

Diseño, Construcción y Modelo Matemático de un Sistema Ferroviario a Escala basado en Redes de Petri Interpretadas

Investigación

Dra. Elvia Ruiz Beltrán², Dr. Jorge Luis Orozco Mora¹, Ing. L.G. Márquez González¹, Ing. A. Pelayo García¹

Dr. José Antonio Calderón Martínez¹

¹Departamento de Eléctrica y Electrónica, ²Departamento de Sistemas y Computación

Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Av. Adolfo López Mateos No. 1801 Ote. Fracc. Bona Gens.

Aguascalientes, Aguascalientes. México.

Tel/Fax +(52 449) 910-5002 Ext. 106 E-mail: eruiz@ieee.org, drorozco@ieee.org, calderon@ieee.org

Resumen

En este artículo se propone el diseño y construcción de un sistema ferroviario a escala y se diseña una interfaz gráfica para controlarlo en lazo abierto. Además se propone el modelo matemático de tal sistema, éste se obtiene a través de una metodología de modelado ascendente basada en Redes de Petri Interpretadas (RPI). Las RPI obtenidas son vivas, binarias y fuertemente conexas, propiedades deseables para analizar y controlar el sistema.

Palabras clave: Redes de Petri Interpretadas, Metodología de Modelado, Sistemas ferroviarios a escala, LABVIEW®.

Abstract

In this paper the design and construction of a scale railway system is proposed. Moreover a visual interface for open-loop feedback control of the system is also proposed. Furthermore a mathematic model of the system is advised, this model is obtained applying a Discrete Event System (DES) modeling methodology for obtaining live, binary and strong-connected Interpreted Petri Nets (IPN). Those properties are required to analyze the observability, controllability and diagnosability of the system that will be examined as a future work.

Key words: Interpreted Petri Nets, Modeling Methodology, a scale railway system Model, LABVIEW®.

Introducción

En este trabajo se diseña y construye un sistema ferroviario a escala (sistema de trenes) y se propone una interfaz gráfica para manipular el sistema en lazo abierto, la finalidad es validar teorías de control y diagnóstico de fallas que posteriormente puedan ser implementadas en sistemas reales. La ventaja del uso

de prototipos es simular el comportamiento de sistemas reales y con el uso de éstos se reduzcan los riesgos que puedan afectar a las máquinas y la infraestructura de los sistemas reales cuando las teorías se migran a éstos. También se minimiza el riesgo de pérdidas humanas.

Cabe destacar que los sistemas de trenes son una parte importante de los sistemas de transporte en el mundo y la constante mejora en sus condiciones de seguridad los hace un medio de transporte atractivo para los usuarios [1-5, 8]. Como resultado, la complejidad de los sistemas de trenes se incrementa y por consiguiente las demandas se concentran en el control lógico de estos sistemas [3].

Considérese sólo como ejemplo, el caso de la Unión Europea (UE). Como la UE está abriendo sus fronteras a Europa Oriental, ésta ha venido realizando mejoras sustanciales para rehabilitar los sistemas de trenes y planea obtener los siguientes objetivos para 2020 [7]: Aumentar la cuota de pasajeros en el ferrocarril de 6% al 20% y el buen tráfico de 8% al 15 %. Además, triplicar la productividad de la mano de obra en los ferrocarriles, un aumento del 50% en eficiencia energética, disminuir en un 50% la emisión de contaminantes e incrementar la capacidad de infraestructura acorde con los objetivos de tráfico. Lo mismo sucede en México, donde se está mejorando y ampliando sus sistemas de trenes y la analizando la necesidad de crear nuevos medios de transporte masivos para cubrir las necesidades de transporte de las metrópolis, tal es el caso de la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey y otras ciudades que se unen a la lista como León, Querétaro, entre otras [8]. Una justificación importante en el uso de trenes como medio de transporte es que en comparación con el transporte público convencional por ejemplo en Guadalajara, al año el Tren Eléctrico deja de contaminar a la atmósfera un equivalente a 11 mil 707 toneladas de dióxido de carbono (CO₂). En balance con la labor ambiental de los árboles en la captación del CO₂ y partiendo de que cada ejemplar absorbe 20 kilogramos de este contaminante por año, se requeriría de una plantación de 46 mil árboles en un espacio de 115 mil hectáreas, para captar lo que el tren deja de emitir[11].

115 mil hectáreas, para captar lo que el tren deja de emitir[11].

Debido a lo anterior es importante diseñar, construir y controlar sistemas de transporte masivos que beneficien el desarrollo social y no deterioren el medio ambiente.

Este trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera, en la primera parte se presentan los conceptos teóricos necesarios, en la segunda parte se muestra el diseño lógico y físico del sistema de trenes a escala que se propuso en este trabajo, posteriormente se presenta la metodología de modelado empleada y se propone el modelo matemático del sistema de trenes a escala, el cual será utilizado en trabajos futuros para validar y probar nuevas técnicas de control y de esquemas de diagnóstico de fallas.

Fundamentos teóricos

En esta sección se presentan los conceptos básicos relacionados con la noción de Sistemas de Eventos Discretos, Redes de Petri y Redes de Petri Interpretadas usadas en este trabajo.

Definición 1: Un sistema de evento discreto (SED), es un sistema donde su evolución depende enteramente de la ocurrencia de eventos discretos asincronos sobre el tiempo.

Ejemplos de este tipo de sistemas son los protocolos de comunicación, sistemas de manufactura flexible, sistemas de información, sistemas de transporte, sistemas logísticos, entre muchos otros.

Redes de Petri (RP)

Definición 2: Estructura de Red de Petri (RP) es la 4-tupla $N=(P,T,I,O)$, donde:

$P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ es un conjunto finito de lugares,
 $T=\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ es un conjunto finito de transiciones,
 $I : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ es la función que representa los arcos que van de los lugares a las transiciones (PRE), y
 $O : T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ función que representa los arcos que van de las transiciones a los lugares (POST).

Gráficamente los lugares se representan por círculos, las transiciones por barras o rectángulos y los arcos por flechas como se muestra en la figura 1. El símbolo $\bullet_{t_j} (t_j^\bullet)$ denota el conjunto de todos los lugares p_i tal que $I(p_i, t_j) \neq 0$ ($O(p_i, t_j) \neq 0$). Análogamente, $\bullet_{p_i} (p_i^\bullet)$ denota el conjunto de transiciones de t_j tal que $O(p_i, t_j) \neq 0$ ($I(p_i, t_j) \neq 0$) y la matriz de incidencia de G es $C = [c_{ij}]$, donde $c_{ij} = O(p_i, t_j) - I(p_i, t_j)$.

La función de marcado $M: P \rightarrow Z^+$ representa el número de marcas que residen dentro de cada lugar. El marcado de una RP es usualmente expresado como un vector de n posiciones.

Un sistema de RP es un par $N=(G, M_0)$, donde G es una estructura de RP y M_0 es la distribución inicial de las marcas. $R(G, M_0)$ es el conjunto de todos los posibles marcados alcanzables de M_0 disparando solo transiciones habilitadas.

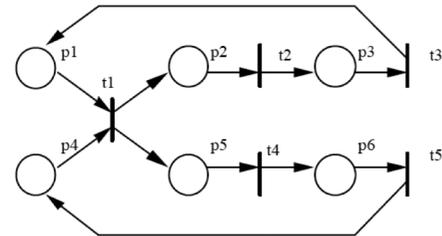


Figura 1. Red de Petri.

Una transición $t_i \in T$ está *habilitada* en un marcado M si y sólo si $\forall p_j \in P: M(p_j) \geq PRE(p_i, t_j)$. Una transición $t_j \in T$ habilitada puede ser disparada, y su disparo alcanza un nuevo marcado a M_{k+1} , el cual puede ser calculado con la ecuación de estado de una RP:

$$M_{k+1} = M_k + C \cdot \vec{v}_j \quad (1)$$

donde \vec{v}_j es un vector de m -entradas, cuyas componentes se definen como: $\vec{v}_j(i) = 0$, para $i \neq j$, ($\vec{v}_j(j) = 1$) y m es el número de transiciones en la red.

Lo anterior también se denota como: $M_k \xrightarrow{t_j} M_{k+1}$. La ecuación (1) se conoce como *ecuación de estado* de las RP.

Definición 3: Una RP (N, M_0) es cíclica si $\forall M_i \in R(N, M_0)$ se cumple que $\exists \sigma$, tal que $M_i \xrightarrow{\sigma} M_0$.

Definición 4: Una RP (N, M_0) es viva si $\forall M_i \in R(N, M_0)$ y $\forall t \in T$ se cumple que $\exists M_j$ tal que $M_i \xrightarrow{\sigma} M_j \xrightarrow{t}$.

Definición 5: Una RP (N, M_0) es k -segura (k -acotada) si $\forall M \in R(N, M_0)$ y $\forall p \in P, M(p) \leq k$. Si se cumple que $\forall M \in R(N, M_0)$ y $\forall p \in P, M(p) \leq 1$, la red es llamada 1-segura (segura o binaria).

Definición 6: Una RP (N, M_0) es fuertemente-conexa si y sólo si a partir de cualquier marcado $M_j \in R(N, M_0)$ se puede alcanza cualquier otro marcado $M_k \in$

(N, M_0) con el disparo de una secuencia σ_k , es decir

$$M_j \xrightarrow{\sigma_k} M_k$$

Definición 7: Sea C la matriz de incidencia de una $RP(N, M_0)$. Un T -semiflujo X_i de (N, M_0) es una solución de valores racionales semi-positivos de la ecuación $CX_i = 0$. El soporte del T -semiflujo X_i es el conjunto $\|X_i\| = \{t_j | X_i(t_j) \neq 0\}$.

Redes de Petri Interpretadas (RPI):

Definición 8: Una Red de Petri Interpretada (RPI) es una 4-tupla $Q = (N, \Sigma, \lambda, \varphi)$ donde,

- $N = (N, M_0)$, donde N es la estructura de RP y M_0 es el marcado inicial.
- $\Sigma = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r\}$ es el alfabeto de entrada de la red, donde α_i es el i -ésimo símbolo de entrada del alfabeto.
- $\lambda : T \rightarrow \Sigma \cup \{\varepsilon\}$ es una función de etiquetado de transiciones con las siguientes restricciones: $\forall t_j, t_k \in T, j \neq k, \forall p_i I(p_i, t_j) = I(p_i, t_k) \neq 0$ y ambos $\lambda(t_j) \neq \varepsilon, \lambda(t_k) \neq \varepsilon$, entonces $\lambda(t_j) \neq \lambda(t_k)$. En este caso ε representa un evento interno del sistema.
- Existe una matriz φ de dimensiones $q \times n$, tal que $y_k = \varphi M_k$ es el mapeo del marcado M_k en un vector de observación q - dimensional. La columna $\varphi(\bullet, i)$ es el vector elemental e_n si el lugar p_i tiene asociado el sensor h ; o el vector nulo si p_i no tiene asociado ningún sensor. En ese caso, un vector elemental e_h es el vector q - dimensional con todas sus entradas igual a cero, excepto en la entrada h , esto es igual a 1. Un vector nulo tiene todas sus entradas igual a cero.

Definición 9: Una transición $t_j \in T$ de una RPI está habilitada en el marcado M_k si $\forall p_i \in P, M_k(p_i) > I(p_i, t_j)$. Si $\lambda(t_j) = \alpha_i \neq \varepsilon$ está presente y t_j está habilitada, entonces t_j debe ser disparada. Si $\lambda(t_j) = \varepsilon$ y t_j está habilitada entonces t_j puede ser disparada. Cuando una transición habilitada t_j se dispara en un marcado M_k , entonces un nuevo marcado M_{k+1} es alcanzado. Esta

idea es representada como $M_k \xrightarrow{t_j} M_{k+1}$ y M_{k+1} puede ser calculada usando la parte dinámica de la ecuación de estado de una RP I que es descrita como:

$$\begin{aligned} M_{k+1} &= M_k + C \cdot \vec{v}_k \\ y_k &= \varphi(M_k) \end{aligned} \quad (2)$$

donde C es la matriz de incidencia y \vec{v}_k es un vector de disparo, los cuales son definidos al igual que para

RP . Además, $y_k \in (Z^+)^q$ es la k - ésimo vector de observación de la RP I.

Definición 10: Si $\lambda(t_i) \neq \varepsilon$ la transición t_i se dice manipulable. De otra forma es no manipulable. Un lugar $p_i \in P$ es medible si la i - ésima columna del vector columna de φ no es nulo, esto es $\varphi(\bullet, i) = \vec{0}$. De otra manera es no medible.

Diseño y construcción de un sistema de trenes a escala

El sistema ferroviario a escala fue diseñado para que circulen tres máquinas o trenes a escala, la escala seleccionada para todo el sistema ferroviario es la HO. Los trenes contienen un motor de corriente directa (CD) con una caja de engranes en su interior, lo que hace que puedan desplazarse sobre las vías.

Los trenes pueden circular en dos diferentes circuitos en forma de óvalo, cada circuito consta de una desviación y un estacionamiento. Para posicionar los trenes en los dos diferentes circuitos se utiliza una mesa giratoria, la cual contiene veintidós posiciones diferentes de las cuales solo se utilizan cinco como se muestra en la figura 2.

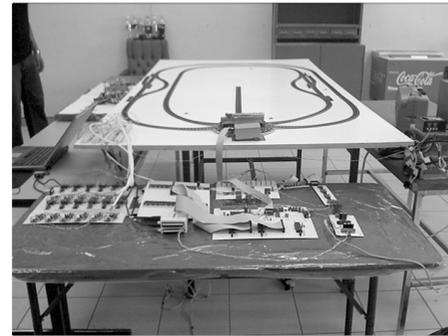


Fig. 2. Circuito del prototipo ferroviario a escala.

Los cambios de vías se realizan por medio de seis actuadores. Se utilizan dos actuadores para cada desviación y uno para cada estacionamiento.

Con el sistema se pretende validar enfoques de control continuo, discreto e híbrido, por tal motivo los circuitos se dividieron en un total de veintidós tramos de vías los cuales se energizan con tres fuentes diferentes. Lo anterior se debe a que pueden caminar tres trenes a la vez a diferentes velocidades y en distintas direcciones.

Para conocer la posición de los trenes en cada tramo de vía, se colocaron dos imanes; uno al inicio y otro al final de cada tramo. Cada tren lleva montado un transmisor de radiofrecuencia HM-TR V2.2 conectado a un microcontrolador PIC16F88 de MICROCHIP© y 3 relevadores magnéticos los cuales cuentan los pulsos con cada tramo de vía, eso nos sirve

para determinar exactamente el tramo en el cual se encuentra el tren.

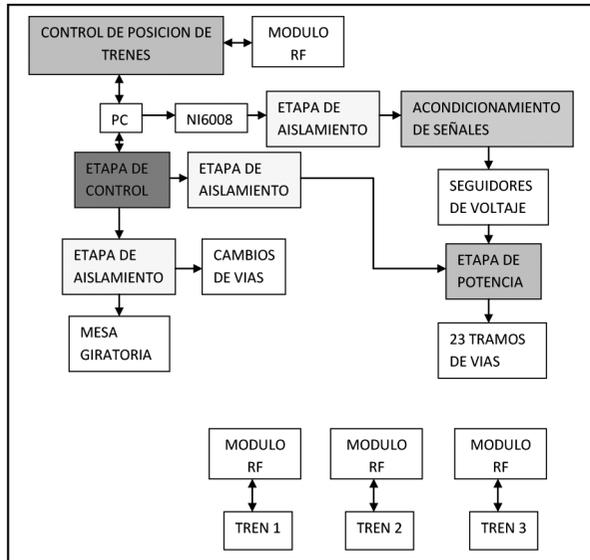


Fig. 3. Diagrama a bloques del sistema ferroviario a escala.

En la figura 3 se muestra el diagrama a bloques del sistema ferroviario a escala que se propone en este trabajo, la finalidad del sistema a escala es simular el comportamiento de sistemas de trenes reales, en el diagrama se observa que el sistema consta de 5 etapas: etapa de aislamiento, etapa de control, acondicionamiento de señales y control de posición de trenes, para profundizar en el funcionamiento de primeras 4 etapas puede referirse a [9]. Ya que en este trabajo se extiende el diseño para contener la parte del control de posición de los trenes.

Interfaz gráfica en LABVIEW®

El sistema se controla desde una PC con el uso de una interfaz desarrollada en LABVIEW®, de tal manera que con la interfaz se manipule el sistema por medio de cuatro puertos seriales y dos tarjetas NI6008. Por el puerto serial se envían los datos referentes a la selección de la fuente en los tramos de vía, el control de la rueda y los cambios de vías, y por medio de las tarjetas NI6008 se manda el voltaje deseado de cada fuente. Los datos de posición de cada tren también se reciben en este software. En la figura 4 se muestra una parte de la interfaz desarrollada en LABVIEW®, esta aplicación se utiliza para manipular en lazo abierto el sistema; las tres perillas llamas “VELOCIDAD A1”, “VELOCIDAD A2” y “VELOCIDAD A3” que se ubican en la parte inferior izquierda de la figura 4 son utilizadas para controlar o manipular de manera

manual el voltaje de cada tren; los botones de la parte superior (1,...,21) energizan respectivamente cada uno de los tramos de vía y por último los botones de la parte inferior derecha (CAMBIO1, CAMBIO4) controlan el sentido en el cual avanzan los trenes sobre las vías.

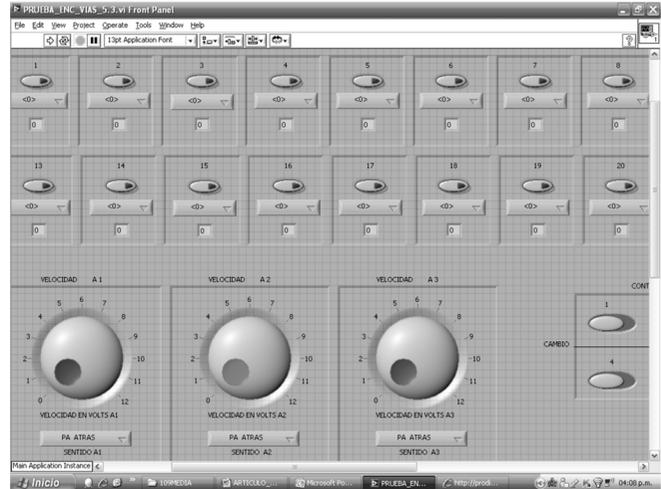


Fig. 4. Interfaz desarrollada en LABVIEW®.

Modelado del Sistema ferroviario a escala utilizando Redes de Petri Interpretadas

Tal como se mencionó al principio del artículo, es importante contar con un modelo matemático a partir del cual se analicen las propiedades del sistema y con ello determinar si es posible controlarlo y diagnosticarlo. Para obtener el modelo matemático, en este trabajo se aplica una metodología de modelado basada en Redes de Petri Interpretadas que sigue una estrategia de modelado ascendente basada en Redes de Petri Interpretadas [10].

La metodología plantea que una vez que se identifican los componentes del sistema, se asigna un conjunto de variables a cada componente, donde el comportamiento de cada variable de estado se modela mediante un modelo de RP. Posteriormente el conjunto de módulos obtenidos se integran en un modelo global que se obtiene con la aplicación de las operaciones de composición síncrona o permisiva, según sea el caso y a esos modelos se les asigna un significado físico. La metodología se aplicará posteriormente con el ejemplo del sistema ferroviario a escala.

Descripción formal del Sistema ferroviario a escala

Considere el sistema de trenes a escala con un tren eléctrico (T_1), dos rutas circulares y un estacionamiento (ver figura 1). Las rutas se dividen en ocho, nueve y un segmento independientes (V_1, \dots, V_8), (V_9, \dots, V_{17}) y (V_a) respectivamente; además, cada vía cuenta con un interruptor que los energiza, indicado como (S_1, \dots, S_8), (S_9, \dots, S_{17}) y (S_a) respectivamente, también el tren puede avanzar en dos direcciones en cada vía, donde la dirección se controla por medio de relevadores (D_1, \dots, D_8), (D_9, \dots, D_{17}) y (D_a) respectivamente para cada segmento de vía.

El sistema opera de la siguiente manera: cuando el interruptor S_i se activa, entonces el segmento V_i de la vía se energiza. Si el tren T_1 se coloca en la vía V_i , éste cambia del estado esperando al estado de viajando, el cual puede estar viajando hacia adelante o hacia atrás, esto se determina en función de la polaridad de las vías. Los circuitos están unidos por una rueda giratoria (RG), la cual puede recibir a T_1 por cualquier ruta y dirigirlo en cualquiera de las 5 posibles vías de salida (como se aprecia en la figura 5 indicándose con 1, 2, 3, 4 y 5).

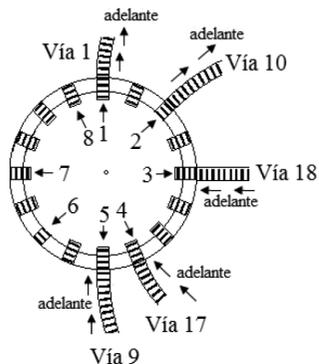


Fig. 5 Polarización y posición de la Rueda Giratoria.

La rueda giratoria (RG) se puede encontrar en 8 posibles posiciones, (P_1, \dots, P_8). Como una vía se encuentra sobre la rueda giratoria, se puede confundir si va hacia adelante o hacia atrás, para evitar lo anterior se asignó una marca para identificar el sentido de la rueda. Las restricciones en el funcionamiento de la mesa giratoria son las siguientes:

1. Cuando se envía la señal para que la mesa gire, en el modelo se observará un cambio abrupto, pero en la realidad, no hay facilidad de hacerlo como en el modelo, es por eso que se agregarán 2 nuevos lugares al modelado de la rueda. {moviendo, detenida}.
2. Si un tren está en la vía contigua a la mesa y tiene la intención de cambiar, ésta tiene que estar "disponible" y "detenida", para ello se

necesitaran dos lugares para representar esos estados: {disponible, ocupada}.

3. Si se quiere mover la rueda, puede hacerlo de posición en posición, es decir, no puede moverse de la posición 1 a la posición 3 sin haber pasado por la posición 2.
4. Si un tren está en la RG y en una posición tal que puede caminar hacia adelante, pero no hacia atrás, el modelo tendrá la restricción de no caminarlo hacia atrás hasta encontrarse en una posición que si lo permita
5. En caso de que un tren esté en la RG, éste podrá ser puesto en cualquier dirección, pero no podrá caminar hacia adelante o atrás si el lugar de "moviendo" se encuentra marcado y si el lugar en el que está es una condición no válida.
6. Se agregan 4 nuevos lugares que indican las posiciones por las cuales un tren puede avanzar a la RG, los lugares son {1y5, 2y6, 3y7 4y8}. En el lugar 1y5, significa que existe el permiso por parte de la RG de que el tren que avanza por la Vía1 y/o Vía9 pueda cambiar o avance a la Vía1 y/o Vía9 en caso de estar en la RG. Para cualquier sentido, ya sea hacia adelante o hacia atrás. En el lugar 2y6, dará permiso a la RG solamente para avanzar hacia la Vía V_{10} en sentido "adelante" y de la Vía V_{10} a la RG en sentido "reversa". En el lugar 3y7, dará permiso a la RG solamente para avanzar hacia la Vía V_{18} en sentido "reversa" y de la Vía V_{18} a la RG en sentido "adelante". En el lugar 4y8, dará permiso a la RG solamente para avanzar hacia la Vía V_{17} en sentido "reversa" y de la Vía V_{17} a la RG en sentido "adelante".
7. Cada vez que a RG se mueva, se marcará el lugar de moviendo y desmarcará el lugar de disponible y se volverá a marcar cuando una señal del sensor la active, es decir, cuando se termine de mover la rueda.

Para ilustrar las condiciones descritas anteriormente se presenta la figura 5 donde las flechas que están fuera de la RG indican el sentido de avanzar hacia "adelante" y las que se encuentran adentro de la RG indican la posición de la vía de la RG en sus 8 posibles posiciones.

De acuerdo con la metodología de modelado propuesta por Ramírez et al., en [10], se identifican 4 variables de estado: sentido de cada vía (DR), estado de cada interruptor (SW), estado del tren (TN) y una última para la rueda giratoria (RG).

Las variables de estado identificadas son: "tareas_DR", "tareas_SW", "tareas_TN", "tareas_RG".

El rango de cada una de las variables de estado es:

- $Rango_tareas_DR = \{atras, adelante\}$,
- $Rango_tareas_SW = \{apagado, encendido\}$,
- $Rango_tareas_TN = \{avanza_adelante, avanza_atras\}$,
- $Rango_tareas_RG = \{ocupada, disponible, detenida, moviendo, posicion, 1y5, 2y6, 3y7, 4y8\}$.

Los conjuntos anteriores que indican los rangos de las variables son representados con los lugares tal como indica a continuación:

- $P_tareas_DR = \{p_{i*6+1}, p_{i*6+2} \mid i \in [0, \dots, 17]\}$
- $P_tareas_SW = \{p_{i*6+3}, p_{i*6+4} \mid i \in [0, \dots, 17]\}$
- $P_tareas_TN = \{p_{i*6+5}, p_{i*6+6} \mid i \in [0, \dots, 17]\}$
- $P_tareas_RG = \{p_{109}, \dots, p_{130}\}$.

En la figura 6 sólo se observan los modelos de los interruptor SW1 hasta el SW18, donde se aprecia que los lugares p3 (indica apagado) y p4 (indica encendido) se relacionan a través de t3, ya que el interruptor puede pasar de apagado a encendido cuando la señal asociada a t3 se ejecuta; los mismo sucede cuando se pasa del estado encendido (indicado por el lugar p4) a apagado y por lo tanto se agrega la transición t4; lo anterior se aplica para obtener el modelo de cada interruptor y del resto de los componentes del sistema. Los puntos en los lugares representan la condición inicial en que se encontrarán cada uno de los elementos del sistema.

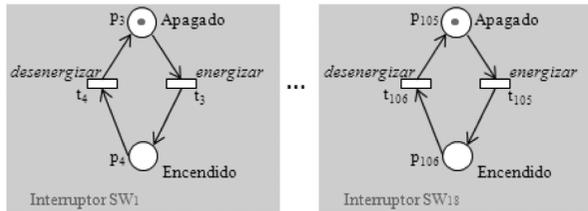


Fig. 6 Modelo de RPI de interruptor 1.

Una vez que se tienen los modelos de cada uno de los elementos del sistema se procede a realizar la composición síncrona y permisiva entre ellos para obtener el modelo de RPI que se muestra en la figura 7 (el modelo se graficó con NetLab para visualizarlo más fácilmente). Por razones de espacio la matriz de incidencia no se muestra, pero esta matriz es de 130x139 (lugares, transiciones respectivamente) de dimensión.

A continuación se presentan las funciones de entrada y salida del sistema, obtenidas del sistema real: λ y ϕ .

Para la función de salida ϕ :

Dado que los lugares $p_{i*6+2}, p_{i*6+4}, p_{i*6+6}, p_{118}, \dots, p_{125}, p_{116}, p_{130}, i \in [0, \dots, 18]$ son lugares medibles, entonces:

$$\phi = [A_1, \dots, A_{19}, E_1, \dots, E_{19}, V_1, \dots, V_{19}, MP_1, \dots, MP_8, DN, FP]^T$$

$$\phi = \begin{matrix} & \begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & \dots & P_{116} & P_{117} & P_{118} & \dots & P_{129} & P_{130} \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_{19} \\ E_1 \\ \vdots \\ E_{19} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{19} \\ DN \\ MP_1 \\ \vdots \\ MP_8 \\ FP \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Nota: la matriz ϕ es una matriz de sensores por lugares, es decir son 66 sensores, que son los que se describen en el vector anterior por los 130 lugares de la red. Debido a las dimensiones de la matriz (66x130) unidamente se mencionan los resultados.

A continuación se define la función etiquetado λ en la tabla 1.

Significado	Etiquetado	Evento manipulable	
Cambiar el sentido hacia adelante	$\lambda(t(i*10+1))$	ad(i+1)	$i \in [0, \dots, 18]$
Cambiar el sentido hacia atrás	$\lambda(t(i*10+2))$	re(i+1)	$i \in [0, \dots, 18]$
Activar interruptor	$\lambda(t(i*10+3))$	on(i+1)	$i \in [0, \dots, 18]$
Desactivar interruptor	$\lambda(t(i*10+4))$	of(i+1)	$i \in [0, \dots, 18]$
Mover a la derecha la rueda giratoria	$\lambda(t((2j+1)+196))$	de(j+1)	$j \in [0, \dots, 3]$
Mover a la izquierda la rueda giratoria	$\lambda(t((2j+1)+197))$	iz(j+1)	$j \in [0, \dots, 3]$
Terminar de mover la mesa giratoria	$\lambda(t196)$	Don	
Para el resto de transiciones	$\lambda(tk)$	ϵ	

Tabla 1. Etiquetado y significado de las transiciones manipulables del modelo de RPI del sistema ferroviario a escala.

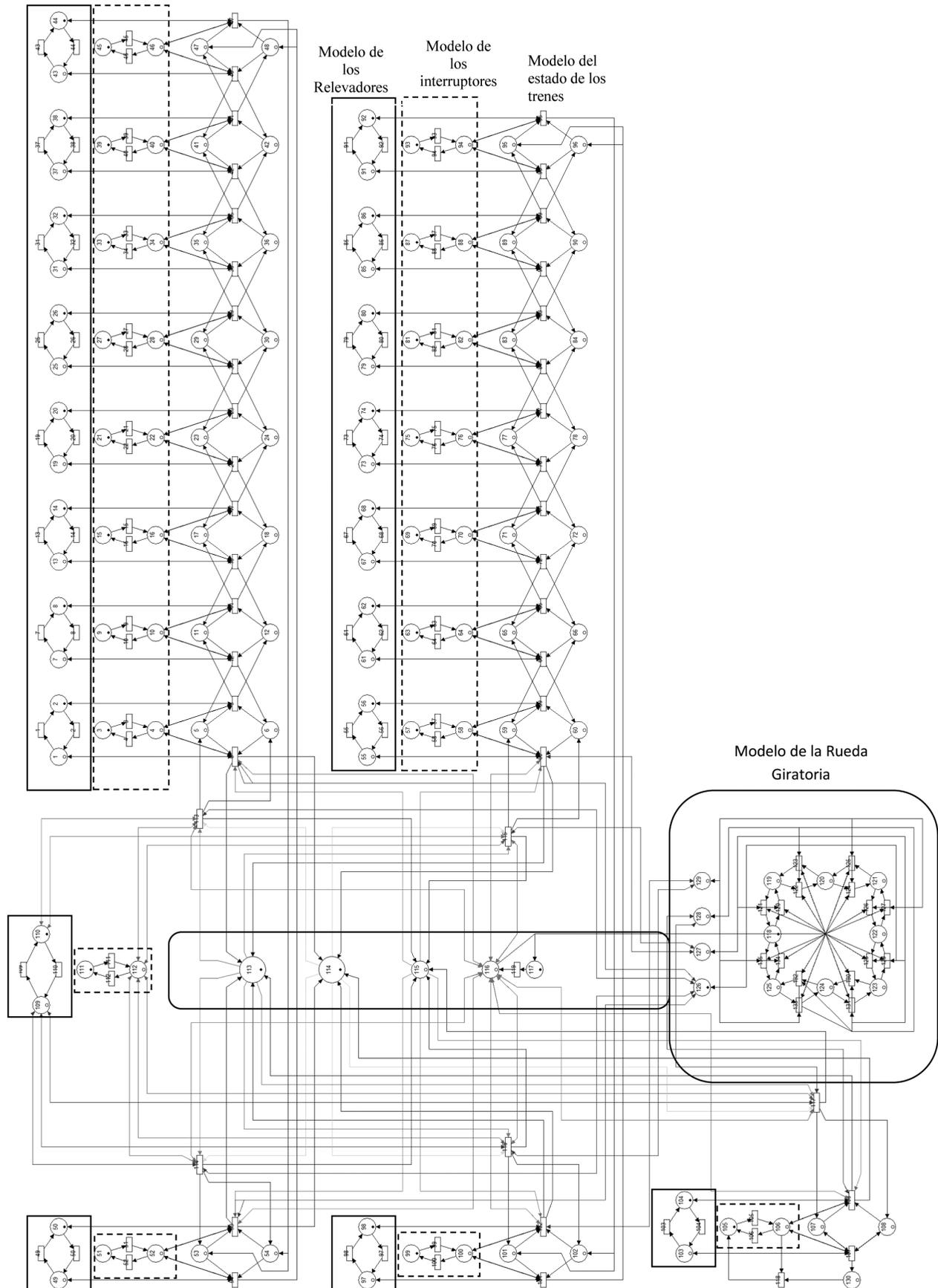


Fig. 7 Modelo de RPI del sistema ferroviario a escala

En la figura 7 se aprecian dos rectángulos ovalados que indican que los lugares dentro de este representan el comportamiento de la rueda giratoria, también se ve de qué manera se relacionan con las vías que se encuentran contiguas a la rueda giratoria (indicado con los arcos dirigidos hacia otras transiciones que a su vez se relacionan con otros elementos del sistema). Los lugares que se encuentran en los rectángulos indican el modelo del comportamiento todos los relevadores y como estos afectan que el tren avance hacia alguna dirección en específico. Además los rectángulos punteados muestran el modelo de los interruptores que se encargan de energizar las vías. El resto de los lugares muestran la condición en que se puede encontrar el tren cuando éste avance en alguna dirección debido al efecto de algún relevador y el hecho de energizar alguna vía.

Cabe destacar que el modelo de RPI obtenido es una representación del Sistema ferroviario a escala y que a este modelo aún no se le han hecho pruebas de diagnosticabilidad, controlabilidad y observabilidad, las cuales se pretenden analizar en un trabajo posterior.

Conclusiones

En este trabajo se diseñó y construyó un sistema ferroviario a escala que aproxime su comportamiento al de sistemas reales. Además se desarrolló una interfaz en LabView con la que se manipula el sistema en lazo abierto y se puede monitorear el estado en que se encuentran cada uno de las variables del sistema. También se obtuvo el modelo matemático en Redes de Petri Interpretadas del sistema ferroviario, ya que a partir de ese modelo se consigue una representación matricial del sistema que será utilizada para analizar propiedades de controlabilidad, observabilidad y diagnosticabilidad.

Es importante resaltar que el prototipo construido tiene una plataforma abierta que permite implementar esquemas de control discreto, continuo e híbridos existentes o aquellos que se obtengan como producto de nuestras investigaciones sobre esquemas de control.

Reconocimientos

Un especial reconocimiento al Instituto Tecnológico de Aguascalientes y a la Dirección General de Educación Superior Tecnológica por brindarnos los recursos para realizar este trabajo de investigación.

Referencias

- [1] A. Giua, C. Seatzu., (2008), "Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets," *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, volume 5, No. 3, p. 431-445.
- [2] P.G. Howlett and P.J. Pudney., (1995), Energy efficient train control, *Advances in Industrial Control*, Springer Verlag.
- [3] C.W. Janczura., (1998), *Modelling and analysis of railway network control logic using coloured Petri nets*, Ph.D. Thesis, University of South Australia.
- [4] T.K.S. Murthy, L.S. Laurence, and R.E. Rivier., (1987), *Computers in Railways Management*, Springer Verlag.
- [5] T.K.S. Murthy, F.E. Young, S. Lehmann, and W.R. Smith., (1987), *Computers in Railways Installations, Track and Signalling*, Springer Verlag.
- [6] V.A. Prollidis., (1995), *Railway Engineering*, Avebury Technical.
- [7] Commission of the European Communities, White Paper on "European transport policy for 2010: time to decide," COM (2001) 370, 12/09/2001.
- [8] Roberto Remes Tello de Meneses, Trenes urbanos y suburbanos para México. Una inversión necesaria y urgente. Biblioteca Jurídica Virtual del Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, <http://www.bibliojuridica.org/libros/6/2816/14.pdf>, 17 de Junio de 2010.
- [9] Adrián Pelayo G., L. G. Márquez González, J.L. Orozco M., and E. Ruiz Beltrán, (2010) A scale railway prototype: design, construction and control interface, *International Conference on Electrical and Electronic Engineering Research (CIIIEE)*, pp. 266-271.
- [10] A. Ramírez Treviño, E. Ruiz Beltrán, I. Rivera Rangel, and E. López Mellado., (2007), *On-line Fault Diagnosis of Discrete Event Systems. A Petri Net Based Approach*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 31-39.
- [11] Sitio Oficial del Tren Ligero de Guadalajara <http://www.siteur.gob.mx/>, visitado el 21 de junio de 2010.

Artículo recibido: 18 de octubre de 2010

Aceptado para publicación: 29 de marzo de 2011