se cumple en  $\{s_0, s_1, s_3\}$ ,  $\square r$  se cumple en  $\{s_1, s_2, s_3\}$ ,  $\mu Q.(r \wedge \neg p \vee \diamond Q)$  se cumple en  $S$ , y  $\nu Q.(p \wedge \square Q)$  se cumple en  $\emptyset$ . Para entender cómo funcionan los operadores de punto fijo consideremos la fórmula  $\nu Q.(p \wedge \square Q)$ , es decir, queremos saber que estados cumplen con la propiedad de que  $p$  vale siempre en todo camino. Cada iteración del operador esta ilustrada en la figura 2.3.  $Q$  se inicializa en True, luego en cada iteración se hace una aproximación al resultado verdadero, los resultados de cada iteración en este caso son, en orden,  $S$ ,  $\{s_0, s_1\}$ ,  $\{s_0\}$ ,  $\emptyset$ . Como se puede apreciar en el resultado, no hay estado donde valga esta propiedad. Si, en vez de usar el mayor punto fijo usáramos el menor, el procedimiento es análogo, solo que la variable se inicializaria en False, aunque no es difícil darse cuenta que no tiene mucho sentido verificar  $\mu Q.(p \wedge \square Q)$ .

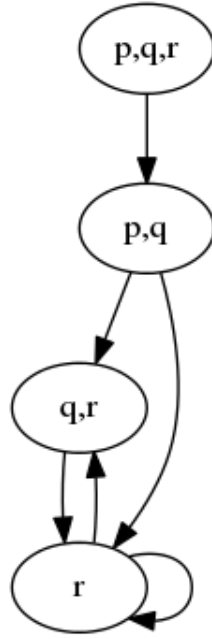


Figure 2.2: Ejemplo de Estructura de Kripke.

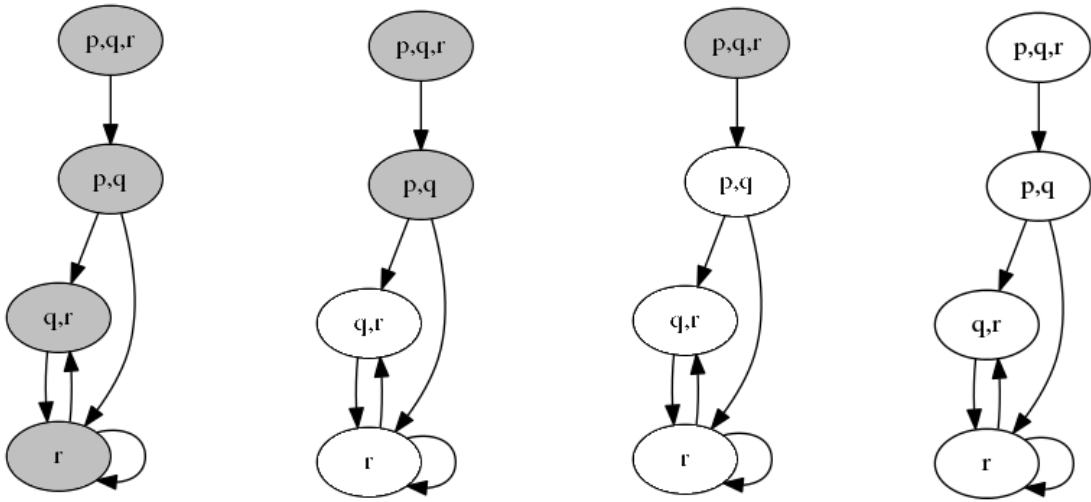


Figure 2.3: Ejecución de operador de punto fijo mayor.



### 2.3.3 Algoritmo de verificación de modelos explícitos

El algoritmo de verificación de modelos explícitos para Cálculo- $\mu$  que analizaremos es el más intuitivo (hay algoritmos mas eficientes), se basa en la semántica anterior, y calcula el subconjunto de estados de un modelo  $M$  que cumplen con una formula  $f$ . El algoritmo trabaja en forma bottom-up a través de la fórmula, evaluandola a partir de los valores de sus subfórmulas. Este algoritmo requiere tiempo  $O(n^k)$ , donde  $n$  es la cantidad de estados del sistema y  $k$  es el número de operadores de punto fijo anidados en la fórmula. Esto se debe a que cada operador de punto fijo hace  $n + 1$  iteraciones como máximo, ya que en cada iteración se hace una aproximación del resultado ya sea agregando o quitando al menos un estado (menor y mayor punto fijo respectivamente). En la figura 2.4 se puede ver el algoritmo [2], donde  $f$  es la fórmula y  $e$  es el ambiente de variables relacionales.

```

1  function eval( $f, e$ )

2  if  $f = p$  then return  $\{s \mid p \in L(s)\}$ ;
3  if  $f = Q$  then return  $e(Q)$ ;
4  if  $f = g_1 \wedge g_2$  then
5      return eval( $g_1, e$ )  $\cap$  eval( $g_2, e$ );
6  if  $f = g_1 \vee g_2$  then
7      return eval( $g_1, e$ )  $\cup$  eval( $g_2, e$ );
8  if  $f = \langle a \rangle g$  then
9      return  $\{s \mid \exists t [s \xrightarrow{a} t \text{ and } t \in \text{eval}(g, e)]\}$ ;
10 if  $f = [a]g$  then
11     return  $\{s \mid \forall t [s \xrightarrow{a} t \text{ implies } t \in \text{eval}(g, e)]\}$ ;

12 if  $f = \mu Q.g(Q)$  then
13      $Q_{\text{val}} := \text{False}$ ,
14     repeat
15          $Q_{\text{old}} := Q_{\text{val}}$ ;
16          $Q_{\text{val}} := \text{eval}(g, e [Q \leftarrow Q_{\text{val}}])$ ;
17     until  $Q_{\text{val}} = Q_{\text{old}}$ ,
18     return  $Q_{\text{val}}$ ;
19 end if;

20 if  $f = \nu Q.g(Q)$  then
21      $Q_{\text{val}} := \text{True}$ ;
22     repeat
23          $Q_{\text{old}} := Q_{\text{val}}$ ;
24          $Q_{\text{val}} := \text{eval}(g, e [Q \leftarrow Q_{\text{val}}])$ ;
25     until  $Q_{\text{val}} = Q_{\text{old}}$ ,
26     return  $Q_{\text{val}}$ ;
27 end if;
28 end function

```

Figure 2.4: Algoritmo de verificación de modelos explícitos para Cálculo- $\mu$ .

## Chapter 3

# Verificación simbólica de modelos

El algoritmo de verificación de modelos con estados explícitos para Cálculo- $\mu$  presentado anteriormente tiene un problema, es muy susceptible a que ocurra una explosión en el tamaño del modelo, especialmente si el grafo de transición de estados se extrae de un sistema concurrente con muchos componentes. En esta sección se describe un algoritmo de verificación de modelos simbólicos para Cálculo- $\mu$  que opera sobre estructuras de Kripke, esta vez representadas no de manera explícita, sino de manera simbólica a través de fórmulas lógicas.

### 3.1 Representación de fórmulas lógicas

Los árboles binarios de decisión ordenados (OBDDs) son formas canónicas de representación de fórmulas lógicas. Son considerablemente mas compactos que las formas normales tradicionales como la forma normal conjuntiva y la forma normal disyuntiva, y pueden ser manipulados eficientemente. Por esto, los OBDDs han sido utilizados ampliamente para una variedad de aplicaciones en el diseño asistido por computadoras, incluyendo simulación simbólica, verificación de lógica combinatoria y, mas recientemente, verificación de sistemas concurrentes con estados finitos.

Para entender la necesidad de usar OBDDs, consideremos primero los árboles binarios de decisión. Un árbol binario de decisión es un árbol dirigido con raíz que consiste en vertices terminales y no terminales. Cada vertice no terminal  $v$  esta etiquetado por una variable  $var(v)$  y tiene dos hijos:  $izq(v)$  corresponde al caso en que  $v$  tenga el valor 0 y  $der(v)$  en caso contrario. Cada vértice terminal esta etiquetado por una constante  $valor(v)$  la cual es 0 o 1. Un árbol binario de

decisión para la fórmula  $f(a, b, c) = (a \wedge b) \vee (a \wedge c)$  es mostrado en la figura 3.1. Uno puede decidir si una asignación particular a las variables hace verdadera la fórmula o no al atravesar el árbol desde la raíz hasta un vertice terminal. Por ejemplo, la asignación  $\{a \leftarrow 1, b \leftarrow 0, c \leftarrow 0\}$  lleva al vértice terminal 0, por lo tanto la fórmula es falsa para esta asignación.

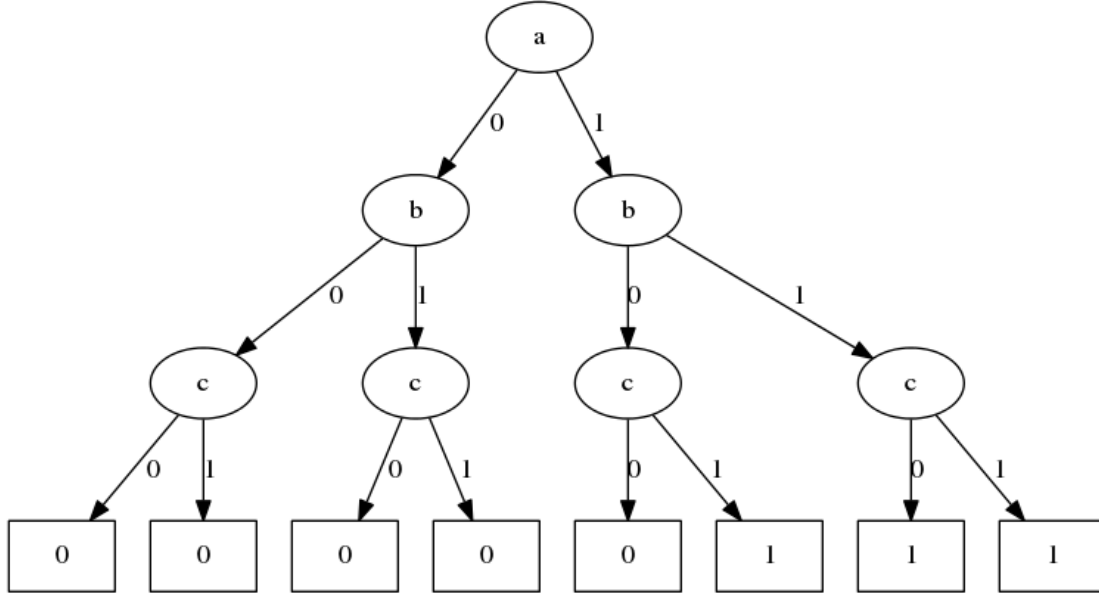


Figure 3.1: Árbol binario de decisión para este ejemplo.

Los árboles binarios de decisión no proveen una representación muy concisa para las funciones lógicas. De hecho, tienen el mismo tamaño que las tablas de verdad. Afortunadamente, es común que haya mucha redundancia en tales árboles. Por ejemplo, en la figura 3.1 todos los caminos donde  $a$  tiene el valor 0 llevan al nodo terminal 0, por lo tanto no sería necesario analizar los valores de  $b$  y  $c$  en esta rama. Esto lleva a pensar que hay formas de reducir el tamaño del árbol unificando subárboles isomorfos. Esto da como resultado un grafo acíclico dirigido (DAG) llamado diagrama binario de decisión (BDD). Mas precisamente, un BDD es un grafo con raíz, dirigido y acíclico con dos tipos de vertices, vertices terminales y no terminales. Estos tienen el mismo significado que en el caso de los árboles. Cada BDD  $B$  con raíz  $v$  determina una función lógica  $f_v(x_1, \dots, x_n)$  de la siguiente manera [2]:

1. Si  $v$  es un vértice terminal: (a) Si  $valor(v) = 1$  entonces  $f_v(x_1, \dots, x_n) = 1$ . (b) Si  $valor(v) = 0$  entonces  $f_v(x_1, \dots, x_n) = 0$ .

2. Si  $v$  es un vértice no terminal con  $var(v) = x_i$  entonces  $f_v$  es la función

$$f_v(x_1, \dots, x_n) = (\neg x_i \wedge f_{izq(v)}(x_1, \dots, x_n)) \vee (x_i \wedge f_{der(v)}(x_1, \dots, x_n))$$

Bryant demostró como obtener una representación canónica para funciones lógicas al poner dos restricciones sobre los BDDs. Primero, las variables deberían aparecer en el mismo orden a lo largo de cada camino desde la raíz a un terminal. Segundo, no debería haber subárboles isomórficos o vertices redundantes en el diagrama. El primer requisito se logra al imponer un ordenamiento total  $<$  sobre las variables que etiquetan los vertices en el BDD y requiriendo eso para cada vertice  $u$  en el diagrama, si  $u$  tiene un sucesor no terminal, entonces  $var(u) < var(v)$ . El segundo requisito se logra al aplicar repetidamente tres reglas de transformación que no alteran la función representada por el diagrama

Eliminar terminales duplicados: Dejar solo un terminal para cada valor y redirigir todos los arcos a los eliminados hacia este.

Eliminar no terminales duplicados: Si dos no terminales  $u$  y  $v$  tienen  $var(u) = var(v)$ ,  $izq(u) = izq(v)$  y  $der(u) = der(v)$ , entonces eliminar  $u$  o  $v$  y redirigir todos los arcos que iban al vertice eliminado hacia el otro.

Eliminar tests redundantes: Si el no terminal  $v$  tiene  $izq(v) = der(v)$ , entonces eliminar  $v$  y redirigir todos los arcos a  $izq(v)$ .

Empezando por un BDD satisfaciendo la propiedad de ordenamiento, la forma canónica se obtiene aplicando las reglas de transformación hasta que el tamaño del diagrama no pueda ser reducido. Al resultado lo vamos a llamar OBDD.

Hay que destacar que el tamaño del OBDD depende fuertemente del ordenamiento de las variables. Esto se puede ver en las figuras 3.2 y 3.3

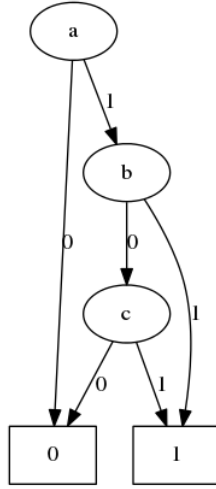


Figure 3.2: OBDD con ordenamiento  $a < b < c$  para el ejemplo dado.

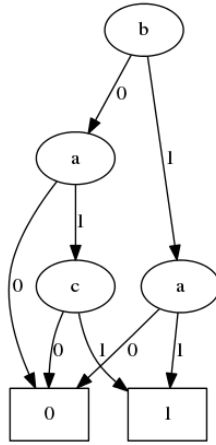


Figure 3.3: OBDD con ordenamiento  $b < a < c$  para el ejemplo dado.

## 3.2 Representación de estructuras de Kripke

Para ilustrar como los OBDDs pueden ser usados para representar concisamente una estructura de Kripke, consideremos la estructura de dos estados mostrada en la figura 3.4 donde  $L(s_1) = \{x, y\}$  y  $L(s_2) = \{x, y, z\}$ . En este caso hay tres variables de estado,  $x$ ,  $y$ , y  $z$ . Introducimos tres variables más,  $x'$ ,  $y'$  y  $z'$ , para

representar el estado sucesor. Asi, representaremos la transición de  $s_1$  a  $s_2$  como la conjunción

$$(x \wedge y \wedge x' \wedge y' \wedge z')$$

La fórmula lógica para todo el sistema de transiciones esta dada por

$$(x \wedge y \wedge \neg z \wedge x' \wedge y' \wedge z') \vee (x \wedge y \wedge \neg z \wedge x' \wedge y' \wedge \neg z') \vee (x \wedge y \wedge z \wedge x' \wedge y' \wedge \neg z') \vee (x \wedge y \wedge z \wedge x' \wedge y' \wedge z')$$

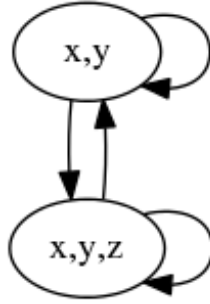


Figure 3.4: Estructura de Kripke con dos estados.

En la fórmula hay cuatro disyuntos porque la estructura de Kripke tiene cuatro transiciones. Esta fórmula se convierte ahora en OBDD para obtener una representación concisa de la relación de transición. En muchos casos, construir una representación explícita de la estructura de Kripke  $M$  y luego codificarla como se vió anteriormente no es factible porque la estructura es demasiado grande, incluso si la representación simbólica termina siendo concisa. Por lo tanto, en la práctica construimos los OBDDs directamente desde una descripción de alto nivel del sistema. En el próximo capítulo, cuando introduzcamos el lenguaje de modelado de sistemas utilizado en este trabajo, veremos como se realiza esta transformación.

### 3.3 Algoritmo de verificación de modelos simbólicos

En la sección anterior vimos como codificar una estructura de Kripke como un OBDD, ahora mostraremos una adaptación del algoritmo de verificación con estados explícitos, ahora con un modelo simbolico en forma de OBDD. En este caso transformaremos las fórmulas del Cálculo- $\mu$  de la siguiente manera[2]:

- Los valores Falso y Verdadero estan representados por OBDD-FALSE y OBDD-TRUE que son constantes(hojas).
- Cada proposición atómica  $p$  tiene un OBDD

asociado con el mismo. Lo denotaremos como  $OBDD_p(x)$ , donde  $x$  es un estado del sistema, este OBDD cumple la propiedad de que  $x$  satisface  $OBDD_p$  si y solo si  $x \in L(p)$ . - El sistema de transiciones tiene un diagrama ordenado de decisión  $OBDD_m(x, x')$  asociado al mismo. Un par  $(x, x') \in S \times S$  satisface  $OBDD_m$  si y solo si  $(x, x') \in T$

Asumamos que tenemos una fórmula  $f$  de cálculo- $\mu$  con las variables relacionales libres  $Q_1, \dots, Q_k$ . La función  $assoc[Q_i]$  asigna a cada variable relacional el OBDD correspondiente al conjunto de estados asociados a esa variable. La notación  $assoc(Q \leftarrow B_Q)$  significa que a  $Q$  se le da el valor  $B_Q$ , se puede ver a  $assoc$  como un ambiente de OBDDs. A continuación se da el procedimiento  $B$  que, apartir de una fórmula  $f$  y una función  $assoc$ , retorna el OBDD correspondiente a la semántica de  $f$ .

$$\begin{aligned}
B(p, assoc) &= OBDD_p(x) \\
B(Q_i, assoc) &= assoc[Q_i] \\
B(\neg f, assoc) &= \neg B(f, assoc) \\
B(f \wedge g, assoc) &= B(f, assoc) \wedge B(g, assoc) \\
B(f \vee g, assoc) &= B(f, assoc) \vee B(g, assoc) \\
B(\diamond f, assoc) &= \exists x' : OBDD_m(x, x') \wedge B(f, assoc)(x') \\
B(\square f, assoc) &= B(\neg \diamond \neg f, assoc) \\
B(\mu Q.f, assoc) &= FIX(f, assoc, OBDD - FALSE) \\
B(\nu Q.f, assoc) &= FIX(f, assoc, OBDD - TRUE)
\end{aligned}$$

Donde  $B(f, assoc)(x')$  reemplaza cada aparición de  $x$  por  $x'$ , y  $FIX$  es la siguiente función [2]:



```

1  function FIX(f, assoc, BQ)
2  result-bdd = BQ,
3  repeat
4      old-bdd := result-bdd;
5      result-bdd := B(f, assoc(Q ← old-bdd));
6  until (equal(old-bdd, result-bdd));
7  return(result-bdd);
8  end function

```

Figure 3.5: Pseudocódigo e la función *FIX*.

### 3.3.1 Complejidad

Un interrogante importante en cuanto a la verificación de modelos para cálculo- $\mu$  es su complejidad. Los algoritmos mas eficientes conocidos son exponenciales en cuanto al tamaño de la fórmula. Existe la conjetura[2] deque no hay un algoritmo polinomial para el problema de la verificación de modelos para cálculo- $\mu$ . Es posible demostrar que el problema esta en  $NP \cap co - NP$ . Si el problema fuera NP-completo, entonces NP seria igual a co-NP, lo cuál se cree que no es cierto.

# Chapter 4

## Lenguaje MC2

MC2 es el verificador de modelos desarrollado en esta tesis, el mismo toma modelos escritos en un lenguaje que tambien llamaremos MC2, el modelo incluye la descripción del sistema y las propiedades que debe satisfacer en Cálculo- $\mu$ . El diseño del lenguaje de modelado se centra en la noción de estructuras de Kripke, es decir que con este lenguaje se puede describir el comportamiento del sistema en términos de transiciones de entre estados, y además especificar las propiedades que se desean verificar sobre el modelo. Primero analizaremos la sintaxis y semántica de la parte del lenguaje que se encarga de la descripción del sistema, y luego veremos la sintaxis y semántica de la parte de especificación de propiedades.

### 4.1 Sintaxis

Sean  $p \in AP, X \in VName$ , entonces la sintaxis de MC2 se define con la siguiente gramática:

$$D := p \\ | D; D$$

$$C := E -> E \\ | C; C$$

$$E := p \\ | !p \\ | E, E$$

$$P := F \\ | P, P$$

$$F := p \\ | : X \\ | !F \\ | (F \quad F) \\ | (F|F) \\ | <> F \\ | []F \\ | \%X.F \\ | \$X.F$$

$$M := \textit{vars } D \textit{ rules } C \textit{ init } E \textit{ check } P$$

Usamos la coma ',' para separar elementos de una lista de expresiones, y , punto y coma ';' para separar elementos de una lista de comandos o de declaraciones. La diferencia es sutil pero es importante destacarla para evitar confusión.

## 4.2 Semántica

$$[[\text{vars } D \text{ rules } C \text{ init } E \text{ check } P]]_m = (hdP, [[hdP]]_f) + +[[[[\text{vars } D \text{ rules } C \text{ init } E \text{ check } tlP]]_f,$$

$$\begin{aligned} [[p]]_f &= OBDD_p \\ [[: X]]_f &= assoc[: X] \\ [[!F]]_f &= NOT[[F]]_f \\ [[F \& G]]_f &= [[F]]_f AND [[G]]_f \\ [[F | G]]_f &= [[F]]_f OR [[G]]_f \\ [[<> F]]_f &= EXISTSx' : OBDD_m AND [[F]]_f(x') \\ [[[F]]]_f &= [[! <> !F]]_f \\ [[\%X.F]]_f &= FIXOBDD - FALSE \\ [[\$X.F]]_f &= FIXOBDD - TRUE \end{aligned}$$

## 4.3 Diseño

# Bibliography

- [1] C. Baier and J.-P. Katoen, *Principles of Model Checking*. The MIT Press, 2008.
- [2] O. G. Edmund M. Clarke, Jr. and D. A. Peled, *Model Checking*. The MIT Press, 2000.
- [3] D. Kozen, *Results on the prepositional mu-calculus*. Elsevier Science Publishers B.V., 1983.

# Apéndice

# Appendix A

## Código

Código.