



Institución Universitaria

# **Esquema metodológico para el control del sistema de tráfico vehicular con atributos de cooperación, flexibilidad y autonomía, usando redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas**

**Aldemar Hernández Gallego**

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2015



# **Esquema metodológico para el control del sistema de tráfico vehicular con atributos de cooperación, flexibilidad y autonomía, usando redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas**

**Aldemar Hernández Gallego**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Automatización y Control**

Director:

M.Sc. Rubén Darío Vásquez Salazar

Co-director:

Ph.D Juan Alejandro Peña Palacio

Línea de Investigación:

Máquinas Inteligentes y Reconocimiento de Patrones

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2015



*Amar a la ciencia como amo a mi esposa, luchar por esta meta como lucho por lograr una sonrisa de mi hija, y apreciar el conocimiento ganado en este camino, como aprecio el apoyo de las dos mujeres que me han dado la fortaleza a lo largo de este camino.*

*Dedicado con amor a mi esposa y a mi hija.*



# Agradecimientos

Gracias a mi Alma Mater, la Institución Universitaria ITM, que me apoyó y dio las herramientas para generar una investigación de calidad.

Agradezco de antemano y sinceramente el esfuerzo, conocimiento y dedicación que aportó el profesor Rubén Vásquez Salazar a este proyecto, fue de gran ayuda y motivación para su realización, y al voto de confianza otorgado a lo largo de mi carrera educativa.

Al profesor Juan Alejandro Peña, que gracias a sus conocimientos y amor por esta rama de la inteligencia artificial, no hubiese tenido la valentía de presentar este trabajo ante la comunidad académica.

# Resumen

Para el modelado de un sistema de tráfico vehicular controlado por semaforización, se preestablecen, a través de un experto, varios parámetros: geometría, tiempos óptimos para el cambio semafórico y características físicas para obtener finalmente un controlador a la medida de cada intersección. Puesto que estos parámetros son fijos, y el cambio en el flujo vehicular es constante, el embotellamiento se hace inminente en una u ambas vías de la intersección. Debido a esto, se han generado investigaciones en controles que aprenden y adaptan su comportamiento dependiendo de la demanda, pero no consideran el tiempo de espera de los usuarios mientras los controles actúan; ni una metodología de manera gráfica que pueda modelar parámetros para diferentes geometrías de manera modular. Esta tesis establece un método aplicado para modelar el sistema de tráfico vehicular, como un sistema de eventos discretos, por medio de las Redes de Petri Continuas y controlado por una Red de Petri Coloreada Difusa Adaptativa, que le da características de flexibilidad de programación, dada su estructura modular; cooperación entre vías de la intersección; y autonomía de las vías, sin importar la geometría y aprendizaje, por medio de la implementación de un modelo Mamdani, basado en un Sistema Adaptativo de Inferencia Neuro-Difuso (M-ANFIS) con conjuntos gaussianos. Este nuevo enfoque entrega resultados de estabilidad de flujo vehicular, considerando el tiempo de espera para todas las vías de la intersección, comparada con un sistema tradicional controlado por parámetros, y obteniendo aumentos de flujo del 58% en la vía más congestionada con solo dos intervenciones del controlador.

**Palabras clave:** Redes de Petri difusas adaptativas, Redes de Petri, control de tráfico.

# Abstract

In order to model a traffic system that is controlled by traffic lights, several parameters are predefined with the help of an expert, such as geometry, optimal timing of traffic light switching and physical characteristics to obtain a controller adapted to each crossroads. Due to the fact that these parameters are fixed and that the flow of traffic changes constantly, traffic jams are imminent in one or both roads of the intersection.



Consequently, numerous studies have been conducted to develop controllers that learn from and adapt their behavior to traffic conditions but these do not take into account neither the waiting time of pedestrians while traffic control systems are in operation, nor a graphic methodology that can model parameters, in a modular way, for different geometries. In this thesis, a graphic method is proposed to model traffic systems as discrete event systems by means of Continuous Petri Nets and that are controlled by a Fuzzy Colored Adaptive Petri Net, giving systems program flexibility thanks to the method's modular structure, cooperation between intersection roads, road autonomy disregarding the geometry involved and a learning process by implementing a Mamdani model based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (M-ANFIS) with Gaussian sets. This novel approach results in traffic flow stability, while including the waiting time for all intersection roads compared to traditional systems that are controlled by parameters, and an increase in traffic flow by 58% for the road with highest traffic jams by having only two interventions in the controller.

**Keywords: adaptive fuzzy petri nets, petri nets, traffic control.**



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XV</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>5</b>
1.1 Justificación .....	5
1.2 Problema de investigación.....	7
1.2.1 Funcionamiento y operación de los semáforos en Medellín .....	7
1.2.2 Investigación en el control de tráfico .....	8
1.3 METODOLOGÍA.....	11
1.3.1 Métodos y Materiales .....	11
1.3.2 Hipótesis .....	12
1.4 OBJETIVOS .....	12
1.4.1 Objetivo General .....	12
1.4.2 Objetivos Específicos.....	12
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1 Redes de Petri.....	15
2.2 Redes de Petri Temporizadas.....	18
2.3 Redes de Petri Continuas .....	19
2.4 Redes de Petri Difusas Coloreadas .....	21
2.5 Redes de Petri Difusas Adaptativas.....	26
<b>3. MODELO DE SISTEMA DE SEMAFORIZACIÓN EN UNA INTERSECCIÓN.....</b>	<b>33</b>
<b>4. MODELO DE CONTROL VEHICULAR CON RPDA.....</b>	<b>40</b>
4.1 Modelo principal del controlador RPCDA .....	41
4.1.1 Control clásico.....	42
4.1.2 Control RPCDA .....	45
4.2 Reglas de Inferencia.....	46
4.3 Factor de Pertenencia.....	47
4.4 Aprendizaje basado en Modelo M-ANFIS .....	51
4.5 SIMULACIÓN .....	58
4.5.1 Aleatorio.....	59
4.5.2 Vía IN.....	60
4.5.3 Sub red Vía IN.....	61
4.5.4 Generar veh .....	63
4.5.5 Central .....	66
4.5.6 Distribución .....	67
4.5.7 Vía OUT .....	69
4.5.8 Semaforización .....	69
4.5.9 Feedforward.....	71

4.5.10	Área.....	73
4.6	Backpropagation .....	75
4.7	Flexibilidad .....	77
4.8	Cooperación.....	80
<b>5.</b>	<b>ESQUEMA METODOLÓGICO .....</b>	<b>81</b>
5.1	Creación de Modelo vehicular .....	82
5.2	Creación de control .....	83
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	86
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>97</b>
6.1	Conclusiones.....	97
6.2	Recomendaciones.....	98
<b>A.</b>	<b>Anexo: Modelo y control en CPNTools (archivo .cpn) .....</b>	<b>99</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Ejecutable modelo continuo Microsoft Studio (archivo .exe).....</b>	<b>99</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo: Datos de simulación obtenida y comparación (archivo.xlsx).....</b>	<b>99</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo: Datos de modelo continuo VCPN (archivo .xlsx).....</b>	<b>99</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>100</b>

# Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 2-1: Interpretación grafica de una RP.....	17
Figura 2-2: TPN Red de Petri temporizada.....	19
Figura 2-3: Modelo básico con CPN de un simple modelo de protocolo con una marca inicial $M_0$ (Jensen & Kristensen, 2007). ....	22
Figura 2-4: Ejemplo de Red de Petri Difusa Coloreada (Votano et al., 2004). ....	25
Figura 2-5: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Coloreada Tipo 1.....	25
Figura 2-6: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Coloreada Tipo 2.....	26
Figura 2-7: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Coloreada Tipo 3.....	26
Figura 2-8: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Adaptativa Tipo 1. ....	29
Figura 2-9: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Adaptativa Tipo 2 .....	30
Figura 2-10: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Adaptativa Tipo 3. ....	30
Figura 3-11: Modelo de RPCV para una sección de vía (Tolba et al., 2005).....	34
Figura 3-12: Relación de flujo para una vía con semáforo en verde. ....	36
Figura 3-13: Representación gráfica del modelo continuo de una vía de entrada.....	37
Figura 3-14: Representación gráfica de transiciones y lugares para modelo híbrido (Matsuno et al., 2011).....	37
Figura 3-15: Representación pictórica de modelo con RPC de sistema de semaforización en una intersección. ....	38
Figura 3-16: Grafo de modelo con RPC de sistema de semaforización en una intersección. ....	39
Figura 4-17: Conjunto borroso Tiempo en Verde. (----- Muy poco, — — Poco —●—●— Medio, ——— Mucho, ———◆Excedido) .....	40
Figura 4-18: Modelo semafórico de control.....	41
Figura 4-19: Modelo principal de controlador RPCDA para una intersección.....	45
Figura 4-20: Segmento de Red de Petri Difusa Coloreada para el cálculo del factor de pertenencia para el "TIEMPO DE ESPERA".....	50
Figura 4-21: Segmento de Red de Petri Difusa Coloreada para el cálculo del factor de pertenencia de los conjuntos de entrada. ....	50
Figura 4-22: Modelo Mamdani ANFIS (Chai et al., 2009). ....	52
Figura 4-23: Superficies de conjuntos borrosos de RBR. ....	53
Figura 4-24: Red de Petri para cálculo del área de los conjuntos. ....	56
Figura 4-25: Red de Petri para modelo M-ANFIS capa 4 y 5. ....	57
Figura 4-26: Transición jerárquica del módulo "aleatorio". ....	59
Figura 4-27: Sub red generación número de vehículos de forma aleatoria. ....	59
Figura 4-28: Segmento de red VCPN de en la vía de entrada. ....	61
Figura 4-29: Sub red vía IN. ....	62
Figura 4-30: Generar distribución de probabilidad para tipos de vehículo.....	64
Figura 4-31: Selección de tipo de vehículo por método de Montecarlo.....	65
Figura 4-32: Selección de vehículo de la base de datos.....	66
Figura 4-33: Sub Red Central.....	67
Figura 4-34: Sub Red Distribución.....	68

Figura 4-35: Sub Red Vía OUT. ....	69
Figura 4-36: SemafORIZACIÓN. ....	70
Figura 4-37: SemafORIZACIÓN Controlada con RPCDA. ....	70
Figura 4-38: Factor de pertenencia en Sub Red Feedforward. ....	71
Figura 4-39: Cálculo de pesos con factores de pertenencia Sub Red Feedforward. ....	72
Figura 4-40: Cálculo de áreas de conjuntos difusos Sub Red Área. ....	73
Figura 4-41: Multiplicación de pesos y áreas Sub Red Feedforward. ....	73
Figura 4-42: Defuzzificación de Sub Red Feedforward. ....	74
Figura 4-43: Habilitar control por medio de Sub Red Backpropagation. ....	74
Figura 4-44: Cálculo del error Sub Red Backpropagation. ....	75
Figura 4-45: Lectura de los pesos actuales Sub Red Backpropagation. ....	76
Figura 4-46: Actualización de centros y áreas con regla delta generalizada. ....	76
Figura 4-47: Transformación de áreas en diámetros. ....	77
Figura 4-48: Sub Red Intersección. ....	78
Figura 4-49: Conexión de intersección controlada RPCDA e intersección no controlada. ....	79
Figura 4-50: Pre visualizar congestión de vía no controlada. ....	80
Figura 5-51: Esquema metodológico para el control del sistema de tráfico vehicular usando Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas. ....	81
Figura 5-52: Flujograma de esquema metodológico para el control del sistema de tráfico vehicular usando Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas. ....	85
Figura 5-53: Gráficos de variables de entrada y salida. ....	88
Figura 5-54: Entorno gráfico de la intersección semaforizada simulada en Microsoft Visual 2010. ....	89
Figura 5-55: Número de vehículos en dos fases con designación de tiempos en verde convencional. ....	90
Figura 5-56: Flujos vehiculares para las dos fases asignación tiempo en verde convencional. ....	90
Figura 5-57: Velocidades en fases con asignación de tiempo convencional. ....	91
Figura 5-58: Asignación de tiempo en verde de sistema vehicular controlado por RPCDA. .....	92
Figura 5-59: Modificación de los conjuntos difusos de variable de salida tiempo en verde. .....	93
Figura 5-60: Número de vehículos en dos fases con designación de tiempos en verde RPCDA. ....	93
Figura 5-61: Flujos vehiculares para las dos fases asignación tiempo en verde RPCDA. ....	94
Figura 5-62: Velocidades en fases con asignación de tiempo convencional. ....	95

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1-1: Descripción de variables del modelo semafórico de control para la vía SUR-NORTE .....	41
Tabla 1-2: Descripción de variables del modelo semafórico de control para la vía ESTE-OESTE .....	41
Tabla 1-3: Reglas de inferencia para el control de tráfico .....	47
Tabla 4-4: Factores de pertenencia para el conjunto borroso "TIEMPO DE ESPERA" ...	48
Tabla 4-5: Tabla de valores para conjuntos borrosos de entrada .....	49
Tabla 4-6: Tabla de valores para el conjunto borroso de salida .....	49
Tabla 4-7: Distribución de probabilidad por tipo .....	63
Tabla 5-8: Tabla de valores de salida según los conjuntos de entrada .....	83
Tabla 5-9: Datos calculados según modelo tradicional 4.1.1 .....	86
Tabla 5-10: Datos calculados según modelo tradicional 4.1.1 para las fases .....	87
Tabla 5-11: Parámetros de conjuntos difusos de entrada .....	87
Tabla 5-12: Parámetros de conjuntos difusos de salida .....	88
Tabla 5-13: Tabla de datos obtenidos en la simulación del control de tráfico para dos fases. ....	91





# Introducción

La búsqueda de un sistema de tráfico menos contaminante, con menos retrasos y más seguridad para los usuarios, entre otros, han sido temas recurrentes a través del tiempo; son numerosas las investigaciones realizadas que buscan dar solución a los diferentes problemas que enfrenta el continuo crecimiento de las ciudades metropolitanas. Este es el caso que actualmente enfrenta el Valle de Aburrá con un promedio de 4.684.389 personas movilizándose diariamente en auto particular, bus o taxi (STTM, 2012). Lo que significa que la capacidad de infraestructura que se tiene para el sistema vial no es suficiente en el área metropolitana, ya que cuenta tan solo con un área vial de 19 millones de metros cuadrados en un total de cien millones de metros cuadrados. Las ciudades más desarrolladas del mundo tienen una capacidad de crecimiento del 25%; según el informe realizado en el 2008 de la alianza interinstitucional privada “Medellín Como Vamos” (Medellín Cómo Vamos, 2008), la ciudad de Medellín puede llegar a su máximo nivel con 6 millones más de área vial, pero como indica el informe de movilidad y espacio de 2015 (Medellín Cómo Vamos, 2015) realizado por ésta misma institución: “Si el crecimiento en el número de vehículos por cada 100.000 habitantes es muy superior al de los kilómetros construidos de vías en el mismo período, es posible que las vías que actualmente se construyen no tarden mucho tiempo en saturarse”.

Uno de los sistemas de control en intersecciones es el sistema de luces semafóricas, el cual basa su funcionamiento en los tiempos establecidos para permitir el paso de los vehículos. El ajuste adecuado o inadecuado de la duración de estos tiempos se puede percibir diariamente con la saturación de los semáforos cuando éstos indican la luz roja, señal para detenerse, y dejar que las demás vías circulen normalmente; pero esto no siempre se desarrolla satisfactoriamente, debido a que las vías que se encuentran con luz verde no poseen flujo vehicular todo el tiempo, y esto se puede evidenciar con el siguiente ejemplo:

Se toma el caso hipotético de una persona en su vehículo que se encuentra en un semáforo cualquiera, que le indica la señal luminosa roja de parada, pero se percata de que algunos días a esa misma hora, las demás vías que se encuentran en luz verde no se encuentran congestionadas, o en otras ocasiones, sin vehículos circulando por éstas.

Y es cuando se pregunta: “¿por qué tengo que esperar tanto tiempo para que cambie la luz, si las otras vías están sin vehículos?”.

En esta tesis se aborda este problema, con la creación de un esquema para modelar y controlar una intersección de tráfico vehicular, por medio de una representación gráfica que permitirá manipular la información, la cual será ingresada por una persona que posea conocimiento de los parámetros básicos físicos, llamada experto. Este experto generará unas reglas sencillas de control, basadas en su percepción personal para que el control tome decisiones, y a medida que tenga interacción con los datos de la intersección, se optimicen dichas reglas sin necesidad de un reajuste o entrenamiento de parámetros previo a la puesta en marcha del controlador.

Para lograr esta propuesta se ha desarrollado todo el sistema bajo una representación gráfica llamada Redes de Petri, la cual permite visualizar y modelar, tanto la intersección, como su control. Las Redes de Petri utilizadas en este modelo se valen de extensiones tales como: las Redes de Petri Coloreadas para el manejo de datos, Redes de Petri Continuas para la simulación de variables continuas, y Redes de Petri Jerárquicas para que el sistema sea modular y flexible en su construcción; esto forma una Red Híbrida que permite el diseño de un modelo con acceso a información y fácil de migrar a un lenguaje de programación orientado a objetos.

Adicional a estas características prestadas por la Red de Petri Híbrida, se suma el manejo de las reglas de control ingresadas por el experto, las cuales deben adaptarse a las condiciones de flujo vehicular, sin importar si alguna de las vías de la intersección está conectada físicamente con otra que cuente con control inteligente o no. Esta tarea es realizada a través de la Lógica Difusa que se integra con el aprendizaje de las Redes Neuronales, dándole a cada vía la habilidad de contar con sus reglas de control características y ser autónoma con respecto a las otras vías, para darle la suficiente flexibilidad al control de comunicarse y ser cooperativo con otras vías o intersecciones no controladas.

Al tener un sistema de red conectada entre todas las vías de la intersección por medio de las Redes de Petri, se logra una comunicación y cooperación entre ellas para considerar los tiempos en verde y rojo propios de cada vía, y a la vez, considerar los tiempos en

verde y rojo de las vías pertenecientes a la misma intersección. Esto equilibra los tiempos de espera en todas las vías, lo suficiente para aumentar el flujo vehicular en la intersección.

En el desarrollo de esta tesis en el Capítulo 1, se presenta el planteamiento del problema desde la problemática social, pasando por algunos apartados que denotan las investigaciones desarrolladas para su solución, además de los objetivos de este trabajo; el Capítulo 2 presenta el Marco Teórico necesario para integrar el modelo expuesto en este trabajo; también el Capítulo 3 concibe el modelo de semaforización para una intersección; se construye, además, el modelo de control vehicular en el Capítulo 4; y más adelante en el Capítulo 5, se presenta el esquema metodológico que integra los modelos de los capítulos anteriores. Por último, se dan algunas conclusiones y recomendaciones sobre el trabajo realizado.



# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este Capítulo se plantea en primera instancia, como el problema de investigación abordado presenta un impacto de tipo social y tecnológico en la ciudad de Medellín, y se presentan las investigaciones más representativas para el tratamiento del control vehicular, representadas mediante grafos o características de importancia tratadas en este trabajo.

## 1.1 Justificación

Técnicamente la congestión vehicular según Bull (2003), es la situación que se crea cuando el volumen de demanda de tránsito en uno o más puntos de una vía, excede el volumen máximo que puede pasar por ellos. Para que se produzca la congestión, es necesario que haya un aumento en el volumen de la demanda o una disminución del volumen máximo posible del punto de la vía. Estos cambios pueden ocurrir a lo largo de la vía o lo largo del tiempo, adicionalmente la definición dada por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe descrita en (Bull, 2003), explica que la variación en el tiempo crea una dificultad para el control del flujo vehicular, limitando los métodos actuales de control de este sistema, debido a la falta de adaptación del controlador al entorno.

Debido al problema de la variación del tiempo y otros factores que intervienen para provocar una congestión, Medellín intenta cada día, dar una pronta solución, con la instalación de semáforos, cámaras y personal humano en las calles. Desde el año 2012, la Alcaldía implementó el Plan de Desarrollo de Medellín 2008-2011 (Alcaldía de Medellín, 2011) con un centro de control de tránsito, inaugurado el 29 de marzo de 2009. Este centro de control inteligente instalado en la ciudad, consta de dos etapas de implementación, las cuales tienen como objetivo general según la Alcaldía de Medellín: *“gestionar los sistemas de control de tráfico y administrar las vías de la ciudad buscando mejorar la movilidad de personas que se desplacen en algún medio de transporte dentro del sistema vial de la ciudad de Medellín”* (Alcaldía de Medellín, 2011).

1. Para esto se ha realizado en su primera etapa las siguientes actividades:

- a. Monitorear las condiciones de las principales vías de la ciudad mediante un sistema de Circuito Cerrado de Televisión (CCTV).
  - b. Gestionar la flota de vehículos de la Secretaría de Tránsito y Transporte de Medellín (STTM), mediante el sistema de Localización Automática de Vehículos (AVL).
  - c. Recibir reportes de incidentes de tránsito y asignar los recursos humanos y técnicos para su atención.
  - d. Atender la línea de información para los agentes de tránsito.
  - e. Capturar infracciones de tránsito a través del sistema de CCTV.
  - f. Informar a la ciudadanía acerca del estado de las vías a través de diferentes medios.
2. La segunda etapa está conformada por cuatro componentes: el primero de ellos es el sistema de gestión de transporte público que se encarga de la reprogramación de los semáforos bajo temporización y dar seguimiento a las empresas de transporte. El segundo componente, es la divulgación de información de tránsito en tiempo real a la ciudadanía, por medio de los sistemas de CCTV y AVL. Esto da paso al tercer componente, que se encarga de la visualización de la información del sistema de tráfico, la cual es analizada por expertos para la toma de decisiones y generación de informes. El cuarto componente, Ingeniería Semáforos, es un equipo de profesionales que cuenta con un software de planteamiento de la reprogramación de los semáforos y las estaciones de conteo. Todas estas herramientas prestan ayuda para la reprogramación de los semáforos y realizar ajuste en los tiempos de ciclo de acuerdo a los cambios en las condiciones de tráfico (Alcaldía de Medellín, 2010).

El funcionamiento del centro de control que se encuentra en la ciudad de Medellín, cuenta con una tecnología que puede visualizar los parámetros del sistema, pero la toma de decisiones se hace de forma manual para la programación de tiempos en la semaforización vial, por medio de sugerencias en los tiempos de los semáforos coordinados o por demanda, esto conlleva a la posibilidad de incrementar los inconvenientes actuales debido al error humano.

## **1.2 Problema de investigación**

### **1.2.1 Funcionamiento y operación de los semáforos en Medellín**

Los semáforos en Medellín en 2006, eran manejados por controladores de tráfico de la firma holandesa Peek Traffic. Cada controlador está instalado en un gabinete gris en alguna esquina de la intersección y contiene una tarjeta que maneja un sistema de potencia para las luces, una memoria interna para las secuencias de tiempos, y el control en general para coordinar ocho grupos de señales. Debe anotarse que un grupo de señales puede provenir de varios semáforos, pero éstos funcionarán siempre con los mismos tiempos. Si alguna intersección requiere más de ocho grupos de señales, entonces requiere más de un controlador, por ejemplo, la Avenida las Vegas con calle 10.

Cada controlador es alimentado por la red eléctrica domiciliaria y está comunicado con una oficina central vía modem. En dicha oficina, las señales de los controladores de la gran mayoría de intersecciones de la ciudad, son agrupadas y procesadas por un computador, que tiene un software para visualizar en un mapa digital de la ciudad, el estado de todos los semáforos en tiempo real. Desde el mismo software los controladores determinan los ciclos y los planos de los semáforos, según la programación que asigne el encargado (Ramírez, 2005).

En la ciudad se encuentra en funcionamiento el Centro de Control de Tránsito, donde el Municipio de Medellín tiene un convenio con UNE Telecomunicaciones, con el objetivo de prestar mediante la modalidad de concesión, la infraestructura tecnológica (TIC) y los procesos de trámites de los usuarios ante la Secretaría de Tránsito, como son los trasposos de propiedad de los vehículos, las licencias de conducción, las multas por infracciones y el recaudo, entre otras.

La tecnología actual permite tener conteos permanentes del flujo de vehículos en las principales vías de la ciudad, para generar estadísticas por rangos de tiempo e incluso por clase de vehículo, de acuerdo con su tamaño o el número de ejes. Esta información resulta de fundamental a la hora de planear y gestionar el tráfico, así como para

programar la realización de obras públicas sobre la malla vial, permitiendo la maximización de beneficios en la utilización de los recursos presupuestales.

La prestación de ayudas las 24 horas, mediante el monitoreo de personal calificado para la modificación del sistema, hace que se presente este software como un complemento para la toma de decisiones y no presente las alternativas de control automático o autónomo de las intersecciones o vías seleccionadas para este fin.

### **1.2.2 Investigación en el control de tráfico**

Debido a la complejidad del problema de semaforización, hasta el momento se han presentado varias posibilidades para modelar este sistema que podrían representarlo tanto cómo se quisiera. Uno de los primeros modelos que aún siguen en vigencia, considera las características dinámicas de los vehículos, el cual fue llamado Modelo Microscópico (Chandler et al., 1958) (Gipps, 1981). Aunque considerados como clásicos en el tema de control de flujo vehicular hasta el día de hoy podemos considerar como fundamentos teóricos aplicables los siguientes modelos:

- Modelo Lineal de B. D. Greenshields. Consiste en la linealización de un conjunto de datos obtenido por el investigador, donde se establecen las diferentes relaciones parabólicas (Greenshields et al., 1935).
- Modelo Logarítmico de H. Greenberg. Este es uno de los modelos que está apoyado en la analogía del flujo vehicular con el flujo hidrodinámico, ya que el sistema macroscópicos de tráfico considera la dinámica grupal del sistema y se puede comportar de manera similar a los fluidos. (Greenberg, 1959).
- Modelos de Asignación de Equilibrio. De ellos se conocen dos tipos:
  - Equilibrio del Usuario (Lozano & Torres, 2003).
  - El modelo de optimización del Sistema (Lozano & Torres, 2003).



- Modelo de Nagel-Schreckenberger. Este es uno de los tantos modelos basados en la conocida relación parabólica entre el flujo y densidad. (Oliveira & Rodríguez, 2004).
- Teoría de Colas. La teoría de colas es una de las herramientas comúnmente más usadas en el análisis de problemas de congestión. En un proceso básico de colas los vehículos son tomados como clientes que necesitan un servicio, formando una cola a la espera de la prestación de dicho servicio. En determinado momento se selecciona un miembro de la cola para proporcionarle el servicio, mediante alguna regla conocida como disciplina de servicio. La disciplina que rige una cola que simula cualquier fenómeno de tráfico vehicular, es la más común de la teoría de colas, y se enuncia como: "El primero que llega es el primero que sale" (Cal et al., 2007).

Tomando las referencias anteriores como fundamentos teóricos aún vigentes para la Ingeniería de Tránsito, los modelos básicos como el de (Greenshields et al., 1935), presentan la posibilidad de considerar la dinámica de los vehículos, llamado modelo microscópico, o el modelo de tráfico vehicular que se considera a sí mismo un sistema con comportamiento y dinámica general también llamado macroscópico. Tanto el modelo macroscópico como el microscópico poseen ventajas que se pueden ver reflejadas en los grafos representados en el trabajo de (Tolba et al., 2005), en donde se presenta un modelo de Redes de Petri que considera el tiempo y simula la dinámica de las variables continuas en ese mismo grafo. Cabe anotar entonces, para los alcances de este trabajo, el modelo macroscópico se ajusta con más eficacia al sistema de intersección vial semaforizada, debido a que los vehículos varían su aceleración volviendo impreciso el modelo microscópico.

El modelo macroscópico de Redes de Petri continuas puede ser ajustado para un mejor desempeño mediante redes de Petri Híbridas, que constan de una Red de Petri que modela el flujo de los vehículos de manera continua. Y otra Red de Petri discreta que modela el sistema de control semafórico. Esto se evidencia en el trabajo de Mohamed Jbira y Ahmed (2011), quienes formularon un sistema de control para el flujo vehicular con una ecuación de predicción de ciclo próximo, con ajustes de pesos por simple optimización, encontrando el máximo de la función de flujo vehicular. En el control de esta Red Híbrida no se considera la información individual de la vía, ya que se optimiza el tiempo de ciclo y se reparte equitativamente sesgando la importancia de la vía con más

congestión. Adicional a esto, el sistema presenta la premisa de que todas las vías alternas deben estar interconectadas para enviar la información del ciclo y ajustar los parámetros, esto mismo se presenta en la evolución del trabajo de M Jbira (2012), proponiendo un ajuste al algoritmo.

Por otro lado, el trabajo de (Barzegar et al., 2011) propone el control de tráfico basado en selección de combinaciones de indicaciones que permiten uno o varios movimientos simultáneamente a través de la intersección llamadas fases, y son establecidas como reglas a través de un autómata de aprendizaje y un modelo con Redes de Petri Difusas Adaptativas Coloreadas el cual predice los estados actuales de la red con el aprendizaje del autómata y selecciona las reglas preestablecidas. Aunque este trabajo presenta un modelo sistemático, con flexibilidad en la implementación por sus Redes Jerárquicas, adaptación del sistema y manejo de datos, se presenta con un sistema de aprendizaje basado en conjuntos difusos triangulares que dan un costo computacional bajo, presentan posibilidad de discontinuidad en la variación de las áreas ocupadas por los conjuntos y así mismo, una adaptación menos eficaz que las resultantes con los conjuntos gaussianos.

Una de las soluciones recurrentes para el control del tráfico vehicular, es el cambio de fases de señales, las cuales representan posibles giros habilitados por las señales semaforicas. Dichas fases son predeterminadas para dar paso a la vía que se quiera dar paso con luz verde. Al tener un control por fases preestablecidas, el sistema se limita a tener una secuencia limitada de paso para cada vía, siendo el caso de (Sammoud, 2013), en cuya investigación presenta una Red de Petri Híbrida con selección de fases, esto da una respuesta más rápida y menos costo computacional, pero sacrifica la flexibilidad de implementación en la vía, limitando sus posibilidades de adaptar los tiempos según el tiempo en rojo o en espera.

Otro sistema similar al cambio de fases preestablecidas, son las acciones establecidas en los sistemas de aprendizaje por refuerzo, las cuales buscan a través del premio y castigo, la mejor política o conjunto de acciones para optimizar los recursos del control y lograr solucionar el problema. Esto se evidencia en una de las investigaciones más recientes, aplicada en la ciudad de Toronto (El-Tantawy et al., 2013), la cual está en

proceso de patente. Sin embargo, ha mostrado grandes avances debido a la modularidad implementada mediante un sistema multiagente; pero así mismo, la investigación continúa en búsqueda de un mejor desempeño, debido a que funciona por ensayo y error de acciones que buscan inicialmente, una política adecuada para el tráfico vehicular de la intersección en donde se está aplicando.

Algunas investigaciones han incentivado la creación de sistemas modulares, flexibles y adaptativos, e independientes en su forma, para lograr solucionar el problema de congestión en las vías de una intersección vehicular; sin embargo, no consideran el equilibrio de los flujos vehiculares en cada vía, pasando por alto los tiempos que cada una tiene que esperar. Adicional a esto, no se cuenta con un esquema metodológico para la integración de todas estas características de adaptación, flexibilidad e independencia en un solo modelo. Es por esto que esta tesis presenta la realización de un modelo y el control, con características de flexibilidad en la implementación de cualquier geometría de intersección, debido a la modularidad y autonomía en la toma de decisiones, sin importar el tipo de control que tengan las otras vías; por medio de una máquina de inferencia adaptativa, a través de conjuntos gaussianos y una Red de Petri Coloreada, interconectando las vías, de tal forma que haya cooperación mediante la gestión de información; y al mismo tiempo modela su control.

## **1.3 METODOLOGÍA**

### **1.3.1 Métodos y Materiales**

Para la solución del problema de tráfico y tiempos de espera en las vías que se encuentran en luz roja, se inicia con la construcción del modelo de semaforización en una intersección. Esto se realizará con la ayuda del modelado gráfico y concurrente de las Redes de Petri; la programación se realizará bajo un sistema modular que se genera a través de la programación en módulos, con la herramienta CPNTools 4.0. En la estructura del manejo de datos y la modularidad del programador, se establecerá un esquema para desarrollar de manera flexible cualquier cantidad de vías e intersecciones que se deseen observar y controlar, bajo la estructura genérica que será desarrollada, mediante un modelo de Redes de Petri Jerárquicas.

### **1.3.2 Hipótesis**

Un esquema metodológico de un sistema de tráfico vehicular, estructurado por una intersección interconectada, modelada y controlada con Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas, con características de cooperación, flexibilidad y autonomía, aumentará los flujos vehiculares en cada una de las vías de la intersección, a partir de la disminución de los tiempos de espera en cada una de ellas en forma automática.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

Desarrollar un esquema metodológico, basado en Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas, para el control de un sistema de tráfico vehicular con flujo aleatorio, mediante la interconexión de intersecciones viales modeladas, y la caracterización del sistema con atributos de cooperación, flexibilidad y autonomía, para adaptarse al entorno por medio un sistema inteligente.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar un sistema de semaforización de tráfico vehicular de una intersección, por medio de un sistema inteligente, con una representación en Redes de Petri.
- Desarrollar un modelo de control vehicular, mediante la representación de Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas (RPCDA).
- Producir un control con flexibilidad, cooperación y autonomía, para la adaptación y reconocimiento de semáforos no inteligentes, instalados actualmente en la vía.

- Desarrollar mediante simulación, en un lenguaje de alto nivel, un esquema metodológico para controlar un sistema de tráfico vehicular con flujo aleatorio.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Redes de Petri

Las Redes de Petri (RP) son una herramienta gráfica y matemática de modelado para la descripción formal de sistemas, tiene entre muchas otras, dos características principales de gran interés: la primera, permite visualizar el comportamiento del modelo y sus características, como paralelismo, sincronización y recursos compartidos; y la segunda, la existencia de varios métodos asociados para el modelamiento de las redes de Petri, que le dan características híbridas, tales como las redes de Petri coloreadas, jerárquicas y continuas, entre otras. Además, las redes pueden ser usadas como una herramienta visual del comportamiento de sistemas concurrentes y su evolución, mediante marcas que pueden simular la dinámica del sistema. Como herramienta matemática, es posible llevarla a ecuaciones algebraicas y diferenciales que pueden definir el comportamiento de dicho sistema.

Las Redes de Petri se representan con un método gráfico orientado, conformado básicamente por cuatro tipos de elementos: lugares (P), transiciones (T), entradas (I) y salidas (O); estos por separado, no representan una red de Petri (Zapata & Carrasco, 2002).

La función de entrada es un mapeo a partir del conjunto de lugares de entrada hacia la transición  $t_j$ . A su vez, la función de salida es un mapeo a partir de la transición  $t_j$  hacia el conjunto de salidas.

**Definición. 1** (Zapata & Carrasco, 2002)

Una RP autónoma está definida como una 4-tupla:

$$R = (P, T, Pre_{m \times n}, Post_{m \times n}) \quad (1)$$

donde:

$P$ : es un conjunto finito, no vacío de  $m$  lugares, cada lugar se representa mediante un círculo.

$$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}, \quad \|P\| = m, P \neq \emptyset \quad (2)$$

$T$ : Conjunto finito, no vacío de  $n$  transiciones. Las transiciones se representan mediante una línea.

$$T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}, \quad \|T\| = n, T \neq \emptyset \quad (3)$$

$Pre_{m \times n}$ : Matriz de incidencia previa, representa un arco dirigido de  $p_i$  a  $t_j$  con un peso dado por:

$$Pre(p_i, t_j) \in N, \quad \text{con } i = 1, 2, 3, \dots, m \quad \text{y} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

$Post_{m \times n}$ : Matriz de incidencia posterior, representa un arco dirigido de  $t_j$  a  $p_i$  con un peso dado por:

$$Post(p_i, t_j) \in N, \quad \text{con } i = 1, 2, 3, \dots, m \quad \text{y} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

*Conjuntos de lugares de entrada y salida.*

$\cdot t_j = \{p_i \in P / Pre(p_i, t_j) > 0\}$  Conjunto de lugares de entrada a  $t_j$

$t_j \cdot = \{p_i \in P / Post(p_i, t_j) > 0\}$  Conjunto de lugares de salida de  $t_j$

*Conjuntos de transiciones de entrada y salida.*

$\cdot p_i = \{t_j \in T / Post(p_i, t_j) > 0\}$  Conjunto de transiciones entrada a  $p_i$

$p_i \cdot = \{t_j \in T / Pre(p_i, t_j) > 0\}$  Conjunto de transiciones de salida de  $p_i$

Al representar gráficamente una RP se puede observar el modelo del sistema en forma organizada y como cambia de un estado a otro, dando una perspectiva más clara a quién esté analizando el problema.

Un círculo representa un nodo, una barra representa una transición. Los arcos o curvas conectan los nodos y las transiciones. Si un arco va de un nodo a una transición, el nodo será una entrada y si el arco va de una transición a un nodo, el nodo será una salida de esa transición (Figura 2-1).



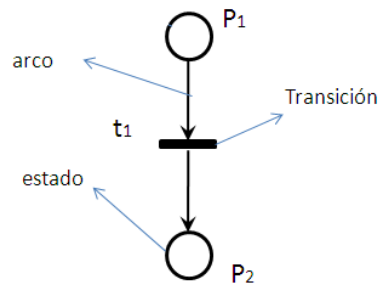


Figura 2-1: Interpretación gráfica de una RP.

Una Red de Petri se ejecuta por el disparo de transiciones.

### **Reglas de disparo**

- Una transición puede dispararse si está habilitada.
- Una transición está sensibilizada si cada uno de sus lugares de entrada tiene al menos una marca.
- Al realizar el disparo de  $t_j$  se debe mover la marca al lugar  $K+1$  dejando  $K$  y sensibilizando a  $t_{j+1}$ .

### *Transición sensibilizada*

**Definición 2.** (Murata, 1989).

Una transición  $t$  se dice que esta sensibilizada si:

$$M(p_i) \geq \text{Pre}(p_i, t_j), \forall p_i \in {}^{\cdot}t \quad (6)$$

Es decir, una transición está sensibilizada si el número de marcas en todos los lugares de entrada a esa transición, es mayor o igual al peso del arco que conecta cada lugar con dicha transición. Entonces, una transición está sensibilizada si el número de marcas en todos los lugares de entrada a esa transición, es mayor o igual al peso del arco que conecta cada lugar con dicha transición. El marcaje tras el disparo de la transición  $t_j$  cambia de acuerdo con la siguiente regla de evolución:

$$M_{k+1}(p_i) = M_k(p_i) + Post(p_i, t_j) - Pre(p_i, t_j), \forall p_i \in P \quad (7)$$

donde  $M_k(p_i)$  y  $M_{k+1}(p_i)$  son las marcas del lugar  $p_i$  antes y después respectivamente. La matriz de incidencia  $W = (w_{ij})$ ,  $i = 1, \dots, L, j = 1, \dots, n$  de una RP es una matriz  $L \times n$  donde  $w_{ij} = Post(p_i, t_j) - Pre(p_i, t_j)$ , y satisface la siguiente ecuación de estado:

$$M = M_0 + W \cdot S \quad (8)$$

Con  $S = [S_1, \dots, S_n]^T$  la secuencia de disparo lleva la marca  $M_0$  a  $M$ . A su vez  $S$  es el número de veces que  $t_j$  es disparada. El disparo de una transición sensibilizada consiste en remover marcas de cada lugar de entrada y agregar marcas a cada lugar de salida, de acuerdo al peso de los arcos de entrada y salida respectivamente. Un disparo tendrá lugar en el mismo instante en el que la transición se sensibiliza.

## 2.2 Redes de Petri Temporizadas

Las Redes de Petri son muy útiles para la representación de sistemas dinámicos que dependen del tiempo, este último puede ser asociado a los lugares o transiciones. Estas redes son llamadas respectivamente P-timed y T-timed Petri Nets, las cuales asocian una constante de tiempo  $d_j$ . Para el caso de estudio de este trabajo, solo se consideraran las Redes de Petri con transiciones temporizadas (TPN).

Una Red de Petri Temporizada es definida como una dupla  $(Q, T_j)$  donde  $Q$  es una red de Petri marcada que cumple con la ecuación de marcaje:

$$0 < m_i < \sum_{j=1}^q Pre(P_i, T_j) \quad (9)$$

$T_j$  es una función del conjunto positivo  $T$  de transiciones, el cual tiene asignado  $d_j$  para temporizar dicha transición. Esto es, con el disparo de la transición transcurre un tiempo  $d_j$  para llevar la marca  $M_0$  a  $M$ . Durante este tiempo las marcas están inhabilitadas para realizar otra actividad (Figura 2-2).(Tolba et al., 2005).

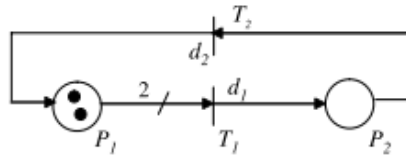


Figura 2-2: TPN Red de Petri temporizada.

### 2.3 Redes de Petri Continuas

Para el modelado de sistemas característicos del flujo de vehículos, se han realizado estudios de los dos modelos representativos de este fenómeno, como son los modelos macroscópicos y microscópicos (Tolba et al., 2001). Este último presenta una descripción detallada de las características e interacciones de los vehículos como individuos y su interacción entre sí. Por otro lado, los modelos macroscópicos describen por el contrario, el flujo de tráfico con variables globales, tales como la relación de flujo, la densidad y la velocidad promedio.

Debido a que las redes de tráfico se consideran a menudo como sistemas temporizados continuos, algunos comportamientos del sistema pueden ser reemplazados por parámetros macroscópicos que logran caracterizar el flujo de tráfico. Las características de los modelos macroscópicos y sus representaciones, son basados en la teoría de la hidrodinámica y modelos de colas (Tolba et al., 2001).

Para el modelado y representación de los parámetros continuos mencionados anteriormente, las Redes de Petri Continuas son la solución más adecuada para la tarea, por lo que consideran el número de marcas accesibles en los lugares y eliminan la explosión de combinaciones disponibles, ya que este comportamiento normalmente es considerado un limitante.

Las Redes de Petri con Velocidad Variable (RPCV), fueron propuestas para generar una aproximación del comportamiento de estos parámetros de forma continua (Zerhouni & Alla, 1990). Una RPCV es una 2-tupla  $(Q, V_{max})$  en la que  $Q$  es una marca en una red de Petri y  $V_{max}$  es el vector positivo de la velocidad de disparo.

$$V_{max} = \left( v_{max} = \frac{1}{d_j} \right)_{j=1, \dots, n} \in (IR^+)^n \quad (10)$$

Siendo una marca positiva el vector

$$M(t) = (m_i(t))_{i=1, \dots, n} \in (IR^+)^L \quad (11)$$

Y el vector de velocidad de disparo en el tiempo  $t$

$$V(t) = (v_j(t))_{j=1, \dots, n} \in (IR^+)^n \quad (12)$$

Adicional a esto, la evolución del marcaje de una RPCV está dada por la ecuación diferencial (13) que viene de la Ecuación (8) (Zerhouni & Alla, 1990):

$$\frac{dM(t)}{dt} = W \quad (13)$$

Los componentes de la velocidad de disparo  $V(t)$  dependen continuamente del marcaje de las RPCV, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$v_j = v_{maxj} \cdot \min(\alpha_j, m_i(t)) \quad (14)$$

La marca  $\alpha_j$  limita el número de disparos simultáneos en la transición  $T_j$ .

## 2.4 Redes de Petri Difusas Coloreadas

Las Redes de Petri Coloreadas (CPN), son una herramienta para analizar y obtener información significativa y útil para la estructura del desarrollo dinámico de los sistemas modelados. Estas redes tienen una diferencia principal con las Redes de Petri Simples, debido a que los elementos de las CPN son separables y describen las características de sus elementos, adicional a un poder de precisión computacional.

Las Redes de Petri Coloreadas fueron introducidas por Kurt Jensen en 1987, como un modelo de desarrollo de las Redes de Petri. Las Redes de Petri Coloreadas son un lenguaje para el modelado y validación de sistemas, en los cuales la concurrencia, comunicación y sincronización juegan un papel importante, estas son una combinación entre un lenguaje de programación Standard ML (Figura 2-3) y el formalismo de las Redes de Petri pero con la distinción entre sus marcas.

La representación formal de las Redes de Petri Coloreadas es:

**Definición 3** (Jensen & Kristensen, 2007)

Una CPN es una 6-tupla  $(P, T, C, I^-, I^+, M_0)$  donde:

$P, T$  están definidos como las Ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

$C$  es una función que asigna un conjunto de colores finitos no vacíos a cada lugar y conjunto de modos de cada transición.

$I^-, I^+$  denotan la incidencia hacia adelante y hacia atrás como funciones definidas por  $P \times T$ , tal que

$$I^-(p, t), I^+(p, t) \in [C(t) \rightarrow C(p, t)_{MS}], \forall (p, t) \in P \times T^2$$

$M_0$  denota una función definida en  $P$ , describiendo el marcaje inicial tal que  $M_0(p) \in C(p)_{MS}$

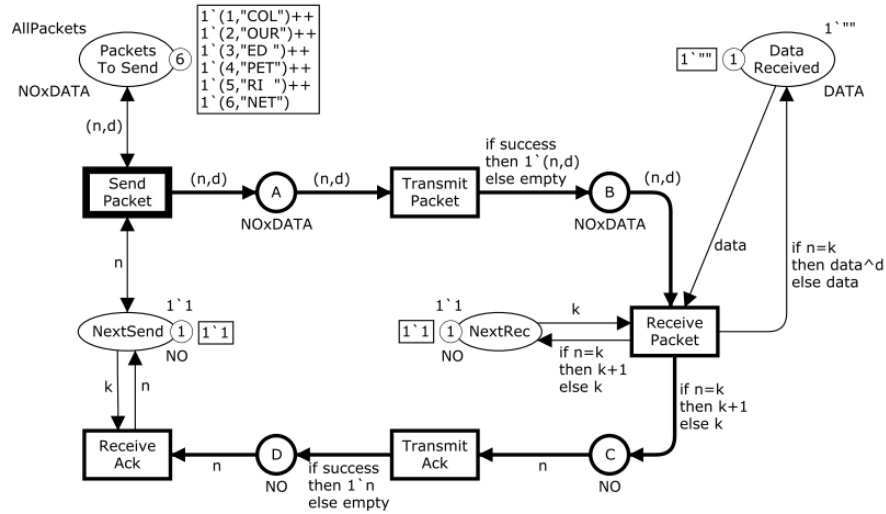


Figura 2-3: Modelo básico con CPN de un simple modelo de protocolo con una marca inicial  $M_0$  (Jensen & Kristensen, 2007).

Las Redes de Petri Coloreadas son una representación gráfica que maneja datos en sus marcaciones, pero aún así, no siempre son suficientes para representar y analizar el comportamiento complejo. La razón para que esto suceda, se debe a que la semántica de la representación gráfica del problema no está bien definida para una gran variedad de sistemas, descripción jerárquica, manipulación y control de datos y simulación interactiva, entre otros (Votano et al., 2004). Esto determina que las Redes de Petri aún tienen muchas limitaciones y requiere una descripción del sistema más precisa. Puede que no sea capaz de modelar información o estados incompletos, tales como “muy alto” y “bueno”, pero para esto, han sido introducidas las Redes de Petri Difusas (RPD), las cuales son usadas como representación de bases de conocimiento y razonamiento (C. Li & Ding, 2009).

**Definición 4**

Las redes de Petri Difusas de Chen y otros (1990), y las Coloreadas de Jensen y Kristensen (2007), son la fundación de las Redes de Petri Difusas Coloreadas (FCPN), que da características de representación del conocimiento, mediante las Redes de Petri

con el lenguaje creado por Jensen. Una FCPN no jerárquica puede ser definida como una 12-tupla:  $FCPN = (\Sigma, P, T, D, A, N, C, G, E, \beta, f, I)$  donde:

$\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ , un conjunto no vacío de tipos llamados conjuntos de colores,  $I \geq 0$

$P = \{P_c, P_f\}$ , un conjunto de lugares,

$P_c = \{pc_1, pc_2, \dots, pc_m\}$ , un conjunto de lugares que modelan el comportamiento dinámico del sistema, llamados lugares de control,  $m \geq 0$

$P_f = \{pf_1, pf_2, \dots, pf_n\}$ , un conjunto de lugares que modelan las reglas, llamados lugares difusos,  $n \geq 0$ ,  $P_c \cap P_f = \emptyset$

$T = \{T_c, T_f\}$ , un conjunto finito de transiciones,

$T_c = \{tc_1, tc_2, \dots, tc_i\}$ , un conjunto finito de transiciones que son conectadas a y desde los lugares de control, las cuales son llamadas control de transiciones.  $i \geq 0$

$T_f = \{tf_1, tf_2, \dots, tf_j\}$ , un conjunto finito de transiciones que están conectadas hacia o desde los conjuntos difusos, llamado transición difusa,  $j \geq 0$ ,  $T_c \cap T_f = \emptyset$

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ , un conjunto finito de proposiciones,  $|P_f| = |D|$

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ , un conjunto finito de arcos,  $k \geq 0$ ,  $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$

$N : A \rightarrow P \times T \cup T \times P$ , una función nodo, esta muestra cada arco como un par, donde el primer elemento es el nodo de origen y el segundo es el nodo de destino, los dos nodos son de dos tipos, de entrada y de salida.

$C : (P \cup T) \rightarrow \Sigma_{ss}$ , una función color, por ejemplo, este muestra cada lugar y transición a un super-conjunto de conjunto de colores.

$G : T \rightarrow$  una función guardia,  $\forall t \in T: [Tipo(G(t)) = Booleano \wedge Tipo(Var(G(t))) \subseteq \Sigma]$  donde  $Tipo(Vars)$  denota los conjuntos de tipos  $\{Tipo(v) | v \in Vars\}$ ,  $Vars$  es un conjunto de variables  $Vars(G(t))$  denota las variables usadas en  $G(t)$ .

$E : A \rightarrow$  expresión, una función expresión del arco,  $\forall a \in A:$

$[Tipo(E(a)) = C(p(a))MS \wedge Tipo(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$  donde  $p(a)$  es el lugar de  $N(a)$ ,  $MS$  es significa multi-conjuntos (*Multi Sets*).

$\beta : P_F \rightarrow D$  es un mapeo de los lugares difusos de proposición.

$f : T \rightarrow [0,1]$ , es una función de asociación, asigna un valor de certeza a cada color usado para cada transición difusa.

$I$ : una inicialización doble  $(\delta, \alpha)$ ,

$\delta : P \rightarrow$  expresión, una función de inicialización.  $\forall p \in P: [Tipo(\delta(p)) = C(p)_{MS}]$ ,

$\alpha$ : una función de asociación que asigna un valor de certeza en el rango  $[0,1]$ , para cada marca en los lugares difusos.

### **Reglas de disparo**

Las reglas para las transiciones de control son:

- Una transición dispara si y solo si el token (marca) color en el lugar de entrada de esa transición, es miembro del conjunto de colores asociados a la transición.
- El token color es removido desde el lugar de entrada cuando una transición dispara. Un conjunto de tokens color será creado en el lugar de salida como está definido en la expresión del arco de salida.
- Los colores asociados con tokens pueden cambiar a través de transiciones (Figura 2-4).



Las reglas para las transiciones difusas son:

- Todas las reglas de disparo son para las transiciones difusas.
- Una transición dispara si y solo si todos los valores de certeza ( $\alpha$ ) de los tokens de entrada son mayores que el valor de umbral, donde este se encuentra en un rango  $[0,1]$ .
- Similar a las reglas de disparo para las transiciones de control, el proceso de disparo de la transición remueve los tokens de entrada de sus lugares y los depositará en cada uno de sus lugares de salida.
- Los grados de verdad de los tokens de salida, serán producto del valor de certeza de la proposición de entrada y el grado de verdad en la regla.

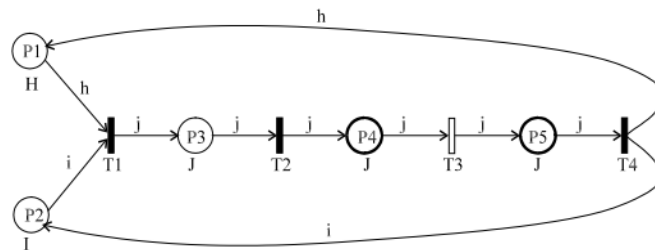


Figura 2-4: Ejemplo de Red de Petri Difusa Coloreada (Votano et al., 2004).

La estructura de las Redes de Petri Difusas Coloreadas dependen de las reglas de producción difusas, las cuales pueden ser compuestas y estar dentro de tres tipos (Ouchi & Tazaki, 1997):

Tipo 1: Regla de Producción Difusa Simple:

$$SI d_j \text{ ENTONCES } d_k (CF = \mu) \tag{15}$$

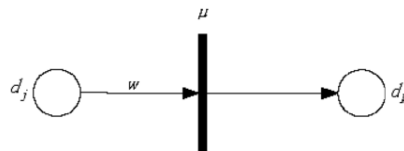


Figura 2-5: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Coloreada Tipo 1.

Tipo 2: Regla de producción Difusa Conjunción Compuesta:

$$SI d_1 Y d_2 Y \dots Y d_n ENTONCES d_k (CF = \mu) \quad (16)$$

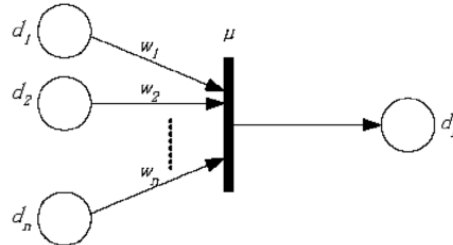


Figura 2-6: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Coloreada Tipo 2.

Tipo 3: Regla de Producción Difusa Disyunta Compuesta:

$$SI d_1 O d_2 O \dots O d_n ENTONCES d_k (CF = \mu) \quad (17)$$

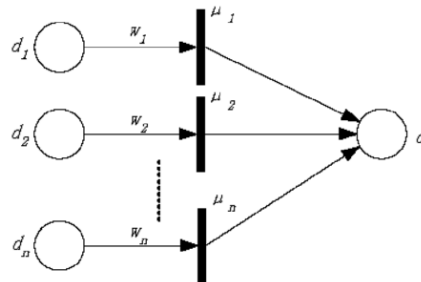


Figura 2-7: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Coloreada Tipo 3.

## 2.5 Redes de Petri Difusas Adaptativas

La teoría de las Redes de Petri Difusas Coloreadas, proporciona herramientas para manipular información imprecisa, algunos modelos de este tipo han sido propuestos, soportándose en la toma de decisiones y razonamiento difuso (Liu et al., 2013), (Ouchi & Tazaki, 1997). Estas decisiones son tomadas por medio del disparo de una regla con un grado de verdad, que describe la incertidumbre que se tiene acerca de esta preposición. Sin embargo, aunque se presentan como modelos flexibles, las proposiciones poseen estos pesos para darle importancia a estas afirmaciones, dichos pesos permanecen

constantes y no se pueden ajustar cuando el conocimiento varía en el tiempo. En otras palabras, no tienen la capacidad de aprender. Para esto (Pedrycz & Gomide, 1994) introdujeron las Redes Neuronales a las RPDs, bajo un concepto de Redes de Petri Difusas Generalizadas, que tienen la posibilidad de transformar las entradas y las salidas en una red neuronal con neuronas lógicas OR/AND. En (X. Li & Lara-Rosano, 2000) quienes proponen las Redes de Petri Difusas Adaptativas (RPDA). Estas tienen también la habilidad de aprender mediante el algoritmo back propagation, pero no necesitan transformarse en redes neuronales.

Una RPDA está definida como una 9-tupla (Xiaoou Li & Yu, 2000):

$$RPDA = \{P, T, D, I, O, \alpha, \beta, Th, W\}$$

donde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  es un conjunto finito de lugares

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  es un conjunto finito de transiciones

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  es un conjunto finito de proposiciones, y  $|P| = |D|, P \cap T \cap D = \emptyset$

$I = T \rightarrow P^\infty$  es una función entrada, que define un recorrido desde las transiciones a los lugares que reciben.

$O = P^\infty \rightarrow T$  es una función salida, que define un recorrido desde los lugares a las transiciones que reciben.

$\alpha = P \rightarrow [0,1]$  es una función de asociación, la cual asigna un valor real entre cero y uno a cada lugar.

$\beta = P \rightarrow D$  describe una trayectoria entre la proposición, y el lugar para cada nodo.

$Th = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  es el conjunto de valores de umbral.

$W = W_I \cup W_O$ , y  $W_I = I \rightarrow [0,1]$ ,  $W_O = I \rightarrow [0,1]$ , donde  $W_I$  y  $W_O$  son los pesos de las entradas y salidas respectivamente.

**Definición 5** (Xiaoou Li & Yu, 2000)

Un lugar  $p$  es llamado un lugar fuente si y solo si no posee transiciones de entrada. Es llamado un lugar de sumidero si no tiene transiciones de salida.

**Definición 6** (Xiaoou Li & Yu, 2000)

Cuando  $t$  está habilitada, produce un nuevo factor de certeza  $CF(t)$

$$CF = \begin{cases} \sum_j \alpha(p_{Ij}) \cdot w_{Ij}, & \sum_j \alpha(p_{Ij}) \cdot w_{Ij} \geq Th(t) \\ 0, & \sum_j \alpha(p_{Ij}) \cdot w_{Ij} < Th(t) \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

donde  $n$  es el número de entradas y para aproximar  $CF(t)$  se puede utilizar la función continua  $CF(t)(x)$

$$CF(t)(x) = x \cdot F(x) \quad (19)$$

donde:

$$x = \sum_j \alpha(p_{Ij}) \cdot w_{Ij} \quad (20)$$

$F(x)$  Es una función sigmoidea con un umbral  $t$

$$F(x) = \frac{1}{(1 + e^{-b(x-Th(t))})} \quad (21)$$

si  $b$  es lo suficientemente grande cuando  $x > Th(t)$ ,  $e^{-b(x-Th(t))} \approx 0$ , entonces  $F(x) \approx 1$ , y cuando  $x < Th(t)$ ,  $e^{-b(x-Th(t))} \rightarrow \infty$ , entonces  $F(x) \approx 0$ .

**Definición 7** (Xiaoou Li & Yu, 2000)

Si  $x > Th(t)$ , la transición  $t$  dispara, y el token realiza la transición a otro lugar.

1. Si el lugar  $p_{ok}$  solo tiene una transición de entrada  $t$ , un nuevo token resultante de la operación (22); éste es puesto en cada lugar  $p_{ok}$ , para  $k = 1, 2, \dots, m$ , y los tokens de los lugares  $p_{lj}$  son removidos, para  $j = 1, 2, \dots, n$ .

$$w_{ok} \cdot CF(t) \quad (22)$$

2. Si el lugar  $p_{ok}$  tiene más de una transición de entrada (Figura 2-10), y más de una ellas disparada, el nuevo factor de certeza del lugar  $p_{ok}$  es calculado a partir del centro de gravedad de las transiciones disparadas con la ecuación:

$$\alpha(p_{ok}) = \frac{\sum_j [w_{oj} \cdot CF(t_j)]}{\sum_j w_{oj}} \quad (23)$$

donde toda  $t_j$  dispara pertenece a transición de entrada  $p_{ok}$ .

Al igual que en la estructura de las Redes de Petri Difusas Coloreadas, dependen de las reglas de producción difusas; las Redes de Petri Difusas Adaptativas comprenden una modificación en su estructura, basada en sus características de aprendizaje, que pueden estar dentro de tres tipos:

*Tipo 1: Regla de producción difusa simple:*

$$SI \ a \ ENTONCES \ c \ Th(t) = \lambda, w_o(t, p_j) = \mu, w_l(p_j, t) = w \quad (24)$$

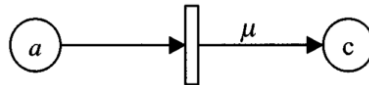


Figura 2-8: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Adaptativa Tipo 1.

*Tipo 2: Regla de producción difusa conjunción compuesta:*

$$SI a_1 Y a_2 Y, \dots, Y a_n ENTONCES c \quad Th(t) = \lambda, w_o(t, p_j) = \mu, w_l(p_j, t) = w_i, \quad (25)$$

$$i = 1, \dots, n$$

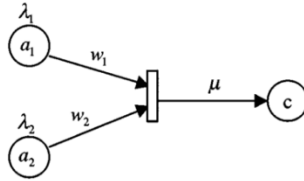


Figura 2-9: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Adaptativa Tipo 2

*Tipo 3: Regla de producción difusa disyunta compuesta:*

$$SI a_1 O a_2 O, \dots, O a_n ENTONCES c \quad Th(t_i) = \lambda_i, w_o(t_i, p_j) = \mu, w_l(p_j, t_i) = w_i, \quad (26)$$

$$i = 1, \dots, n$$

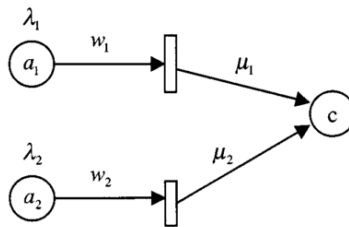


Figura 2-10: Denotación de regla para Red de Petri Difusa Adaptativa Tipo 3.

### **Algoritmo Back Propagation**

En cada condición que el sistema de inferencia da como resultado, se incluye un parámetro llamado peso  $W$ , y su valor no es fácil de especificar cuándo se utilizan las RPD, ya que esto depende de la experiencia del experto. Mientras que en las RPDA, el modelo tiene las propiedades de una red neuronal. Es por esta razón que es posible el autoajuste, de acuerdo con la actualización del conocimiento por medio de un algoritmo

de aprendizaje de una red neuronal, que en este caso se hablará del popular algoritmo Back Propagation (Wen et al., 2010).

Se asume que una RPDA está dividida en  $n$  capas y tiene  $b$  lugares  $P_j, j = 1, 2, \dots, b$ , si se toma  $r$  muestras para el entrenamiento, la funcion de error es definida como  $E$ :

$$E = \sum_{i=1}^r E^P = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^b (d - y)^2 \quad (27)$$

reemplazando los valores  $d$  y  $y$  respectivamente por  $\alpha_i^{(1)}(P_j)$  y  $\alpha_i(P_j)$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^b (\alpha_i(P_j) - \alpha_i^{(1)}(P_j))^2 \quad (28)$$

donde  $\alpha_i(P_j)$  y  $\alpha_i^{(1)}(P_j)$  son el grado de verdad obtenido, y el grado de verdad ideal. Mediante la regla del descenso del gradiente (Isasi & Galván, 2004), la idea es realizar un cambio en cada peso, proporcional a la derivada del error, mediante el patrón actual respecto al peso:

$$\Delta w_{ix}^{(n)} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ix}^{(n)}} \quad (29)$$

por la regla de la cadena

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ix}^{(n)}} = \frac{\partial E}{\partial (\alpha^{(n)}(P_j))} \cdot \frac{\partial (\alpha^{(n)}(P_j))}{\partial w_{ix}^{(n)}} \quad (30)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ix}^{(n-1)}} = \frac{\partial E}{\partial (\alpha^{(n)}(P_j))} \cdot \frac{\partial (\alpha^{(n)}(P_j))}{\partial (\alpha^{(n-1)}(P_j))} \cdot \frac{\partial (\alpha^{(n-1)}(P_j))}{\partial w_{ix}^{(n-1)}} \quad (31)$$

Si  $t_i(n)$  es la  $n$ -sima capa de transición de la RPDA entonces  $t_i(n) \in T$ , y el peso en entradas de los arcos son  $w_{i1}^{(n)}, w_{i2}^{(n)}, \dots, w_{im}^{(n)}$ , entonces los errores del primer orden del gradiente son obtenidos por la Ecuación (30), donde  $x = 1, 2, \dots, m - 1$ . Entonces todos los gradientes de primer orden  $\partial E / \partial w_{ix}^{(q)}$  pueden ser calculados de esta forma

con la Ecuación(31), donde  $q = n - 2, n - 3, \dots, 2, 1$ . Cuando todos los gradientes son calculados, los pesos  $w_i(q)$  de cada  $t_i(q)$  pueden ser ajustados en la Ecuación (32), donde  $\eta$  es el factor de aprendizaje.

$$w_{ix}^{(q)}(k + 1) = w_{ix}^{(q)}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ix}^{(q)}} \quad (32)$$



### 3. MODELO DE SISTEMA DE SEMAFORIZACIÓN EN UNA INTERSECCIÓN

Para el modelo del sistema propuesto, se consideran las RPCV (Tolba et al., 2005), modeladas por la ecuación diferencial (13), donde cada  $P_i$  corresponde a cada sección de la vía donde  $i = 1, 2, \dots, L$  y cada transición  $T_i$  está comprendida por la separación entre los segmentos de las vías  $P_i$  y  $P_{i+1}$ . El marcaje  $m_i$  del lugar  $P_i$  representa el número de vehículos que se encuentran en éste segmento de la vía, y la velocidad de disparo  $v_i$ , depende del flujo promedio de vehículos que pasan por este segmento  $q_i$ . También en este modelo, es de gran importancia la consideración de variables, como la densidad promedio de flujo  $\rho_i$  y la velocidad promedio del segmento, representado por  $S_i$ , estos últimos se calculan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\rho_i(t) = \frac{m_i(t)}{\Delta i} \quad (33)$$

$$S_i(t) = \frac{v_i(t) \cdot \Delta i}{m_i(t)} \quad (34)$$

el número de vehículos que se conservan en el segmento  $i$  está dado por:

$$\frac{d\rho_i(t)}{dt} + \frac{q_i(t) - q_{i-1}(t)}{\Delta i} = 0 \quad (35)$$

de la ecuación (33)

$$\frac{d\rho_i(t)}{dt} = \frac{1}{\Delta i} \cdot \frac{dm_i(t)}{dt} \quad (36)$$

y teniendo:

$$v = q \cdot \Delta \quad (37)$$

se tiene:

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = v_{i-1}(t) - v_i(t) \quad (38)$$

tomando la ecuación (8) y modificándola con la evolución en (38) se tiene la función por partes de:

$$m_i'(t) = m_i(t) + W \cdot V(t) \quad (39)$$

siendo  $W$  la matriz de incidencia de la RPCV y el vector  $V(t)$  que determina la velocidad de disparo y  $m_i'(t)$  la razón de cambio del marcaje  $m_i$  respecto al tiempo  $t$ .

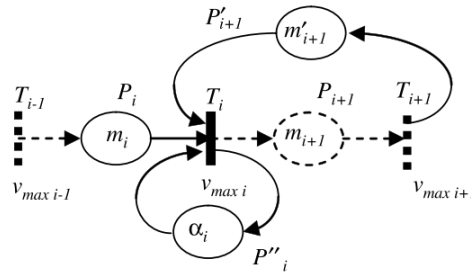


Figura 3-11: Modelo de RPCV para una sección de vía (Tolba et al., 2005).

En la Figura 3-11 se muestra el lugar  $P'_{i+1}$  que corresponde al número de sitios disponibles en el segmento  $P_{i+1}$ , y a su vez el lugar  $P''_i$  limita el disparo simultáneo de la transición  $T_i$ . La velocidad de disparo solo depende de la activación de la transición y se representa por la siguiente ecuación:

$$v_i(t) = v_{max i} \cdot \min(\alpha_i, m_i(t), C_{i+1} - m_{i+1}(t)) \quad (40)$$

donde:

$$v_{max i} = \frac{v_{free i}}{\Delta i} \quad (41)$$

$$\alpha_i = \frac{q_{\max i} \cdot \Delta t}{v_{free i}} \quad (42)$$

$$m'_{i+1} = C_i - m_i \quad (43)$$

$$C_i = \rho_{\max i} \cdot \Delta t \quad (44)$$

$q_{\max i}$  ,cambio de flujo máximo

$\rho_{\max i}$  ,densidad de flujo o atascamiento

$v_{free i}$  ,límite máximo de velocidad

$v_{max i}$  ,máxima frecuencia de disparo

Debido a que la Red de Petri Continua con velocidad variable se le debe proporcionar un número de vehículos iniciales en  $m_i(t)$ , se genera la entrada de vehículos con una distribución de Poisson. Esta distribución es usada con regularidad en problemas de gestión de colas (Gerlough & Schuhl, 1955), (Hu & Wang, 2010), (López-Neri et al., 2009), y esta descrita como:

$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (45)$$

donde:

$\lambda$  ,tasa media de llegadas

Para la generación de  $\lambda$  se genera un porcentaje dependiendo de las características de las vías, donde a partir del flujo  $q_i(t)$  que se calcula con la Ecuación (40) por unidad de tiempo, y una vía con tiempo  $t$  de semáforo en verde, se vería como en la Figura 3-12:

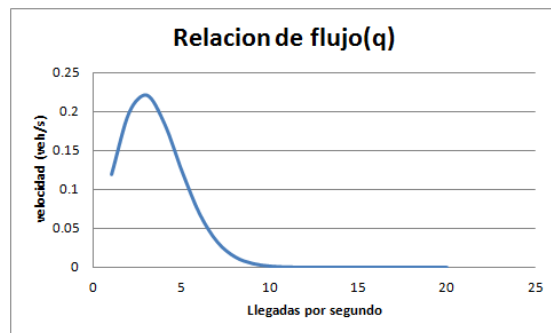


Figura 3-12: Relación de flujo para una vía con semáforo en verde.

Luego de consolidar el número aleatorio para la entrada de la vía, el siguiente paso es determinar el comportamiento de los vehículos a la salida de la vía. El sentido de orientación o giro que toma cada vehículo no está determinado por un modelo dinámico que genere con precisión dicho evento, por lo tanto aquí, se toma al igual que en la entrada una distribución de probabilidad. Ya que en este caso, el comportamiento de una distribución de probabilidad representada en la Figura 3-12 se muestra como  $\Pi$ . La distribución  $\Pi$  está dada por el grado de importancia de la vía, normalmente tomado desde la variable de flujo y debe cambiar cada tiempo  $t$ , o se toma como una distribución constante determinada por el programador, según la decisión de éste último.

La distribución de probabilidades se asigna a los giros determinados. Ej.: si se tienen las probabilidades de 30% giro a la derecha, 20% giro a la izquierda y 50% seguir de frente, para un vehículo  $A$ , en un instante de tiempo  $t$ , se genera un número aleatorio con una distribución normal con media en cero y desviación estándar en uno  $rnd = 0.1548$ , donde  $0 < 0.1548 < 0.2$ , por lo que el vehículo  $A$  giraría a la izquierda. En el rango de la distribución se compara una variable aleatoria por el método de Montecarlo (Willink, 2006), (Oliveira & Rodrigues, 2004) para determinar según las probabilidades dadas en qué sentido se debe girar.

La aplicación de esta distribución a la salida de las vías está asignada al lugar central, representada  $P(\Pi)$  denotado por el nombre  $PCA$  (Place Central Area). Luego de salir de la distribución de  $PCA$ , los vehículos se dirigen a las entradas de las respectivas vías de

evacuación, modeladas mediante la representación de una red como la presentada en la Figura 3-11.

La representación del modelo continuo de una vía, está dada por la entrada de los vehículos a la transición continua  $T$ , la cual al estar habilitada, dispara para permitir la evolución de la marca hacia  $PI(d)$ , donde  $d$  representa la dirección de la vía (*Norte, Sur, Este, Oeste*). Luego, para permitir el paso de los vehículos hacia  $PCA$ , se controla con la utilización del lugar  $C_i$  (Control Semafórico), este limita el disparo de la transición  $T'$ , la cual es una transición discreta que habilita el paso de vehículos hacia  $PCA$ .

Tanto las transiciones continuas y discretas, como los lugares de este mismo tipo, son representadas en el modelo híbrido denotado gráficamente en la Figura 3-14. De manera contraria no se designarán los lugares continuos que limitan los lugares disponibles  $m'_{i+1}$  y los disparos simultáneos  $\alpha_i$ ; la denotación del grafico para cada vía, estará entonces representada como está indicado en la Figura 3-13, conformado por los elementos de la Figura 3-14.

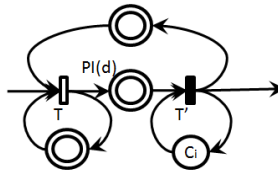


Figura 3-13: Representación gráfica del modelo continuo de una vía de entrada.



Figura 3-14: Representación gráfica de transiciones y lugares para modelo híbrido (Matsuno et al., 2011).

Las transiciones discretas  $dvi$  con  $i = 1, 2, \dots, n$ , son transiciones temporizadas, las cuales son programadas con el tiempo que dura la luz verde  $Vi$ ; el valor del tiempo asignado a estas transiciones, puede variar dependiendo del tipo de control que se le asigna al modelo. Así mismo,  $dAi$  representa las transiciones temporizadas para

determinar el tiempo de luz amarilla, para luego activar el siguiente lugar. En este modelo no se tiene en cuenta ningún lugar para la luz roja, ya que al estar algún lugar permitido en verde, este bloquea a los demás. Todo esto se puede evidenciar en la Figura 3-16 para una intersección.

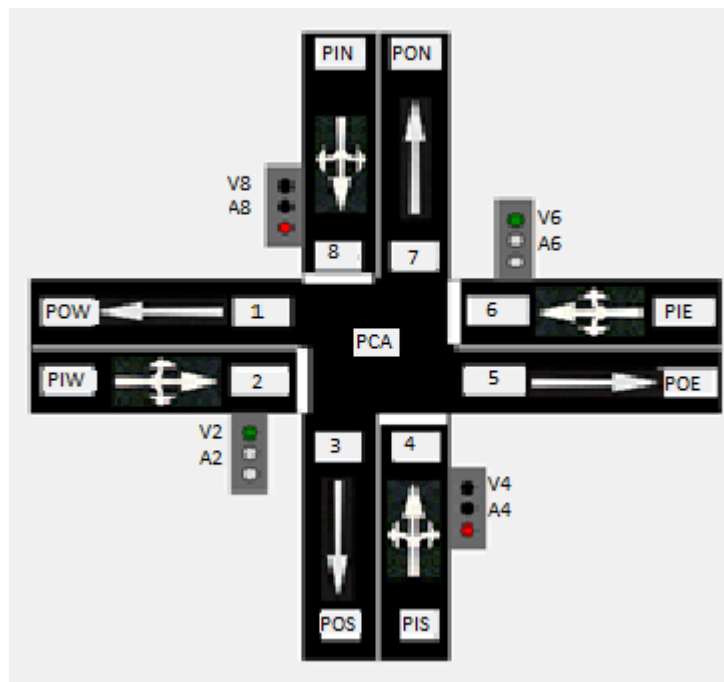


Figura 3-15: Representación pictórica de modelo con RPC de sistema de semaforización en una intersección.

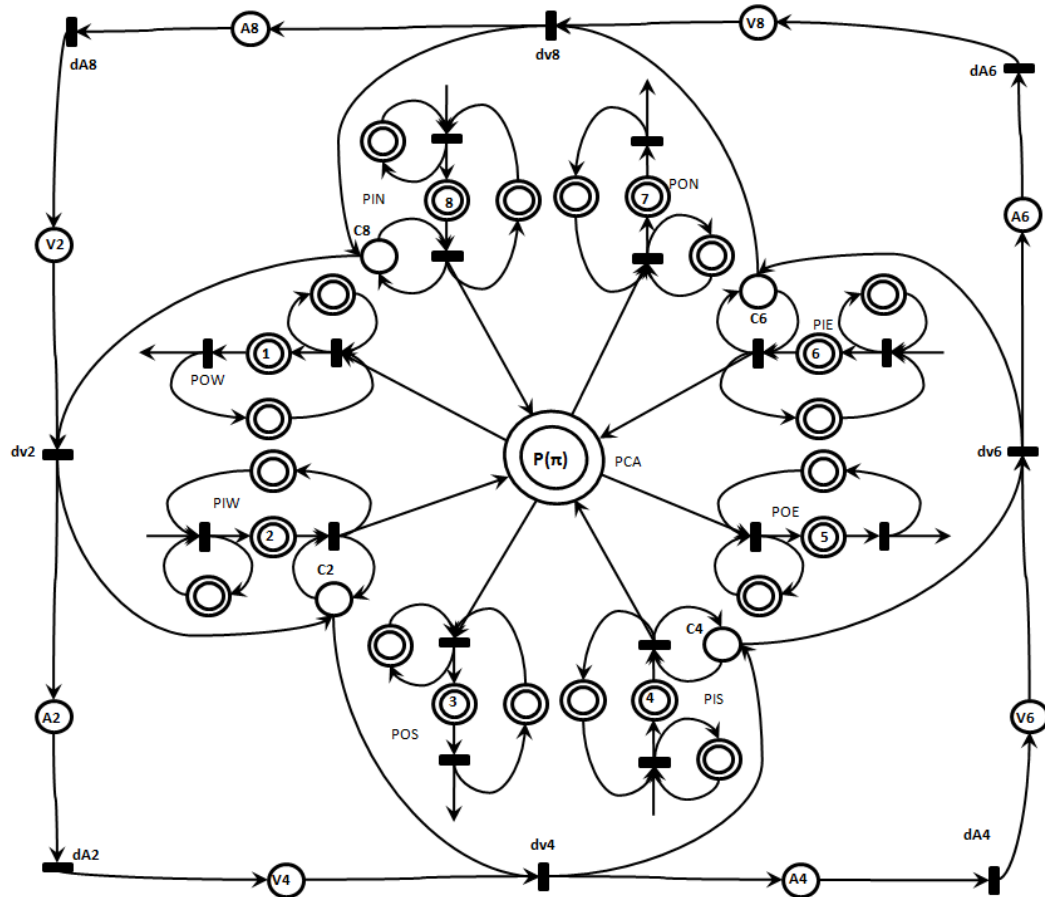


Figura 3-16: Grafo de modelo con RPC de sistema de semaforzación en una intersección.

donde

$$i = 1, 2, \dots, n$$

1, 3, 5, 7 ,son lugares continuos de las vías de salida de la intersección

2, 4, 6, 8 ,son lugares continuos de las vías de entrada de la intersección

$V_i$  ,lugar donde permanece la marca durante el tiempo  $dv_i$

$A_i$  ,lugar donde permanece la marca durante el tiempo  $dA_i$

$dv_i$  ,son transiciones temporizadas, las cuales son programadas con el tiempo que dura la luz verde  $V_i$ .

$dA_i$  ,representa las transiciones temporizadas para determinar el tiempo de luz amarilla  $A_i$ .

## 4. MODELO DE CONTROL VEHICULAR CON RPDA

Las redes neuronales poseen una gran habilidad para tratar datos incompletos por medio del entrenamiento de la red, mientras que la lógica difusa posee grandes características para tratar la incertidumbre del conocimiento humano. Para realizar el control de tráfico semafórico, se considera la visualización de la vía cuando es controlado por un experto. Dicho experto comúnmente es reconocido como guarda de tráfico, el cual tiene un entorno visual de la ocupación vial por medio del volumen. Es decir, la sumatoria de los volúmenes de vehículos en la vía, es restada al volumen total de la vía para poder determinar la congestión (ocupación de la vía).

El experto determina con sus propias palabras el nivel de ocupación, y términos como mucho, poco, etc., son denotados como variables lingüísticas. Ellas proporcionan información para describir el comportamiento de la variable ocupación (Figura 4-17).

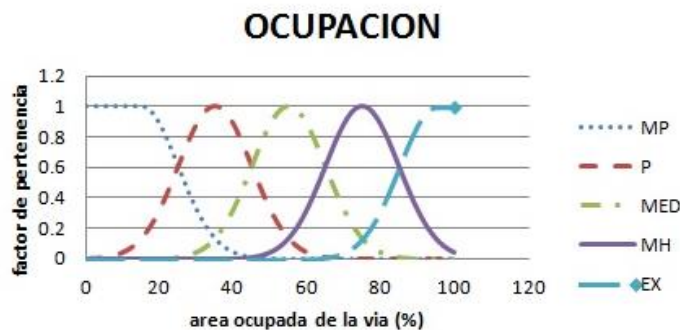


Figura 4-17: Conjunto borroso Tiempo en Verde. (----- Muy poco, — — Poco —●—●— Medio, ——— Mucho, ———◆Excedido)

De igual manera es para ajustar el tiempo promedio de espera (ATWT) (Zou et al., 2009), referido al tiempo que cada vía que se encuentra en luz roja, tiene que esperar para realizar el ciclo y volver a tener el permiso de paso para sus vehículos. Este tiempo se considerará como un conjunto borroso de entrada, al igual que la ocupación.

Teniendo la percepción del experto para la creación de los conjuntos, se inicia la creación del modelo del controlador.



## 4.1 Modelo principal del controlador RPCDA

Ya que se han considerado las entradas del sistema borroso, se procede a construir el modelo que tomará la variable de salida, dicha variable proporcionará el control de tiempo que cada vía permanecerá en verde, si y solo si el control se encuentra habilitado.

El modelo mencionado se basa en un controlador por cada fase, donde para este esquema, se consideran dos fases y su estrategia de sistema semafórico (Figura 4-18).

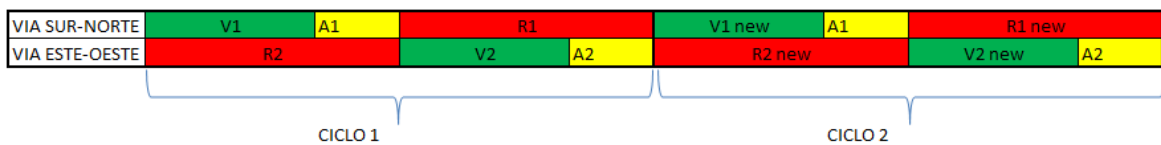


Figura 4-18: Modelo semafórico de control.

donde el significado de dichas variables se describe en las siguientes tablas:

Tabla 1-1: Descripción de variables del modelo semafórico de control para la vía SUR-NORTE

vía SUR-NORTE	
V1	representación de duración luz en verde de la fase 1
A1	representación de duración luz amarilla de la fase 1
R1	representación de duración luz roja de la fase 1
V1new	representación de duración luz verde de la fase 1 modificada por el control
R1new	representación de duración luz roja de la fase 1 modificada por el control

Tabla 1-2: Descripción de variables del modelo semafórico de control para la vía ESTE-OESTE

vía ESTE-OESTE	
V2	representación de duración luz amarilla de la fase 2
A2	representación de duración luz amarilla de la fase 2
R2	representación de duración luz roja de la fase 2
V2new	representación de duración luz verde de la fase 2 modificada por el control
R2new	representación de duración luz roja de la fase 2 modificada por el control

### 4.1.1 Control clásico

El control clásico de semaforización se basa en el cálculo de valores iniciales, necesarios para la determinación de tiempos fijos adecuados para la demanda preconcebida, y para las características físicas de la intersección. En este paso se realiza la inmersión a este tipo de control, y se utiliza el control semafórico, para lograr hacer una comparación de desempeño, respecto al esquema propuesto.

En la anterior figura (Figura 4-18), se presenta el esquema semafórico de dos fases que constituyen la intersección. Dicho esquema representa los eventos que ocurren en las vías a lo largo de dos ciclos, separados por programas para su control. El primer acontecimiento se presenta con la lectura de los vehículos detenidos en la vía 1 (R1).

Los tiempos "V1", "A1", "R1", "V2", "A2", y "R2", son calculados con el sistema tradicional determinado (Jovan & Abalo, 2010) por el Highway Capacity Manual. En primer lugar, se consideraran las siguientes ecuaciones:

$$CP = \left( t + \frac{v}{2 * a} \right) + \left( \frac{w + l}{v} \right) \quad (46)$$

donde:

$CP$  , tiempo de intervalo de cambio de fase

$\left( t + \frac{v}{2 * a} \right)$  , es el tiempo en que el vehículo puede frenar de forma segura antes de llegar a las luces semafóricas, se puede tomar como el tiempo en amarillo "ta"

$t$  , tiempo de percepción y reacción del conductor frente a la luz amarilla (valor usual 1s)

$v$  , velocidad de acercamiento de los vehículos a la intersección

$a$  , tasa de desaceleración (valor usual 3.05 m/s)

$\left(\frac{w+l}{v}\right)$ , es el tiempo necesario para que el vehículo pueda cruzar la intersección  
 $w$ , ancho de la intersección

$l$ , longitud del vehículo (usualmente se toma para Medellín con 5.8m) (Álvarez, 2006).

El valor de  $CP$  es necesario para determinar el tiempo en verde mínimo “ $tvmin$ ”, denotada por la siguiente ecuación (Useda Ramirez & Silva Mercado, 2003):

$$tvmin = 7 + \left(\frac{w}{1.2}\right) - CP \quad (47)$$

Se determina también la proporción de flujo entre el volumen de la vía en vehículos por hora (veh/h) y el flujo de saturación estándar para cada vía  $i$ .

$$y_i = \frac{vol\ i}{RS} \quad (48)$$

donde

$vol\ i$ , es el volumen de la vía medido en una hora.

$RS$ , flujo de saturación de la vía, normalmente 1900 veh/h (Useda Ramírez & Silva Mercado, 2003).

Luego de obtener el tiempo en amarillo, se continua con el cálculo del ciclo óptimo, este se toma de la investigación de Webster (1958).

$$C_o = \frac{1.5 * l + 5}{1 - \sum_{i=1}^f y_i} \quad (49)$$

donde

$f$ , número de fases.

$l$  , es igual a  $f$  multiplicado por el tiempo entre verde 1 y verde 2, que usualmente son tres segundos, y determina el tiempo perdido total.

Teniendo en cuenta lo anterior se calcula el tiempo total en verde eficaz

$$Tv = C_o - l \quad (50)$$

De este tiempo se obtiene el tiempo para cada vía "tv"

$$tv = \left( \frac{y_{ci}}{\sum_{i=1}^f y_i} \right) * Tv \quad (51)$$

para

$y_{ci}$  , es la relación flujo de saturación crítica por fase.

Por último, para considerar que los valores calculados sean acordes con el desempeño de la vía, según sus características, se calcula el tiempo de ciclo mínimo (Cheng et al., 2000) y la relación de volumen-capacidad.

$$C_{min} = \frac{l}{1 - \sum_{i=1}^f y_i} \quad (52)$$

$$X_{cm}(\%) = \frac{cs}{RS * \left(1 - \frac{l}{C_o}\right)} \quad (53)$$

donde

$C_{min}$  , es el tiempo de ciclo mínimo

$X_{cm}$  , es la relación de volumen capacidad

$cs$  , es la sumatoria de volúmenes críticos

Esta última ecuación describe el porcentaje de ocupación posible para la vía con estas características calculadas, y así poder concertar los datos calculados.

### 4.1.2 Control RPCDA

Para obtener los tiempos y características de la intersección semaforizada expuesta en la Subsección 4.1.1, se procede a realizar la estructura de semaforización en conjunto, con las medidas y acciones de control para obtener el modelo mostrado en la Figura 4-18.

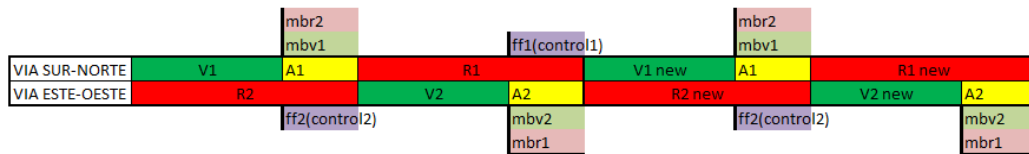


Figura 4-19: Modelo principal de controlador RPCDA para una intersección.

donde

$V$  , tiempo en verde

$R$  , tiempo en rojo

$A$  , tiempo en amarillo

$mbr$  , volumen de vehículos acumulados durante el tiempo en rojo

$mbv$  , volumen de vehículos evacuados durante el tiempo en verde

$ff(control)$  , proceso Feedforward o control según el caso

El esquema de control que está graficado (ver Figura 4-19), describe el comportamiento del sistema semaforizado con el controlador, basado en un sistema de eventos, los cuales producen una secuencia. Al iniciar, el evento seguido de la luz verde pertenece a la lectura de los vehículos acumulados durante el periodo en rojo 1, pero este tiempo inicial se toma como cero. Luego, en el mismo instante que el sistema semaforizado termina el tiempo "V1", se lee la cantidad de vehículos evacuados durante la luz verde, y a este evento se llama "mbv1". De manera paralela a estas acciones, se da la medición de los

vehículos acumulados durante el tiempo de rojo en la vía 2, a esta variable se le asigna el nombre de “mbr2”.

Así pues, después de tener las mediciones de los vehículos, se toma la decisión de activar el controlador mediante la sentencia:

$$SI\ mbrv < mbr\ ENTONCES\ control\ SINO\ feedforward \quad (54)$$

Esto quiere decir, que si el volumen de vehículos que se está acumulando en la vía es mayor a la evacuación de vehículos se debe activar el control, en caso contrario solo es necesario que la Sub Red Feedforward realice la estimación del tiempo en verde requerido para el próximo ciclo.

Por otro lado, en el caso de que se active el controlador, este debe de tener en cuenta el tiempo estimado de la siguiente forma:

$$SP1 = \frac{mbr1 * V1}{mbv1} \quad (55)$$

Por lo que “SP1” será el tiempo en verde siguiente para asignar a la vía 1 y asignar esta variable como “SET POINT” al controlador. Este tiempo es limitado por los valores de “tmin” y “tmax”.

## 4.2 Reglas de Inferencia

Luego de tener las vías con la “OCUPACION” y el “TIEMPO DE ESPERA” se deben tener las condiciones establecidas por el usuario experto, las cuales cumplen la notación:

$$SI\ x1\ es\ A1\ \&\ x2\ es\ A2\ \&\ ... \&\ xq\ es\ Aq,\ ENTONCES\ y\ es\ B \quad (56)$$

Esta ecuación cumple la estructura de las ecuaciones (24)(25)(26) para las Redes de Petri Difusas Adaptativas, por lo que se procede a la creación de las reglas de la máquina de inferencia, para que realice la relación entre los dos conjuntos borrosos de entrada (“OCUPACION” y “TIEMPO DE ESPERA”); estas reglas se pueden ver en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3: Reglas de inferencia para el control de tráfico

TIEMPO VERDE		TIEMPO DE ESPERA				
		MP	P	MED	MH	EX
OCUPACION	MP	Z	Z	C	C	L
	P	Z	C	C	C	L
	MED	C	C	L	L	L
	MH	C	L	L	ML	ML
	EX	L	L	L	ML	EL

donde

$MP$  ,conjunto difuso “Muy Poco”

$P$  ,conjunto difuso “Poco”

$MED$  ,conjunto difuso “Medio”

$MH$  ,conjunto difuso “Mucho”

$EX$  ,conjunto difuso “Excedido”

$Z$  ,conjunto difuso “Cero” de la variable lingüística “tiempo en verde”

$C$  ,conjunto difuso “Corto” de la variable lingüística “tiempo en verde”

$L$  ,conjunto difuso “Largo” de la variable lingüística “tiempo en verde”

$ML$  ,conjunto difuso “Muy Largo” de la variable lingüística “tiempo en verde”

$EL$  ,conjunto difuso “Extremadamente Largo” de la variable lingüística “tiempo en verde”

### 4.3 Factor de Pertenencia

Las variables lingüísticas  $x_i$  para  $i = 1, 2, \dots, q$ , son los antecedentes “OCUPACIÓN” y “TIEMPO DE ESPERA”, el tiempo la variable  $y$  es la consecuente. Luego de esto se procede a determinar la función de pertenencia generalizada para una campana de Gauss, la cual transforma la Ecuación (21), para determinar el factor de pertenencia de cada conjunto borroso, y estará dada por:

$$\mu_{Ai} = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{x - xc_i}{d} \right)^2 \right]^{bi}} \quad (57)$$

donde:

$x$  ,variable de entrada

$xc_i$  ,media de la función Gaussiana

$d$  ,factor relacionado con la desviación estándar de la función Gaussiana (donde  $d^2 =$  varianza).

$bi$  ,parámetro de ajuste geométrico. Para este caso será de 1, debido a que no tendrá incidencia en la ecuación.

El factor de pertenencia, por ejemplo para el conjunto borroso “TIEMPO DE ESPERA”, se calcula con los siguientes valores como se ve en la Tabla 4-4 :

$$xc_i = \{5, 15, 25, 35, 45\} \quad i = 1, 2, \dots, q \quad d = 5$$

Tabla 4-4: Factores de pertenencia para el conjunto borroso “TIEMPO DE ESPERA”

TIEMPO DE ESPERA (valores adimensionales 0..1)					
media	11	22	33	44	55
varianza	5	5	5	5	5
x	MP	P	MED	MH	EX
0	1	6.2522E-05	3.4759E-10	1.528E-17	5.3111E-27
3	1	0.0007318	1.523E-08	2.5062E-15	3.261E-24
6	1	0.00597602	4.6557E-07	2.868E-13	1.3969E-21
9	1	0.03404745	9.9295E-06	2.2897E-11	4.175E-19
12	0.98019867	0.13533528	0.00014775	1.2754E-09	8.7054E-17
15	0.72614904	0.3753111	0.00153381	4.9564E-08	1.2664E-14
18	0.3753111	0.72614904	0.011109	1.3438E-06	1.2853E-12
21	0.13533528	0.98019867	0.05613476	2.5419E-05	9.1015E-11
24	0.03404745	0.92311635	0.1978987	0.00033546	4.4963E-09
27	0.00597602	0.60653066	0.48675226	0.00308872	1.5498E-07
30	0.0007318	0.2780373	0.83527021	0.01984109	3.7267E-06
33	6.2522E-05	0.08892162	1	0.08892162	6.2522E-05
36	3.7267E-06	0.01984109	0.83527021	0.2780373	0.0007318
39	1.5498E-07	0.00308872	0.48675226	0.60653066	0.00597602
42	4.4963E-09	0.00033546	0.1978987	0.92311635	0.03404745
45	9.1015E-11	2.5419E-05	0.05613476	0.98019867	0.13533528
48	1.2853E-12	1.3438E-06	0.011109	0.72614904	0.3753111
51	1.2664E-14	4.9564E-08	0.00153381	0.3753111	0.72614904
54	8.7054E-17	1.2754E-09	0.00014775	0.13533528	0.98019867
57	4.175E-19	2.2897E-11	9.9295E-06	0.03404745	1
60	1.3969E-21	2.868E-13	4.6557E-07	0.00597602	1



donde

$MP$  ,conjunto difuso “Muy Poco”

$P$  ,conjunto difuso “Poco”

$MED$  ,conjunto difuso “Medio”

$MH$  ,conjunto difuso “Mucho”

$EX$  ,conjunto difuso “Excedido”

De esta manera se podrán construir las reglas divididas en dos grupos: entradas y salidas, como se muestra en la Tabla 4-5 y Tabla 4-6.

Tabla 4-5: Tabla de valores para conjuntos borrosos de entrada

ENTRADAS									
CENTROIDES OCUPACION					CENTROIDES TIEMPO DE ESPERA				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
MP	P	MED	MH	EX	MP	P	MED	MH	EX
15	35	55	75	95	5	15	25	35	45
10	10	10	10	10	5	5	5	5	5

Tabla 4-6: Tabla de valores para el conjunto borroso de salida

SALIDA				
CENTROIDES TIEMPO EN VERDE				
1	2	3	4	5
Z	C	L	ML	EL
33	39	45	51	57
5	5	5	5	5

donde:

$Z$  ,conjunto difuso “Cero” de la variable lingüística “tiempo en verde”

$C$  ,conjunto difuso “Corto” de la variable lingüística “tiempo en verde”

$L$  ,conjunto difuso “Largo” de la variable lingüística “tiempo en verde”

$ML$  ,conjunto difuso “Muy Largo” de la variable lingüística “tiempo en verde”

$EL$  ,conjunto difuso “Extremadamente Largo” de la variable lingüística “tiempo en verde”

Los valores de las tablas que permanecen en blanco son  $x_{c_i}$  y los valores en gris pertenecen a  $d$ . Así, de esta manera se constituyen los factores de pertenencia  $\mu_{A_i}$  de

cada uno de los conjuntos borrosos gaussianos, mediante la función “ $bell = (n, c_i, d_i)$ ” del arco de salida de la transición, dicha función es una transcripción en lenguaje para CPNTools de la Ecuación (57) , y se muestra en los arcos de salida en la Figura 4-20.

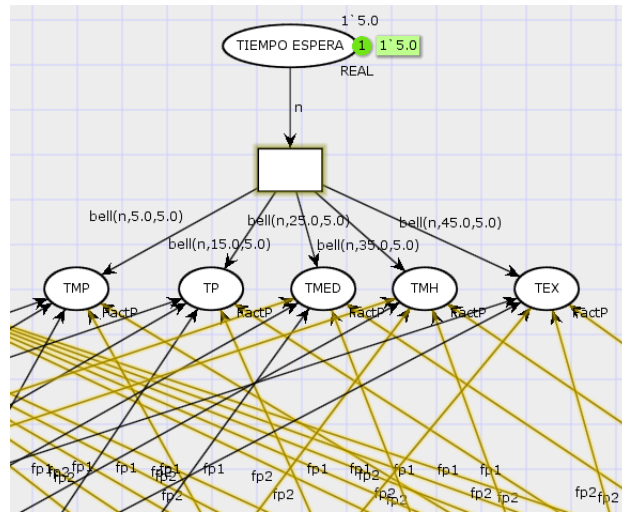


Figura 4-20: Segmento de Red de Petri Difusa Coloreada para el cálculo del factor de pertenencia para el “TIEMPO DE ESPERA”.

Ambos conjuntos (“OCUPACION” y “TIEMPO DE ESPERA”), deben generar los factores de pertenencia para calcular la estructura de la Red de Petri Difusa Adaptativa, como se evidencia en la Figura 4-21.

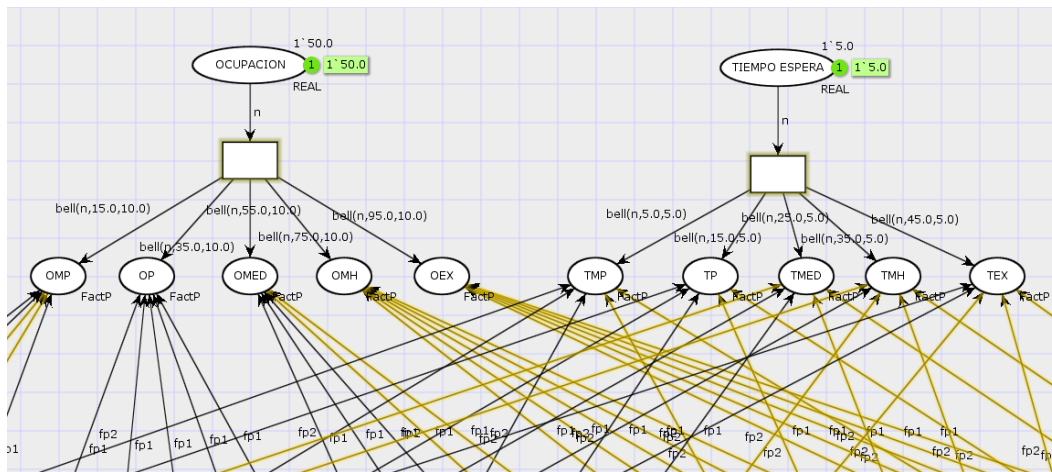


Figura 4-21: Segmento de Red de Petri Difusa Coloreada para el cálculo del factor de pertenencia de los conjuntos de entrada.

## 4.4 Aprendizaje basado en Modelo M-ANFIS

El modelo ANFIS, llamado así por su nombre en inglés *Adaptive Network Based Fuzzy Inference System*, fue propuesto por Jang (1993), adaptando el sistema de inferencia difuso Takagi - Sugeno en una estructura de red neuronal, en donde se realiza un procedimiento que consta de una adquisición de patrones de entrada que se propagan por medio de reglas, de las cuales su consecuente óptimo de salida es estimado por un procedimiento de mínimos cuadrados, mientras que los parámetros de la premisa, son adaptados por el algoritmo de back propagation, hasta satisfacer algún criterio de paro de entrenamiento por acercamiento al error mínimo.

Existen dos modelos comúnmente usados en los sistemas de inferencia difusos: el método difuso Mamdani y el método Takagi-Sugeno (T-S). El sistema T-S, trabaja con técnicas que garantizan la continuidad de la curva de superficie del conjunto borroso de salida (Takagi & Sugeno, 1985). Este sistema tiene dificultades en la asignación de los pesos a cada regla y a cada entrada.

El modelo Mamdani puede lograr la representación de la incertidumbre del conocimiento de las personas del común, debido a que es un sistema intuitivo y se dan beneficios al mostrar la salida de forma sencilla. Por las cualidades que tiene, fue presentado el modelo M-ANFIS en (Chai et al., 2009), el cual es adaptado en esta tesis al modelo de aprendizaje de la Red de Petri Difusa Adaptativa con la variación de conjuntos gaussianos. La combinación de la Red de Petri con el modelo M-ANFIS, permitirá que la acción de las reglas solo se activen en su transición para ser adaptadas, pues la selección de las reglas implicadas y su respectivo entrenamiento, podrá ayudar a la simplicidad del proceso para hacerlo más rápido, como se ve en el ejemplo dado en (Chai et al., 2009).

Lo que propone Chai es que teniendo el teorema del centroide del área (CA):

$$Z_{CA} = \frac{w_1 a_1 z_1 + w_2 a_2 z_2}{w_1 a_1 + w_2 a_2} \quad (58)$$

$$Z_{CA} = \overline{w_1 a_1} \cdot z_1 + \overline{w_2 a_2} \cdot z_2$$

donde

$a_i$  ,es el área bajo la curva del conjunto difuso

$w_i$  ,es el peso de la red

$z_i$  ,es el centroide del consecuente

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo Mamdani ANFIS se muestra en la Figura 4-22.

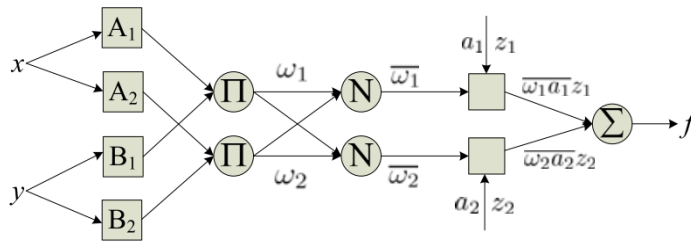


Figura 4-22: Modelo Mamdani ANFIS (Chai et al., 2009).

donde:

*Regla 1: Si x es  $A_1$  & y es  $B_1$ , Entonces  $f_1 = \overline{w_1 a_1} \cdot z_1$*

*Regla 2: Si x es  $A_2$  & y es  $B_2$ , Entonces  $f_2 = \overline{w_2 a_2} \cdot z_2$*

De la misma manera que la estructura del modelo ANFIS, el modelo M-ANFIS considera su estructura basada en capas de la siguiente forma:

**Capa 1:** Generar los factores de pertenencia  $\mu_1$  y  $\mu_2$

$$O_{1,i} = \mu A_i(x), \quad i = 1,2$$

(59)

$$O_{1,i} = \mu B_{i-2}(y), \quad i = 3,4$$

Luego con la Ecuación (57) se genera, como se explicó anteriormente, el factor de pertenencia.

**Capa 2:**

$$O_{1,i} = w_i = \mu A_i(x) \times \mu B_i(y) \quad i = 1,2 \quad (60)$$

**Capa 3:**

$$O_{3,i} = \overline{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1,2 \quad (61)$$

**Capa 4:**

$$O_{4,i} = f_i = \overline{w}_i a_i \cdot z_i \quad i = 1,2 \quad (62)$$

**Capa 5:**

$$O_{5,i} = \sum f_i = \overline{w}_i a_i \cdot z_i \quad i = 1,2 \quad (63)$$

Luego de tomar los valores de salida se debe estimar en la siguiente iteración, los valores para los parámetros de los antecedentes, evaluando en cada iteración, el error presentado, esto se hace por medio del algoritmo de aprendizaje híbrido que se implementará con una Red de Base Radial (RBR).

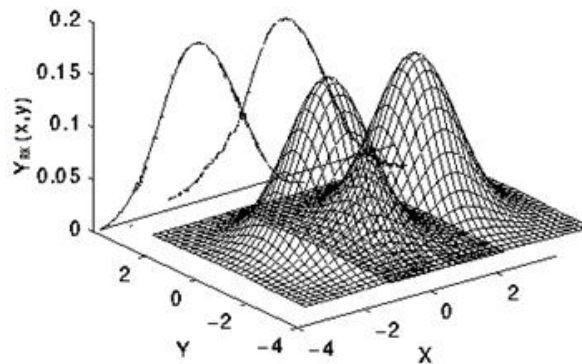


Figura 4-23: Superficies de conjuntos borrosos de RBR.

El disparo de una regla equivale al disparo de una neurona y viene dado de manera general por una red neuronal de base radial, que se denota y define como (Isasi & Galván, 2004):

$$Y_{Rk} = C_{jk} \left[ \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{X_i - XC_{ij}}{D_j} \right)^2 \right) \right] \quad (64)$$

donde:

$i$  , número de entradas

$j$  , número de centroides

$XC_{ij}$  , centroides del conjunto borroso

$D_j$  , diámetro de la base del conjunto borroso

$C_{jk}$  , peso de la capa oculta

$$S_{jk} = \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{X_i - XC_{ij}}{D_j} \right)^2 \right) \quad (65)$$

$S_{jk}$  , salida de la capa oculta

Para la actualización de los parámetros se deben considerar tres variables:

$$C_{j\ k+1} = C_{jk} - \alpha \frac{\partial \hat{e}_k^2}{\partial C_{jk}} \quad (66)$$

$$D_{j\ k+1} = D_{jk} - \alpha \frac{\partial \hat{e}_k^2}{\partial D_{jk}} \quad (67)$$

$$XC_{j\ k+1} = XC_{jk} - \alpha \frac{\partial \hat{e}_k^2}{\partial XC_{jik}} \quad (68)$$

Donde  $C_{j\ k+1}$  es la actualización de los pesos de la capa oculta,  $D_{j\ k+1}$  la actualización de los diámetros de los conjuntos borrosos, y  $XC_{j\ k+1}$  representa la actualización de los centroides. Al ser un proceso iterativo, se debe generar la función objetivo para alcanzar el menor valor del error cuadrático medio:

$$\hat{e}_k^2 = \frac{1}{2} (Y_{dk} - Y_{Rk})^2 \quad (69)$$

Derivando para satisfacer la Ecuación (68)

$$\frac{\partial \hat{e}_k^2}{\partial XC_{jk}} = -(Y_{dk} - Y_{Rk}) \frac{\partial Y_{Rk}}{\partial XC_{jik}} \quad (70)$$

$$\frac{\partial Y_{Rk}}{\partial XC_{jk}} = C_{jk} \left[ \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{X_i - XC_{ij}}{D_j}\right)^2\right) \right] \cdot \left[ -\left(\frac{X_i - XC_{ij}}{D_j}\right) \right] \cdot \left[ -\frac{1}{D_j} \right] \quad (71)$$

Reemplazando las Ecuaciones (69)- (71) en (68)

$$XC_{ij\ k+1} = XC_{ijk} + \alpha \cdot (Y_{dk} - Y_{Rk}) \cdot C_{jk} \left[ \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{X_i - XC_{ij}}{D_j}\right)^2\right) \right] \cdot \left(\frac{X_i - XC_{ij}}{D_j^2}\right)$$

Por lo que la ecuación para la actualización de los centroides quedaría así:

$$XC_{ij\ k+1} = XC_{ijk} + \alpha \cdot \hat{e}_k \cdot C_{jk} \cdot S_{jk} \cdot \left(\frac{X_i - XC_{ij}}{D_j^2}\right) \quad (72)$$

El mismo proceso se realiza para las ecuaciones (67) y (68), donde quedarían las ecuaciones de actualización como:

$$D_{j\ k+1} = D_{jk} + \alpha \cdot \hat{e}_k \cdot C_{jk} \cdot S_{jk} \cdot \frac{(X_i - XC_{ij})^2}{D_j^3} \tag{73}$$

$$C_{j\ k+1} = C_{jk} + \alpha \cdot \hat{e}_k \cdot S_{jk} \tag{74}$$

Luego de tener los factores de pertenencia de cada conjunto borroso, se procede a dar cumplimiento a las capas 2, 3, 4 y 5, para esto se deben calcular las áreas de las funciones gaussianas, donde:

$$a = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i - XC_{ij}}{D_j}\right)^2\right) dX_i$$

$$a = |D_j| \sqrt{2\pi} \tag{75}$$

donde

$a$  ,es el área bajo la curva de la función gaussiana.

Teniendo el área se procede a determinar dichas áreas de cada conjunto borroso, como se muestra en la Figura 4-24.

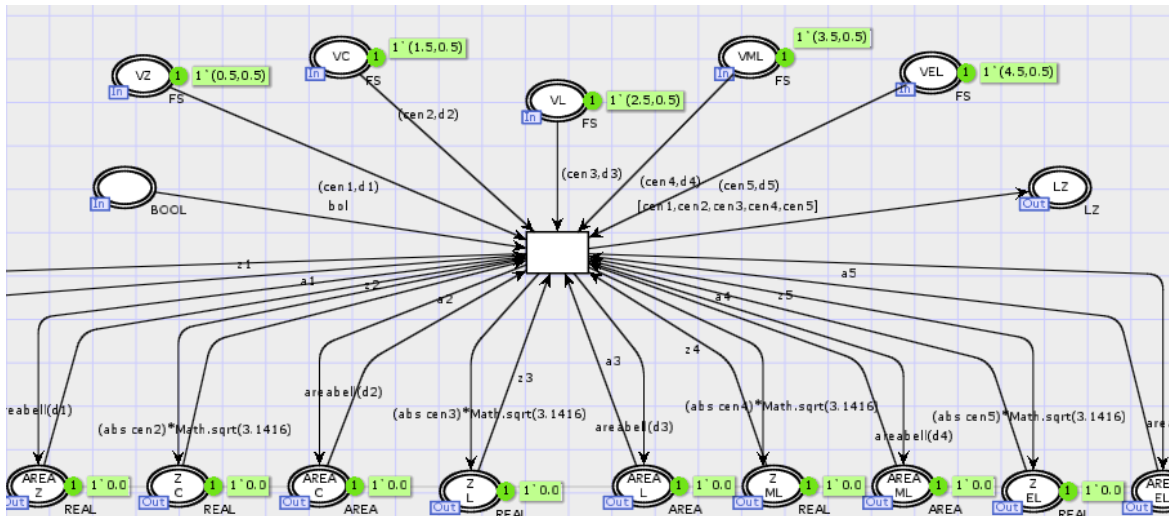


Figura 4-24: Red de Petri para cálculo del área de los conjuntos.



La red mostrada en la Figura 4-24 pertenece a la sub red contenida en la transición “Group 1” donde llega a cada una de las reglas con sus pesos ponderados para dar cumplimiento a la capa 4 y 5 del modelo M-ANFIS.

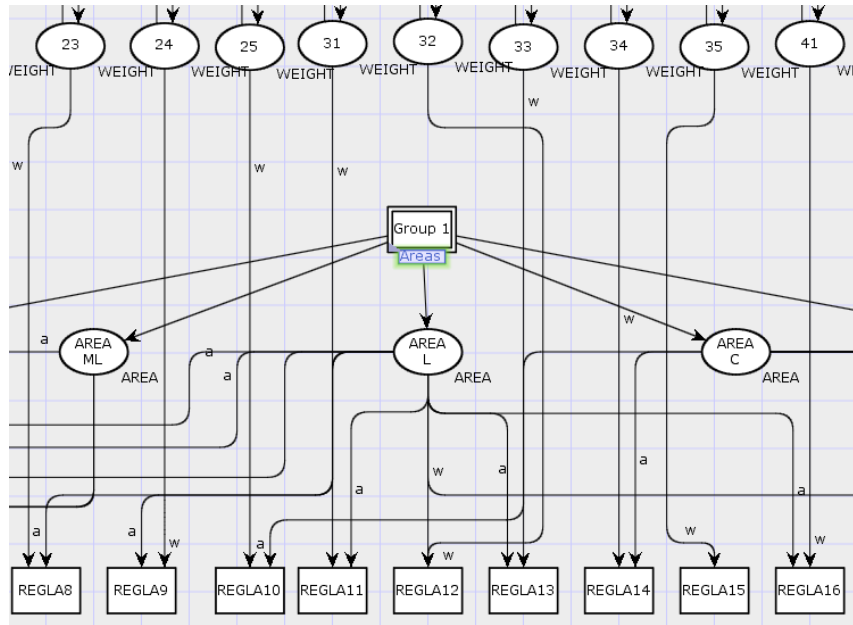


Figura 4-25: Red de Petri para modelo M-ANFIS capa 4 y 5.

Luego, para tratar la capa 5, se reemplaza  $Y_{Rk}$  por la Ecuación (63) por

$$Y_{Rk} = \sum f_i = \overline{w_l a_l} \cdot XC_{ij k+1} \tag{76}$$

Y así, recalculando para la actualización de  $XC_{ij k+1}$ , este quedaría finalmente como:

$$XC_{ij k+1} = XC_{ijk} + \alpha \cdot \hat{e}_k \tag{77}$$

De la misma forma tomando la Ecuación (75) que depende directamente del diámetro  $D_j$ , se actualiza el área del conjunto difuso como:

$$a_{j k+1} = a_{jk} + \alpha \cdot \hat{e}_k \tag{78}$$

Despejando de (75)

$$|D_j| = \frac{a_j k+1}{\sqrt{2\pi}} \quad (79)$$

## 4.5 SIMULACIÓN

Para la generación del modelo, se ha seleccionado CPN Tools 4.0, el cual se presenta como una de las herramientas más utilizadas para la edición, simulación y análisis de las CPNs. Su generación, por medio de esta herramienta, facilita la creación de modelos gráficos, conservando las reglas y estandarización de este tipo de grafos. Cabe anotar que este software no posee características de simulación en tiempo real, “*segundo a segundo*” para mostrar las Redes de Petri Temporizadas, pero si posee una simulación de un reloj con una medida de tiempo para dichas redes (CPN Tools, 2014).

Una de las herramientas características de CPN Tools, son las redes de Petri Jerárquicas, de gran ayuda para organizar el código y darle características de abstracción a diferentes niveles; se crean módulos una sola vez, evitando repetir elementos. Las redes de Petri Jerárquicas, son utilizadas en este trabajo para crear módulos que sirven para formar la estructura del modelo, y estos son:

- Aleatorio
- Generar veh
- Vía IN
- Vía OUT
- Distribución
- Central
- Intersección
- Áreas
- Feedforward
- Backpropagation

Estos módulos serán representados por transiciones etiquetadas con el nombre de la sub red que estas contienen. Como se presenta en la Figura 4-26, la transición “ALEATORIO 1” contiene la etiqueta “aleatorio” la cual representa la sub red con dicho nombre.



Figura 4-26: Transición jerárquica del módulo “aleatorio”.

### 4.5.1 Aleatorio

Para la construcción del modelo de tráfico en CPN Tools se inicia con el concepto de que cada vía se encuentra representada por dos lugares, como se vio en la Figura 3-11. En su lugar de entrada aparecerán los vehículos de manera aleatoria, y para esta actividad se realiza el siguiente módulo (ver Figura 4-27):

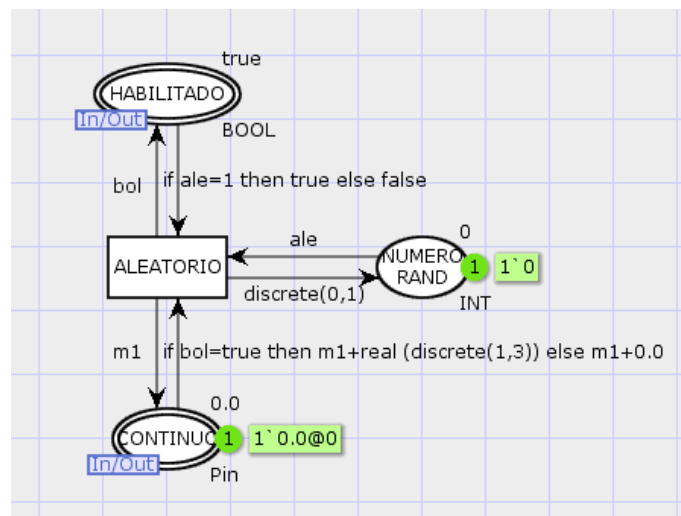


Figura 4-27: Sub red generación número de vehículos de forma aleatoria.

El inicio de este módulo necesita una habilitación, y se da en el lugar “HABILITADO” con un valor “true” en el conjunto de color “BOOL” para poder disparar la transición “ALEATORIO”; a su vez, se encarga de generar un número aleatorio con una función de

distribución aleatoria discreta (discrete), con valores enteros (INT) de cero o uno. De manera simultánea, la transición toma la marca que se encuentra en el lugar “CONTINUO”, limitada por las condiciones de los arcos de entrada, que obedecen a las variables “ale” y “bol”, iguales a 1 y true respectivamente. De esta manera, la generación del número de vehículos es de forma aleatoria en el lugar llamado “CONTINUO”, que a su vez es la salida del módulo “ALEATORIO”.

#### 4.5.2 Vía IN

En el módulo “ViaIN” se crea la red de Petri, coloreada para la simulación del traslado de la vía de entrada, con dos condiciones o lugares de entrada (ver Figura 4-28). El primero, es un lugar llamado “verde”, que tiene la habilitación externa de la señal semafórica verde por medio de un valor “true”. El segundo lugar de entrada “CONTINUO”, es el encargado de transportar la información que se genera en el módulo “ALEATORIO”, conformado por el conjunto de color “Pin”, que tiene como valor inicial “1`0.0@0”. Este valor contiene dos datos: el primero, (0.0) es de tipo real que representa el número de vehículos generados de manera aleatoria; el segundo dato, es precedido por el símbolo “@”, y representa el tiempo en el reloj del modelo simulado por CPNTools. Adicional a esto, la transición contiene una sub red, que entrega una cantidad de vehículos de forma continua por medio de una red VCPN a la salida “O”, como fue explicado en el Capítulo 3.

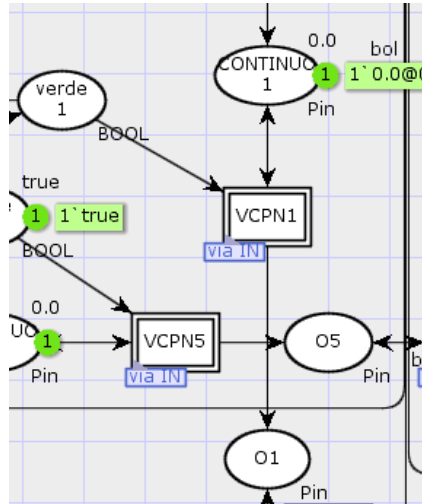


Figura 4-28: Segmento de red VCPN de en la vía de entrada.

### 4.5.3 Sub red Vía IN

La sub red “vía IN”, contiene un lugar de entrada llamada “vehículos” de entrada Real”, hace referencia a la cantidad de vehículos que se encuentran en la entrada de la vía y se dirigen hacia el final de ella, donde se encuentra con las luces semafóricas. Esta sub red contiene el modelo de VCPN descrito anteriormente, enviando desde el lugar de entrada la cantidad de vehículos hacia el lugar “vehículos de salida Real”, teniendo en cuenta la Ecuación (40), la cual necesita variables como “Nu”, número de la vía que transita, “q” flujo vehicular (veh/h), “v” velocidad (km/h), “d” delta de la vía (longitud de la vía en m), y por último, “s” es el espaciamiento entre vehículos que consta de la medida promedio del vehículo, más el espacio entre el parachoques delantero y el siguiente vehículo. Adicional a esto, se toma en cuenta todas las restricciones de entrada como: verificar que en lugar de entrada se encuentren vehículos, que la vía este habilitada por medio del lugar “habilitar vía”, que es alimentada por señal de verde desde el exterior de la sub red.

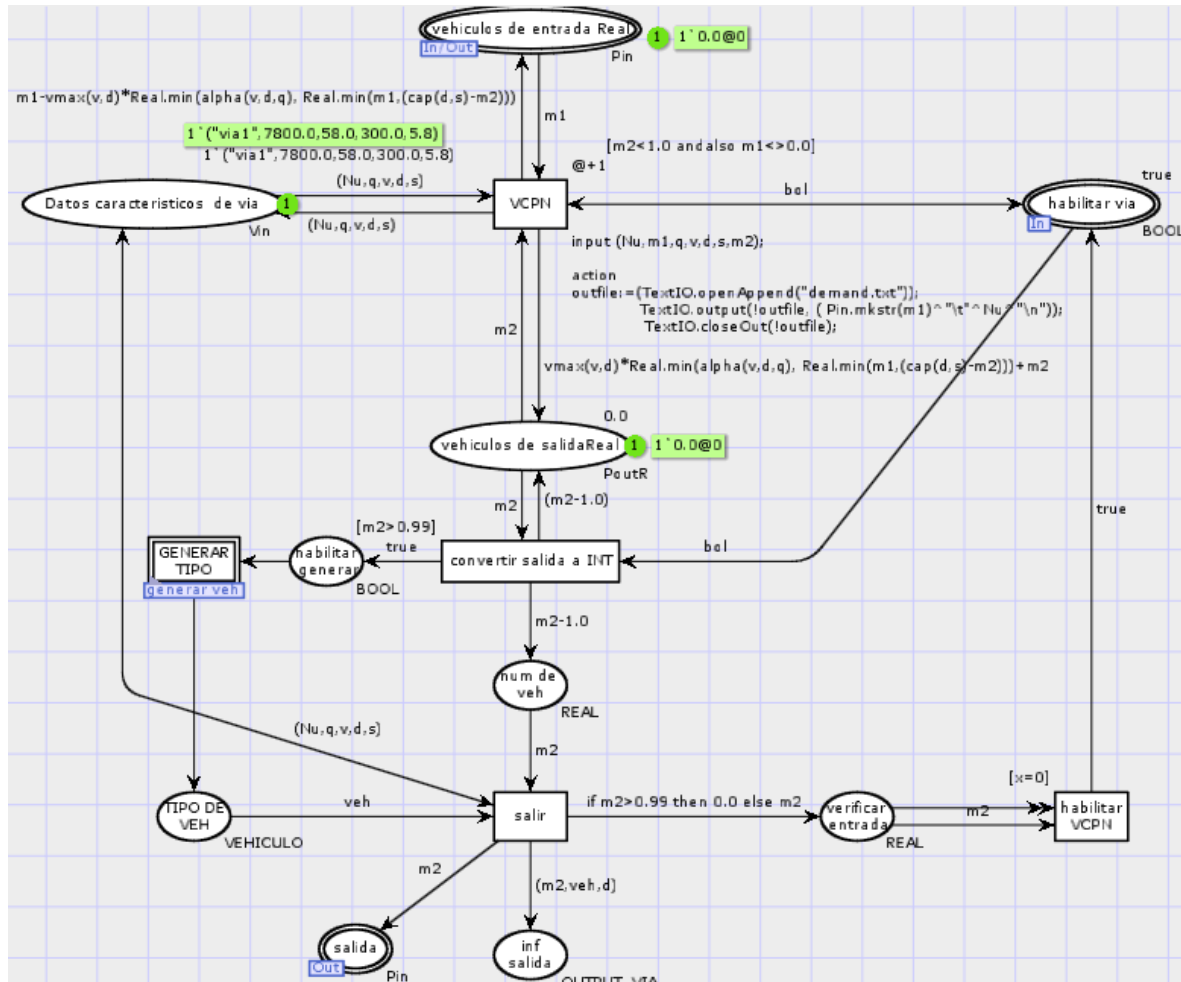


Figura 4-29: Sub red vía IN.

Además de entregar de forma continua los vehículos, dependiendo de los “datos característicos de la vía”, la transición VCPN se encarga de añadir el factor tiempo a cada uno de los que pasa, por medio de etiqueta “@+1”. Los vehículos en la transición siguiente, “convertir salida a INT”, como muestra la Figura 4-29, son convertidos en un número de tipo real a un tipo entero. Esto quiere decir que durante la trayectoria de los vehículos, la red se comporta como un sistema continuo, pero cuando los vehículos llegan a su destino, se comportan de modo discreto. Continuando con la descripción de la sub red, se encuentra la transición “GENERAR TIPO”, con otro módulo llamado “generar veh”, que se encarga de generar el tipo vehículo y será explicado en el siguiente apartado.

Luego de tener el tipo de vehículo, la cantidad y el tiempo requerido para transitar la vía, se verifica si se encuentran más vehículos en el lugar de entrada, por medio de la condición del arco dirigido hacia el lugar “verificar entrada”, que habilita el disparo para la transición “habilitar VCPN”, y esta a su vez al lugar “habilitar vía”, quedando de esta manera habilitada la transición “VCPN” para un nuevo ciclo.

#### 4.5.4 Generar veh

La sub red “generar veh” se encarga de tomar la cantidad de vehículos generados y buscar de manera probabilística, los tipos de vehículos que se pueden generar en cada vía. Esto es en general importante, para la determinación del tipo de vía, ya que el área que ocupa cada uno en la vía, es diferente dependiendo de su tamaño.

Las vías son congestionadas a menudo por vehículos pequeños y particulares en vías principales, esto se puede simular por medio de esta sub red con los datos ingresados en el lugar llamado “cantidad de veh x tipo”, que está determinado por una lista de ocho números enteros (1`[2,1,2,2,3,5,6,10]) como se muestra en la Figura 4-30. En la cuarta columna de la Tabla 4-7, cada uno de los números hace referencia a la percepción del usuario de cuántos vehículos del respectivo tipo fluyen cada minuto, es decir, el primer número en la lista (2) corresponde a la percepción de dos vehículos de tipo “BICICLETA” y tiene una distribución de probabilidad de 0.0645, por lo que tendrá una probabilidad del 6.45% de que aparezca en la vía por minuto (ver Tabla 4-7).

Tabla 4-7: Distribución de probabilidad por tipo

LISTA	TIPO	DISTRIBUCION	PERCEPCION
1	BICICLETA	0.064516129	2
2	CAMIÓN	0.032258065	1
3	BUSETA	0.064516129	2
4	BUSETA METRO	0.064516129	2
5	BUS	0.096774194	3
6	TAXI	0.161290323	5

7	PARTICULAR	0.193548387	6
8	MOTO	0.322580645	10
		100%	31

Para realizar el cálculo de la distribución de probabilidad, la primera parte de la sub red “generar veh”, realiza esta función por medio del ingreso y lectura de la lista antes mencionada. Después, se procede a obtener la sumatoria de las probabilidades de aparición en el lugar “PROB ACUMULADA”, al mismo tiempo, con las transiciones “for j” y “for i”, se lee cada valor para convertirlo a real con la transición “convertir real”. De esta manera se puede continuar con la división, para obtener la probabilidad de cada tipo de vehículo, almacenando esta información en el lugar llamado “lista de prob”. Terminado este procedimiento, se habilita la transición “habilitar inicio”, el cual después de tener todas las probabilidades de los tipos de vehículos, procede a determinar el tipo de vehículo a generar.

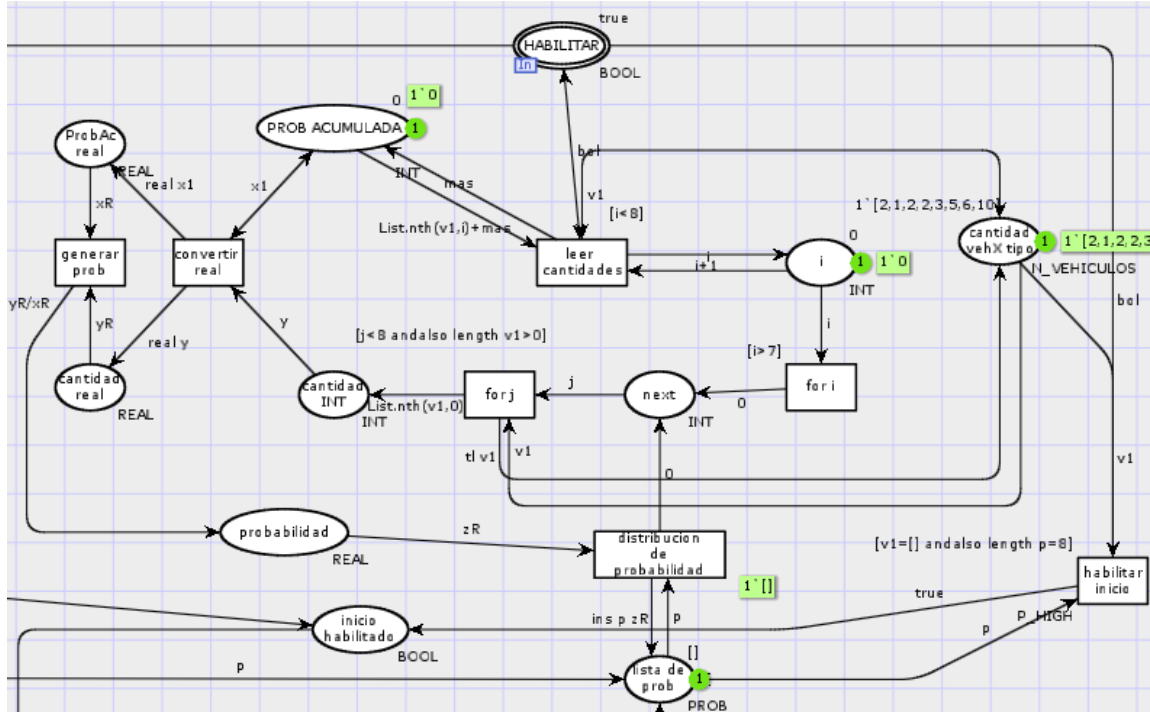


Figura 4-30: Generar distribución de probabilidad para tipos de vehículo.



Al tener todas las probabilidades y haber activado el lugar “habilitar inicio”, se habilita la transición “INICIO”, dando inicio al cálculo del método de Montecarlo (Willink, 2006). Este método se aplica en este trabajo, con el fin de tomar las probabilidades, y mediante un número aleatorio, realizar el sorteo para generar la selección de un tipo de vehículo.

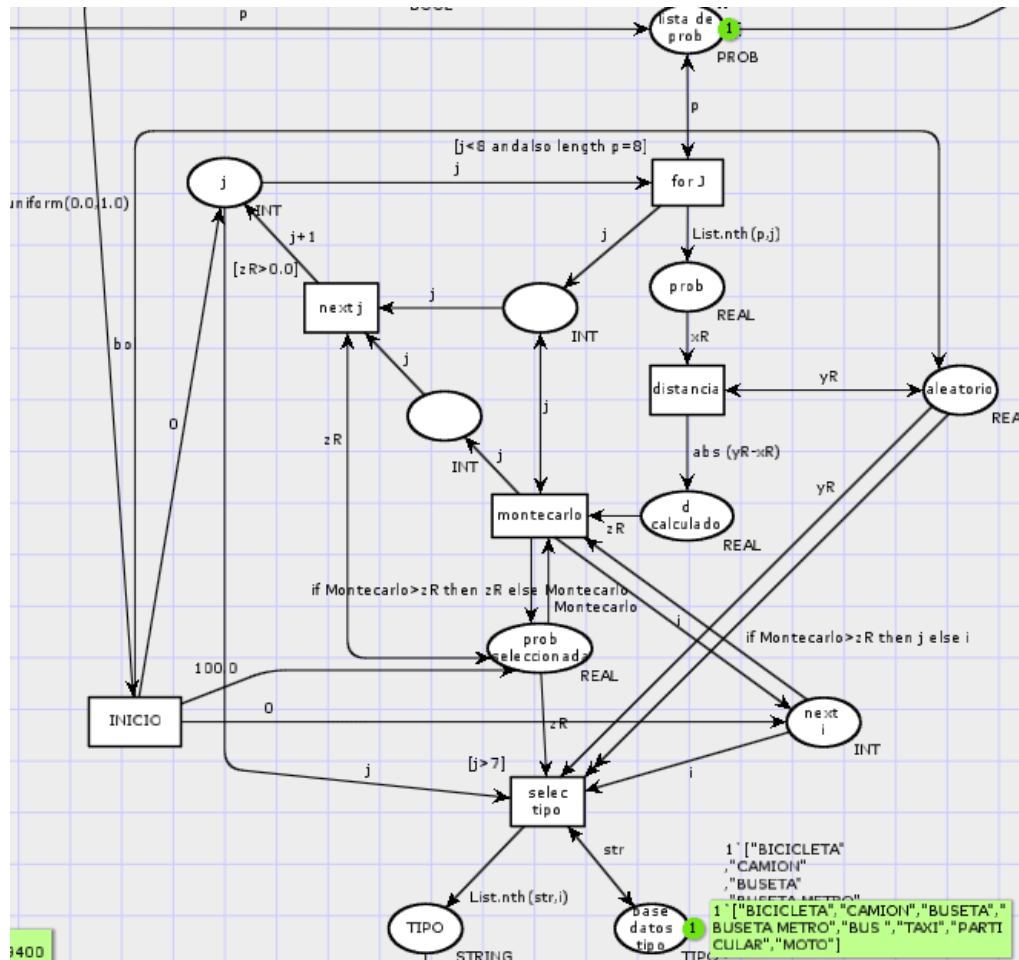


Figura 4-31: Selección de tipo de vehículo por método de Montecarlo.

Este segmento de la sub red, Figura 4-31, genera un número aleatorio entre cero y uno, por medio de la función de distribución “uniform”, en el lugar llamado “aleatorio”. La transición “distancia”, toma la distancia euclidiana entre el número aleatorio y la probabilidad para determinar si éste está dentro de ese rango; así el lugar “prob seleccionada”, toma la probabilidad mas cercana al número aleatorio para poder habilitar

la transición “selec tipo”, que se encarga de tomar el tipo de vehículo de la probabilidad seleccionada.

Luego de determinar el tipo de vehículo con los datos del lugar llamado “base datos tipo”, se pasa a la selección del vehículo dentro de una base de datos (Consumer Reports, 2014) (ICTA, 2014) (Ship North America Transportation, 2014), construida a partir de 384 vehículos divididos en tipos, con su respectiva área ocupada. Toda esta información del vehículo generado, es almacenado en el lugar “TIPO Y MARCA”, como se muestra en la Figura 4-32.

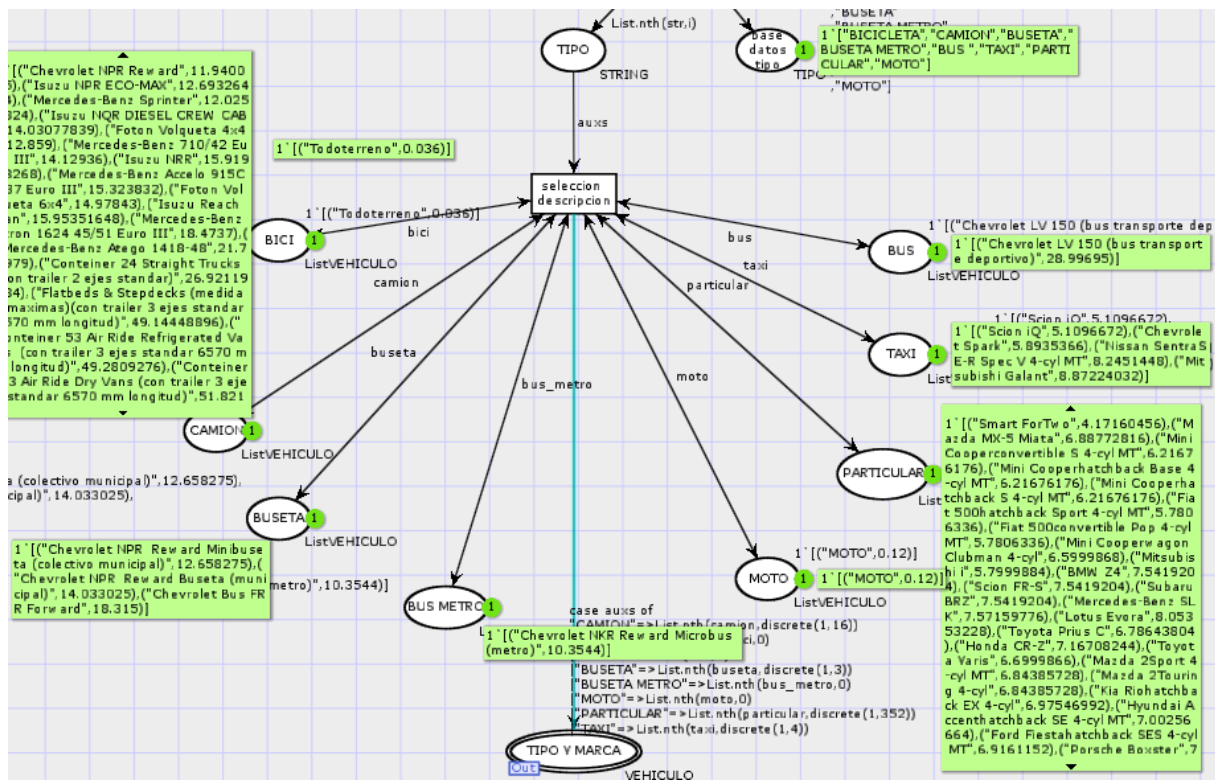


Figura 4-32: Selección de vehículo de la base de datos.

### 4.5.5 Central

Luego de realizar la simulación de todos los vehículos que atraviesan la “vía IN”, ésta sub red entrega esta información al lugar de entrada “veh IN” de la Sub Red “Central”, que

cumple la función de simular el área central de la intersección y determina mediante probabilidades, el giro que pueda tomar cada uno de los vehículos.

La transición “activar distribución” envía la información a la transición “probabilidad de giro”, la que a su vez, contiene una sub red llamada “distribución”, que determina según la probabilidad ingresada en el lugar “probabilidad de giro”, hacia dónde debe ir cada vehículo, y enviando la información a los lugares de salida “salida recto”, “salida dere” y “salida izq”, como se muestra en la Figura 4-33.

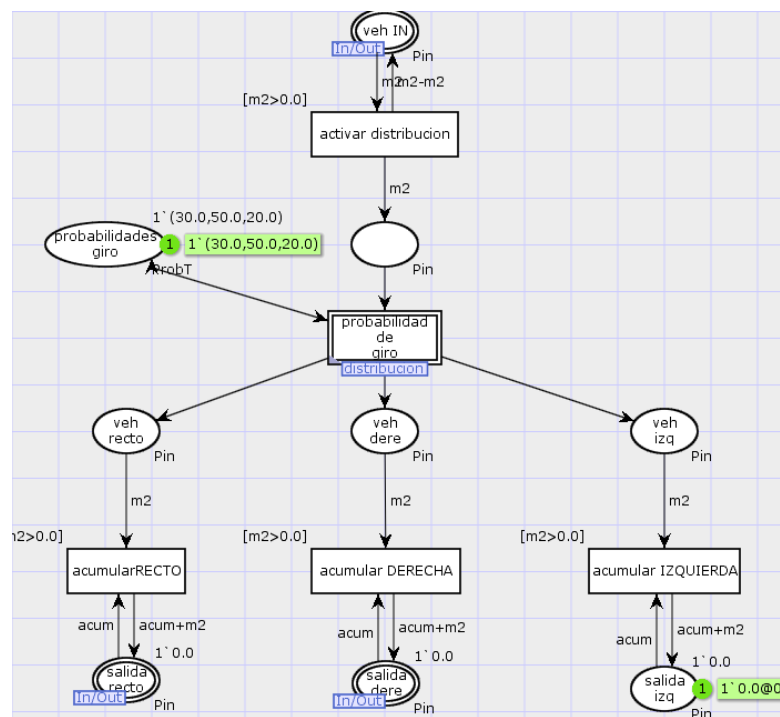


Figura 4-33: Sub Red Central.

#### 4.5.6 Distribución

La Sub Red “Distribución” como se describe en la Sub Red “Central”, modela la probabilidad de giro de cada vehículo, por lo que el lugar de entrada “probabilidad de giro”, corresponde a un porcentaje de probabilidad asignada a cada vía conectada a la salida de la “vía IN”. En la Figura 4-34 se muestra el lugar de entrada con las probabilidades  $1 \ (30.0, 50.0, 20.0)$ , que corresponde a 30%, 50%, 20%, para vía recta,

vía derecha y vía izquierda, respectivamente. Esto es, si la vía tiene viraje restringido (giro prohibido) en un sentido, es suficiente con solo dos porcentajes.

La Sub Red “Distribución” tiene dos lugares de entrada como condición de habilitación: los vehículos que entran al área central de la intersección y las probabilidades. Estas condiciones habilitan la transición llamada “probabilidad acumulada”, que se encarga de la sumatoria de las probabilidades para luego habilitar la transición “distribuir”. Así, con la ayuda del valor aleatorio generado en el lugar “Num veh”, determina en qué sentido girará el vehículo. Cabe anotar que con el ingreso de probabilidades, es posible simular la importancia de las vías principales en dicha intersección.

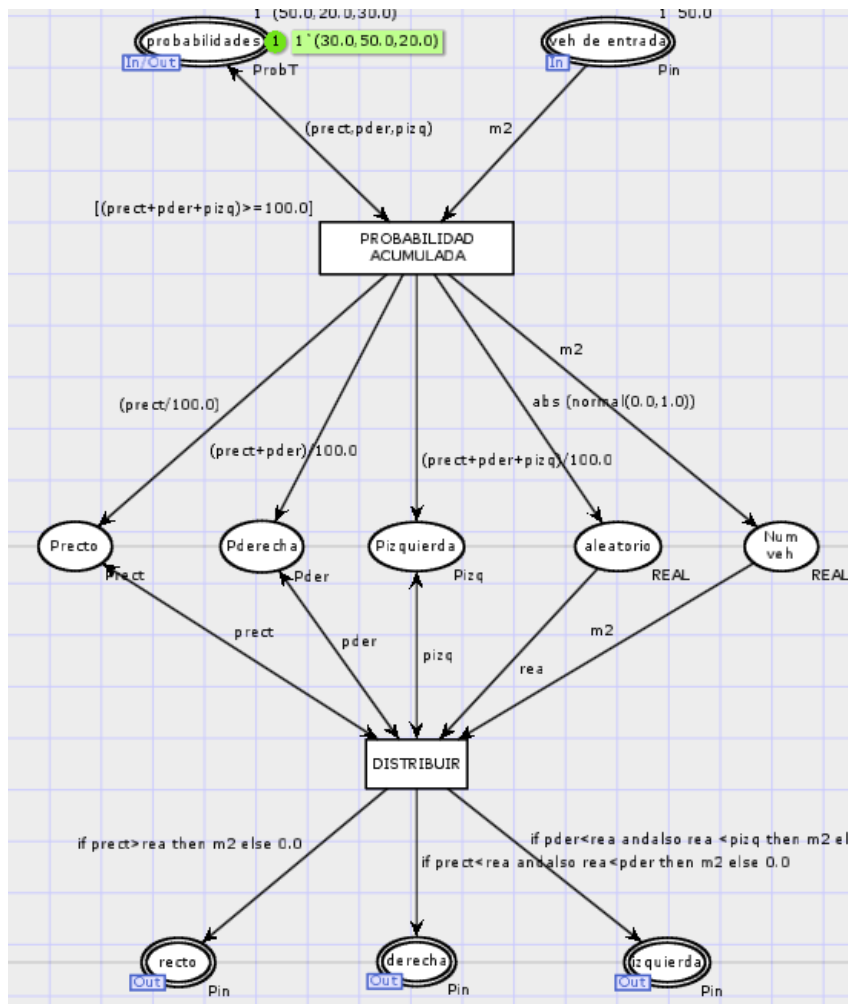


Figura 4-34: Sub Red Distribución.

### 4.5.7 Vía OUT

La Sub Red “Vía OUT”, se encarga de simular la vía que recibe los vehículos luego de la semaforización y la zona central de la intersección. La Sub Red contiene un sistema de transición VCPN similar en sus características a la “Vía IN”. A diferencia de “Vía IN” la “Vía OUT” no genera vehículos, por lo que se torna más simple en su estructura (Figura 4-35).

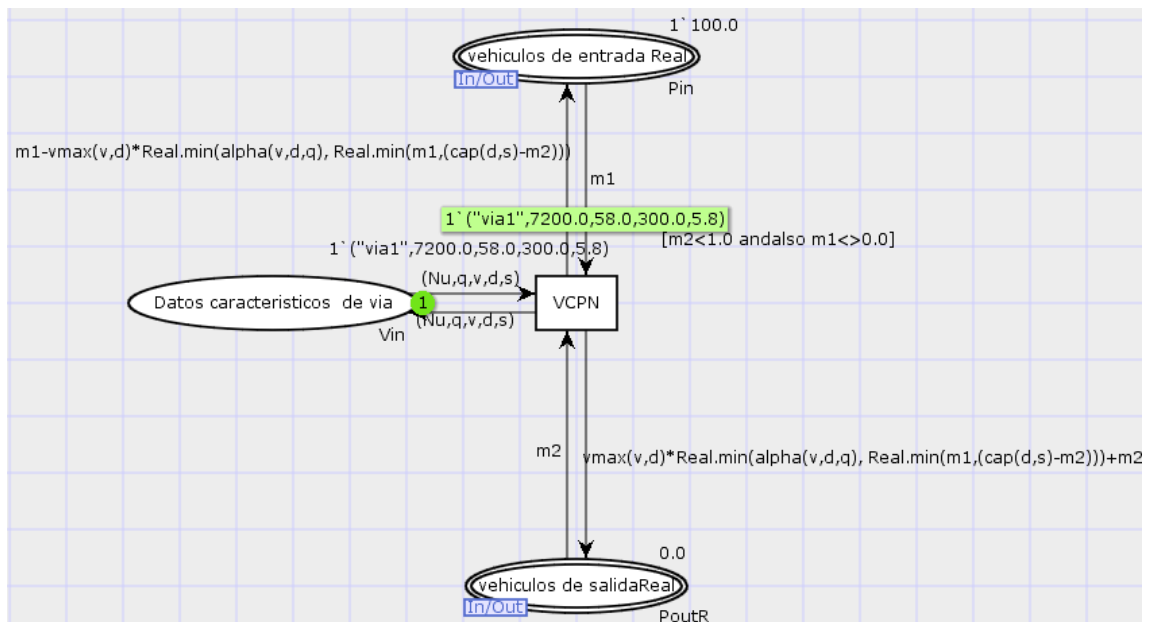


Figura 4-35: Sub Red Vía OUT.

### 4.5.8 Semaforización

El sistema de activación de luces semafóricas, está dado por la activación de las transiciones “disparar verde1, disparar verde 2”, que tienen la condición, por antelación, de disparo en los lugares “A1” y “A2”, cuyas marcas dependen del tiempo establecido en los lugares “a1” y “a2” respectivamente, para el tiempo en amarillo.

Al disparar la transición “disparar verde” se habilitan las vías de entrada para que circulen los vehículos a sus respectivas vías de salida, hasta que este tiempo termine y comience el tiempo en amarillo, luego se habilite la otra fase.

Cabe anotar que los lugares en rojo (R1 y R2), solo habilitan el disparo de la transición en verde de su contraparte.

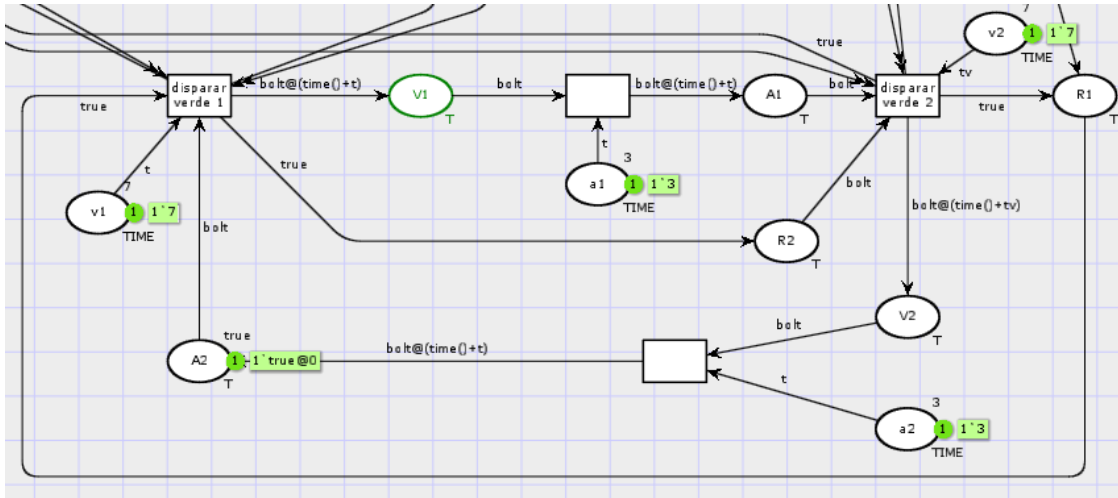


Figura 4-36: Semaforización.

Teniendo en cuenta la Figura 4-36, y la descripción presentada en el Capítulo 3, se toma la siguiente Figura (Figura 4-37), como la representación gráfica del control del tráfico vehicular de una intersección mediante una Red de Petri Coloreada Difusa Adaptativa.

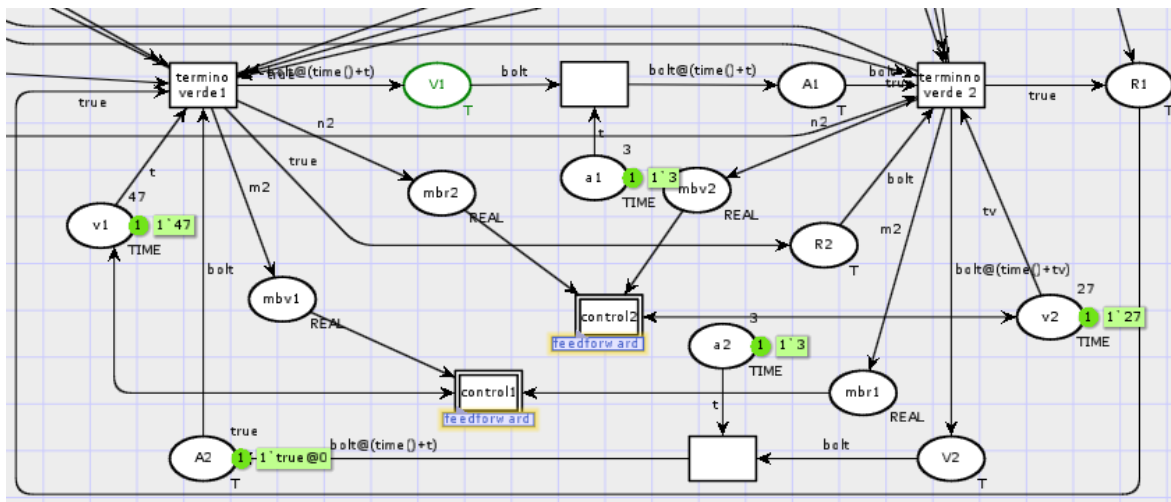


Figura 4-37: Semaforización Controlada con RPCDA.

### 4.5.9 Feedforward

Una parte esencial del sistema adaptativo propuesto en este trabajo, es la producción de salidas proporcionales, dependiendo de la ocupación y el tiempo de espera que tenga en la vía. Esto se logra mediante el proceso Fuzzy que ejecuta la Sub Red “Feedforward”, descrito en la Sección 4.2 ,4.3 y 4.4.

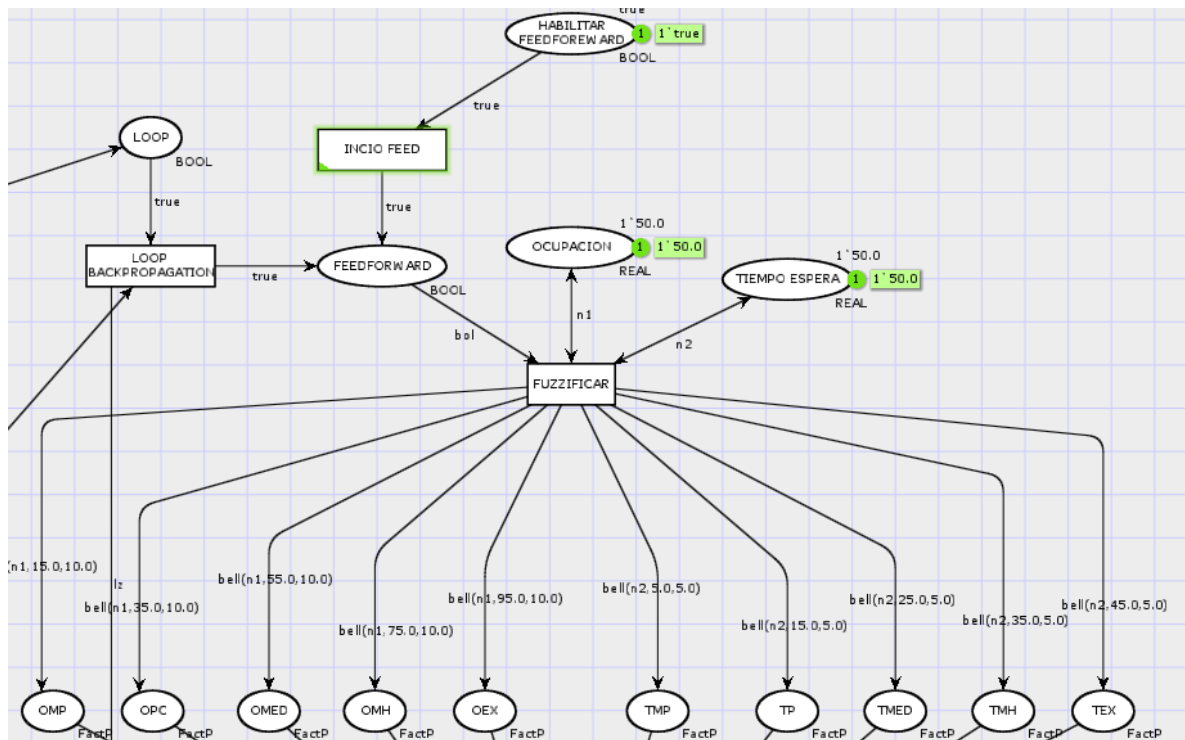


Figura 4-38: Factor de pertenencia en Sub Red Feedforward.

Se ejecuta primero el inicio del proceso, por medio del disparo de la transición “INICIO FEED”, como se ilustra en la Figura 4-38, teniendo en cuenta las entradas del sistema en los lugares “OCUPACION” y “TIEMPO DE ESPERA”. Luego de esta información, se pasa a la ejecución de la transición “FUZZIFICAR” encargada del cálculo de los conjuntos difusos con la función expresada en la Ecuación (80).

$$fun\ bell(x, z, d) = Math.exp(\sim(0.5 * ((x - z)/d) * ((x - z)/d))) \tag{80}$$

Esta Ecuación (80) se encarga de calcular el factor de pertenencia con las mismas variables expresadas en el Capítulo 4.3, que son:

$fun\ bell(x, z, d)$  ,función gaussiana

$x$  ,valor a calcular

$z$  ,media del conjunto difuso

$d$  ,diámetro del conjunto difuso

$Math.exp()$  ,expresión del lenguaje CPNTools para denotar la función exponencial de la librería Math.

Teniendo calculados los factores de pertenencia para cada conjunto difuso, se habilita la transición “WEIGHTS” (Figura 4-39), la cual se encarga de realizar la multiplicación de los factores de pertenencia para cada regla como se expresó en la Tabla 1-3.

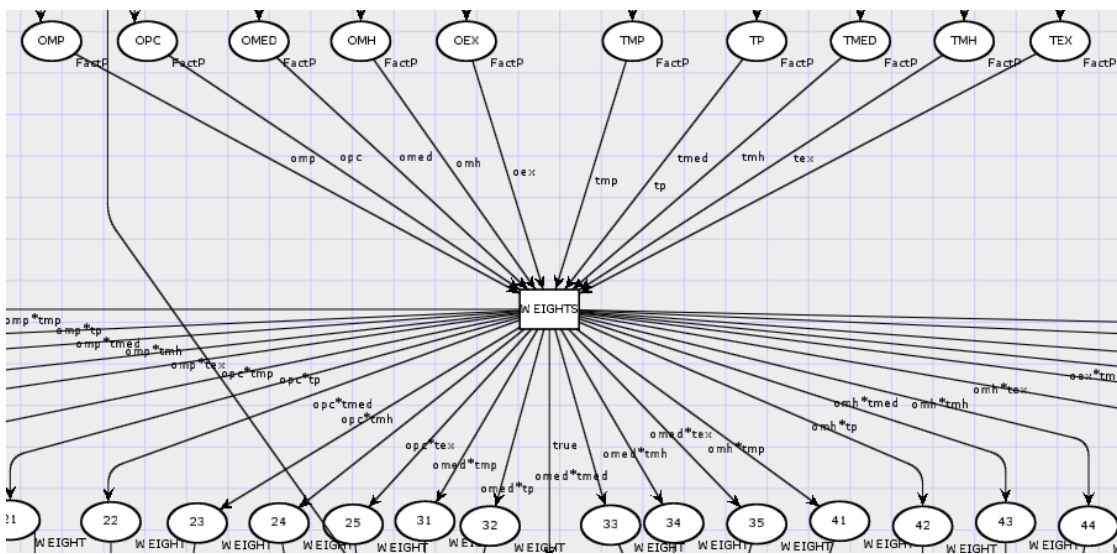


Figura 4-39: Cálculo de pesos con factores de pertenencia Sub Red Feedforward.



### 4.5.10 Área

El uso de la Sub Red “Área”, se basa en el cálculo del área ocupada por el conjunto difuso para el cumplimiento de las Ecuaciones (75) y (79).

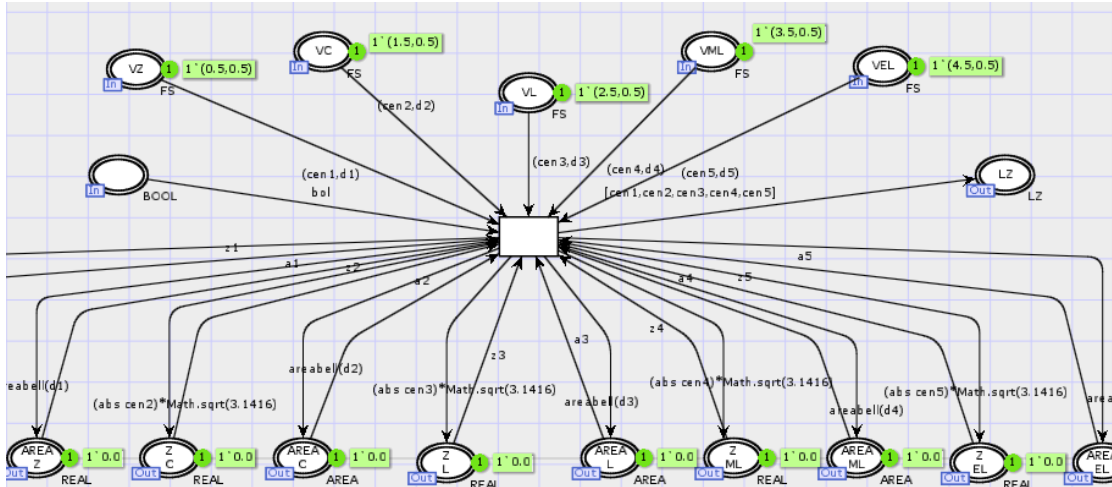


Figura 4-40: Cálculo de áreas de conjuntos difusos Sub Red Área.

Estas áreas son actualizadas a medida que el control actúe sobre ellas, de este modo el sistema tendrá en cuenta el aprendizaje para todos los conjuntos. Por esta razón, la Figura 4-41 muestra una transición llamada “W\*A”, encargada de la multiplicación de los pesos y las áreas para cumplir con la Ecuación (62).

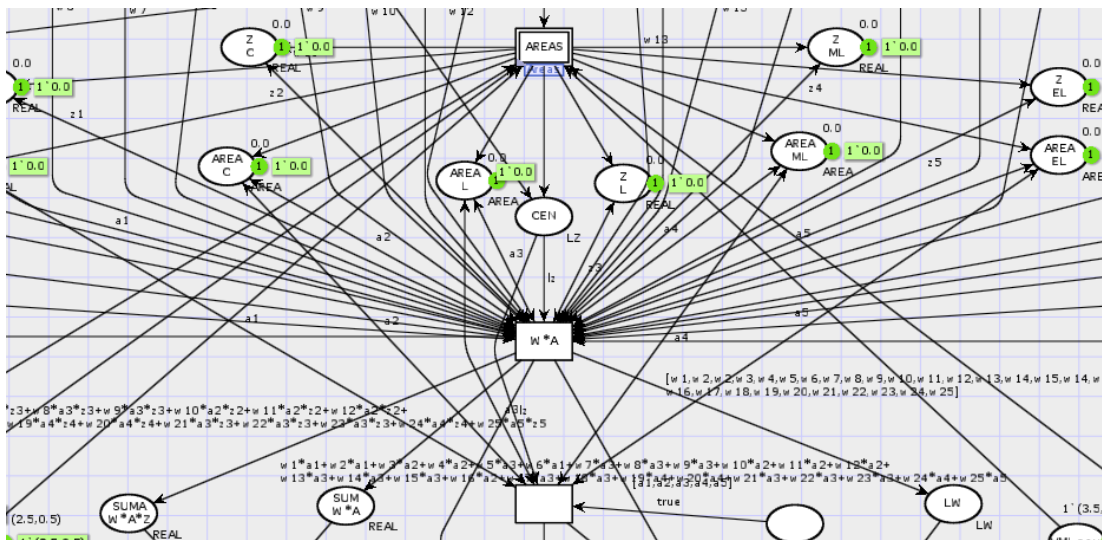


Figura 4-41: Multiplicación de pesos y áreas Sub Red Feedforward.

Por último, en la Sub Red Feedforward, se tiene la defuzzificación (Figura 4-42), la cual es permitida por los lugares "SUMA W\*A\*Z" y "SUM W\*A". Estos lugares habilitan la transición "DEFUZZIFICAR" para entregar un valor real de tiempo en verde  $t_v$ , teniendo la solución de la Ecuación (64) para la respuesta del sistema  $Y_{Rk}$ .

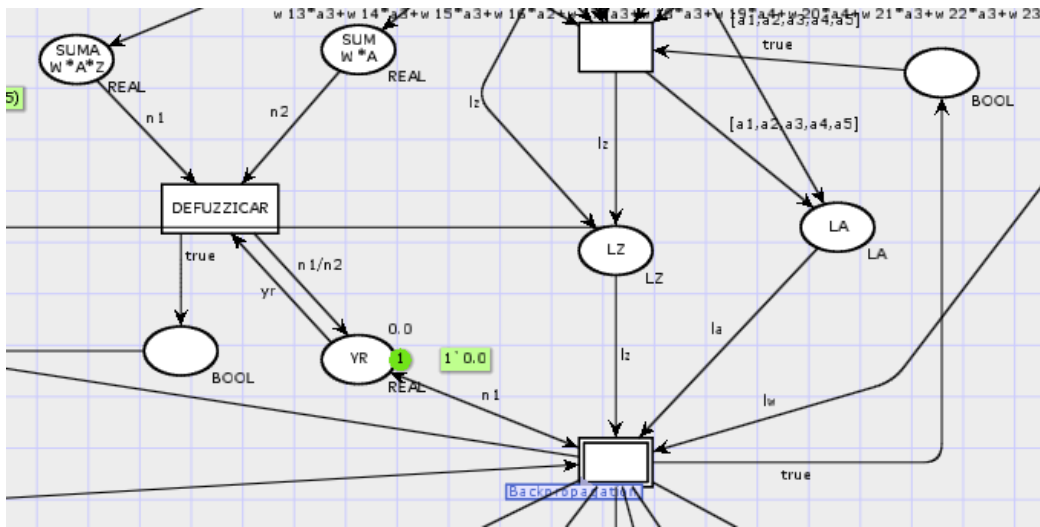


Figura 4-42: Defuzzificación de Sub Red Feedforward.

Teniendo en cuenta la sentencia (54) "SI  $veh_{ev1} < veh_{rojo}$  ENTONCES control SINO feedforward", se producirá la habilitación del control, y por lo tanto se necesita un entrenamiento del sistema por medio del procedimiento "BACKPROPAGATION", el cual es habilitado por el lugar "HABILITAR ENTRENAMIENTO", como se muestra en la Figura 4-43.

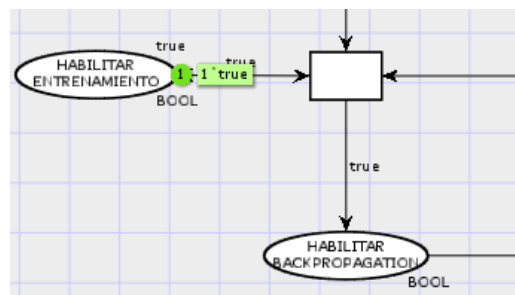


Figura 4-43: Habilitar control por medio de Sub Red Backpropagation.

## 4.6 Backpropagation

La Sub Red Backpropagation, se encarga del aprendizaje de los nuevos valores para los conjuntos difusos. Este proceso repetitivo es limitado por el lugar “# de iteraciones” y condicionado por la existencia de las entradas “SetPoint”, “YR”, “pesos” (w), un listado de las áreas, y los centroides respectivamente. Estos centroides serán actualizados y enviados a través del lugar llamado “LOOP”.

El procedimiento de la red comienza con el cálculo del error por medio de la Ecuación (69), que implica la resta de “YR” correspondiente a la salida del tiempo en verde, entregado por la Sub Red Feedforward y el valor deseado “SetPoint”, calculado por la Ecuación (55).

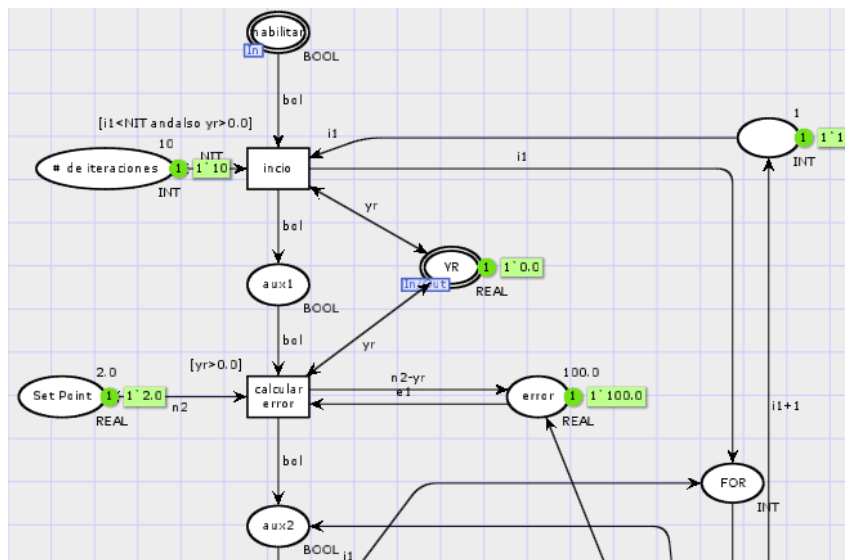


Figura 4-44: Cálculo del error Sub Red Backpropagation.

Después de tener el error, se procede a la lectura de los pesos, para esto, la sección de la red debe realizar un recorrido por cada uno de los valores entregados en la lista, por medio de las variables I y J, que se encuentran relacionadas en los arcos de la transición “ITERACION CONJUNTOS” (Figura 4-45), para poder calcular la Ecuación (76).

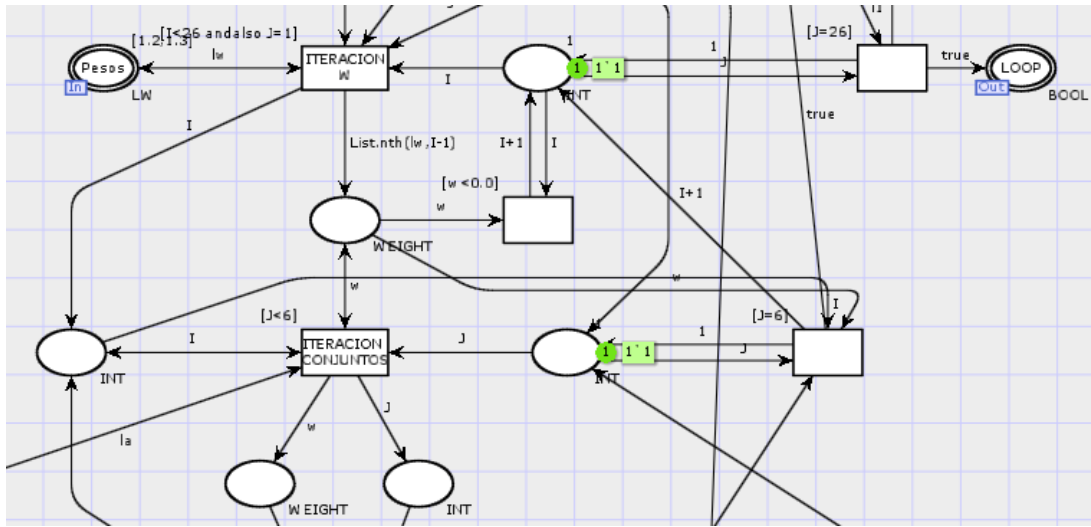


Figura 4-45: Lectura de los pesos actuales Sub Red Backpropagation.

Con la ayuda de los lugares “LA” y “LZ”, que corresponden a los valores de las áreas y las medias de los conjuntos difusos respectivamente, se calcula su actualización mediante las Ecuaciones (77) y (78).

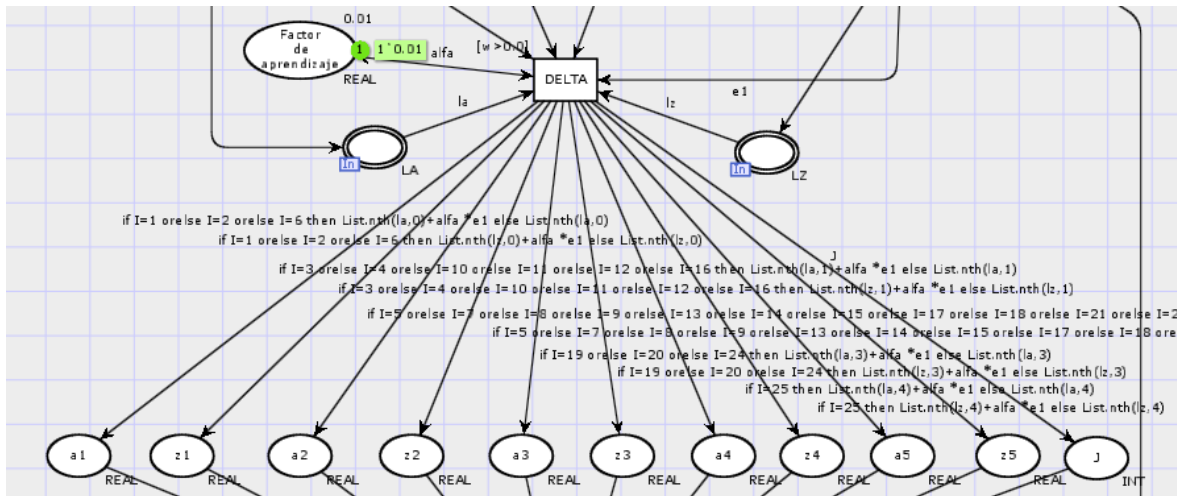


Figura 4-46: Actualización de centros y áreas con regla delta generalizada.

En la Figura 4-46 se muestran los procedimientos de actualización de los centros, mediante la regla delta generalizada para cada una de estas variables, y son actualizadas con las Ecuaciones (72) y (73) respectivamente.

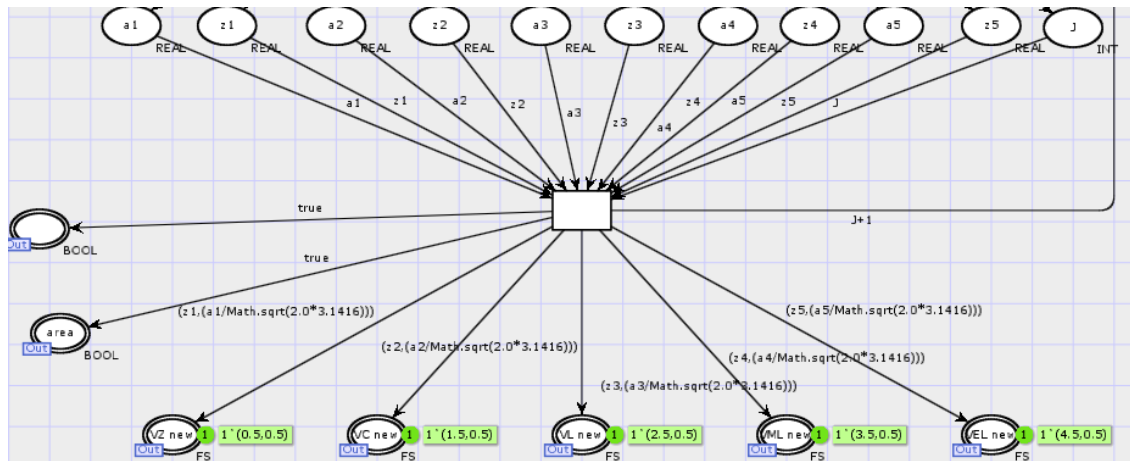


Figura 4-47: Transformación de áreas en diámetros.

Por último, se obtiene la conversión de los valores de áreas en los lugares “VZ, VC, VL, VML, VEL”, correspondientes a la actualización de la variable de salida tiempo en verde.

VZ ,conjunto borroso “cero” de la variable “tiempo en verde”

VC ,borroso “corto” de la variable “tiempo en verde”

VL ,borroso “largo” de la variable “tiempo en verde”

VML ,borroso “muy largo” de la variable “tiempo en verde”

VEL ,borroso “extremadamente largo” de la variable “tiempo en verde”

## 4.7 Flexibilidad

La característica del sistema representado por Redes de Petri Coloreadas, presenta una ventaja de flexibilidad para el programador, pudiendo tener opciones de construcción del entorno, para el modelado de diferentes características físicas de las vías. Esto se logra mediante la creación de sub redes que interactúan entre sí, y lograr la creación de un sistema complejo.

Al desarrollar todos los módulos, el diseñador o programador, tiene la posibilidad de fabricar la intersección con todos los componentes que se necesiten en la geometría. Tales disposiciones son creadas a partir de módulos reutilizados, y estos se organizan para obtener una intersección de la siguiente forma (ver Figura 4-48):

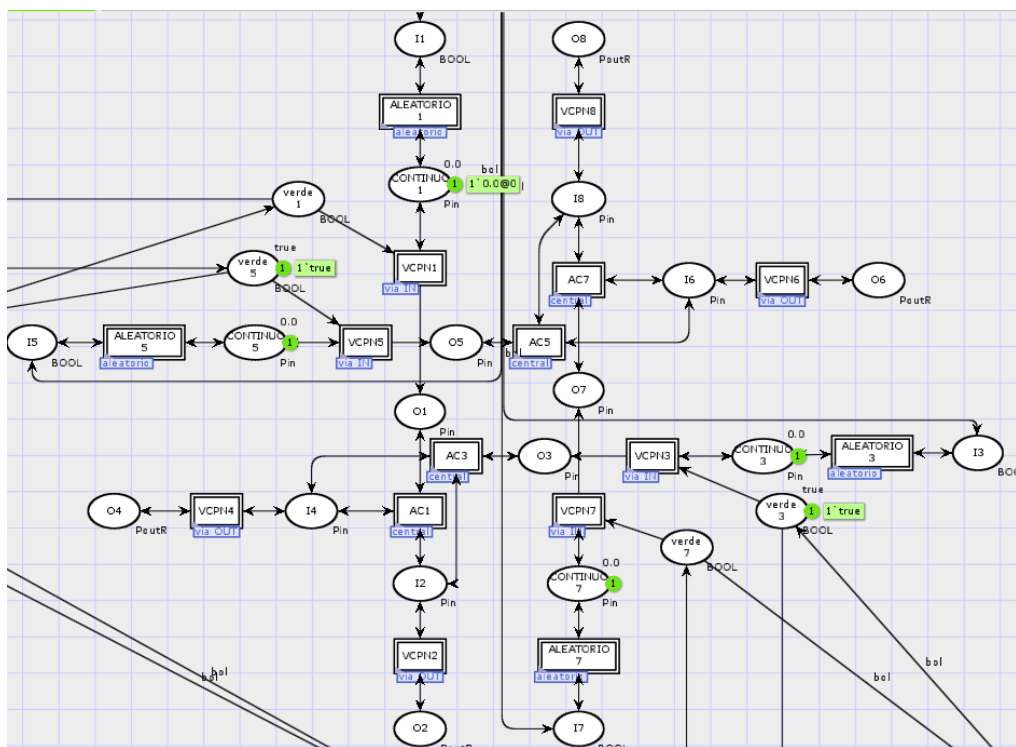


Figura 4-48: Sub Red Intersección

donde

$I\#$  ,lugar de habilitación

$ALEATORIO \#$  ,transición jerárquica con Sub Red “Aleatorio”

$CONTINUO \#$  ,lugar vehículos de entrada “CONTINUO #”

$VCPN\#$  ,transición jerárquica con Sub Red “vía IN” o “vía OUT”

$O\#$  ,lugar de salida del área central

$AC\#$  ,transición jerárquica con Sub Red “Central”, área central

$I\#$  ,lugar de entrada vía de salida

Donde # se refiere al número de vía a la cual pertenece el elemento. Esta estructura en módulos da como alternativa, la interacción y correlación con otras vías, tomando como datos los vehículos de llegada de la otra intersección. Por esta razón, el sistema obtiene reconocimiento e independencia de los tipos de vías que se le adhieran a esta intersección controlada. Esto se muestra en la Figura 4-49, de tal forma que la intersección creada con el controlador RPCDA pueda interconectarse con la vía no controlada.

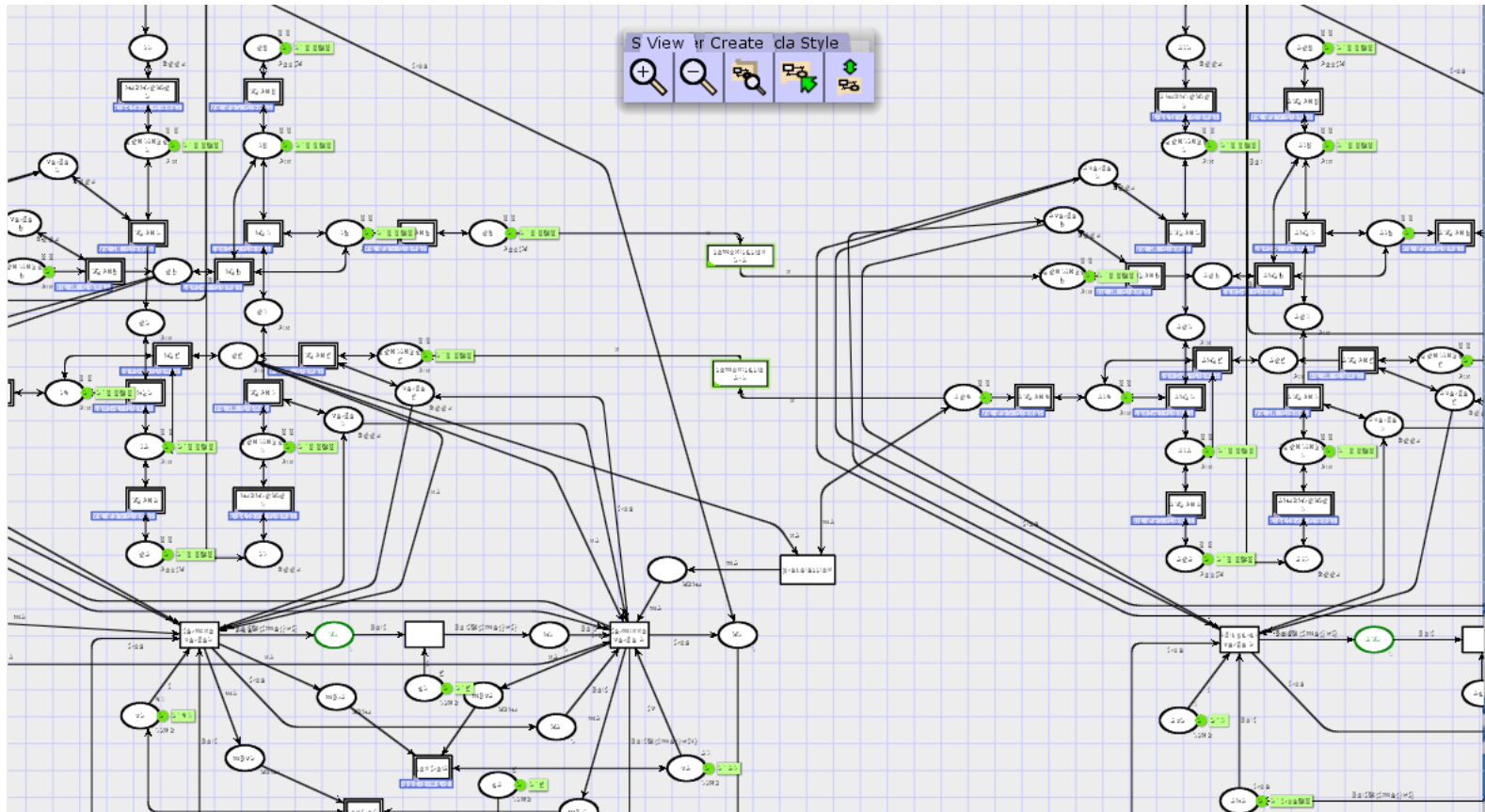


Figura 4-49: Conexión de intersección controlada RPCDA e intersección no controlada.

Adicional a la flexibilidad de adherir otros sistemas físicos, es importante la flexibilidad al crear otros sistemas a partir de otras sub redes, dándole la propiedad modularidad y polimorfismo asociado a los diferentes módulos, ahorrando tiempo debido a las redes jerárquicas.

## 4.8 Cooperación

La intersección controlada por la RPCDA se interconecta con las otras vías, y reconoce los vehículos entrantes, por medio de la lectura de los vehículos salientes de la vía no controlada. Esto permite que la vía controlada pueda evaluar si su vía se encuentra más o menos congestionada y poder predecir el embotellamiento venidero.

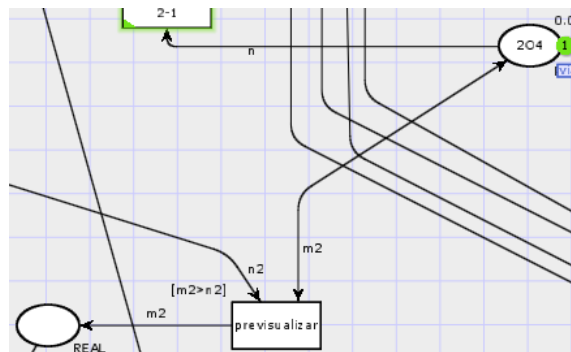


Figura 4-50: Pre visualizar congestión de vía no controlada.

El controlador compara la ocupación de la vía controlada “n2” vs la vía anterior “m2”, por lo que se determina la mayor cantidad de ocupación. Si la vía anterior presenta más ocupación, la transición de pre visualizar se dispara reemplazando el dato de ocupación en el controlador, para adaptar la vía controlada a los vehículos que llegarán en el próximo ciclo.

Así mismo, el sistema modelado mediante una Red de Petri Coloreada, permite la aceptación de información que se toma a consideración en esta tesis, y comprende la solución primordial a la problemática del tiempo de espera en cada una de las vías. Esto es verificable en la construcción de las reglas que conforman la máquina de inferencia, ya que cada vía considera el tiempo en rojo de su contraparte en la intersección.



## 5. ESQUEMA METODOLÓGICO

En este Capítulo se presenta de manera esquemática y organizada los pasos necesarios para la realización del modelo de tráfico vehicular, controlado por medio de la representación de Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas

Es importante aclarar que la implementación del sistema completo de tráfico vehicular es una ejemplificación de la capacidad, la adaptación, la flexibilidad y la sencillez de la herramienta RPCDA, para el modelado y control de sistemas, tanto dinámicos como discretos. Para llevar esta simulación a una implementación real en campo, se requiere la creación de un algoritmo de conteo de vehículos, para determinar la ocupación en las vías, ya que este no es el fin primario de este trabajo, y su desarrollo estaría por fuera de sus alcances.

Para determinar la estructura del modelo propuesto, se crean dos grandes grupos:

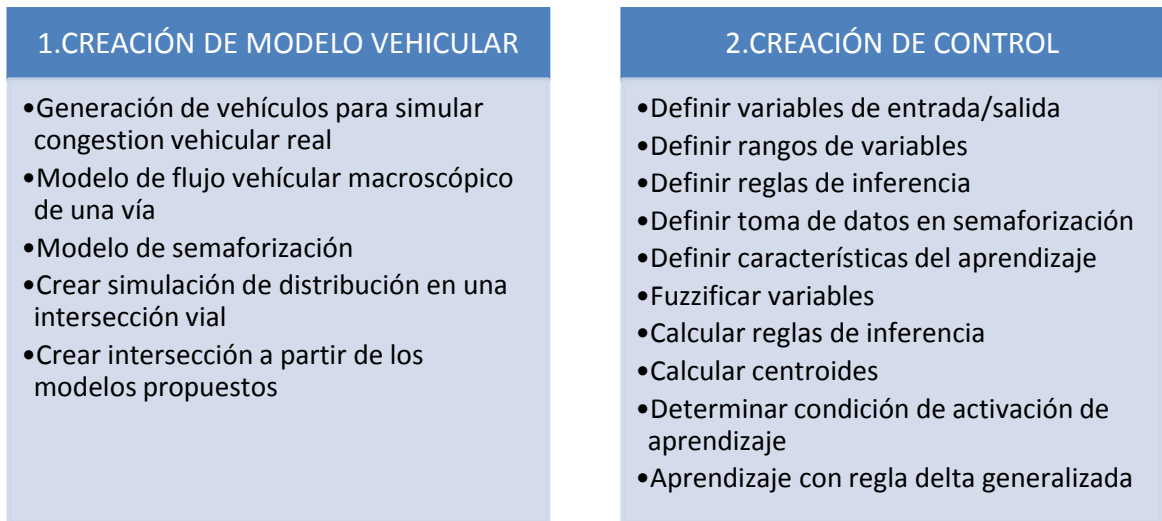


Figura 5-51: Esquema metodológico para el control del sistema de tráfico vehicular usando Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas.

## 5.1 Creación de Modelo vehicular

Para determinar el control, se debe tomar en consideración la creación del modelo vehicular como lo muestra la Figura 5-51. Este modelo necesita la simulación de los vehículos entrando a la vía, y para tal fin se desarrolla un algoritmo que genere aleatoriamente la entrada de vehículos, como se describe en la Subsección 4.5.4. Después de tener los vehículos simulados a la entrada, se procede con la creación de un modelo vehicular de tipo macroscópico que simule el trayecto de los vehículos a través de la vía, como se muestra y describe en la Subsección 4.5.3

A continuación, los vehículos que transitan después de cruzar las luces semafóricas, se trasladan a la vía central, creando una distribución de probabilidades para generar los giros respectivos. Esta área central se encarga de simular, por medio de probabilidades, el comportamiento de una intersección vial con sus vías principales, y son descritas en la Subsección 4.5.5.

Tan pronto los vehículos cruzan el área central de la intersección y se disponen a tomar el giro, necesitarán una vía de salida, generada a partir del código de la vía de entrada, mostrada en el apartado del Capítulo 4 en la Subsección 4.5.7, en donde se puede comparar con la vía de entrada propuesta en la Subsección 4.5.2.

Por último, en el modelo vehicular se reúnen todos los módulos creados y se genera una intersección completa, por lo que se crea una estructura ejemplificada en la Sección 4.7 Aunque con esta estructura, se pretende dar un ejemplo de las muchas geometrías que se podrían representar, éstas pueden cambiar según la intersección que se modele, ya que la programación por redes de tipo jerárquica, permite que se copie y se modifique sin alterar las demás vías.

## 5.2 Creación de control

Al crear el control para la intersección vehicular, se define la creación de las variables de entrada para el control, que en este caso serán la ocupación en la vía y el tiempo de espera o la cantidad de tiempo en rojo. Determinado esto, se debe considerar un rango estimado para el manejo de las variables. Luego, se toma la determinación de cómo combinar las reglas de entrada y salida de la forma que se muestra en la Ecuación (56), y tomando la información de los conjuntos de entrada, formados como se muestran en la Tabla 4-5 y en la Tabla 4-6. En la Tabla 5-8, se organizan los tiempos de espera como columnas, y la ocupación de la vía como filas, ambas representadas numéricamente por valores 1 al 5, así:

- 1, conjunto difuso “Muy Poco”
- 2, conjunto difuso “Poco”
- 3, conjunto difuso “Medio”
- 4, conjunto difuso “Mucho”
- 5, conjunto difuso “Excedido”

Tabla 5-8: Tabla de valores de salida según los conjuntos de entrada.

		Tiempo de espera				
		1	2	3	4	5
ocupación	1	1	1	2	2	3
	2	1	2	2	2	3
	3	2	2	3	3	3
	4	2	3	3	4	4
	5	3	3	3	4	5

En anterior tabla, el conjunto de salida (tiempo en verde) representado por las celdas de color verde, se obtiene de la combinación de las filas y columnas, reemplazando los valores de la Tabla 4-6, así:

- 1 ,es el conjunto difuso “Cero” de la variable lingüística “tiempo en verde”
- 2 ,es el conjunto difuso “Corto” de la variable lingüística “tiempo en verde”
- 3 ,es el conjunto difuso “Largo” de la variable lingüística “tiempo en verde”
- 4 ,es el conjunto difuso “Muy Largo” de la variable lingüística “tiempo en verde”

5 ,es el conjunto difuso “Extremadamente Largo” de la variable lingüística “tiempo en verde”

Teniendo en cuenta esta configuración de las reglas de inferencia y las consideraciones explicadas en el Apartado 4.2; se calculan los factores de pertenencia, expresados en las ecuaciones del Capítulo 4.3. De esta manera, se genera la fuzzificación de los datos según las reglas de inferencia y se pasa al cálculo de la normalización de los datos con los pesos, determinado en el Capítulo 4.4, por medio del sistema adaptativo M-ANFIS.

Al calcular la normalización de los datos y obtener un dato de salida, se convierte este en la actualización de la variable de salida (tiempo en verde), mediante el cálculo del centroide con la Ecuación (58). Esta actualización se realiza con el fin de que el sistema se adapte al entorno y luego ejecute un tiempo en verde más adecuado.

El aprendizaje del entorno, realizado con este tipo de sistema adaptativo tipo M-ANFIS, se logra con la regla delta generalizada, logrando con ella, minimizar el error entre el valor deseado y el valor arrojado por el sistema difuso. La aplicación de esta regla para la actualización de los pesos, centroides y áreas, se logra con las Ecuaciones (72) (73) (74). De esta forma, con la ecuaciones propuestas, y teniendo la reunión de los modelos mediante módulos representados en Redes de Petri Jerárquicas, se puede determinar el esquema general de funcionamiento del nuevo modelo propuesto para el aumento de flujo vehicular, considerando los tiempos de espera en cada vía. Este esquema es representado para su mejor entendimiento por el flujograma mostrado en la Figura 5-52.

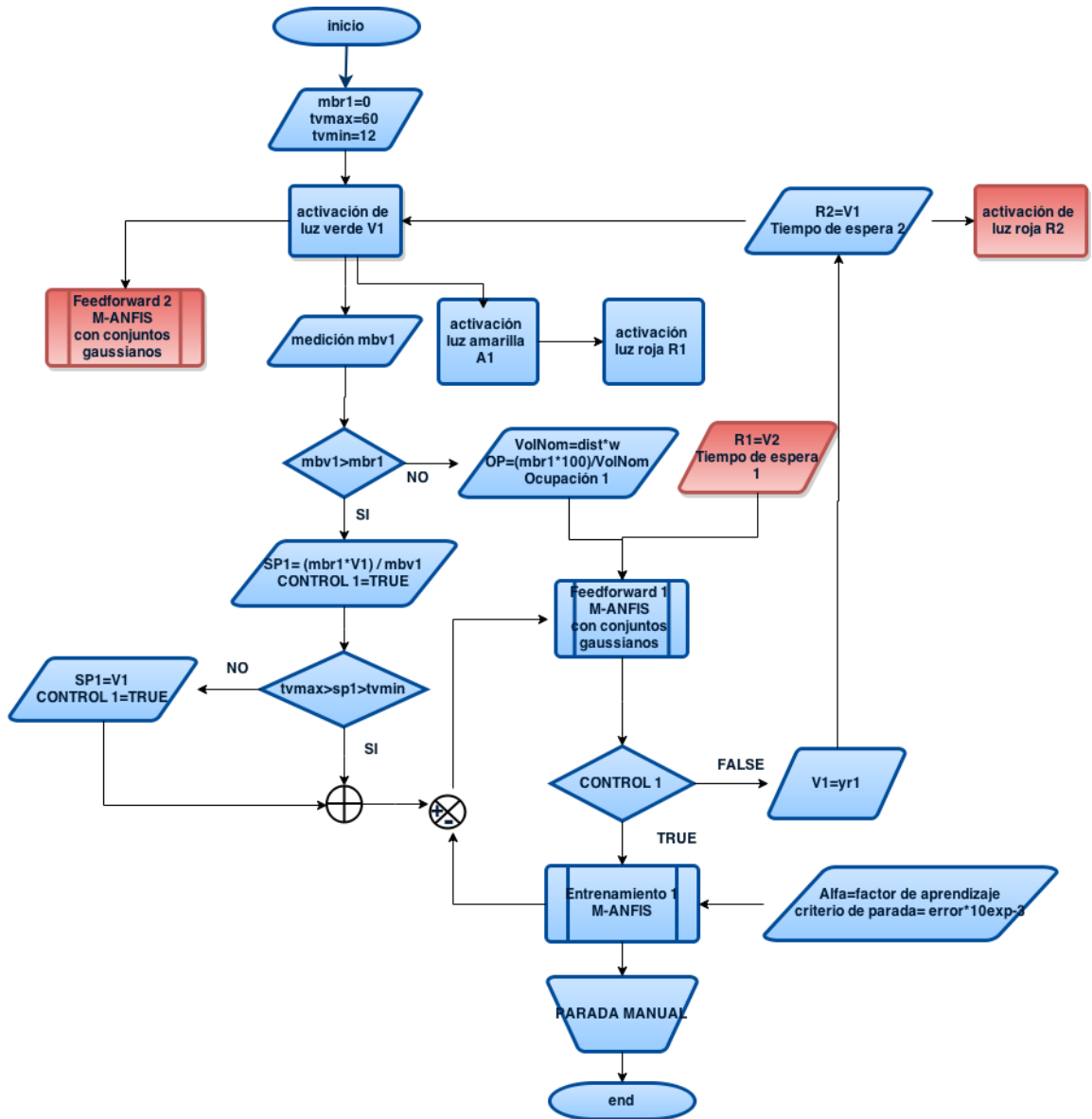


Figura 5-52: Flujograma de esquema metodológico para el control del sistema de tráfico vehicular usando Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas.

donde

$mbr1$  ,vehículos acumulados durante tiempo en rojo R1

$tvmax$  ,tiempo en verde máximo

$tvmin$  ,tiempo en verde mínimo

$V1$  ,duración de tiempo en verde de la vía 1

$A1$  ,duración de tiempo en Amarillo de la vía 1

$R1$  ,duración de tiempo en verde de la vía 1

$V2$  ,duración de tiempo en verde de la vía 2

$R2$  ,duración de tiempo en verde de la vía 1

$SP1$  ,es el Set Point para la vía 1

$yr1$  ,tiempo en verde calculado por el controlador para la vía 1

### 5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la ejecución de la simulación, se toma en cuenta los valores iniciales para dos intersecciones (.).

Tabla 5-9), las cuales se dispararon de manera independiente, una con el sistema de semaforización tradicional expuesto por las ecuaciones de Webster (1958) principalmente, y otras expuestas en la Subsección 4.1.1

Se toman primero los valores de tiempo en verde, que son establecidos por los lugares “v1” y “v2” respectivamente, mostrados en la Figura 4-37. En el caso de este trabajo se relacionan según el cálculo obtenido de los tiempos en verde máximos para cada vía, calculados con la Ecuación (72) (ver .).

Tabla 5-9 y Tabla 5-10).

Tabla 5-9: Datos calculados según modelo tradicional **Control clásico** 4.1.1

Descripción de variable	Valor
aceleración <b>a</b> (m/s <sup>2</sup> )	3.05
percepción <b>t</b> (s)	1.5
Long auto <b>dist</b> (m)	5.8

ancho de la vía <b>w</b> (m)	10.2
flujo de saturación <b>RS</b> (veh/h)	1900
tiempo perdido por fase <b>I</b> (s)	6
verde efectivo total <b>Tv</b> (s)	70
tiempo en verde maximo <b>tvmax</b> (s)	60
tiempo de ciclo <b>C</b> (s)	76
tiempo de ciclo mínimo <b>C min</b> (s)	32.57143
suma volúmenes críticos <b>cs</b> (veh/h)	1550
tiempo perdido total <b>L</b> (s)	12
relación volumen-capacidad	97%
iteraciones del control	10
factor de aprendizaje de red M-ANFIS	0.01

Tabla 5-10: Datos calculados según modelo tradicional **Control clásico** 4.1.1 para las fases

Descripción de variable	Fase 1		Fase 2	
	norte sur	este oeste	sur norte	oeste este
vías				
volumen de la vía <b>Vol</b> (veh/h)	500	950	600	400
Proporción de flujo <b>Yi</b>	0.263158	0.5	0.315789	0.2105263
velocidad (km/h)	58	58	58	58
velocidad <b>v</b> (m/s)	16.111111	16.111111	16.111111	16.111111
intervalo de cambio <b>CP</b> (s)	5	5	5	5
tiempo en amarillo <b>ta</b> (s)	4	4	4	4
tiempo en verde mínimo <b>tv min</b> (s)	10.5	10.5	10.5	10.5
tiempos en verde por fase <b>tv</b> (s)	27.14285714		42.85714286	

Según la .

Tabla 5-9, la relación de volumen-capacidad entrega un total calculado de 97% de utilización de la intersección, que presenta una congestión potencial en cualquier variación o aumento de volumen.

Teniendo los datos calculados de las vías, se consideran los siguientes parámetros para los conjuntos difusos de las variables de entrada y salida, mostrados en la Tabla 5-11 y la Tabla 5-12 respectivamente.

Tabla 5-11: Parámetros de conjuntos difusos de entrada.

ENTRADAS				
CENTROIDES OCUPACION				
1	2	3	4	5
MP	P	MED	MH	EX
15	35	55	75	95
10	10	10	10	10
CENTROIDES TIEMPO DE ESPERA				
1	2	3	4	5
MP	P	MED	MH	EX
11	22	33	44	55
5	5	5	5	5

Tabla 5-12: Parámetros de conjuntos difusos de salida.

SALIDA				
CENTROIDES TIEMPO EN VERDE				
1	2	3	4	5
Z	C	L	ML	EL
30	36	42	48	54
5	5	5	5	5

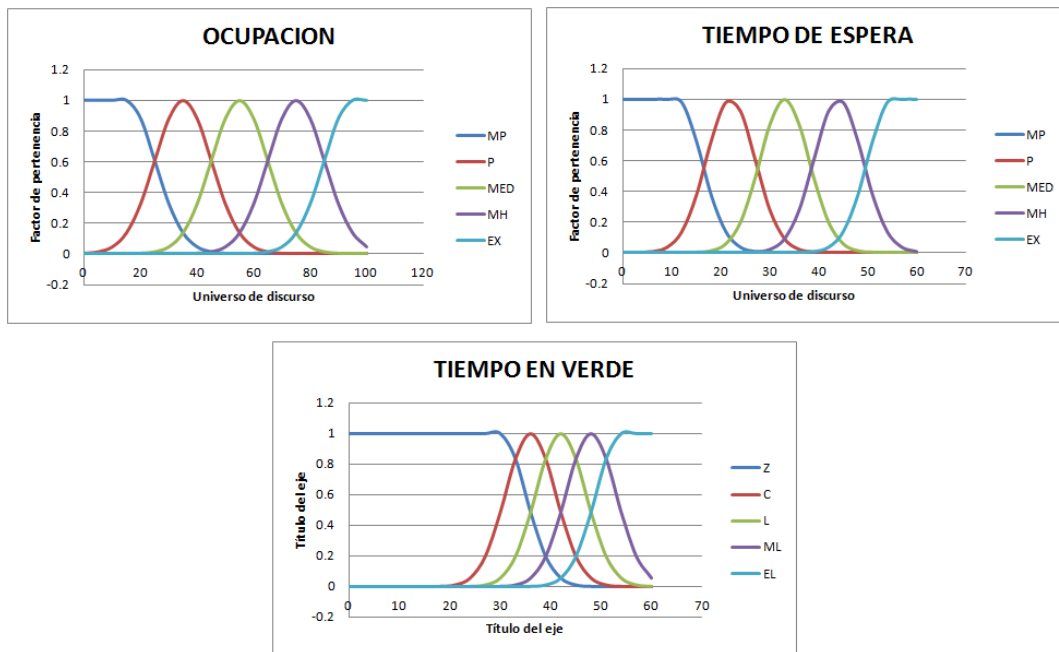


Figura 5-53: Gráficos de variables de entrada y salida.

Con los datos establecidos, se tiene que las gráficas de los conjuntos de las variables de entrada y de salida, estarán configuradas como se muestra en la Figura 5-53. De esta



forma se tienen conjuntos gaussianos que muestran un sistema de variables difusas más continuas entre sus valores lingüísticos.

Para tener una representación alternativa en un entorno gráfico de la simulación vehicular, se realizó de forma paralela, una configuración del algoritmo en el software Microsoft Visual Studio 2010, para tener una visual de la configuración de la intersección, por lo que se obtuvo un entorno gráfico basado en el modelo mostrado en la siguiente Figura 5-54.

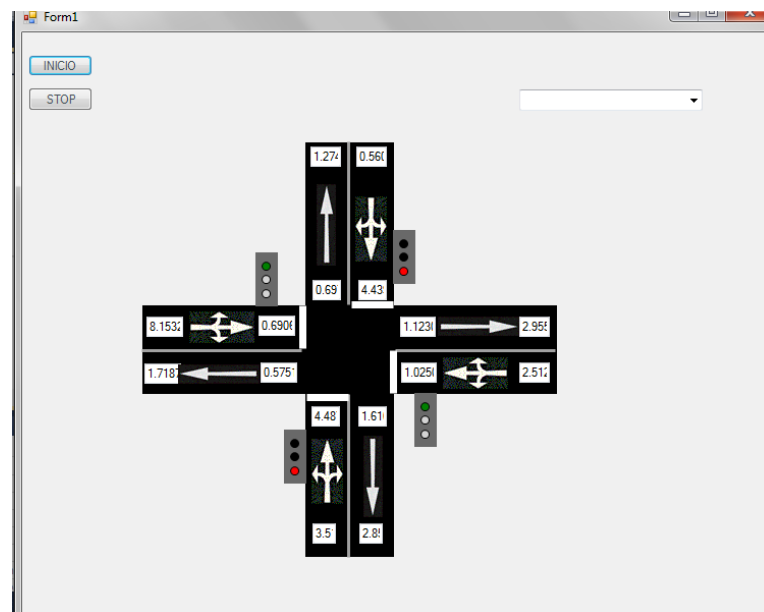


Figura 5-54: Entorno gráfico de la intersección semaforizada simulada en Microsoft Visual 2010.

Con la simulación en el entorno gráfico, se verifica que los valores iniciales se disgreguen en las vías de salida, representadas en los rectángulos blancos con las flechas unidireccionales. Así mismo, se visualiza el cambio en las vías ESTE-OESTE, SUR-NORTE, que corriendo la simulación en CPN tools, y tomando los datos correspondientes a cada vía, se realiza ajuste de los parámetros para cada una de las vías, con tiempo en verde de 27 segundos para la fase 1 donde se encuentra la vía ESTE-OESTE, y 43 segundos para la fase 2, tal como se muestra en la .

Tabla 5-9. Según los calculos almacenados en dicha tabla, se puede realizar una comparación entre las dos fases con las configuraciones de control fijo del sistema tradicional de designación de tiempos antes expuesto en la Subsección 4.1.1, y representados por la Figura 5-55.

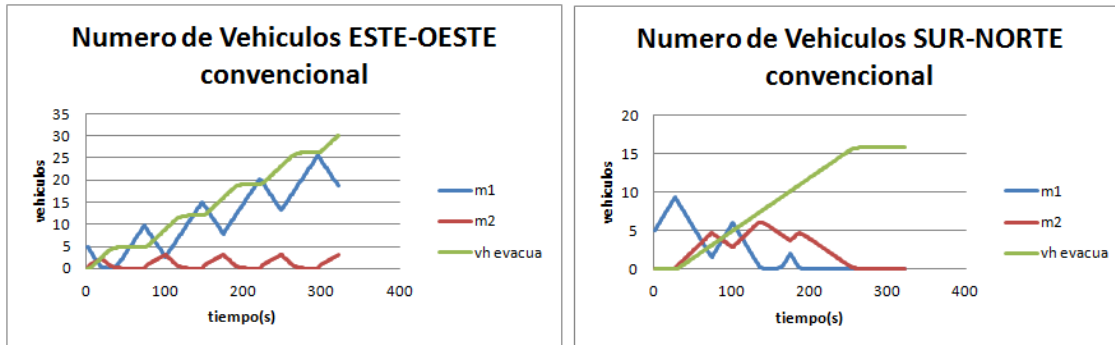


Figura 5-55: Número de vehículos en dos fases con designación de tiempos en verde convencional.

En la Figura 5-55, se aprecia la cantidad de vehículos en la entrada, representada por “m1”; el volumen de vehículos a la salida, representada por “m2”; y con la línea verde, la cantidad de vehículos evacuados en cada vía. Tomando en cuenta que las vías se encuentran con diferentes flujos, pero se conservan con un incremento de volumen, se puede observar que en la vía SUR-NORTE se presenta un desalajo de los vehículos de forma constante, mientras que en la vía de entrada a la intersección ESTE-OESTE se presenta una acumulación de vehículos, generando congestionamiento y una desigualdad de flujos (ver Figura 5-56).

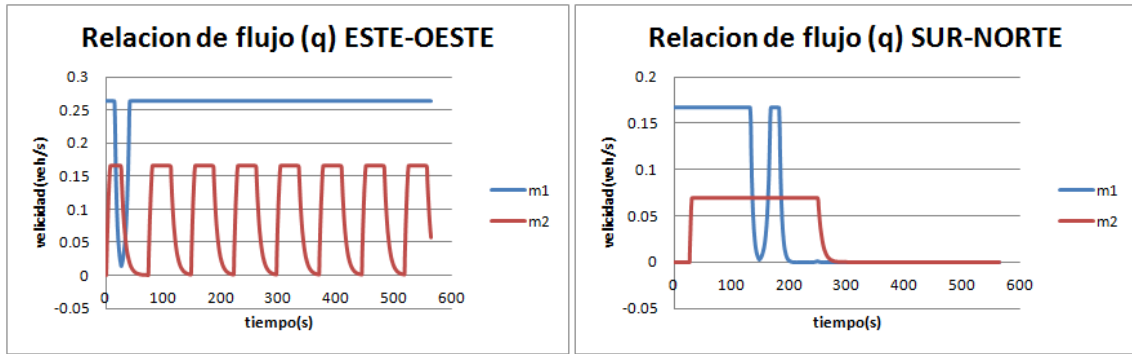


Figura 5-56: Flujos vehiculares para las dos fases asignación tiempo en verde convencional.

El flujo de la fase 1 aunque es constante en la entrada “m1”, no tiene la capacidad para desalojar por “m2” tal cantidad de vehículos. Por otro lado, el flujo de la fase 2 se mantiene constante, tanto en la evacuación de entrada “m1” como de salida “m2”. De manera que al no estar equilibrado el sistema, es afectado por la velocidad de cada una de las fases, y se puede observar este fenómeno en la Figura 5-57, donde la velocidad de “m1” en la entrada de la fase 1 se ve reducida a medida que pasa el tiempo y se acumulan los vehículos.

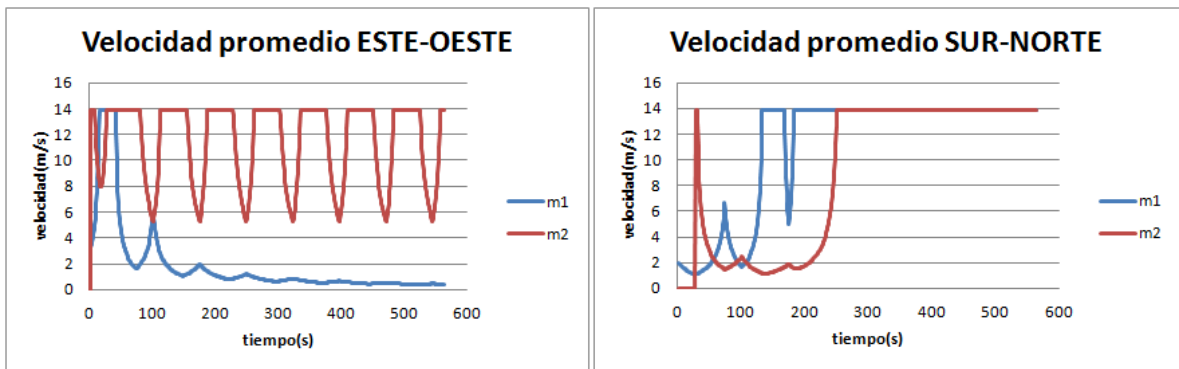


Figura 5-57: Velocidades en fases con asignación de tiempo convencional.

En seguida de haber programado las señales semafóricas de modo convencional, se realiza la simulación de la intersección semaforizada con la Red de Petri Coloreada Difusa Adaptativa para su control y se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 5-13.

Tabla 5-13: Tabla de datos obtenidos en la simulación del control de tráfico para dos fases.

Tipo de intervencion	Iteracion	OCUP1	Tiempo de espera R1	mbv1	mbr1	tiempo actual V1	SP1	OCUP2	Tiempo de espera R2	mbv2	mbr2	V2	SP2
CONTROL	1	91.52	47	4.98452	9.4675	27	51.28						
CONTROL	2							80.556	27	7.666667	8.333333	47	51.09
FEEDFORWARD	3	73.427	51	9.22347	7.5959	51	51						
FEEDFORWARD	4							80.556	51	8.333333	8.333333	51	51
FEEDFORWARD	5	47.998	51	7.33291	4.9653	51	50						
FEEDFORWARD	6							78.944	50	8.333333	8.16667	51	51
FEEDFORWARD	7	16.061	51	4.70146	1.6615	50	47						
FEEDFORWARD	8							74.111	47	8.333333	7.66667	51	51
FEEDFORWARD	9	0.4687	51	1.39758	0.0485	47	49						
FEEDFORWARD	10							77.333	49	8.333333	8	51	51

Se realizaron 10 iteraciones en el algoritmo de control, el resultado determinó que solo en las dos primeras iteraciones se necesitaba el control, cumpliendo la condición mencionada en el Capítulo 4.1 "*SI mbv < mbr ENTONCES control SINO feedforward*".

Con los mismos parámetros iniciales, ajustados para el cálculo del control clásico (ver .

Tabla 5-9), se ajusta el nuevo control propuesto con RPCDA, los cuales comienzan con un porcentaje de 91.52% de ocupación para fase 1, y la ocupación de la fase 2 con una ocupación de 80.5%. De manera paralela, se considera el tiempo de espera o tiempo en rojo de cada fase, que va variando según la regulación del controlador.

El controlador reduce la ocupación en ambas vías y estabiliza el tiempo de espera para ambas fases, asignando el tiempo en verde, como se muestra en la Figura 5-58.

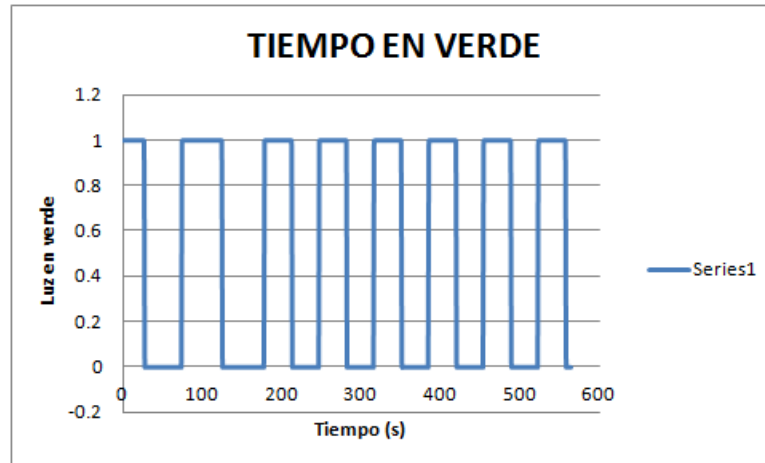


Figura 5-58: Asignación de tiempo en verde de sistema vehicular controlado por RPCDA.

La modificación de este tiempo en verde se da como resultado de la activación del controlador en las dos primeras iteraciones, y la adecuación de los conjuntos difusos, según la necesidad planteada en estas iteraciones. Como resultado, el controlador solo aprende en esas dos únicas ocasiones y luego el Sistema Feedforward entrega una salida proporcional a las entradas de tiempo de espera y ocupación de la vía.

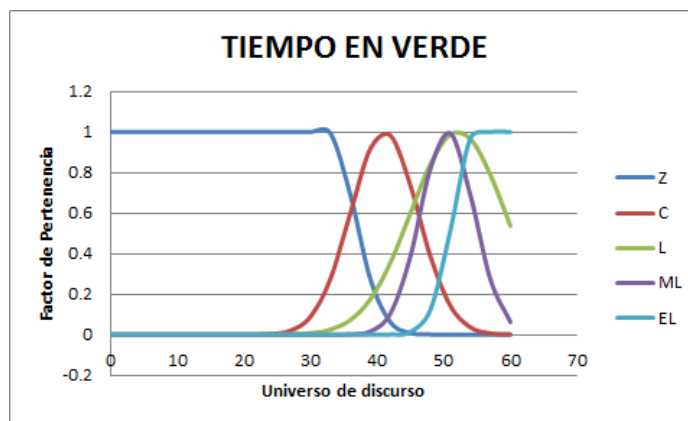


Figura 5-59: Modificación de los conjuntos difusos de variable de salida tiempo en verde.

Con la modificación de los conjuntos de salida de la variable “tiempo en verde” para ambas fases (Figura 5-59), el sistema entrega unos tiempos en verde acordes con la necesidad del sistema, estabilizando la relación de estas variables de entrada logrando que la evacuación de vehículos sea de la siguiente forma:

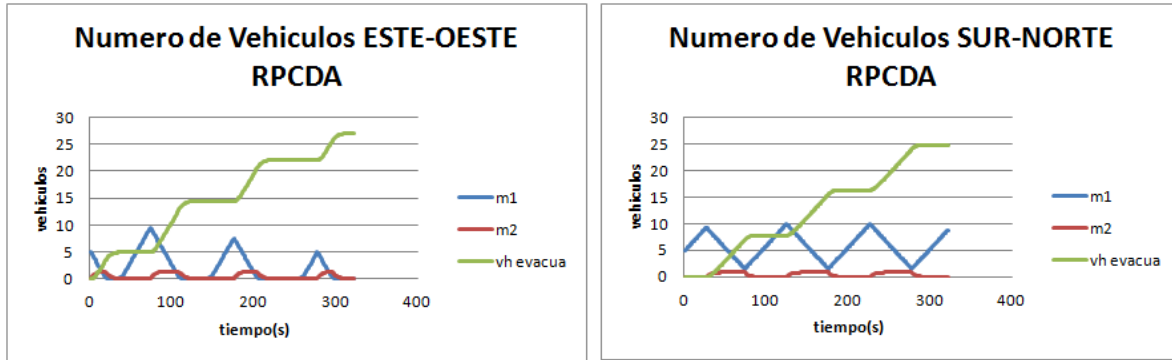


Figura 5-60: Número de vehículos en dos fases con designación de tiempos en verde RPCDA.

Como se ve en la Figura 5-60, la cantidad de vehículos evacuados “m2” en ambas fases, se conserva estable, y la cantidad de vehículos en espera, no produce congestión, estabilizando la entrada “m1” en ambas fases.

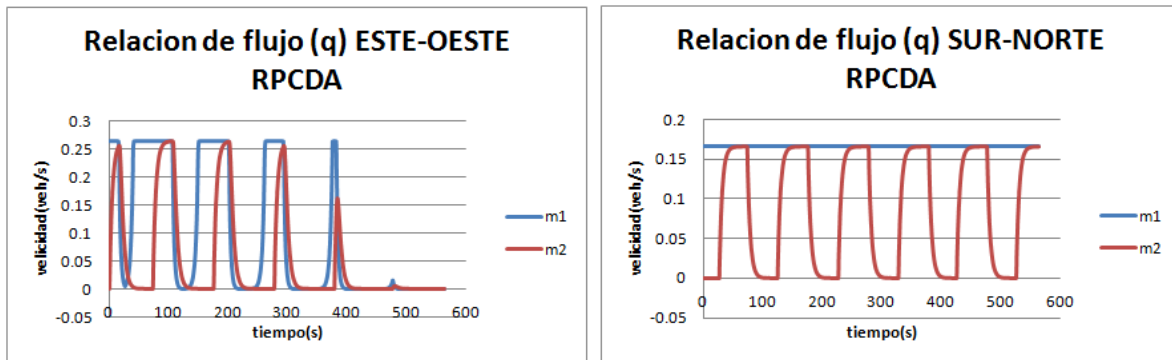


Figura 5-61: Flujos vehiculares para las dos fases asignación tiempo en verde RPCDA.

En la Figura 5-61 se verifica el comportamiento del flujo de ambas fases, por lo que el flujo de salida de los vehículos “m2” se ve interrumpido por la semaforización de forma periódica, y a su vez, aumenta el flujo de salida a niveles similares al flujo de entrada “m1”, esto se puede verificar comparándolo con la Figura 5-56. Con este nuevo enfoque, el controlador entrega resultados de estabilidad de flujo vehicular que se pueden garantizar en el tiempo, ya que en (Sanchez & Perez, 1999) podemos asumir que las redes neuronales artificiales pueden representar desde el punto de vista teórico,

exactamente sistemas no lineales, y concluir que el algoritmo de backpropagation o retroalimentación garantiza convergencia exacta mediante la demostración de la metodología de la estabilidad de Lyapunov.

Considerando el tiempo de espera para todas las vías de la intersección, en contraste con un sistema tradicional controlado por los parámetros dados en la .

Tabla 5-9, obteniendo aumentos de flujo del 58% en la vía más congestionada, con solo dos intervenciones del controlador. Adicionalmente, al no presentar disminución en el flujo de ambas fases, la velocidad se ve afectada, entregando la velocidad nominal de las vías de salida “m2” en ambas direcciones y estabilizando las velocidades en las vías de entrada “m1”, como se muestra en la Figura 5-62, logrando un incremento de velocidad del 42.8% en la vía de entrada de salida “m2” y una desviación de estabilidad del 4%.

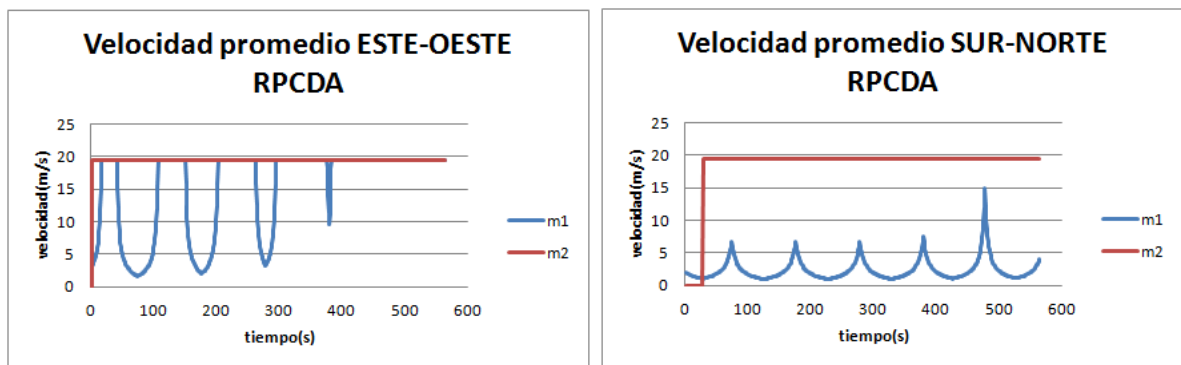


Figura 5-62: Velocidades en fases con asignación de tiempo convencional.





## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 Conclusiones**

Al utilizar las Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas para modelar y controlar un sistema de tráfico vehicular semaforizado, se logra maximizar la información suministrada por el experto, mediante la representación del conocimiento, garantizando que el diseño de un controlador de este tipo sea más sencillo de parametrizar, ya que logra adaptarse a las condiciones reales del entorno vial.

Debido a que el cambio en el entorno de una intersección a lo largo del tiempo es constante, las consideraciones iniciales tomadas estadísticamente, no son suficientes, ya que al cambiar la demanda de estos se incurre en pérdida de eficiencia por toma de datos y reprogramación constante, aumentando las probabilidades de generar descontento entre los usuarios, debido a los tiempos de espera o por los cortos tiempos en verde, que generan interrupción en la inercia del sistema. Con la creación de una intersección que considere los vehículos entrantes y el tiempo que tienen que esperar, se garantiza un sistema con una reducción de volumen vehicular en las fases involucradas de la intersección.

Así mismo, la intersección inteligente creada a partir de módulos como sub redes, puede variar y transformarse en un sistema tan complejo, o tan simple como se considere. Esto genera facilidad en la creación de nuevos entornos de control modulares, generando velocidad de procesamiento y autonomía, puesto que las intersecciones pueden tener cooperación de las vías adyacentes con independencia de su comportamiento, sean controladas o con tiempos fijos.

Mediante las simulaciones y con los resultados obtenidos, se logra concluir en este trabajo, que en tan solo dos intervenciones por parte del sistema adaptativo y el resto del tiempo mediante el módulo borroso del controlador, la intersección controlada llega a un incremento nominal del flujo a la salida de ambas fases de la intersección del 58%.

A lo largo del desarrollo de la investigación se logra interactuar con un software de alto nivel, como Microsoft Visual Studio 2010, para la realización del entorno grafico de la intersección. Esto llevó a la conclusión de que las Redes de Petri Jerárquicas, poseen la

flexibilidad y modularidad que posee la programación orientada a objetos, por lo que la programación a través de clases, facilitó el desarrollo en módulos de estas Redes de Petri Coloreadas Difusas Adaptativas en este entorno. La diferencia notable entre el software CPNTools 4.0 y Microsoft Studio 2010, reside en la programación paralela, ya que CPNTools es una herramienta de programación concurrente y con Microsoft Studio se tienen que generar hilos por cada vía creada, esto conlleva al desarrollo de controles para su manejo y crea complicaciones en la creación de esta programación.

Las redes de Petri coloreadas sirvieron como herramienta de modelación, tanto del sistema como de su control, incluyendo paradigmas de inteligencia artificial como las redes neuronales y lógica difusa, lo que permitió encapsular las ventajas de cada una de estas teorías y lograr modelar un sistema complejo, validado a través de la aplicación a un sistema de tráfico vehicular.

## 6.2 Recomendaciones

Para la implementación de un sistema con este esquema de manera real, se debe crear un sistema de detección de volumen ocupado en las vías, o conteo de vehículos en línea, para la obtención de datos exactos para alimentar el controlador. Debido a que este no era el fin investigativo de este trabajo, se propone como campo de estudio, la implementación de este esquema con el reconocimiento y montaje físico en una intersección semaforizada.

Implementar un sistema controlado por RPCDA en un sistema vial, que interviniendo las reglas de disparo, como el procedimiento realizado en la ciudad de Toronto, llamado MARLIN-ATSC (El-Tantawy et al., 2013). Este sistema está basado en el aprendizaje por refuerzo, el cual puede tener tiempos de exploración riesgosos donde el control con RPCDA puede mejorar el comportamiento de múltiples intersecciones.

- A. Anexo: Modelo y control en CPNTools (archivo .cpn)**
- B. Anexo: Ejecutable modelo continuo Microsoft Studio (archivo .exe)**
- C. Anexo: Datos de simulación obtenida y comparación (archivo.xlsx)**
- D. Anexo: Datos de modelo continuo VCPN (archivo .xlsx)**

## Bibliografía

- Alcaldia de Medellín. (2010). Sistema inteligente para la movilidad de medellín. Retrieved from <http://www.culturaemedellin.gov.co/sites/CulturaE/eicd2010/Documents/TENDENCIAS EN CIUDADES DIGITALES - PANELISTA - RICARDO SMITH.pdf>
- Alcaldia de Medellín. (2011). Plan de desarrollo de Medellín 2008-2011, 8. Retrieved from <http://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/wpccontent/Sites/Subportal del Ciudadano/Nuestro Gobierno/Secciones/Publicaciones/Documentos/Periodico Compromiso/compromiso33lowres.pdf>
- Alvarez, R. I. P. (2006). *Aplicación del manual de capacidad de carreteras (HCM) versión 2,000, para la evaluación del nivel de servicio de carreteras de dos carriles. Carreteras* (p. 77). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Barzegar, S., Davoudpour, M., Meybodi, M. R., Sadeghian, a., & Tirandazian, M. (2011). Formalized learning automata with adaptive fuzzy coloured Petri net; an application specific to managing traffic signals. *Scientia Iranica*, 18(3), 554–565. <http://doi.org/10.1016/j.scient.2011.04.007>
- Bull, A. (2003). *Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo. Vasa*. Santiago de Chile: Comision Economica para America Latina y el Caribe. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- Cal, R., Mayor Spinola, R., & Grisales Cardenas, J. (2007). *Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones*. (G. E. ALFAOMEGA S.A., Ed.) (8th ed., p. 517). Alfaomega. Retrieved from <http://books.google.com.mx/books?id=6vIoAAAACAAJ>
- Chai, Y., Jia, L., & Zhang, Z. (2009). Mamdani model based adaptive neural fuzzy inference system and its application. *International Journal of Computational Intelligence*, 22–29. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Mamdani+Model+based+Adaptive+Neural+Fuzzy+Inference+System+and+its+Application#0>
- Chandler, R., Herman, R., & Montroll, E. (1958). Traffic dynamics: studies in car following. *Operations Research*, 6(2), 165–184. Retrieved from <http://or.journal.informs.org/content/6/2/165.short>
- Chen, S. M., Ke, J. S., & Chang, J. F. (1990). Knowledge representation using fuzzy Petri nets. *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, 2(3), 311–319. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=60794](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=60794)

- Cheng, D., Messer, C. J., Z. Tian, Z., & Liu, J. (2000). Modification of Webster's Minimum Delay Cycle Length Equation Based on HCM 2000.
- Consumer Reports. (2014). Exterior & Cargo. Retrieved November 09, 2014, from <http://www.consumerreports.org/cro/cars/types/exterior-and-cargo-comparison.htm>
- CPN Tools, H. (2014). Timed Nets. Retrieved May 01, 2014, from <http://cpntools.org/documentation/concepts/time/start>
- El-Tantawy, S., Abdulhai, B., & Abdelgawad, H. (2013). Multiagent reinforcement learning for integrated network of adaptive traffic signal controllers (marlin-atsc): Methodology and large-scale application on downtown toronto. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(3), 1140–1150.
- Gerlough, D. L., & Schuhl, A. (1955). *Use of Poisson Distribution in Highway Traffic The Probability Theory Applied to Distribution of Vehicles on Two-Lane Highways*.
- Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), 105–111. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(81\)90037-0](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0)
- Greenberg, H. (1959). An Analysis of Traffic Flow. *Operations Research*, 7(1), 79–85. <http://doi.org/10.1287/opre.7.1.79>
- Greenshields, B. D., Bibbins, J. R., Channing, W. S., & Miller, H. H. (1935). A study of traffic capacity. In *Highway Research Board Proceedings* (Vol. 14, pp. 448–477). Retrieved from <http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=120649>
- Hu, C., & Wang, Y. (2010). A Novel Intelligent Traffic Light Control Scheme. *2010 Ninth International Conference on Grid and Cloud Computing*, 372–376. <http://doi.org/10.1109/GCC.2010.78>
- ICTA, I. C. T. of A. (2014). Isuzu Commercial Vehicles - Low Cab Forward Trucks - Commercial Trucks - Diesel Truck Specifications. Retrieved November 09, 2014, from [http://www.isuzucv.com/nseries/diesel\\_specs](http://www.isuzucv.com/nseries/diesel_specs)
- Isasi, P., & Galván, I. (2004). *Redes neuronales artificiales—un enfoque práctico*. (PEARSON Prentice Hall, Ed.) (p. 238). Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Informatica. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Redes+de+Neuronas+Artificiales+un+enfoco+practico#0>
- Jang, J.-S. R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3). <http://doi.org/10.1109/21.256541>

- Jbira, M. (2012). A Hybrid Modelling Approach for Traffic Light Control of Oversaturated Intersections. ... *Journal of Research and Reviews in ...*, 3(1), 1444–1452. Retrieved from <http://sciacademypublisher.com/journals/index.php/IJRRCS/article/viewFile/633/584>
- Jbira, M. K., & Ahmed, M. (2011). Computer Simulation: A Hybrid Model for Traffic Signal Optimisation. *Journal of Information Processing Systems*, 7(1), 1–16. <http://doi.org/10.3745/JIPS.2011.7.1.001>
- Jensen, K., & Kristensen, L. (2007). Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems. *Journal on Software Tools for*. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/W6001222108R5135.pdf>
- Jovan, E., & Abalo, S. (2010). *APLICACION DE TEORIA DE COLAS EN LOS SEMAFOROS PARA MEJORAR LA MOVILIDAD EN LA CARRERA 7 ENTRE CALLES 15 Y 20 DE LA CIUDAD DE PEREIRA*. Cycle.
- Li, C., & Ding, F. (2009). Fuzzy dynamic Petri nets. In *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009. FSKD'09. Sixth International Conference on* (Vol. 7, pp. 34–38). IEEE. <http://doi.org/10.1109/FSKD.2009.349>
- Li, X., & Lara-Rosano, F. (2000). Adaptive fuzzy petri nets for dynamic knowledge representation and inference. *Expert Systems with Applications*, 19(3), 235–241. [http://doi.org/10.1016/S0957-4174\(00\)00036-1](http://doi.org/10.1016/S0957-4174(00)00036-1)
- Li, X., & Yu, W. (2000). Dynamic knowledge inference and learning under adaptive fuzzy Petri net framework. *Systems, Man, and Cybernetics*, 30(4), 442–450. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=897071](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=897071)
- Liu, H.-C., Lin, Q.-L., Mao, L.-X., & Zhang, Z.-Y. (2013). Dynamic Adaptive Fuzzy Petri Nets for Knowledge Representation and Reasoning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 1–1. <http://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2256125>
- Lopez-Neri, E., Ramirez-Trevio, A., & Lopez-Mellado, E. (2009). Urban traffic systems dynamic entities discrete behavior. In *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE, 2009 6th International Conference on* (pp. 1–6). IEEE. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5393355](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5393355)
- Lozano, A., & Torres, V. (2003). Tráfico vehicular. *Ciencias (Universidad Nacional Autonoma de México)*, 70, 34–35. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Tráfico+vehicular#7>
- Matsuno, H., Tanaka, Y., Aoshima, H., Doi, A., Matsui, M., & Miyano, S. (2011). Biopathways representation and simulation on hybrid functional petri net. *Studies in Health Technology and Informatics*, 162, 77–91.

- Medellín Cómo Vamos. (2008). *Cómo Vamos en Movilidad vial*, pp. 34–36. Retrieved from <http://www.medellincomovamos.org/file/289/download/289>
- Medellín Cómo Vamos. (2015). *Movilidad y espacio público | Medellín Cómo Vamos*. Retrieved September 08, 2015, from <http://www.medellincomovamos.org/movilidad-y-espacio-p-blico>
- Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541–580. <http://doi.org/10.1109/5.24143>
- Oliveira, M. J. De, & Rodrigues, Á. L. (Instituto de F. U. de S. P. (2004). Continuous Time Stochastic Models for Vehicular. *Brazilian Journal of Physics*, 34(2), 373–376.
- Ouchi, Y., & Tazaki, E. (1997). Learning and reasoning method using fuzzy coloured Petri nets under uncertainty. *1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, 4. <http://doi.org/10.1109/ICSMC.1997.633274>
- Pedrycz, W., & Gomide, F. (1994). A generalized fuzzy Petri net model. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2(4), 295–301. <http://doi.org/10.1109/91.324809>
- Ramírez, D. (2005). *Simulación y control de tráfico vehicular por semaforización*. Universidad Pontificia Bolivariana. Retrieved from <http://eav.upb.edu.co/banco/sites/default/files/files/TesisSIMULACIONTRAFICO.pdf>
- Sammoud, B. (2013). Modeling and Control of an Isolated Intersection via Hybrid Petri Nets. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, 1(1), 9–14. Retrieved from <http://www.jtle.net/uploadfile/2013/0205/20130205015903831.pdf>
- Sanchez, E. N., & Perez, J. P. (1999). Input-to-state stability (ISS) analysis for dynamic neural networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 46(11), 1395–1398. <http://doi.org/10.1109/81.802844>
- ShipNorthAmerica Transportation, I. (2014). *Equipment, Truck Trailer Van Specifications*. Retrieved November 09, 2014, from <http://www.shipnorthamerica.com/htmlfiles/equipment.html>
- STTM, (Secretaria de Transportes y Transito de Medellin). (2012). *Indicadores de Movilidad 2012*. Retrieved March 21, 2012, from <http://www.medellin.gov.co/transito/linea-base.html>
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, SMC-15(1)*, 116–132. <http://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
- Tolba, C., Lefebvre, D., Thomas, P., & El Moudni, a. (2001). Continuous Petri nets models for the analysis of traffic urban networks. *2001 IEEE International*

*Conference on Systems, Man and Cybernetics. E-Systems and E-Man for Cybernetics in Cyberspace (Cat.No.01CH37236)*, 2(2), 1323–1328.  
<http://doi.org/10.1109/ICSMC.2001.973104>

Tolba, C., Lefebvre, D., Thomas, P., & Moudni, a. El. (2005). Continuous and timed Petri nets for the macroscopic and microscopic traffic flow modelling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(5), 407–436. <http://doi.org/10.1016/j.simpat.2005.01.001>

Useda Ramirez, C., & Silva Mercado, D. J. (2003). *Metodología para el análisis de intersecciones semaforizadas*. Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua. Retrieved from [http://biblioteca.mti.gob.ni:8080/docushare/dsweb/Get/Tesis-30/Metodología para el análisis de intersecciones semaforizadas 0711 TTE-N.pdf](http://biblioteca.mti.gob.ni:8080/docushare/dsweb/Get/Tesis-30/Metodología%20para%20el%20análisis%20de%20intersecciones%20semaforizadas%200711%20TTE-N.pdf)

Votano, J., Parham, M., & Hall, L. (2004). FUZZY COLOURED PETRI NETS IN MODELLING FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS. *Chemistry &* Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>

Webster, F. V. (1958). Traffic signal settings. *Road Research Technical Paper, No.39, Road Research Laboratory, London*, 44.

Wen, S., Ye, J., & Zhu, Z. (2010). A feedback Adaptive fuzzy Petri net model for context reasoning. *5th International Conference on Pervasive Computing and Applications*, 313–319. <http://doi.org/10.1109/ICPCA.2010.5704119>

Willink, R. (2006). On using the Monte Carlo method to calculate uncertainty intervals. *Metrologia*. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/43/6/N02>

Zapata, G., & Carrasco, E. (2002). Estructuras generalizadas para controladores lógicos modeladas mediante redes de petri.

Zerhouni, N., & Alla, H. (1990). Dynamic analysis of manufacturing systems using continuous Petri nets. *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1070–1075. <http://doi.org/10.1109/ROBOT.1990.126136>

Zou, F. Z. F., Yang, B. Y. B., & Cao, Y. C. Y. (2009). Traffic light control for a single intersection based on wireless sensor network. *2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. <http://doi.org/10.1109/ICEMI.2009.5273994>