# Capítulo 1

# Introducción

## 1.1 Procesos a eventos discretos de tiempo real

Este libro estudia sistemas compuestos de *procesos a eventos discretos de tiempo real*. Ejemplos típicos de tales sistemas son encontrados en una variedad de aplicaciones tales como control de procesos, sistemas de manufactura flexible, robótica, redes de comunicación, sistemas de tráfico, aviónica y sistemas de computadoras inmersos de tiempo real. ¿Cuáles son las características de los procesos a eventos discretos de tiempo real, y por qué debemos estudiarlas?

¿Qué son los procesos a eventos discretos de tiempo real?

Los principales componentes de un proceso a eventos discretos son sus estados y eventos. Un estado tiene duración en el tiempo, por ejemplo, “la parte 46 está actualmente sobre el transportador 2”. Un evento ocurre instantáneamente, por ejemplo, “el transportador falla”. Los siguientes elementos incluyen algunas de las características de los procesos a eventos discretos de tiempo real.

* Los eventos ocurren en tiempos discretos y los estados tienen valores discretos.
* Los procesos son dirigidos por eventos más que dirigidos por el reloj.
* Los procesos son típicamente no determinísticos (capaces de hacer elecciones por algún mecanismo no modelado por el analista de sistema). No se postulan características estocásticas explícitas ---el foco está sobre la posibilidad más que la probabilidad de ocurrencia de evento.
* Los procesos generalmente tienen comportamiento dinámico interno, y también interactúan y reaccionan con sus ambientes (la interacción frecuentemente no termina).
* Los procesos operan concurrentemente y se comunican unos con otros (por ejemplo a través de paso de mensajes sobre canales).
* Frecuentemente los deadlines de tiempo real “duros” deben ser cumplidos para operación segura. La corrección del sistema depende no solamente del resultado lógico del comportamiento del sistema sino también del tiempo en el cual los resultados son producidos.

Hay muchos ejemplos donde los deadlines de tiempo real duros deben ser cumplidos. Si la temperatura de un núcleo de un reactor nuclear es demasiado alta una alarma debe ser generada dentro de algún deadline. El spray que pinta un auto sobre un transportador en movimiento debe ser iniciado en algún tiempo adecuado y debe terminar algún tiempo más tarde. Cuando un avión entra a una región de control de tráfico aéreo, el controlador de vuelo debe ser informado en tiempo y forma. Una vez que el acercamiento de un tren es detectado, el tránsito vehicular y peatonal en la intersección del tren deben ser detenidos antes de que el tren alcance la intersección. Si la computadora que controla un robot no le da la orden de detenerse o girar a tiempo, el robot podría colisionar con otro objeto sobre el piso de fábrica.

¿Por qué estudiar procesos a eventos discretos de tiempo real?

Hay un concenso general en la literatura de software y sistemas de control [86,24,7,44,82] que los sistemas a eventos discretos son difíciles de modelar, especificar y diseñar. Además, la experiencia ha mostrado que los componentes software de sistemas son problemáticos (tal vez incluso más que los componentes mecánicos u otro hardware).

El software es complejo (considere la documentación necesaria para inclusive módulos simples), no es robusto (pequeños errores tienen consecuencias grandes) y el software es notoriamente difícil de probar (el número de casos de prueba que deben ser revisados se hace inmanejablemente grande incluso en sistemas pequeños) [70]. No es una sorpresa que el primer vuelo del transbordador espacial fue retardado por un error de temporización sutil, el cual fue trazado a una condición de carrera improbable en el software de control de vuelo [21]. Aunque no hubo pérdida de vidas en esa ocasión, otras computadoras de tiempo real están en el corazón de sistemas en los cuales errores de software pueden tener consecuencias catastróficas.

Dado que los procesos a eventos discretos ocurren en tantos sistemas de seguridad críticos, hay obviamente una necesidad de modelar, especificar, diseñar y verificar tales procesos para asegurar su comportamiento seguro.

¿Cómo este libro estudiará procesos a eventos discretos de tiempo real?

Desde hace mucho se ha conjeturado que un enfoque matemático formal sería útil para superar algunas de las dificultades en la especificación, diseño e implementación de sistemas complejos.

Pero ¿qué beneficios esperan los teóricos obtener con el uso de un framework formal? Una lista de los beneficios incluye:

* En el proceso de formalización frecuentemente se descubren requerimientos informales, ambigüedades, omisiones y contradicciones.
* El modelo formal podría conducir a métodos de desarrollo de sistemas semi-automatizados (o inclusive automatizados).
* El modelo formal puede ser verificado para corrección por métodos matemáticos (más que por las intratables pruebas caso por caso).
* Un subsistema formalmente verificado puede ser incorporado en un sistema más grande con mayor confianza de que se comporta como está especificado.
* Se puede comparar diseños diferentes.

Muchos frameworks formales han sido desarrollados con algunos de los objetivos de arriba en mente. Este libro presenta uno de tales frameworks llamado el framework ESM/RTTL (véase la sección 1.4 para una explicación). El framework ESM/RTTL aun tiene un largo camino que recorrer antes de que cumpla todos los objetivos de formalización y aun no ha sido probado en el campo sobre problemas reales. Sin embargo, la proliferación de nuevos frameworks esparcidos actualmente en una variedad de disciplinas diferentes es una indicación de la importancia de una tarea (formalización) la cual está aun en su infancia.

En el resto de esta introducción, intentaremos dar un vistaso a algunos de los trends y conceptos tanto en la literatura de sistemas de software y de sistemas de control. Las ciencias de la computación y las ciencias de control están ambas interesadas en sistemas complejos. Sin embargo, sus conceptos, clases de problemas importantes por resolver y herramientas son frecuentemente muy diferentes. El framework ESM/RTTL fue desarrollado usando herramientas de la literatura de verificación de software (sistemas de transición y lógica) para explorar problemas de interés para los ingenieros de control (modelación de plantas y controladores y corrección de controlador), y por lo tanto se encuentra asimismo en la interface entre estas dos disciplinas.

## 1.4 El framework ESM/RTTL

El framework ESM/RTTL es usado para modelar, especificar y verificar sistemas compuestos de procesos a eventos discretos de tiempo real. Las máquinas de estado extendidas (ESM) son usadas para representar procesos a eventos discretos de tiempo real, y la lógica temporal de tiempo real (RTTL) es un lenguaje de afirmación (assertion language) para especificación y verificación.

La conexión entre las ESMs y la RTTL se hace a través de una extensión a la noción de Manna y Pnuely de un sistema de transición equitativo (fair transition system). Un sistema de transición equitativo consiste de un espacio de estados (posiblemente infinito), un conjunto de transiciones que definen transformaciones de estado, un conjunto de estados iniciales, y una familia de justicia y equidad. Una computación es una secuencia de estados cuyo estado inicial está en el conjunto de estados iniciales, cuyos estados sucesores son obtenidos aplicando transiciones habilitadas, y donde las familias de justicia y equidad son usadas para asegurar que ciertos conjuntos de transiciones que son continuamente habilitadas o infinitamente frecuentemente habilitadas en la computación eventualmente ocurran. Una computación puede ser usada para interpretar fórmulas de lógica temporal. Para determinar si un programa concurrente satisface una especificación de lógica temporal S, el programa es primero traducido a un sistema de transición equitativa. La traducción es usualmente un proceso directo, fácilmente automatizado. El programa satisface S exactamente cuando todas las computaciones del programa satisfacen S.

Para obtener el framework ESM/RTTL, a los sistemas de transición equitativos se les hacen las siguientes extensiones:

* Las transiciones tienen asociadas cotas de tiempo inferior y superior (medidas con respecto a un reloj global) de tal manera que las propiedades de tiempo real (incluyendo retardos y agotamientos de tiempo –tiemouts--) puedan ser representados.
* Se agregan dos variables distinguidas: una variable tiempo t (el tiempo del reloj actual) y la variable siguiente transición n (para referirse a los eventos de sistemas complejos).
* En lugar de computaciones, el sistema de transición ahora genera trayectorias o secuencias de estados que toman en cuenta las cotas de tiempo inferior y superior de transiciones.
* Las trayectorias pueden ser interpretadas en lógica temporal de tiempo real (la cual usa operadores estándar junto con la variable tiempo para expresar propiedades de temporización cuantitativas). No se pierde potencia expresiva al hacer la transición de un sistema de transición equitativo al framework ESM/RTTL. Las cotas de tiempo superior e inferior imponen restricciones adicionales sobre las transiciones, entonces se necesitan reglas de demostración adicionales para verificar las propiedades de tiempo real, pero se preservan las reglas de demostración estándares de lógica temporal para verificar comportamiento cualitativo.
* Las ESMs son útiles para representar sistemas de procesos a eventos discretos. Las ESMs modelan eventos espontaneos, eventos controlados, elección no determinística de eventos, eventos compartidos por dos o más ESMs, comunicación inter-ESM y composición paralela de ESMs. Las ESMs también pueden representar las construcciones de lenguajes de programación de tiempo real. La traducción de ESMs a un sistema de transición equitativa (de tiempo real) asociado es directa.

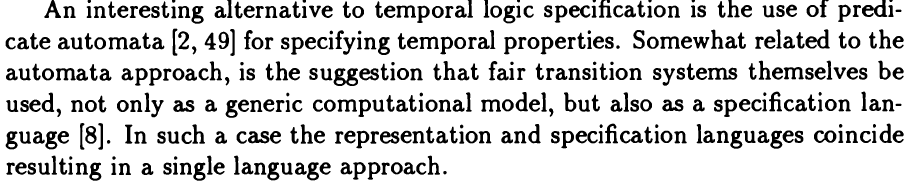
La planta de un sistema a eventos discretos complejo puede ser representada por una planta ESM (la cual en sí misma está compuesta de varias ESMs con cada ESM representando un proceso de la planta). Una especificación S de comportamiento de planta requerido puede ser formulada en RTTL. Un controlador (posiblemente implementado en un lenguaje de programación concurrente de tiempo real) puede ser representado por un controlador ESM. El problema de verificación del controlador puede ser establecido como sigue: dadas las ESMs de la planta y del controlador, revisar si planta||controlador (la composición paralela de planta y controlador) satisface S. El problema de síntesis del controlador puede ser establecido como: dada una especificación S para la planta ESM, se pregunta si hay una forma automática de producir un ESM controlador tal que la composición paralela de lazo cerrado ESM planta||controlador satisface S.

## 1.5 Máquinas de estado extendidas

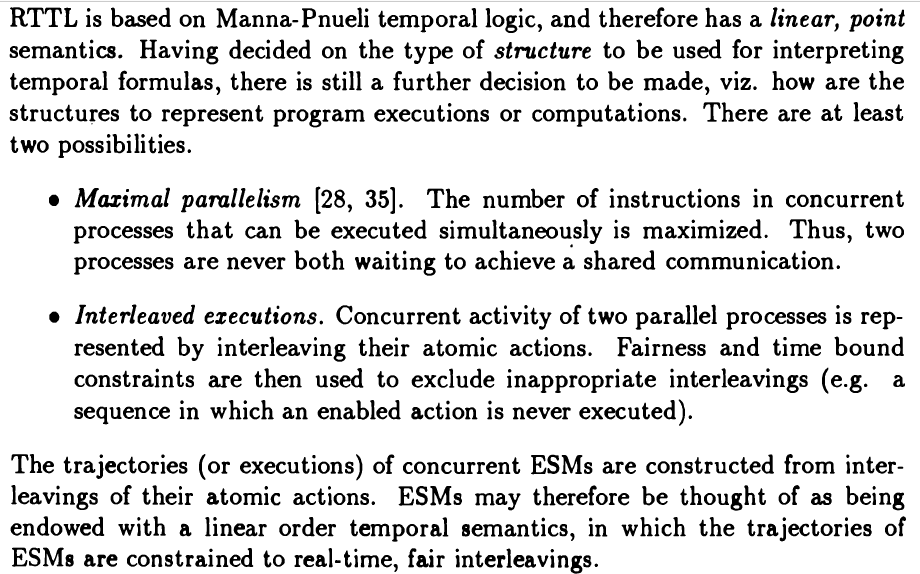
Las ESMs son la principal herramienta de modelado usada en este libro, y el siguiente capítulo estará dedicado a la explicación de las mismas. Sin embargo, las especificaciones RTTL podrían ser aplicadas a cualquier modelo de computación dirigido por sistemas de transición equitativa: variables compartidas, comunicación asíncrona, y modelos de redes de Petri [75]. Las limitaciones del enfoque serán discutidas con más detalle en el capítulo final.

El formalismo de máquinas de estado es uno de los modelos más antiguos de computación digital. Ha sido extensamente usado en especificaciones de requerimientos para computación de tiempo real [88,3] porque es un medio visual, natural para describir el comportamiento dinámico de un sistema complejo. Esta es la razón para elegir máquinas de estado extendidas para representar plantas y controladores. Las ESMs máquinas de estados (posiblemente infinitas) complementadas con nociones de programación estándar de variables datos, eventos con guarda, concurrencia y comunicación. Las máquinas de estado también han sido complementadas con una noción de jeraquía (véase [23]), una característica que actualmente no está en las ESMs.

Una alternativa interesante a la especificación de lógica temporal es el uso de autómatas predicado [2,49] para especificar propiedades temporales.

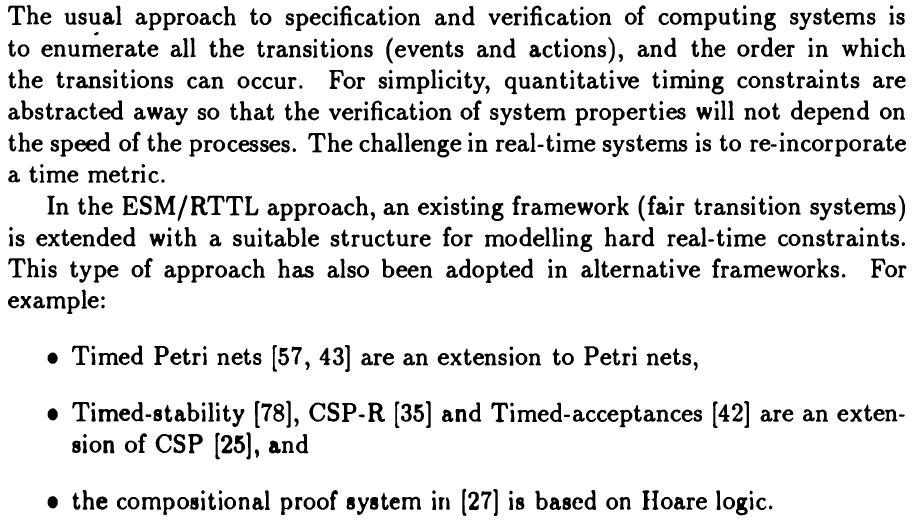


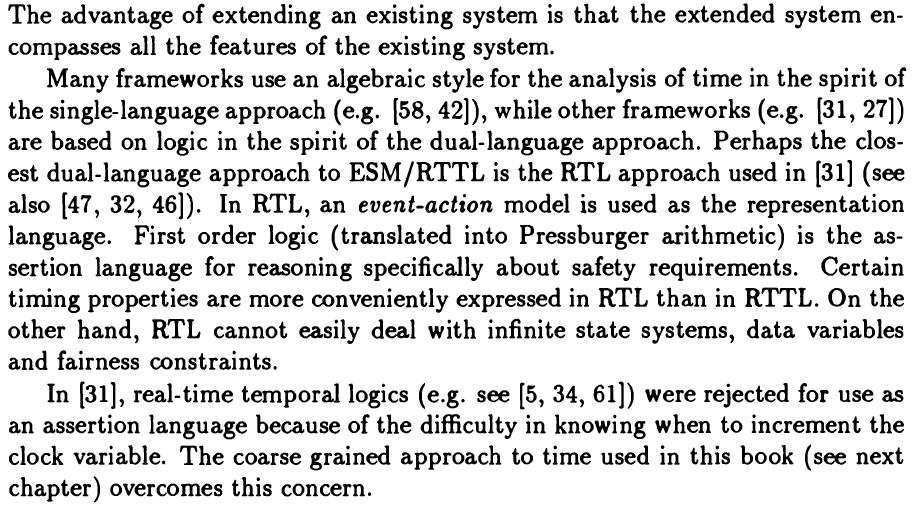
PAG. 10

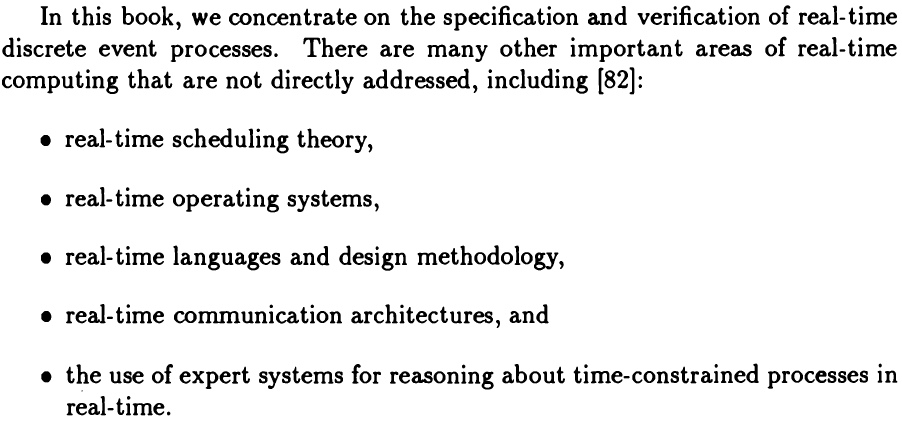


## 1.7 Tiempo real

(PAG. 11)







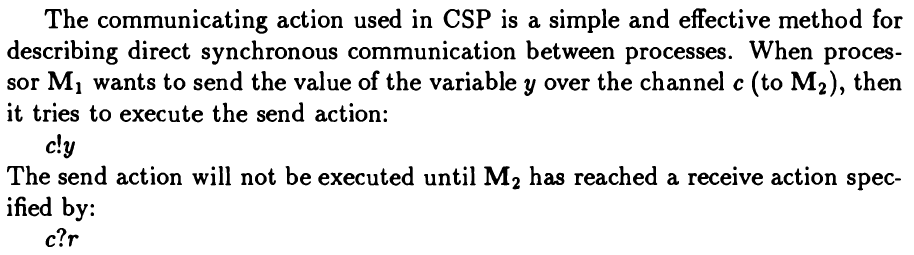
## Capítulo 2

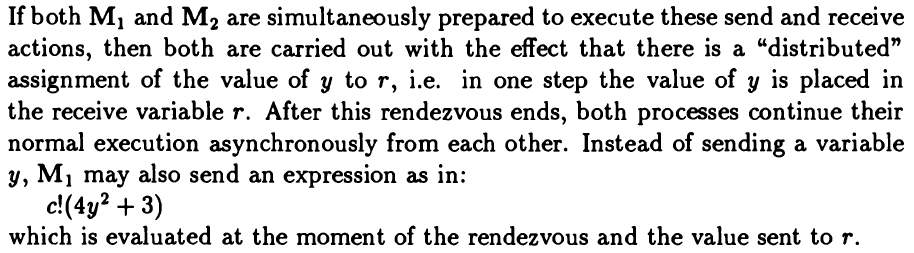
## Sintaxis ESM

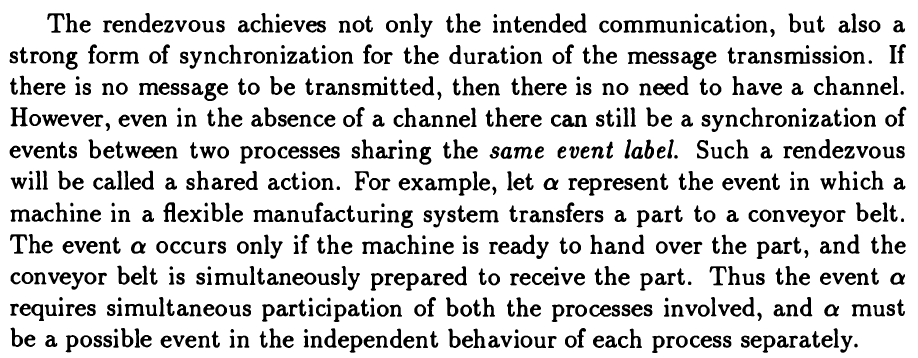
## 2.1 Procesos secuenciales comunicantes

Una explicación breve de algunas características de los procesos comunicantes (CSP) se presenta a continuación para motivar la definición de una ESM. Las características de interés son las *acciones comunicantes* y las *acciones compartidas*.

Sean %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{1}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{2}
\]
\end{document} dos procesos que están conectados por un canal c. Un canal puede ser visto como una línea de comunicación de un sentido que conecta dos procesos, a través de la cual una señal o elemento de datos puede ser transmitido.







## 2.2 Definición formal de una ESM

En el capítulo 2 de [1] se presentan dos ejemplos (el ejemplo de la puerta de tren, y el ejemplo de la vía compartida) para ilustrar la definición sintáctica, e preparar el camino para la semántica formal que se discute en el capítulo 3 de [1].

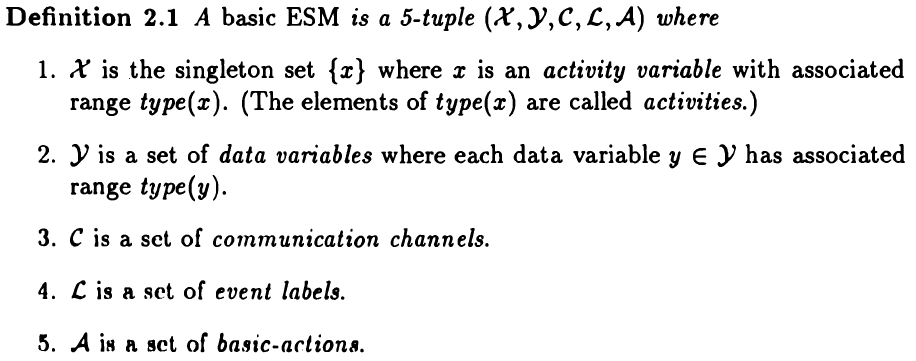
Para hacer afirmaciones sobre el nivel lógico de sistemas a eventos discretos de tiempo real tales como:

1. La parte número 6 está sobre la banda transportadora

Será necesario introducir variables en la definición de una ESM. Las variables parecerán innecesarias al principio, porque las variables no aparecen en la definición de autómata. Sin embargo, hacer afirmaciones tales como (A) en RTTL (véase capítulo 4) dependerá de las variables que serán ahora introducidas.

Cada descripción ESM de un proceso tendrá una variable distinguida llamada una variable de actividad la cual tendrá valores de un conjunto de actividades. Además, una ESM podría tener un conjunto de variables datos para almacenar información numérica o cuantitativa tales como niveles, temperaturas, presiones o un valor dato en un proceso software. Las actividades de una ESM son usualmente llamadas estados en teoría de autómatas. Sin embargo, en el resto de este libro la palabra estado se referirá a los valores de todas las variables de actividad y de datos, i.e., el estado global de la ESM.

La ocurrencia de un evento causa un cambio instantáneo de la actividad actual a una nueva actividad (como en un diagrama de estados estándar), así como también causa un cambio en los valores de las variables datos. Las variables podrían ser usadas como un mecanismo estructurante para la prevención de multitudes de aristas innecesarias que ocurren en los diagramas de estados (por ejemplo, cuando la misma transición debe ser hecha desde un número grande de actividades). Además, una ESM debe ser capaz de modelar ambas cosas procesos hardware y procesos software. Se podrían usar variables dato para representar variables de programa, y consecuentemente también podrían representar datos estructurados tales como arreglos y registros. Además de acciones comunicantes y compartidas, las ESM también cuentan con una acción asignación, la cual modelará cambios a los datos sobre la ocurrencia de un evento.



**basic-actions**: Cada acción básica en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A
\]
\end{document} está dada por %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\{(x,E)\}
\]
\end{document}. %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
E
\]
\end{document} es un evento dado por la 4-tupla %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(a_{s},guard,operation,a_{d})
\]
\end{document} donde %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a_{s}
\]
\end{document} es una actividad fuente en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(x)
\]
\end{document}, %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a_{d}
\]
\end{document} es una actividad destino en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(x)
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
guard
\]
\end{document} es una expresión booleano-valuada en las variables dato.

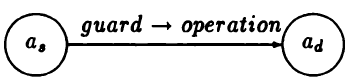
**operations**: Hay tres clases de operaciones:

1. Una operación %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   asignment
   \]
   \end{document} está dada por %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \alpha\left[y\,\,:\,\,a\right]
   \]
   \end{document} (los dos puntos significan asignación, i.e., %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \left[y\,\,:\,\,a\right]
   \]
   \end{document} se lee “a es asignado a y”) donde %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \alpha
   \]
   \end{document} es una etiqueta de evento, %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   y
   \]
   \end{document} es una variable dato, y %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   a
   \]
   \end{document} es una expresión. La expresión %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   a
   \]
   \end{document} debe ser del mismo tipo que la variable dato %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   y
   \]
   \end{document}. La etiqueta evento podría ocurrir por sí misma en una operación, i.e., %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   [y\,\,:\,\,a]
   \]
   \end{document} es opcional. Múltiples asignaciones simultaneas (por ejemplo, 2 asignaciones) en la misma operación son denotadas

%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha[y_{1}:a_{1},y_{2}:a_{2}]
\]
\end{document}.

1. Una operación %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   send
   \]
   \end{document} está dada por %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   c!m
   \]
   \end{document}, donde %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   c
   \]
   \end{document} es un canal en %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   C
   \]
   \end{document} y %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   m
   \]
   \end{document} es un mensaje. Un mensaje es ya sea un término (i.e., una expresión) en las variables datos o de actividad, o una etiqueta de evento.
2. Una operación %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   receive
   \]
   \end{document} es dada por %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   c?r
   \]
   \end{document}, donde %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   c
   \]
   \end{document} es un canal de comunicación, y %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   r
   \]
   \end{document} es ya sea una variable dato o una etiqueta de evento.

La gráfica



es una representación pictórica de un evento. Si la guarda se omite, entonces se asume que es verdadera. Una interpretación informal del evento de arriba es: “si la ESM está actualmente en la actividad %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a_{s}
\]
\end{document} y si la guarda se evalúa a %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
true
\]
\end{document}, entonces la arista es atravesada mientras se está haciendo la %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
operation
\]
\end{document}, después de lo cual la ESM está en la actividad %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a_{d}
\]
\end{document}”.

Las operaciones comunicantes pueden ser usadas ya sea para comandar la ejecución de un evento específico o comunicar un mensaje. Una descripción informal de estos dos tipos de comunicación se presenta a continuación:

**command to execute an event** - La operación %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
send
\]
\end{document} %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c!\alpha
\]
\end{document} en alguna ESM %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{1}
\]
\end{document} se lee “enviar el comando para hacer %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document} sobre el canal %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c
\]
\end{document} (a alguna otra ESM por ejemplo, %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{2}
\]
\end{document} )”. La operación receive %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c?\alpha
\]
\end{document} en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{2}
\]
\end{document} se lee: “recibir el comando para hacer %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document} (por ejemplo, de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{1}
\]
\end{document}) sobre el canal %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c
\]
\end{document} y ejecutar el comando %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document}”. Las operaciones send y receive, cuando están sincronizadas, resultan en el comando y ejecución del evento %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document}.

**communicating a message** - Sea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m
\]
\end{document} un término (el valor de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m
\]
\end{document} es el mensaje), y sea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
r
\]
\end{document} una variable dato. Entonces la operación %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c!m
\]
\end{document} en alguna ESM %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{1}
\]
\end{document} se lee: “envía el mensaje %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m
\]
\end{document} sobre el canal %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c
\]
\end{document} (a alguna otra ESM por ejemplo, %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{2}
\]
\end{document})”. La operación correspondiente %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c?r
\]
\end{document} en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{2}
\]
\end{document} se lee: “recibe un mensaje (de por ejemplo, %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
M_{1}
\]
\end{document}) sobre el canal %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c
\]
\end{document} y poner el mensaje en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
r
\]
\end{document}”. Las operaciones send y receive juntas resultan en una asignación distribuida de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m
\]
\end{document} a %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
r
\]
\end{document}.

Una operación send %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c_{1}!m
\]
\end{document} se parea con una operación %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c_{2}?r
\]
\end{document} si %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c_{1}=c_{2}
\]
\end{document} y, %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
r
\]
\end{document} son la misma etiqueta de evento, o %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
r
\]
\end{document} es una variable dato y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m
\]
\end{document} es un término con el mismo tipo que %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
r
\]
\end{document} (i.e., %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(m)=type(r)
\]
\end{document} ). Una acción send (i.e. una acción basic-action que contiene una operación send) en una ESM M básica no puede tener una acción receive pareada en M como no hay comunicación interna dentro de una misma ESM (un canal representa una conexión uno a uno de M a alguna otra ESM).

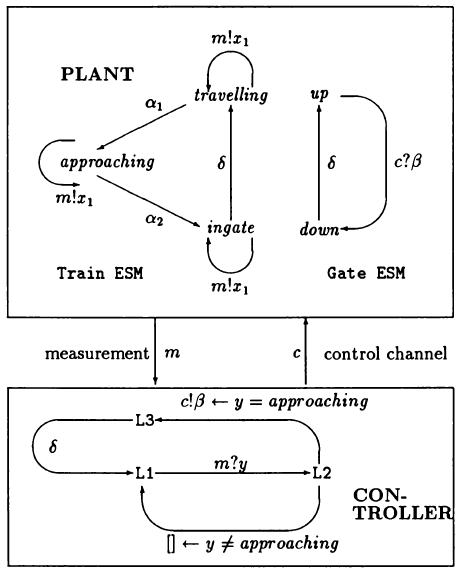


Figure 2.1: ESM representation of the train-gate system

**Example 2.1 (The train-gate example)** La figura 2.1 muestra una representación gráfica de transición de estado de un cruce de vías de tren. La planta consiste de dos procesos: un proceso tren (train) y un proceso puerta (gate). Se va a diseñar un controlador para asegurar que la puerta (barrera) es bajada antes de que el tren llegue al cruce. La puerta (barrera) está ya sea arriba (up) o abajo (down), y el tren puede estar viajando (travelling), acercándose (approaching) (cerca del cruce) o ingate (actualmente en el cruce/actually on the crossing). Hay también etiquetas de evento tales como %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\beta
\]
\end{document} (la puerta es bajada/se baja la puerta(barrera)) y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha_{1}
\]
\end{document} (el tren entra a la zona de aproximación).

La ESM básica gate es una 5-tupla



donde %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(x_{2})=\{up,down\}
\]
\end{document} y



Como en CSP, arreglamos para que las ESMs sincronicen sus eventos cuando necesitan interactuar. De esta forma, el handshaking de nivel más bajo (por ejemplo, a través de semáforos, monitores, o colas de condición) podría ser ignorado. La acción sincronizada consiste de la participación simultanea de eventos componente es llamada una interacción. La definición formal es como sigue:

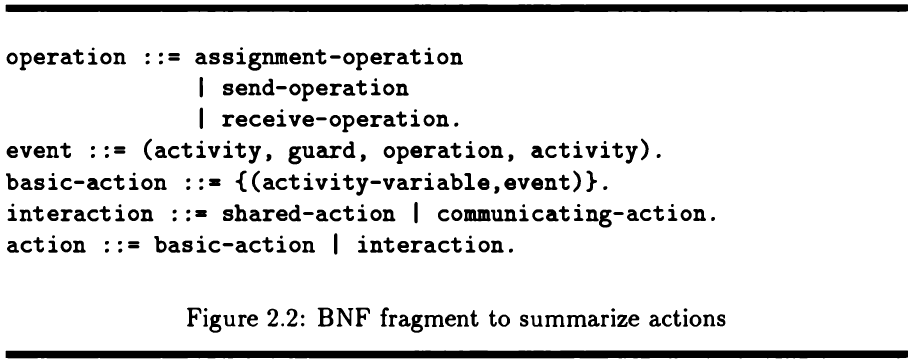
**Definición 2.2 (Actions)** Una action es ya sea una basic-action o una interacción. Una interacción es ya sea una acción compartida (shared action) o una acción comunicante (communicating action) definidas como sigue:

1. Shared actions son definidas inductivamente como sigue. Caso base: Sean **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   A_{i}
   \]
   \end{document}** y **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   A_{j}
   \]
   \end{document}** acciones asignación (i.e., basic-actions con una operación asiganción) de diferentes ESMs teniendo la misma etiqueta de evento **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \alpha
   \]
   \end{document}**. Entonces %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   A_{i}\cup A_{j}
   \]
   \end{document} es una acción compartida con etiqueta de evento compartido asociado %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \alpha
   \]
   \end{document}.

Caso inductivo: Sean %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A_{i}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A_{j}
\]
\end{document} cada uno ya sea una acción de asignación o una acción compartida que tiene etiqueta de evento compartido asociada %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document}. Entonces %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A_{i}\cup A_{j}
\]
\end{document} es también una acción compartida con etiqueta de evento asociado %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document}.

1. Sean **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   A_{s}
   \]
   \end{document}** y **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   A_{r}
   \]
   \end{document}** unas acciones send y receive emparejadas respectivamente. Entonces %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   A_{s}\cup A_{r}
   \]
   \end{document}es una acción comunicante.

Si %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A_{i}\cup A_{j}
\]
\end{document} es una interacción, entonces %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A_{i}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A_{j}
\]
\end{document} son llamadas acciones emparejadas.



La figura 2.2 presenta un resumen de cómo la definición de una acción fue obtenida de operaciones, eventos, basic-actions e interacciones. El siguiente ejemplo ilustrará la ocurrencia de una acción compartida en el sistema train-gate.

**Ejemplo 2.2** En la figura 2.1, la etiqueta de evento **%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\delta
\]
\end{document}** es compartida por la ESM train (donde ésta representa “el tren sale del cruce”) y por la ESM gate (donde ésta representa “la puerta es levantada”). Sea **%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
x_{1}
\]
\end{document}** la variable actividad del tren y **%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
x_{2}
\]
\end{document}** la variable actividad de puerta. Entonces

es una acción compartida y será usada para representar la cooperación del train y la gate en la cual el tren sale del ingate mientras simultáneamente la puerta es levantada.

Similarmente el ESM controlador tiene una acción asignación



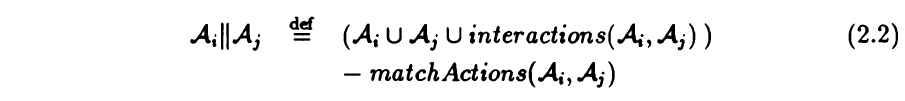
la cual junto con (2.1) produce una nueva acción compartida dada por



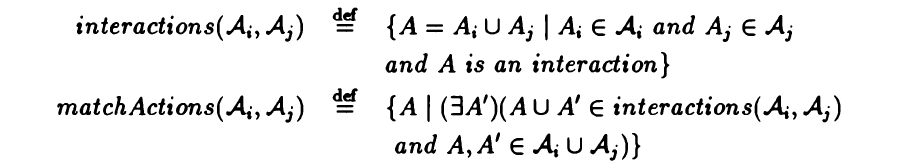
Cuando dos ESMs (por ejemplo, %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M_{1}}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M_{2}}
\]
\end{document}) son puestas en paralelo, entonces se forma una nueva ESM donde %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}=\mathbf{M_{1}}\|\mathbf{M_{2}}
\]
\end{document}. Si no hay interacciones mutuas, entonces las acciones de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} son justo la unión de las acciones de las ESMs componentes %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M_{1}}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M_{2}}
\]
\end{document}, i.e. la historia (o traza) de acciones de la nueva ESM es justo una secuencia intercalada de acciones tomadas de las dos ESMs componentes. Si hay interacciones, entonces las acciones de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} deben reflejar la sincronización de acciones emparejadas tomadas de las ESMs componentes. Las siguientes definiciones formalmente definirán el “wiring together” apropiado de acciones componentes.

[PAG. 21]

**Definition 2.3 (parallel composition of action sets)** Si %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{A}_{i}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{A}_{j}
\]
\end{document} son conjuntos de acciones entonces la composición paralela %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{A}_{i}\|A_{j}
\]
\end{document} es también un conjunto de acciones definidas como sigue



Donde



El conjunto de *matchActions*%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(\mathcal{A}_{i},\mathcal{A}_{j})
\]
\end{document}contiene todas las acciones componentes pareadas, que son usadas para contruir interacciones sincronizadas en *interactions*%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(\mathcal{A}_{i},\mathcal{A}_{j})
\]
\end{document}*,* y los cuales deben por lo tanto ser removidas de la composición paralela.

La definición (de acción composición) implementa una topología de comunicación de canal uno a uno. Esto se hace por simplicidad; sin embargo, la definición puede ser cambiada para permitir otros patrones de conexión. Por ejemplo, para implementar un patrón uno a muchos, interacciones de eventos send no serían removidos a través del operador diferencia de conjuntos en (2.2).

**Definición 2.4 (ESMs via composición paralela)** *Las ESMs son generadas (de ESMs básicas) por finitamente muchas aplicaciones de las siguientes reglas:*

1. Cualquier ESM básica es una ESM.
2. Sean %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \mathbf{M}_{i}=(\mathcal{X}_{i},\mathcal{Y}_{i},\mathcal{C}_{i},\mathcal{L}_{i},\mathcal{A}_{i})
   \]
   \end{document} y %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \mathbf{M}_{j}=(\mathcal{X}_{j},\mathcal{Y}_{j},\mathcal{C}_{j},\mathcal{L}_{j},\mathcal{A}_{j})
   \]
   \end{document} dos ESMs distintas (i.e. %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \mathcal{X}_{i}\cap\mathcal{X}_{j}=\emptyset
   \]
   \end{document} y %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \mathcal{Y}_{i}\cap\mathcal{Y}_{j}=\emptyset
   \]
   \end{document}). Entonces



es una ESM.

Los canales de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}=\mathbf{M}_{i}||\mathbf{M}_{j}
\]
\end{document} proporcionan la interface de comunicación de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} al mundo exterior. Los canales que conectan los componentes de acciones comunicantes de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} son por lo tanto retiradas del conjunto de canales dado que estas soportan únicamente comunicación interna.

La composición paralela es importante en cualquier framework de sistemas serio. Es raramente sensible diseñar un sistema grande como una unidad individual; en lugar de eso, un sistema más grande debe ser construido de componentes más pequeño más tratables. Como una ilustración, el componente planta de train-gate podría ser definida como:

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
plant=train\|gate
\]
\end{document}

El comportamiento de *plant* representa el comportamiento libre no controlado de la planta (en lazo abierto) previo a la imposición de un controlador. Para evaluar el efecto de diferentes políticas de control sobre la planta, el sistema de lazo cerrado

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
trainGate=plant\|controller
\]
\end{document}

podría entonces ser analizado. Tratando a la planta de lazo abierto y al controlador como entidades separadas, es posible plantear preguntas de interés para el ingeniero de control (véanse los problemas de verificación y síntesis que se plantean en la sección 4.4).

Aunque en las ESMs se ha adoptado un modelo de comunicación síncrona, esto no significa que la definición de una ESM no pueda ser extendida para incluir comunicación asíncrona (donde los procesos de comunicación no son bloqueados, sino que continúan su operación después de una operación send). Si una variable queue se agrega para cada canal a la definición de una ESM, entonces una operación send agrega un mensaje al final de la queue y una operación receive obtiene (y entonces borra) mensajes de la parte de enfrente de la queue.

## 2.3 Transiciones asociadas con interacciones

(PAG. 23)En el capítulo 3 de [1] se da una semántica operacional de una ESM asociando una transición con cada acción de la ESM. Formalmente, cada transición está definida como una 5-tupla que consiste del nombre de la transición, condición habilitante, función transformación, y cotas de tiempo inferior y superior. La guarda de una acción debe evaluarse a verdadero para que la condición habilitante de la transición correspondiente sea verdadera. Las ESMs serán interpretadas como generadores de trayectorias (secuencias de estados y transiciones), con transiciones que definen cambios de un estado al siguiente.

Suponga que una transición %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} queda habilitada en algún momento en el tiempo. Llamemos al estado en el cual la transición primeramente queda habilitada un punto de elección. En cada momento, después del punto de elección, la transición permanece habilitada a menos que

1. la transición es expropiada por la ocurrencia de alguna otra transición que causa que la transición %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document} quede deshabilitada, i.e. la condición habilitante de %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document} se convierte en falsa, o
2. la transición %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document} misma ocurre causando un cambio de estado instantáneo determinado por la función transformación. Cuando %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document} ocurre y conduce a un nuevo estado, es posible que %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document}permanezca habilitada en el nuevo estado, en cuyo caso el nuevo estado es en sí mismo un punto de elección. Alternativamente, la ocurrencia de %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document} podría causar que ella misma quede deshabilitada.

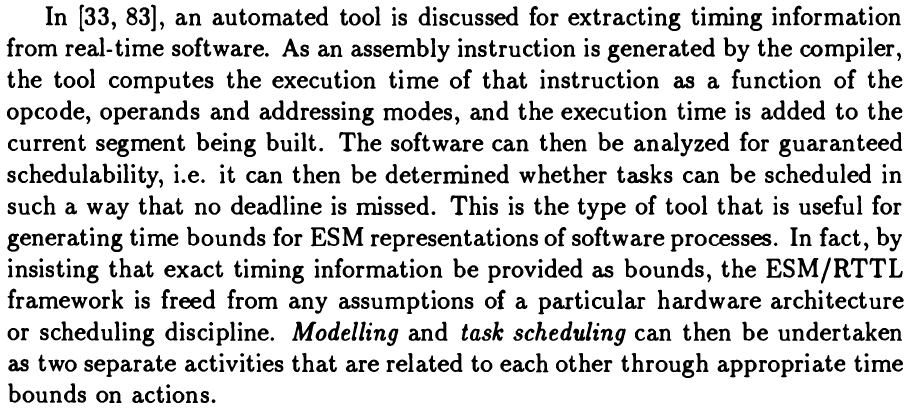
Entre el punto de elección y la ocurrencia real de la transición, podrían ocurrir muchas otras transiciones incluyendo un tick de reloj. La ocurrencia de una transición es considerada como un evento instantáneo indivisible. No ocurren dos transiciones simultáneamente (Para una discusión mayor sobre este punto véase Sección 3.3).

Cada acción (y por lo tanto la transición asociada) tiene una cota de tiempo inferior y una superior. El propósito de esta sección es dar un apunte informal de cómo las cotas de tiempo restringen el comportamiento de las ESMs. La descripción formal será dada en el capítulo 3.

Una cota de tiempo inferior %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
l
\]
\end{document} sobre una transición previene la ocurrencia de la transición hasta que %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
l
\]
\end{document} ticks del reloj han ocurrido desde algún punto de elección de la transición. Una cota de tiempo superior %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
u
\]
\end{document} sobre una transición obliga a la transición a ocurrir dentro de los siguientes %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
u
\]
\end{document} ticks de reloj posteriores a algún punto de elección, a menos que la transición sea deshabilitada por la ocurrencia de alguna otra transición. Algunos ejemplos ilustrarán el rol de las cotas de tiempo.

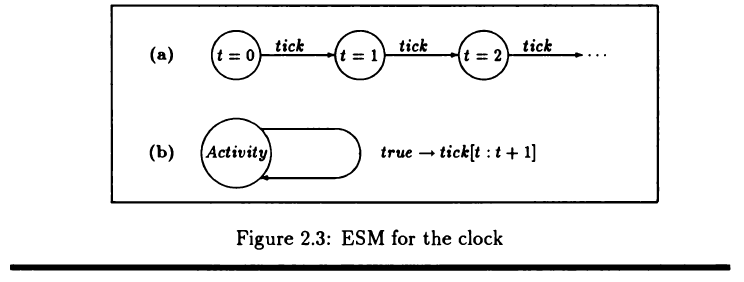
Sea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A_{i}\cup A_{j}
\]
\end{document} una acción compartida con cada acción pareada teniendo operaciones de asignación %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha[y_{i}:a_{i}]
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha[y_{j}:a_{j}]
\]
\end{document} respectivamente. Intuitivamente, la transición asociada ocurrirá solamente si las guardas respectivas están ambas simultáneamente habilitadas, y, al hacer la transición, a %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
y_{i}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
y_{j}
\]
\end{document} se les asignan simultáneamente los valores %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a_{i}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a_{j}
\]
\end{document} respectivamente. Con algún abuso de notación, esta acción compartida será referida por su etiqueta de evento %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document}, i.e. la acción %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document} se refiere a %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A_{i}\cup A_{j}
\]
\end{document}. Una cota de tiempo inferior %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
l
\]
\end{document} sobre la acción %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document}significará que %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document} no podría suceder durante los %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
l
\]
\end{document} ticks de reloj posteriores al punto de elección. Una cota de tiempo superior %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
u
\]
\end{document} sobre la acción %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document} significará que %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document} no puede estar continuamente habilitada sin ocurrir por más de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
u
\]
\end{document} ticks de reloj después del punto de elección.

Las cotas de tiempo podrían ser aplicadas a cualquier basic-action, acción compartida, o ación comunicante. Está más allá del alcance del presente trabajo tratar el tema de cómo se calculan las cotas de tiempo. Calcular cotas de tiempo sobre asignaciones, tiempos a través de canales y handshaking no es obviamente un ejercicio trivial; usualmente se requiere un conocimiento detallado de la arquitectura hardware (incluyendo factores tales como pipelining, memory/bus contention y caching).



En [33,83], se reporta una herramienta para extraer información de temporización de software de tiempo real. De hecho, optando por que la información de temporización exacta sea proporcionada como cotas, se libera al framework ESM/RTTL de cualquier suposición de alguna arquitectura hardware particular o disciplina de planificación. Se puede entonces plantear la modelación y la planificación de tareas como dos actividades separadas que están relacionadas una con otra a través de cotas de tiempo apropiadas sobre las acciones.

Frecuentemente, lo que necesitamos no son cotas de tiempo sobre acciones individuales (o transiciones), sino más bien una cota sobre una secuencia de acciones. Como consecuencia, en la sección 6.3 de [1] se muestra que el análisis puede proceder sin tener que especificar el valor exacto de las cotas. En tal caso, el análisis producirá un resultado tal como “en tanto la secuencia de acciones %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha_{1},\ldots\alpha_{n}
\]
\end{document} es ejecutada en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
u
\]
\end{document} ticks del reloj, la propiedad requerida en la especificación será satisfecha”. Entonces, el análisis en efecto producirá restricciones de planificación para el planificador de tareas de un lenguaje de tiempo real.



Para definir apropiadamente el efecto de las cotas de tiempo inferior y superior, se asume que cualquier ESM %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} siempre tiene asociada con ella una ESM *clock* representando un reloj (conceptual) global. Hay una elección sobre si modelar las características clave del reloj con una variable dato %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
t
\]
\end{document} que se incrementa en uno cada vez que el reloj hace tick (como en la Figura 2.3b), o con un número infinito de variables de actividad (como en la Figura 2.3a). Las variables dato proporcionan una representación concisa de características (p.ej. aritméticas) como distinguidas de las características lógicas del proceso. Entonces se prefiere la representación en la Figura 2.3b.

En un sistema distribuido un reloj global no es físicamente realizable, dado que un conjunto de relojes distribuidos derivará cada uno por su cuenta inclusive si los relojes son sincronizados inicialmente. Podríamos tomar en cuenta una deriva de reloj suficientemente pequeña sumando la máxima deriva posible a la cota de tiempo superior de las acciones, y substrayéndola de su cota de tiempo inferior.

Las siguientes restricciones imponen la relación apropiada entre las cotas de tiempo de acción y los ticks de reloj:

1. El reloj debe hacer tick infinitamente frecuentemente, y
2. Sea %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document} cualquier acción con cota de tiempo inferior %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   l
   \]
   \end{document} y cota de tiempo superior %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   u
   \]
   \end{document}. La cota superior debe ser mayor o igual que la cota de tiempo inferior. Una vez que %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document} está habilitada en algún punto de elección, esta no puede ocurrir por al menos %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   l
   \]
   \end{document} ticks de reloj desde el punto de elección. La transición debe ocurrir dentro de %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   u
   \]
   \end{document} ticks desde el punto de elección a menos que sea expropiada (preempted).

Las suposiciones del reloj y las cotas de tiempo ((a) y (b) arriba) constituyen una interpretación “coarse grained” del tiempo la cual simplifica la modelación de concurrencia de tiempo real. Por ejemplo, no será necesario actualizar el reloj el reloj en un tick cada vez que una acción ocurre; además, una acción espontanea que esté continuamente habilitada podría ocurrir un número de veces no acotado entre cualesquiera dos ticks de reloj.

Una acción espontanea tiene cota de tiempo superior infinita, i.e. una acción espontanea nunca es forzada para ocurrir. Las acciones espontaneas podrían ser usadas para modelar cambios impredecibles tales como una falla de dispositivo. Entonces aun si la guarda de una acción espontanea está habilitada, no hay garantía de que la acción ocurrirá. Los eventos con guarda en la planta permiten hacer control sin dejar fuera comportamiento no determinístico porque dos eventos saliendo de la misma actividad podrían tener sus respectivas guardas simultáneamente habilitadas.

En la Figura 2.1, la ESM *gate* tiene una acción forzada %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\beta
\]
\end{document}. La acción %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\beta
\]
\end{document} es una acción construida de las operaciones emparejadas componente %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c!\beta
\]
\end{document} (“el controlador comanda sobre el canal c que la puerta sea bajada”) y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c?\beta
\]
\end{document} (“la ESM de la *gate recibe el comando para bajar la gate*”). La acción %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\beta
\]
\end{document} tiene una cota superior calculada tomando en cuenta el tiempo para evaluar la guarda (%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
y=approaching
\]
\end{document}), y el tiempo para hacer el handshaking sobre el canal de control.

La acción espontanea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\delta
\]
\end{document} corresponde a la interacción interpretada como “cuando el tren deja el cruce de vía la gate es simultáneamente levantada y el controlador es reseteado a su actividad inicial %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
L1
\]
\end{document}”. Entonces %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\delta
\]
\end{document} involucra sincronización entre las ESMs del tren, de la gate y del controlador. Es espontanea porque el tren es libre de decidir permanecer en la actividad *ingate*.

La acción %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha_{2}
\]
\end{document} tiene una cota inferior %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
l
\]
\end{document} determinada por el tiempo mínimo que le toma al tren llegar al nivel cruzando desde el tiempo en que su aproximación es sensada primero. La cota inferior para %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha_{2}
\]
\end{document} representa una restricción física determinada por la iniercia del tren. Acciones tales como %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha_{2}
\]
\end{document} serán referidas como *acciones locales* porque %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha_{2}
\]
\end{document} es local a la ESM del tren, y puede entonces ocurrir independientemente de (y asíncronamente con) eventos en las otras ESMs.

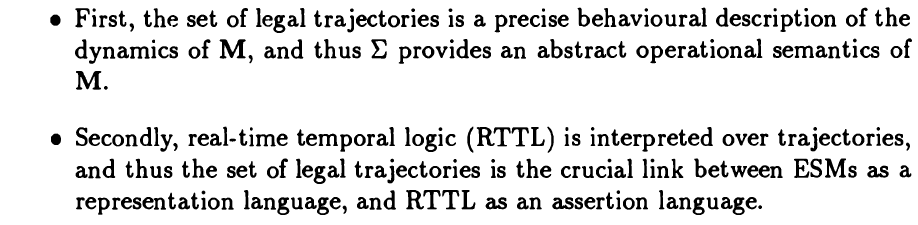
La operación receive %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m?y
\]
\end{document} en la ESM controlador tiene una operación send emparejada %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m!x_{1}
\]
\end{document} en cada actividad de la ESM del tren, correspondiente a la interacción “enviar un mensaje (la actividad actual del tren) sobre el canal %FontSize=11
%TeXFontSize=11
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m
\]
\end{document} al controlador, y poner el mensaje en la variable dato %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
y
\]
\end{document}”. Esta interacción tendrá una cota superior finita si se puede suponer que las mediciones no se pierden. Véase la fórmula (3.1) en el capítulo 3 donde se muestra como agrupar un conjunto de acciones en una ESM (esencialmente tomando la disjuncion de sus guardas) si todas ellas tienen la misma operación (tal como el autociclo %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m!x_{1}
\]
\end{document}), dado que tiene sentido aplicar una cota de tiempo superior y una cota de tiempo superior a la acción aplicada más que a cada una de las acciones individalmente.

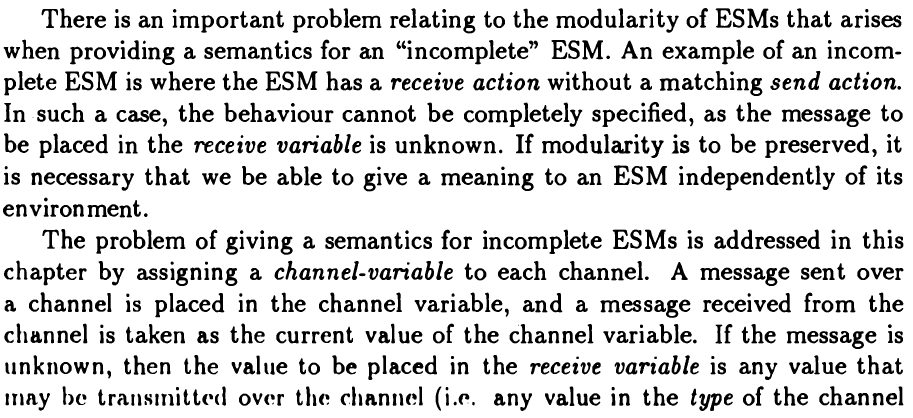
…

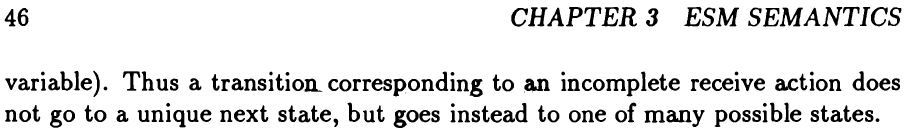
# Capítulo 3 Semánticas ESM

Dada una ESM %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} con espacio de estado %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{S}
\]
\end{document} (las definiciones formales serán dadas más adelante) una trayectoria es cualquier ruta en el espacio de estado consistente de una secuencia infinita de estados y transiciones. El conjunto de todas las trayectorias de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} es denotado %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{S}^{\omega}
\]
\end{document}. No todas las trayectorias representan comportamientos posibles de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document}, debido a las guardas, sincronización de eventos y cotas de tiempo de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} necesariamente prevendrán que ciertas trayectorias nunca se presenten. El conjunto de trayectorias legales de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} (denotado %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{\Sigma}
\]
\end{document}) contiene solo aquellas trayectorias que son comportamientos posibles (entonces, %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{\Sigma}\subset\mathcal{S}^{\omega}
\]
\end{document}).

El propósito de este capítulo es dar una definición precisa de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{\Sigma}
\]
\end{document}. Las trayectorias legales son importantes por dos razones:







## 3.1 Generadores de trayectorias legales

La definición de trayectorias legales está basada en información que pertenece a una ESM tal como su espacio de estado, conjunto de variables y familia de justicia. Toda la información necesaria es colectada en una 6-tupla llamada un *generador* de trayectorias. Después de definir un generador, la noción de estado se actualiza y una discusión breve de justicia de procesos, una definición precisa de trayectorias legales de una ESM basada en su generador se presenta en la sección 3.3.

**Definición 3.1 (Un generador de trayectorias)** *Sea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}=(\mathcal{X},\mathcal{Y},\mathcal{C},\mathcal{C},\mathcal{L},\mathcal{A})
\]
\end{document} una ESM. Un generador de trayectorias para %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} (denotado %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
G_{\mathbf{M}}
\]
\end{document}) es una 6-tupla dada por*



*(el subíndice %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} es omitido si es claro del contexto cuál ESM está siendo descrita del contexto) donde:*



Para cada canal %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c\in\mathcal{C}
\]
\end{document} hay una variable canal %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tilde{c}
\]
\end{document}, y %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tilde{\mathcal{C}}
\]
\end{document} es el conjunto de todas las variables canal. La variable tiempo %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
t
\]
\end{document} es una variable dato de la ESM reloj con dominio %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(t)
\]
\end{document}. Hay una variable distinguida %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{n}
\]
\end{document} (llamada variable siguiente-transición) con %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(\mathbf{n})=\mathcal{T}
\]
\end{document}. %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{V}
\]
\end{document}es llamado el conjunto de variables de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document}. Se asume que todas las variables tienen nombres distintos.

 *%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{R}
\]
\end{document}* es la unión de todos los tipos y es entonces el rango de todos los valores que las variables en %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{V}
\]
\end{document} pueden tener.

el conjunto de todos los estados. Un estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document} es un mapeo %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s:\mathcal{V}\rightarrow\mathcal{R}
\]
\end{document} tal que para cada %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
v\in\mathcal{V}
\]
\end{document} tenemos que %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s(v)\in\,type(v)
\]
\end{document}. %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{S}
\]
\end{document} es llamado el espacio de estado. Asociamos con cualquier estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document} una asignación-estado correspondiente %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document} donde %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document} es la restricción de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document} al dominio %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(\mathcal{V}-\mathbf{n})
\]
\end{document}%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{Q}
\]
\end{document} es el conjunto de todas las asignaciones-estado. Una función-transformación %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
h
\]
\end{document} es una función parcial dada por %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
h:\mathcal{Q}\rightarrow 2^{\mathcal{Q}}
\]
\end{document}.

%FontSize=14
%TeXFontSize=14
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{T}
\]
\end{document}el conjunto de todas las transiciones de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document}. Para cada acción en *%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{A}
\]
\end{document}* hay una transición *%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document}* correspondiente en *%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{T}
\]
\end{document}*. Además de las transiciones correspondientes a acciones, %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{T}
\]
\end{document} también tiene dos transiciones distinguidas: *tick-transition* e *initial*.

Una transición %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document}, correspondiente a una acción con etiqueta de evento %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha
\]
\end{document}, es una 5-tupla %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau=(\alpha,e,h,l,u)
\]
\end{document}, donde %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
e
\]
\end{document} es una condición habilitante, %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
h
\]
\end{document} es una función de transformación y %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
l,u\in\,type(t)
\]
\end{document} son constantes que representan las cotas de tiempo inferior y superior respectivamente.

La transición distinguida *tick-transition* está asociada con la acción reloj de hacer tick de reloj, y está dada por



Hay también una transición distinguida llamada *initial*, la cual deja el estado sin cambio.

* el conjunto de estados iniciales, i.e. %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \Theta\subset\mathcal(S)
  \]
  \end{document}. Cada %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  s_{0}\in\Theta
  \]
  \end{document} tiene %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  s_{0}(\mathbf{n})=initial
  \]
  \end{document}.

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{J}=\{\mathcal{J}_{1},\mathcal{J}_{2},\ldots,\mathcal{J}_{k}\}
\]
\end{document} donde %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{J}
\]
\end{document} es una familia de justicia, y cada %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{J}_{i}
\]
\end{document} en %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{J}
\]
\end{document} es un conjunto de justicia con %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{J}_{i}\subset\mathcal{T}
\]
\end{document}.

La condición habilitante y función transformación de una transición será definida después de haber introducido alguna notación adicional para tratar con actualizaciones de estado. El concepto de familia de justicia será descrito con más detalle en la sección 3.2.

Sea %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s\in\mathcal{S}
\]
\end{document} un estado y sea %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s(v_{1})=d
\]
\end{document} para %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
v_{1}\in\mathcal{V}
\]
\end{document}, %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
d\in\mathcal{R}
\]
\end{document}. Denotamos por %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(s;v_{1}\,:\,d_{1})
\]
\end{document} el estado que difiere de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document} solamente por su valor %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
v_{1}
\]
\end{document} donde este tiene el valor %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
d_{1}
\]
\end{document} en lugar de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
d
\]
\end{document}. Formalmente



La notación puede ser extendida para expresar múltiples (por ejemplo 2) actualizaciones simultaneas de la forma %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(s;v_{1}:d_{1},v_{2}:d_{2})
\]
\end{document}.

Si %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a
\]
\end{document} es un término (por ejemplo una expresión aritmética) entonces la notación %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s(a)
\]
\end{document} significa el valor de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a
\]
\end{document} cuando se evalúa en el estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document}. Para una expresión booleano-valuada %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
b
\]
\end{document}, se dice que %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
b
\]
\end{document} se satisface para el estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document} (escrito: %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s(b)
\]
\end{document}) si %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
b
\]
\end{document} se evalúa a verdadero en %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document}. Las guardas sobre los arcos de las ESMs son todas expresiones booleano-valuadas en las variables de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{V}
\]
\end{document}, y podrían por lo tanto ser evaluadas en cualquier estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document}.

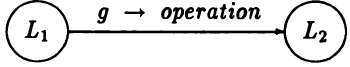
Por simplicidad, evitamos el problema de expresiones que están indefinidas (para algunos estados) de la siguiente forma. Una acción de ESM con guarda y expresión %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a
\]
\end{document} ocurriendo en su operación está bien definida en todos los estados %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document} para los cuales %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s(g)
\]
\end{document} está definido también tenemos que %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s(a)
\]
\end{document} está definido. Por ejemplo, si la expresión %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a
\]
\end{document} es %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
1/y_{i}
\]
\end{document} entonces la condición (%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
y_{i}\neq 0
\]
\end{document}) debe ocurrir en %FontSize=11
%TeXFontSize=11
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
g
\]
\end{document}. Una ESM está bien definida si todas sus acciones están bien definidas.

La notación de actualización de estado también aplica a actializaciones-estado (por ejemplo %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(q;v:d)
\]
\end{document} es la asignación-estado similar a %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document} excepto en %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
v
\]
\end{document} donde esta (esta otra asignación) tiene el valor %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
d
\]
\end{document}). Si una expresión %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
a
\]
\end{document} no contiene alguna ocurrencia de la variable %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{n}
\]
\end{document} (*next-transition*), entonces el valor de la expresión en la asignación-estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document} es el mismo que su valor bajo el estado correspondiente %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document}, i.e. %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s(a)=q(a)
\]
\end{document}.

Una acción %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A\in\mathcal{A}
\]
\end{document} de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} es ya sea una basic-action (i.e. una acción asignación, una acción send, o una acción receive) ó una interacción (i.e. una acción compartida o una acción comunicante). Como se mencionó antes, para cada acción hay una transición correspondiente. La función-transformación %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
h
\]
\end{document} (de una transición %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document}) cuando se aplica a una asignación-estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document} produce un conjunto de asignaciones-estado sucesoras. Usualmente hay una única asignación-estado sucesora. Sin embargo, si %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} corresponde a una acción receive (con operación %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c?r
\]
\end{document}) entonces podrían haber varios estados sucesores correspondientes a todos los diferentes mensajes que podrían ser recibidos sobre el canal %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
c
\]
\end{document} y colocados en la variable %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
r
\]
\end{document}. En general, hay tantos posibles valores de mensaje como elementos en %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(\tilde{c})
\]
\end{document}. Entonces una ocurrencia de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} conduce a %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
|type(\tilde{c})|
\]
\end{document} estados sucesores donde %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
|type(\tilde{c})|
\]
\end{document} es el número cardinal del conjunto %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(\tilde{c})
\]
\end{document}. Definimos abajo la condición-habilitante y función-transformación de una transición correspondiente a cada uno de los diferentes tipos de acciones.

**Definición 3.2 (Condiciones de habilitación y funciones-transformación)**

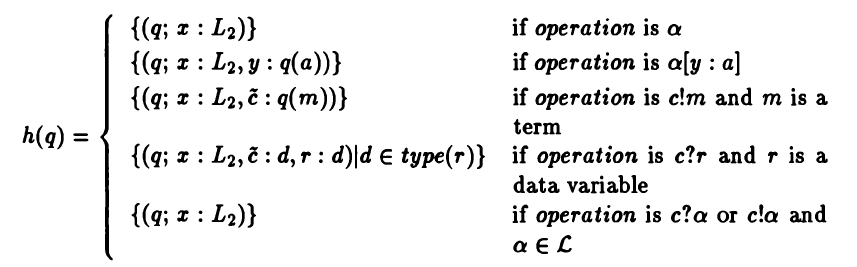
**basic-action:** Sea **%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A\in\mathcal{A}
\]
\end{document}** una basic-action **%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\{(x,E)\}
\]
\end{document}** con **%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
x\in\mathcal{X}
\]
\end{document}** y con el evento **%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
E
\]
\end{document}** dado por



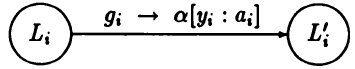
donde %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
L_{1}
\]
\end{document}, %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
L_{2}
\]
\end{document} son actividades en **%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(x)
\]
\end{document}.** Entonces la condición de habilitación es



La función-transformación %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
h
\]
\end{document} está definida para cualquier transformación-estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document} que satisface %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
e
\]
\end{document} como sigue:



**shared action:** Sea **%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A\in\mathcal{A}
\]
\end{document}** una acción compartida %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A=\{A_{1},\ldots,A_{i},\ldots,A_{m}\}
\]
\end{document} donde cada %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A_{i}
\]
\end{document} es una acción asignación %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(x_{i},E_{i})
\]
\end{document} con %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
x_{i}\in\mathcal{X}
\]
\end{document} y con evento %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
E_{i}
\]
\end{document} dado por



Donde %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
L_{i}
\]
\end{document} y %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
L_{i}^{\prime}
\]
\end{document} son actividades en %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
type(x_{i})
\]
\end{document}. Entonces la condición de habilitación es



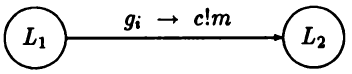
Para cualquier asignación-estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document} que satisface %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
e
\]
\end{document} la función-transformación %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
h
\]
\end{document} es definida como sigue:



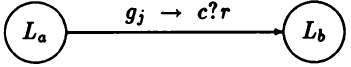
**Communicating action:** Sea **%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A\in\mathcal{A}
\]
\end{document}** una acción comunicante

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
A=\{(x_{i},S),(x_{j},R)\}
\]
\end{document}

donde el evento send %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
S
\]
\end{document} está dado por



y el evento receive %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
R
\]
\end{document} está dado por



Entonces la condición de habilitación es



y para cualquier asignación-estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
h
\]
\end{document} que satisface %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
e
\]
\end{document}

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\begin{enumerate}
\item Si $m$ es un t\'ermino y $r$ es una variable dato $r$, entonces\\
$h(q)=\{(q;x_{i}:L_{2},x_{j}:L_{b},r:m)\}$
\item Si $m$ y $r$ son ambas la etiqueta $\alpha$, entonces\\
$h(q)=\{(q;x_{i}:L_{2},x_{j}:L_{b})\}$
\end{enumerate}
\end{document}

Las variables canal (en la definición de ellos arriba) en las funciones-transformación de acciones básicas send y receive son la “interface” entre una ESM y su ambiente. Las variables canal contienen mensajes de acciones send en tanto no hay acciones receive para aceptar mensajes (y vice-versa). La ESM *planta*=*train*||*gate* para el train-gate es un ejemplo de una ESM incompleta dado que contiene acciones con operación send %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m!x_{1}
\]
\end{document} en el *train* para las cuales no hay acción receive emparejada (dado que la acción emparejada pertenecerá al *controlador* el cual hasta ahora no ha sido determinado).

Sin las variables canal, el comportamiento de tales ESMs incompletas no podría ser definido completamente. Las variables canal no solamente nos permiten definir completamente el comportamiento de ESMs incompletas (váse definición 3.3), sino que son necesarios para preservar la modularidad ESM.

**Ejemplo 3.1** Considere el ejemplo train-gate:

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
trainGate=\mbox{\it train}\|\mbox{\it gate}\|\mbox{\it controller}
\]
\end{document}

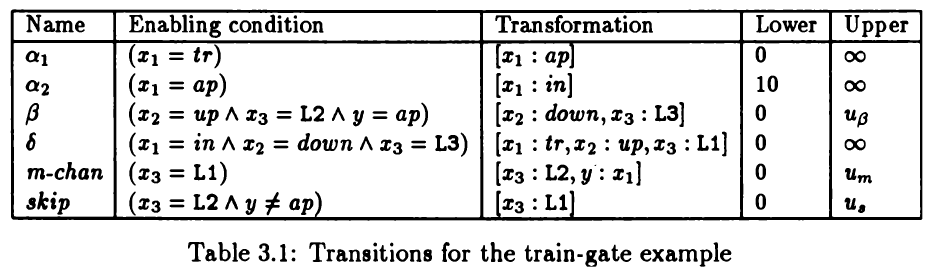
Las transiciones del ejemplo train-gate se muestran en la Tabla 3.1. La función transformación %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
h_{\beta}
\]
\end{document} de la transición con etiqueta de evento %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\beta
\]
\end{document} está dada por:



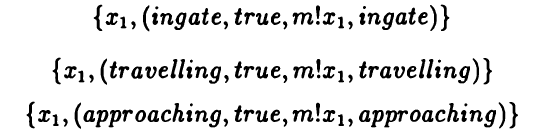
Una abreviación para la función transformación de arriba (llamada el formato asignación para representación de funciones-transformación) es:



la cual indica que al hacer la transición %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\beta
\]
\end{document} a la variable de actividad de gate %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
x_{2}
\]
\end{document} se le asigna el valor %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
down
\]
\end{document} y a %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
x_{3}
\]
\end{document} (la variable de actividad del controlador) se le asigna el valor %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
L3
\]
\end{document}. En general, las funciones transformación serán desplegadas usando este formato.



La ESM *trainGate* es completa (i.e. todas las acciones send tienen acciones receive emparejadas), y entonces ninguna de las transiciones tiene funciones-transformación que involucre un cmabio a variables canal. Sin embargo, considere la ESM *train* por sí misma. Esta tiene tres acciones send básicas dadas por:



Usualmente, cada una de las acciones de arriba tendría su propia transición asociada. Sin embargo, dado que las acciones de arriba tienen todas la misma función transformación, es posible agurpar estas tres acciones juntas para producir una sola transición (llamada digamos %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{s}
\]
\end{document}). La transición resultante %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{s}
\]
\end{document} tiene la condición de habilitación:



la cual es obtenida de la disjunción de las condiciones de habilitación de cada una de las acciones tomadas separadamente (i.e. la transición %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{s}
\]
\end{document} está habilitada si y solo si al menos una de las acciones individuales correspondientes en el grupo está habilitada). Dado que



se sigue que (3.1) es equivalente a *true* (i.e. es posible enviar un mensaje en cualquier estado). La función transformación de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{s}
\]
\end{document} es:



y en formato asignación es denotada:



i.e. si el *train* está en una asignación-estado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document} entonces al hacer la transición %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{s}
\]
\end{document} el estado sucesor es similar a %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document} excepto que %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tilde{m}
\]
\end{document} toma el valor de la variable de actividad %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
x_{1}
\]
\end{document} en %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q
\]
\end{document}. El valor de la variable de actividad no cambia cuando la transición es hecha mientras las acciones correspondientes son autociclos.

La acción send correspondiente a %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{s}
\]
\end{document} tiene una acción receive emparejada dada por: envía



en la ESM controlador. La transición %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{r}
\]
\end{document} correspondiente a la acción en (3.4) tiene la función tramsformación:



la cual en el formato asignación se escribe:



Indicando que %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
x_{1}
\]
\end{document} cambia a %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
L2
\]
\end{document} y que %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
y
\]
\end{document} cambia al valor de la variable canal %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tilde{m}
\]
\end{document} en el siguiente estado (la notación %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\bigcirc\tilde{m}
\]
\end{document} denota el valor de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tilde{m}
\]
\end{document} en el siguiente estado). La parte “%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tilde{m}:\bigcirc\tilde{m}
\]
\end{document}” de la actualización de estado podría parecer confusa a primera vista. Sin embargo, hay una explicación simple: dado que la ESM controlador del train-gate es incompleta no se sabe qué valor tendrá la variable canal en el siguiente estado, y por lo tanto e formato asignación representa el hecho de que cuando se hace la transición, las variables dato %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
y
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tilde{m}
\]
\end{document} cambian al mismo mensaje desconocido que estará residiendo en la variable canal en el siguiente estado. Entonces, (3.5) expresa lo más que se puede decir acerca del valor de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
y
\]
\end{document} y de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tilde{m}
\]
\end{document} en el estado sucesor en la ausencia de cualquier conocimiento de cuál mensaje envía al canal la transición %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{s}
\]
\end{document} en el train. Es claro que las funciones-transformación (3.5) y (3.3) de las transiciones componentes %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{r}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{s}
\]
\end{document} (respectivamente), cuando son llevadas juntas, producen la función transformación %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
[x_{3}:L2,\,y:x_{1}]
\]
\end{document} en la Tabla 3.1, i.e. la transición etiquetada *m-chan* es una transición compartida formada de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{r}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{s}
\]
\end{document}. No hay canal externo %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m
\]
\end{document} para la ESM *trainGate* completa, y por lo tanto la variable canal es dispensada con *m-chan* en esa función-transformación.

Si %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} es una transición con condición-habilitante %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
e
\]
\end{document}, entonces decimos que la transición %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} está habilitada en un estado %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document} si %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s(e)=true
\]
\end{document}. Sea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{T}^{\prime}\subset\mathcal{T}
\]
\end{document}, y sean las %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
m
\]
\end{document} transiciones en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{T}^{\prime}
\]
\end{document} con condiciones-habilitantes %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
e_{1},e_{2},\ldots,e_{m}
\]
\end{document}. Defínase  Un conjunto transición %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{T}^{\prime}
\]
\end{document} está habilitado para un estado %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s
\]
\end{document} si 

La siguiente sección discutirá el significado de la familia de justicia de un generador de trayectorias legales.

## 3.2 Justicia y Equitatividad (Justice and Fairness)

Equitatividad es un nombre genérico para una multitud de conceptos [20] usado en diferentes contextos como elecciones repetitivas entre alternativas (en programas secuenciales) y libertad de inanición en el acceso a recursos por parte de procesos concurrentes. Nos restringimos nosotros mismos al concepto de justicia (o equitatividad debil) desarrollado en [48]. En el contexto del framework ESM/RTTL, justicia expresa el requerimiento de que una ESM continuamente habilitada eventualmente debe progresar. Una trayectoria es excluida del conjunto de trayectorias legales si esa trayectoria falla en satisfacer una restricción de justicia aplicada a conjuntos de transiciones en una *familia de justicia*. El principal propósito de las restricciones de justicia es compensar la representación de concurrencia intercalada, y, por lo tanto, asegurar que cada proceso software (i.e. ESM controlador) eventualmente progresará (dado que esté habilitado).

Una familia de justicia es un dispositivo flexible para acomodar restricciones de justicia en diferentes niveles de detalle una vez que las transiciones de un sistema están definidas. Una restricción de justicia podría ser aplicada hasta a un proceso completo (como los modelados por todas las transiciones de una ESM), o a una sola transición de una ESM.

**Una restricción de justicia sobre un conjunto de transiciones -**  Considere una ESM, dada por

%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}=plant\left\|controller\right.
\]
\end{document}, cuyas transiciones tienen cotas de tiempo superior de infinito (i.e. las transiciones no están forzadas a ocurrir dentro de una cota de tiempo cuantitativa). Aunque no hay restricciones de temporización cuantitativas sobre el comportamiento de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document}, sin embargo, podría ser deseable establecer algunas restricciones de tiempo cualitativas tales como: “*si el controlador está continuamente habilitado entonces alguna transición del controlador debe ocurrir eventualmente*”. Por ejemplo, si el controlador representa un conjunto de tareas software sobre una computadora verdaderamente concurrente (un procesador para cada tarea) entonces es establecimiento de justicia de arriba se cumple automáticamente. Si las tareas de software son implementadas en un ambiente de multiprogramación, entonces un scheduler de tareas asegurará que los procesos del controlador no sean pospuestos indefinidamente. En contraste, la ESM planta podría representar procesos cuyas transiciones podrían no ocurrir aun si éstas están continuamente habilitadas (por ejemplo, una falla de hardware podría nunca ocurrir y sin embargo debe ser modelada como continuamente habilitada, i.e. siempre lista para suceder). El controlador es justo mientras la planta no lo es. Se necesita un mecanismo para excluir (del conjunto legal) solo aquellas trayectorias de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} que muestran al controlador como detenido indefinidamente cuando una de sus ESMs componente está habilitada. Este requerimiento de justicia mínimo es capturado eligiendo una familia de justicia %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{J}=\{\mathcal{T}_{controller}\}
\]
\end{document} con un solo conjunto de justicia %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{T}_{controller}
\]
\end{document} donde %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{T}_{controller}
\]
\end{document} es el conjunto de transiciones del controlador.

**Una restricción de justicia sobre una sola transición –** Un tipo más severo de restricción de justicia podría requerir que si una transición %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} en el controlador (por ejemplo, una elección local no determinística en una sentencia Conic SELECT) está continuamente habilitada, entonces esta debe ocurrir. En este caso, uno de los conjuntos de justicia en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{J}
\]
\end{document} debe ser el conjunto unitario %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\{\tau\}
\]
\end{document}. Tomado junto con el hecho de que el controlador debe ser justo, obtenemos la familia de justicia %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{J}=\{\mathcal{T}_{controller},\{\tau\}\}
\]
\end{document}.

Entonces, la función de un conjunto de justicia es colectar un conjunto relevante de transiciones para el cual una restricción de justicia debe ser establecida. El modelador determina la “granularidad” de la restricción de justicia seleccionando cuáles transiciones van a formar parte de una familia de justicia.

La formulación precisa de una restricción de justicia está dada en la definición 3.3 en la siguiente sección. Si es necesario hacerlo así, una *familia de equitatividad fuerte* podría ser introducida para representar una restricción de la forma: “si el controlador está infinitamente frecuentemente habilitado entonces alguna transición de controlador debe ocurrir”. Sin embargo, a diferencia del caso de justicia, en este caso se deben utilizar algoritmos de task scheduling especiales para asegurar equitatividad fuerte. Por lo tanto, no desarrollaremos restricciones de equitatividad fuerte en el framework ESM/RTTL, dado que es suficiente para nuestros propósitos mostrar que el framework soporta la expresión tanto de propiedades cualitativas (como la de justicia) como de propiedades cuantitativas (a través de las cotas de tiempo).

## 3.3 Trayectorias legales

Sea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{S}
\]
\end{document} el espacio de estado de una ESM. Una *trayectoria* %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\sigma
\]
\end{document} es una secuencia infinita %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s_{0}s_{1}s_{2}\,\ldots
\]
\end{document} de estados en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{S}
\]
\end{document}. El conjunto de todas las trayectorias es denotado por %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{S}^{\omega}
\]
\end{document}. Sea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q_{i}
\]
\end{document} la asignación-estado correspondiente a un estado %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s_{i}
\]
\end{document} en la trayectoria %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\sigma
\]
\end{document}, y sea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s_{i}(\mathbf{n})=\tau_{i}
\]
\end{document}. Entonces



La notación  para una trayectoria es frecuentemente preferida debido a que nos permite dibujar una trayectoria como una secuencia de asignaciones-estado con las transiciones llevándonos de una asignación-estado a la siguiente.

Una ESM que consiste de la composición paralela de ESMs básicas podría, en realidad, tener transiciones de diferentes ESMs componentes ocurriendo simultáneamente. Si ese es el caso, entonces se debe dar una justificación para permitir una “historia serial” tal como



para representar la ejecución de la ESM, dado que esto aparenta que ocurrencias simultaneas de transiciones (locales) de diferentes ESMs son ignoradas.

Sin embargo, el comportamiento de tiempo real de un sistema compuesto de ESMs concurrentes puede ser modelado por una historia *intercalada* serial. Considere dos ESMs simples %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M_{1}}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M_{2}}
\]
\end{document} cada una consistente de las transiciones unitarias %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{1}
\]
\end{document} y %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{2}
\]
\end{document} respectivamente. Suponga que las transiciones están habilitadas en alguna asignación-estado %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q_{i}
\]
\end{document}, y que una vez que ambas transiciones ocurren ambas ESMs terminan, con no más transiciones habilitadas. Suponga que ambas transiciones deben ocurrir antes del siguiente tick de reloj (debido a algunas cotas de tiempo superiores). Hay dos escenarios posibles.

1. **Ocurrencia simultanea -** Ambas transiciones ocurren en el mismo momento. El comportamiento correspondiente es entonces



1. **Ocurrencia serial –** Una transición ocurre antes que la otra. Los posibles comportamientos son:



**o**



La situación (ii) es obviamente modelada muy naturalmente por la naturaleza serial de las trayectorias. ¿Qué hay de la situación (i)? Note que %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q_{i+2}=q^{\prime}
\]
\end{document}, i.e. la última asignación-estado alcanzada en cualquier situación es la misma. La única diferencia entre los dos escenarios es que el comportamiento simultaneo evita las asignaciones-estado intermedias %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q_{i+1}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q_{i+1}^{\prime}
\]
\end{document}. Por lo tanto se sigue que las dos historias seriales en (ii) representa adecuadamente las asignaciones-estado alcanzadas por los dos comportamientos, el simultaneo y el serial. Dado que ambos comportamientos, el simultaneo y el serial son físicamente posibles, las asignaciones-estado intermedias y la asignación-estado terminal %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
q^{\prime}=q_{i+2}
\]
\end{document} son representadas correctamente como que son alcanzables. Si siempre es el caso que %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{1}
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{2}
\]
\end{document} ocurren simultáneamente (y nunca serialmente), entonces el modelador debe usar una interacción para reflejar el hecho de que los estados intermedios nunca son alcanzados.

La secuencia %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau_{0}\tau_{1}\tau_{2}\ldots
\]
\end{document} es un intercalado de secuencias de transiciones de las ESMs componente. El comportamiento de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} podría por lo tanto ser definido por un conjunto de trayectorias. Correspondiendo cada trayectoria a un posible intercalado de transiciones de sus ESMs componentes. No todas las trayectorias en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{S}^{\omega}
\]
\end{document} representan comportamientos reales de la ESM. Algún subconjunto %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\Sigma_{\mathbf{M}}\subset\mathcal{S}^{\omega}
\]
\end{document} (llamado el *conjunto de trayectorias legales*) caracterizará el comportamiento real de la ESM, como está determinado por la siguiente definición.

**Definición 3.3 (Trayectorias legales)** *Sea* %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{G}=(\mathcal{V},\mathcal{R},\mathcal{S},\Theta,\mathcal{T})
\]
\end{document} *un generador de trayectorias para una ESM* %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} *bien definida. El conjunto de trayectorias legales %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\Sigma_{\mathbf{M}}
\]
\end{document} es el conjunto de todas las trayectorias inicializadas de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} junto con todos los sufijos (suffixes) de trayectorias inicializadas. Una trayectoria inicializada* %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\sigma\in\Sigma_{\mathbf{M}}
\]
\end{document} *es cualquier trayectoria* %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\sigma\in\mathcal{S}^{\omega}
\]
\end{document}*,* %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\sigma=s_{0}s_{1}s_{2}\ldots =
\]
\end{document} *que satisface los siguientes requerimientos:*

1. **inicialización –** El estado **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{0}\in\Theta
   \]
   \end{document}** (esto significa que %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{0}(\mathbf{n})=initial
   \]
   \end{document}), y **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   initial
   \]
   \end{document}** nunca ocurre otra vez en **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \sigma
   \]
   \end{document}**.
2. **sucesión –** Para cada **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   i
   \]
   \end{document}**, si %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{i}(\mathbf{n})=\tau
   \]
   \end{document} (donde la transición %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document} tiene condición habilitante %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   e
   \]
   \end{document} y función de transformación %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   h
   \]
   \end{document}), entonces **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{i}(e)=true
   \]
   \end{document}** y **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   q_{i+1}\in h(q_{i})
   \]
   \end{document}**.
3. **justicia –** Sea **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \mathcal{J}_{i}\in\mathcal{J}
   \]
   \end{document}** un conjunto de justicia que está continuamente habilitado después de algún estado %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{k}
   \]
   \end{document} de **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \sigma
   \]
   \end{document}**. Entonces alguna transición en **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \mathcal{J}_{i}
   \]
   \end{document}** debe ocurrir al menos una vez después de **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{k}
   \]
   \end{document}**, esto es, debe existir un **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   j\geq k
   \]
   \end{document}** tal que **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{j}(\mathbf{n})\in\mathcal{J}_{i}
   \]
   \end{document}**. Esto implica que las transiciones en **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \mathcal{J}_{i}
   \]
   \end{document}** deben ocurrir infinitamente muchas veces en **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \sigma
   \]
   \end{document}**.
4. **ticking –** El reloj hace ticks infinitamente frecuentemente, i.e. hay un número infinito de estados %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s
   \]
   \end{document} en **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \sigma
   \]
   \end{document}** tales que **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s(\mathbf{n})=\mbox{\it tick-transition}
   \]
   \end{document}** donde:

**%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mbox{\it tick-transition}=(tick,true,[t\,:\,t+1],0,\infty)
\]
\end{document}.**

1. **cota de tiempo superior –** Sea **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document}** cualquier transición en **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \mathcal{T}
   \]
   \end{document}** con cota de tiempo superior finita **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   u
   \]
   \end{document}** y condición habilitante **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   e
   \]
   \end{document}**. Para cualquier **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   i
   \]
   \end{document}**, si **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{i}(e\wedge t=T)=true
   \]
   \end{document}** (i.e. en el estado %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{i}
   \]
   \end{document}, %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document} está habilitada y la variable de reloj lee %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   T
   \]
   \end{document} ticks de reloj), hay un estado posterior **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{j}
   \]
   \end{document}** en **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \sigma
   \]
   \end{document}** (donde %FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   j\geq i
   \]
   \end{document}) tal que

**%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s_{j}((t\leq T+u)\wedge(\lnot e\vee\mathbf{n}=\tau))=true
\]
\end{document}**

Entonces %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} debe ocurrir dentro de los siguientes %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
u
\]
\end{document} ticks del reloj (desde el punto de elección), a menos que %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} sea expropiada por la ocurrencia de alguna otra transición que cause que la condición de habilitación de %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} se convierta en falsa.

1. **Cota de tiempo inferior –** Sea **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \tau
   \]
   \end{document}** una transición en **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \mathcal{T}
   \]
   \end{document}** con cota de tiempo inferior **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   l>0
   \]
   \end{document}** y condición habilitante **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   e
   \]
   \end{document}**. Para cualquier **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   i<k
   \]
   \end{document}**, sea **%FontSize=10
   %TeXFontSize=10
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{i}(e\wedge t=T)=true
   \]
   \end{document}** y sea **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{k}
   \]
   \end{document}** el primer estado subsecuente a **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{i}
   \]
   \end{document}** en **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   \sigma
   \]
   \end{document}** con **%FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{k}(t=T+l)=true
   \]
   \end{document}** (esto es, el reloj ha hecho tick %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   l
   \]
   \end{document} veces). Si
2. ya sea hay un estado predecesor %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{i-1}
   \]
   \end{document} (a %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{i}
   \]
   \end{document}) para el cual

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s_{i-1}(\lnot e\vee \mathbf{n}=\tau)=true
\]
\end{document}

1. o, %FontSize=12
   %TeXFontSize=12
   \documentclass{article}
   \pagestyle{empty}
   \begin{document}
   \[
   s_{i}\in\Theta
   \]
   \end{document},

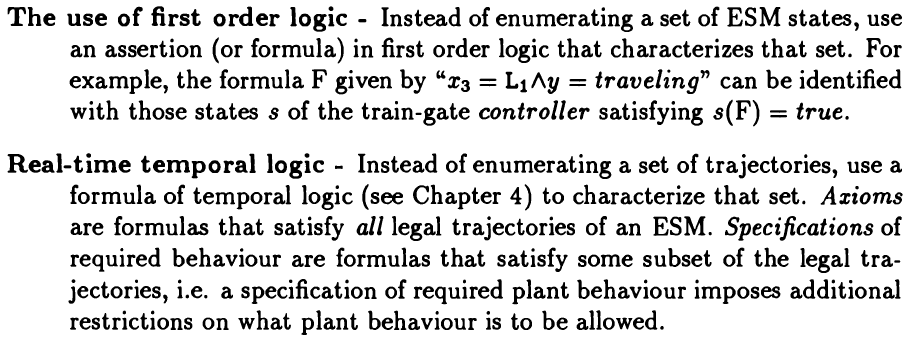
entonces %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s_{j}(\mathbf{n}\neq \tau)=true
\]
\end{document} para todo %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
j=i,(i+1),\ldots,(k-1)
\]
\end{document}.

Las condiciones (i) y (ii) seleccionan estados en trayectorias los cuales son puntos de elección adecuados desde los cuales la cota puede ser medida. La condición (i) afirma que un buen punto de elección %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
s_{i}
\]
\end{document} es ya sea cuando la primera transición es habilitada, o cuando la transición justo ha ocurrido y permanece habilitada. La condición (ii) afirma que cualquier estado inicial es un buen punto de elección.

Los primeros tres requerimientos en la definición de trayectorias legales de arriba son similares a los encontrados en [48]. Sin embargo, las tres últimas condiciones para tiempo real son especiales para nuestra aplicación.

Una nota precautoria importante. Una transición autociclo, la cual tiene ambas cotas de tiempo, inferior y superior iguales a cero, debe ocurrir un número infinito de veces antes de los ticks de reloj. Tales transiciones de orden cero deben por lo tanto ser impedidas si el requerimiento (d) de arriba ha de ser retenido. En general, cualquier secuencia de transiciones de orden cero, donde la secuencia se cicla sobre sí misma, debe ser impedida. Condiciones patológicas como esta no ocurren para transiciones de orden no cero.

Para todas las ESMs (excepto para las triviales), calcular el conjunto de trayectorias legales es frecuentemente una tarea intratable. Afortunadamente, estamos usualmente interesados en establecer solamente que todas las trayectorias legales satisfacen alguna propiedad dada, más que en inspeccionar los detalles de cada trayectoria legal. [PAG. 56] Se debe encontrar un método más abstracto de manejar trayectorias. Una herramienta de abstracción importante es el *assertional reasoning,* el cual será explorado en el siguiente capítulo (capítulo 4). Como una introducción a las principales ideas detrás de *assertional reasoning* considere lo siguiente:



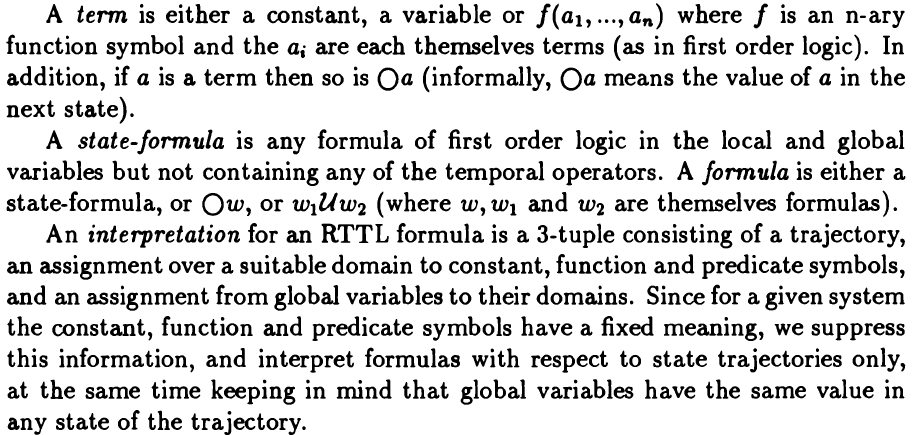
TERMINA Capítulo 3.

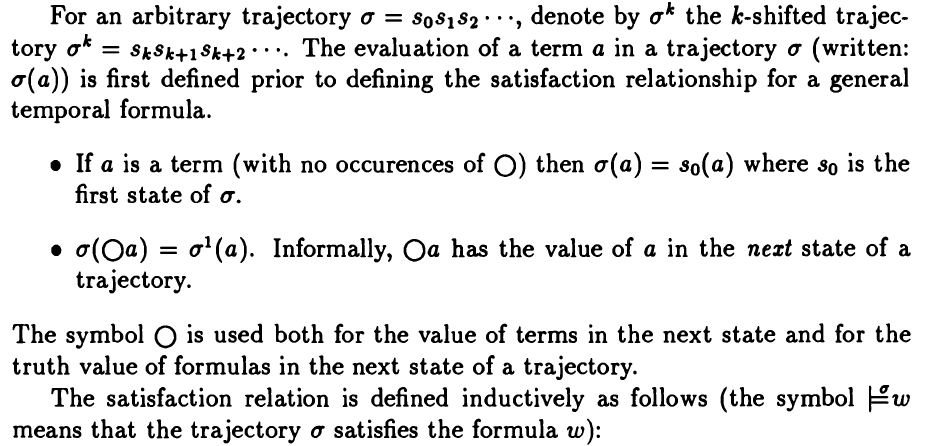
## 4.2 Lógica temporal Manna-Pnueli

Introducción breve a lógica temporal.

Por simplicidad, usamos dos operadores básicos %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\bigcirc
\]
\end{document} (next), y %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{U}
\]
\end{document} (until) de los cuales podemos definir muchos otros operadores útiles incluyendo: ![%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\square
\]
\end{document}](data:image/png;base64,iVBORw0KGgoAAAANSUhEUgAAADQAAAA0BAMAAAA3VgbYAAAAHlBMVEX///8AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAACGjDitAAAACXRSTlMA7xDdic2rdpn9oJx6AAAACXBIWXMAAA7EAAAOxAGVKw4bAAAACXBIWXMAAFxGAABcRgEUlENBAAAAPUlEQVQ4EWNgwA0kZ+IAkxjoKzXZBRO4zpwJcsY0LM5nH5VCCpXR0EAKDIbR0BhBoTG5AxO0QgqHwVCyAQAj3iQTLJiEHQAAAABJRU5ErkJggg==) (henceforth/always), %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\lozenge
\]
\end{document} (eventually), %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
U
\]
\end{document} (unless), y %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{P}
\]
\end{document} (precedes). Otros operadores no tratados aquí tales como previous y since han sido usados para extender el poder expresivo de Lógica Temporal. Se ha encontrado [73] que esos operadores de pasado son útiles para tratar temas de modularidad.

Las variables individuales del lenguaje son particionadas en variables locales (las variables de actividad, las variables dato, las variables canal, la variable siguiente evento %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{n}
\]
\end{document} y la variable tiempo %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
t
\]
\end{document}) las cuales cambian de estado a estado, y variables globales las cuales no cambian con el tiempo. La cuantificación solo es permitida sobre variables globales.





**Definición 4.1 (Satisfacción)** En el apéndice A del [1] se da una definición más completa de esta definición:

Para fórmulas temporales %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega,\,\omega_{1}\,\omega_{2}
\]
\end{document} y trayectoria %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\sigma
\]
\end{document},

* Si %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega
  \]
  \end{document} es %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  p(a_{1},\ldots,a_{n})
  \]
  \end{document} donde %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  p
  \]
  \end{document} es un predicado n-ario, entonces %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}\omega
  \]
  \end{document} si y solo si %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  P(\sigma(a_{1}),\ldots,\sigma(a_{n}))
  \]
  \end{document} se evalúa a verdadero.
* %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}\omega_{1}\vee\omega_{2}
  \]
  \end{document} si y solo si %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}\omega_{1}
  \]
  \end{document} o %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}\omega_{2}
  \]
  \end{document}.
* %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}\lnot\omega
  \]
  \end{document} si y solo si no sucede que %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}\omega
  \]
  \end{document}.
* %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}\bigcirc\omega
  \]
  \end{document} si y solo si %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma^{1}}\omega
  \]
  \end{document}. %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \bigcirc\omega
  \]
  \end{document} podría ser mencionado: %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega
  \]
  \end{document} será verdadero en el siguiente estado.
* %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}\omega_{1}\mathcal{U}\omega_{2}
  \]
  \end{document} si y solo si %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \exists\,k\geq 0
  \]
  \end{document} tal que %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma^{k}}\omega_{2}
  \]
  \end{document} y %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \forall\,i,\,0\leq i<k,\,\models^{\sigma^{i}}\omega_{1}
  \]
  \end{document}.

Entonces, %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{1}\mathcal{U}\omega_{2}
\]
\end{document} puede ser mencionado como: eventualmente %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{2}
\]
\end{document} se cumplirá y hasta entonces %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{1}
\]
\end{document} se cumplirá continuamente.

* Sea %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  V
  \]
  \end{document} una variable global que tiene rango sobre el dominio %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  D
  \]
  \end{document}, y sea %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega(d)
  \]
  \end{document} la fórmula temporal obtenida de %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega(V)
  \]
  \end{document} remplazando cada ocurrencia libre de %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  V
  \]
  \end{document} con %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  d
  \]
  \end{document}. Entonces %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}(\forall\,V\,:\,\omega(V))
  \]
  \end{document} si y solo si para cada %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  d\in D
  \]
  \end{document}, tenemos %FontSize=10
  %TeXFontSize=10
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \models^{\sigma}\omega(d)
  \]
  \end{document}.

Una fórmula %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega
\]
\end{document} para la cual %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\models^{\sigma}\omega
\]
\end{document} es verdadero, se dice que es satisfecha por la trayectoría %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\sigma
\]
\end{document}. Una fórmula válida es satisfecha por todas las trayectorias (o más precisamente satisfecha en todas las interpretaciones ---véase Apéndice A).

Los otros operadores proposicionales (por ejemplo %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\rightarrow
\]
\end{document}) podrían ser definidos en la manera usual de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\vee
\]
\end{document} y ![%FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\lnot
\]
\end{document}](data:image/png;base64,iVBORw0KGgoAAAANSUhEUgAAACsAAAAWBAMAAACrl3iAAAAAG1BMVEX///8AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAB4Gco9AAAACHRSTlMAu83d75lEdhgrc2AAAAAJcEhZcwAADsQAAA7EAZUrDhsAAAAJcEhZcwAAXEYAAFxGARSUQ0EAAAAqSURBVBgZYxBSwgIUGCw6sAAH6ggzYIKIDgdMQQaGUWHMUKFKmKSXFwAALrRCiaGQiYsAAAAASUVORK5CYII=). Nuevos operadores temporales podrían ser definidos de %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\bigcirc
\]
\end{document} y %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{U}
\]
\end{document} como sigue:

* %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \lozenge\omega
  \]
  \end{document} es una abreviatura para %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  (true\mathcal{U}\omega)
  \]
  \end{document}. %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \lozenge\omega
  \]
  \end{document} puede ser mencionado como: eventualmente %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega
  \]
  \end{document} será verdadero en algún estado.
* %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \square\omega
  \]
  \end{document} es una abreviatura para %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \lnot(\lozenge(\lnot\omega))
  \]
  \end{document}. %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \square\omega
  \]
  \end{document} puede ser mencionado como: de aquí en adelante %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega
  \]
  \end{document} será verdadero en todos los estados.
* %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega_{1}\mathcal{P}\omega_{2}
  \]
  \end{document} es una abreviatura para %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  (\lnot((\lnot\\omega_{1})\mathcal{U}\omega_{2}))
  \]
  \end{document}. %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega_{1}\mathcal{P}\omega_{2}
  \]
  \end{document} puede ser mencionado como: si %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega_{2}
  \]
  \end{document} eventualmente entonces %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega_{1}
  \]
  \end{document} debe preceder a %FontSize=12
  %TeXFontSize=12
  \documentclass{article}
  \pagestyle{empty}
  \begin{document}
  \[
  \omega_{2}
  \]
  \end{document}.

Puede verse la Tabla A.1 para una lista completa de abreviaturas y para las convenciones adoptadas para mejorar la legibilidad de fórmulas.

## 4.3 Introducción a RTTL

**Definición 4.2 (Fórmulas RTTL)** Sea %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} una ESM con conjunto de variables (variable-set) %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{V}
\]
\end{document} (el cual incluye las variables distinguidas %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{n}
\]
\end{document} y %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
t
\]
\end{document}). Una fórmula RTTL (para %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document}) es cualquier fórmula de lógica temporal cuyas variables locales están en %FontSize=10
%TeXFontSize=10
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathcal{V}
\]
\end{document}.

La fórmula-estado RTTL %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
t=2
\]
\end{document} es un ejemplo de uso de la variable reloj; esta fórmula se satisface en un estado de una trayectoria en el cual el reloj ya ha hecho tick dos veces. Se usan etiquetas de evento para referirse a las transiciones asociadas, i.e. si la transición %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} tiene una etiqueta de evento asociado %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\alpha_{1}
\]
\end{document} entonces más que escribir %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{n}=\tau
\]
\end{document} escribimos %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{n}=\alpha_{1}
\]
\end{document}. Algunos ejemplos de fórmulas RTTL más complejas son las siguientes:

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{1}\wedge t=T\rightarrow\lozenge(\omega_{2}\wedge t\leq T+5)
\]
\end{document} - Si %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{1}
\]
\end{document} es verdadero ahora y el reloj lee %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
T
\]
\end{document} ticks (%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
T
\]
\end{document} es una variable global), entonces antes del tiempo %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
T+5
\]
\end{document} ticks de reloj %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{2}
\]
\end{document} será verdadera. Entonces, una vez que %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{1}
\]
\end{document} se convierte en verdadera, %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{2}
\]
\end{document} debe convertirse en verdadera no más de 5 ticks más tarde.

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{1}\rightarrow (\omega_{2}\mathcal{P}\omega_{3})
\]
\end{document} - Si %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{1}
\]
\end{document} es verdadero ahora, entonces (%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{3}
\]
\end{document} debe ocurrir en algún estado futuro) %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{2}
\]
\end{document} debe preceder a %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega_{3}
\]
\end{document}.

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\square\lozenge(\mathbf{n}=tick)
\]
\end{document} - El reloj hace tick frecuentemente infinitamente.

En la interpretación de fórmulas tales como (%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{n}=\tau\wedge t=T
\]
\end{document}) el reloj no avanza cuando %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} ocurre (asumiendo que %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} no es la transición tick). Entonces, después de que %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\tau
\]
\end{document} ha ocurrido, la carátula del reloj aun muestra %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
T
\]
\end{document}, indicando que han transcurrido %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
T
\]
\end{document} ticks. El reloj es actualizado solo después del evento tick, y muchos otros eventos podrían ocurrir entre dos ticks del reloj.

Proporcionamos abajo algunas especificaciones (de comportamiento requerido de la planta) para el ejemplo train-gate.

**Ejemplo train-gate: -** Cada especificación temporal formal es seguida por una descripción informal de la especificación.

**(S1) Seguridad -** %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\square\lnot(x_{1}=ingate\wedge x_{2}=up)
\]
\end{document}

Siempre, la puerta nunca debe estar arriba mientras simultáneamente el tren está en la vía que está en el cruce.

**(S2) Precedencia -** %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(\mathbf{n}=\beta)\rightarrow\bigcirc(\mathbf{n}=\alpha_{1}\mathcal{P}\mathbf{n}=\beta)
\]
\end{document}

La puerta no se debe bajar si no se solicitó hacerlo, i.e. una vez que la puerta ha sido bajada, el tren debe aproximarse una vez más al cruce de la vía antes de la siguiente vez que la puerta se baje.

**(S3) Respuesta de tiempo real** La puerta debe ser bajada dentro de los 10 ticks después de que el tren se aproxima a la vía que está en el cruce.

%FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
(\mathbf{n}=\alpha_{1}\wedge t=T)\rightarrow\lozenge(\mathbf{n}=\beta\wedge t\leq T+10)
\]
\end{document}

Las especificaciones se refieren únicamente a las actividades y eventos de la planta. No se dice algo acerca de la implementación del controlador, preservando entonces la distinción entre la especificación de requerimientos y el diseño.

La siguiente definición nos permitirá formalizar la noción de una ESM que satisface una especificación de comportamiento requerido, donde la especificación es expresada como una fórmula RTTL.

**Definición 4.3 (M-validity).** Sea %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document} cualquier ESM con conjunto de trayectorias legales %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\Sigma_{M}
\]
\end{document}, y sea %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega
\]
\end{document} cualquier fórmula RTTL (para %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}
\]
\end{document}). Entonces %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega
\]
\end{document} es %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}-valid
\]
\end{document} si todas las trayectorias en %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\Sigma_{M}
\]
\end{document} satisfacen %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\omega
\]
\end{document}, y escribimos %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}\models\omega
\]
\end{document}.

En lugar de escribir %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\mathbf{M}\models\omega
\]
\end{document} también escribimos %FontSize=12
%TeXFontSize=12
\documentclass{article}
\pagestyle{empty}
\begin{document}
\[
\models^{\Sigma_{\mathbf{M}}}\omega
\]
\end{document}.

[1] Jonathan S. Ostroff, Temporal Logic for Real Time Systems, Research Studies Press Ltd. Taunton, Somerset, England. John Wiley & Sons Inc. New York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore, 1989. ISBN: 0 083800866.