



ESTUDIO DE MODELOS DE ANÁLISIS SISTÉMICO PARA LA SEGURIDAD OPERACIONAL

Razonamiento sistémico-matricial en sistemas sociotécnicos aplicado al transporte ferroviario

Propuesta metodológica para el análisis de sistemas de transporte basada en los conceptos del enfoque sistémico de investigación de accidentes, desarrollada mediante la creación de matrices de acoplamientos posibles.

Introducción

Para desarrollar la idea central del artículo, partimos de una frase de Albert Einstein de 1929, publicada en *The Saturday Evening Post*: “la imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado y la imaginación circunda el mundo”.

Entonces ¿cuál fue la idea que nació de la imaginación y en qué contexto vio la luz? Su nacimiento se remonta a los cursos introductorios impartidos por el licenciado Alejandro Covello en la Junta de Seguridad en el Transporte (JST), los cuales fueron reforzados por el director nacional Ing. Diego Di Siervi y el investigador Ing. Germán Goñi de la Dirección Nacional de Investigación de Sucesos Ferroviarios (DNISF) de la JST. En tal ocasión, los conceptos de análisis sistémico y de accidentes normales en sistemas sociotécnicos se cruzaron con la preocupación por la que estaba atravesando el país en el contexto de pandemia por COVID 19. Y así, en un proceso de búsqueda de información sobre un análisis sistémico de la crisis económica y política argentina, nos encontramos con la investigación “Análisis sistémico de la pandemia del coronavirus. Un accidente normal” de Covello y Muro (2020), en la cual los autores desglosan el sistema sociotécnico donde se desarrolla la pandemia en sus distintos elementos y luego los analizan de forma novedosa.

La lectura de dicho material dio lugar a una serie de preguntas: ¿cómo podemos hacer para ordenar los elementos de un sistema complejo de forma simple, metódica, repetitiva y general? ¿Cómo podemos visualizar las interacciones para ver las propiedades emergentes? ¿Existe una sola forma de buscar o manejar esas propiedades? Estos interrogantes quedaron en el ideario hasta que se encontraron con las normativas, métodos y las matrices de riesgo utilizadas por el área de Estudios de la DNISF, usadas para ordenar elementos de información en intersecciones de filas y columnas. Entonces, para tratar de contestar las preguntas iniciales, y en base a un acervo de conocimientos en electrónica y programación, comenzamos a razonar en términos de análisis sistémico a través de la organización matricial. Y así, llegamos al razonamiento sistémico-matricial (RSM) que se describe a lo largo del texto.

Matrices de acoplamientos posibles

Para desarrollar el concepto de la matriz de acoplamientos posibles (MAP), partimos de la idea de sistema sociotécnico (SST) proveniente de la teoría general de sistemas (TGS).

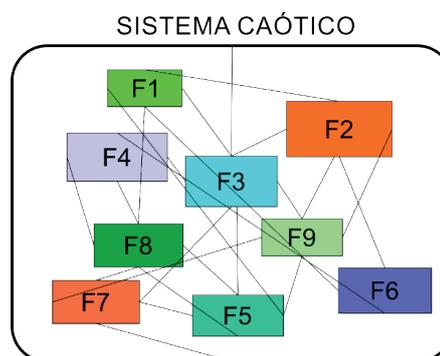
Los sistemas sociotécnicos pueden ser definidos como un complejo de elementos interactuantes. Interacción significa que los elementos “p” están en rela-

ciones “R”. El comportamiento de un elemento p en R es diferente de su comportamiento en otra relación R'. Si los comportamientos en R y R' no difieren, no hay interacción, y los elementos se comportan independientemente con respecto a las relaciones R y R' (Ludwig von Bertalanffy, 1976).

La interacción mutua de los distintos elementos que componen un sistema da lugar a propiedades emergentes que pueden ser o no deseadas, y que son el producto del conjunto de las relaciones entre las partes. Estas propiedades están basadas en conductas simples. Las que generan un todo que es mayor a la suma de las propiedades individuales de los elementos que conforman el sistema.

Para el razonamiento sistémico-matricial (RSM), los elementos p son los factores que lo componen F1, F2, Fn-1 y Fn, y las relaciones R son los acoplamientos mutuos. Si estos no cuentan con ningún orden, restricción o barrera, podemos decir que la propiedad emergente del sistema sería el caos, como se visualiza en la imagen 1.

Imagen 1. Representación del sistema caótico,



Fuente: elaboración propia.

Para el desarrollo del razonamiento sistémico matricial (RSM), se pretende, en primer lugar, visualizar y analizar los distintos factores constituyentes del sistema y sus interacciones. Siguiendo esta lógica, se podrá analizar el sistema desde un estado de caos de las interacciones para lograr ciertas propiedades en un estado de orden deseado, o se podrá analizar el sistema desde el estado de orden actual, para llegar a un estado de caos de las interacciones, que nos permita ver propiedades que antes estaban ausentes.

Para esto, se define en primera instancia una lista de factores constituyentes generales del sistema (FG). En el caso de un sistema de transporte, se estipulan, por ejemplo, los factores vehicular, estructural, humado organizacional, normativo, etc., los cuales brindan información sobre el propio sistema. En la tabla 1 se desarrolla una lista genérica de factores constituyentes.

Tabla 1. Lista 1 de factores constituyentes

Factores constituyentes	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
-------------------------	----------	----------	----------	----------

Fuente: elaboración propia.

Luego, la lista 1 se transpone con la lista 2 de factores y se correlacionan mutuamente, creando una Matriz de Acoplamientos Posibles o MAP, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 2. Lista 2 de factores, transpuesta con de la lista 1

Factores constituyentes
Factor 1
Factor 2
Factor 3
Factor 4

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3: MAP genérica de factores constituyentes

MAP	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Factor 1	Elemento 11	Elemento 12	Elemento 13	Elemento 14
Factor 2	Elemento 21	Elemento 22	Elemento 23	Elemento 24
Factor 3	Elemento 31	Elemento 32	Elemento 33	Elemento 34
Factor 4	Elemento 41	Elemento 42	Elemento 43	Elemento 44

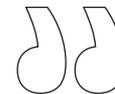
Fuente: elaboración propia.

Los elementos de información de la MAP se identifican con los números de la fila y la columna que interceptan. Por ejemplo, el Elemento 12 intercepta a los Factores 1 y 2. Más adelante, son definidos como acoplamientos posibles y se identifican con la vocal "A". Las celdas de la Tabla 3 que están sombreadas en gris, son los valores que conforman una diagonal en la MAP y que más adelante son definidos como "identidades del sistema".

Los factores generales del sistema, a su vez, se subdividen en los factores individuales participantes en el suceso. Dichos factores se identifican fácticamente en el relevamiento de campo.

Cada elemento de la MAP puede crear una nueva matriz de correlaciones, con nuevas posibilidades, como si fuera un fractal¹ que se va repitiendo en distintas escalas. Este razonamiento irá reproduciendo el método para las distintas combinaciones, desde lo general a lo particular. Cabe aclarar que no prima la búsqueda de relaciones causa-efecto, sino la confluencia de factores acoplados con conexiones e interacciones entre los mismos.

“Cabe aclarar que no prima la búsqueda de relaciones causa-efecto, sino la confluencia de factores acoplados con conexiones e interacciones entre los mismos.”



Para poder visualizar mejor la aplicación de la MAP, desarrollamos un ejemplo con un modelo genérico, con factores contribuyentes generales, y luego veremos cómo se aplica a un ejemplo más específico.

Factores definidos para un primer análisis

Los factores constituyentes definidos son abstracciones determinadas con el fin de visualizar las interacciones dentro del sistema de transporte, inspiradas en la RES170/2018 del Ministerio de Transporte².

Para el análisis de un accidente, el modelo sistémico supone una serie de pasos (Hollnagel, 2009). El primero refiere a identificar las funciones esenciales del sistema. Para ello, se debe determinar qué constituye el sistema y cuáles son sus componentes. La segunda instancia prevé determinar el potencial de variabilidad del contexto y de las funciones principales (humanas, tecnológicas y organizativas). El tercer paso refiere a definir las dependencias entre funciones (correctas e incorrectas) y, por último, decidir las contramedidas (políticas, defensas, monitorización, procedimientos, comunicación, etc.) (González, 2016).

En Tabla 4 se muestran los factores constituyentes generales con sus funciones, capacidades y características. Luego, a través de la ejemplificación de un suceso, observaremos las variables particulares.

1. Un fractal es un objeto geométrico en el que se repite el mismo patrón a diferentes escalas y con diferente orientación.

2. En el caso de que el lector encuentre que un factor es parte de un subsistema más amplio, considere que aquí se lo utiliza para aplicar los conceptos con mayor generalidad.

Tabla 4. Factores generales para el Modelo N9

Factores constituyentes generales	Función	Características iniciales
Vehicular	Trasladar	Diseño, especificaciones, daños, mantenimiento recomendado, etc.
Estructural	Soportar el transporte	Diseño, estado, medidas constructivas, tiempos e intervalos; pendientes, niveles, daños, etc.
Humano organizacional	Operar	Técnicas y psicofísicas. Gestión, política, investigador, etc.
Carga	Carga a transportar	Características de la carga transportada. Daños, usuarios humanos, pasajero, etc.
Visibilidad	Identificar o ser identificado	Obstáculos, posición, medidas y materiales, etc.
Ruido y variabilidad	Perturbar y modificar	Movimientos aleatorios no deseados. Contaminación sonora, contaminación visual, etc.
Vigilancia y registro	Vigilar y registrar las actividades	Cámaras de seguridad, videos tomados por transeúntes. Medios de comunicación. Eventos judiciales relacionados. Estadísticas.
Normativo y usos-costumbres	Reglamentar y regular	Normas vigentes, reglamentos, manuales de buenas prácticas. Usos y costumbres.
Ambiental	Brindar condiciones naturales para el funcionamiento	Climáticas, topográficas, físicas, energéticas, etc.

Fuente: elaboración propia.

Modelo N9

En la Tabla 5 se muestra la matriz de acoplamientos posibles (MAP) de los factores definidos en la tabla 4. El ejemplo se denomina modelo N9 (N9 hace referencia al número de factores constituyentes utilizados). Las variables son susceptibles de simplificación, y algunas podrían incluirse dentro de otras. Para este ejemplo, sin embargo, se utilizarán las nueve variables por separado.

La MAP (matriz de acoplamientos posibles) es el resultado de la transposición y cruce de cada elemento de la lista de factores constituyentes generales. Se realiza un análisis de cada relación iniciando por los acoplamientos de identidad, que son aquellos que relacionan el factor consigo mismo. Luego, se analizan las demás conexiones. Los acoplamientos generales se identifican como $A[i][j]$ donde i son las filas y j son las columnas de la ma-

MAP N9	Vehicular	Estructural	Humano organizacional	Carga	Visibilidad	Ruido	Vigilancia y registro	Normativo	Ambiental
Vehicular	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19
Estructural	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29
Humano organizacional	A31	A32	A33	A34	A35	A36	A37	A38	A39
Carga	A41	A42	A43	A44	A45	A46	A47	A48	A49
Visibilidad	A51	A52	A53	A54	A55	A56	A57	A58	A59
Ruido	A61	A62	A63	A64	A65	A66	A67	A68	A69
Vigilancia y registro	A71	A72	A73	A74	A75	A76	A77	A78	A79
Normativo	A81	A82	A83	A84	A85	A86	A87	A88	A89
Ambiental	A91	A92	A93	A94	A95	A96	A97	A98	A99

Fuente: elaboración propia.

Los factores constituyentes generales (FG) se pueden subdividir, a su vez, en factores individuales (FI). Refieren a los elementos fácticos del sistema bajo análisis, y tendrán su correspondiente MAP.

Para visualizar la MAP de los factores individuales, veremos, a continuación, un ejemplo de una colisión en paso a nivel (PAN) entre una locomotora que trasportaba un vagón de combustible y un micro de pasajeros. Estas características o elementos formarán parte de la identidad vehicular.

Tabla 6. MAP de la identidad vehicular

A11 Vehicular	Locomotora	Vagón	Micro
Locomotora	A'11	A'12	A'13
Vagón	A'21	A'22	A'23
Micro	A'31	A'32	A'33

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 6, la interacción de identidad vehicular A11 genera una nueva MAP con acoplamientos A' entre los elementos fácticos participantes (EFP) en el suceso. Esa nueva matriz tendrá también identidades y elementos combinatorios posibles. En gris, se encuentran las identidades, en rojo, los acoplamientos de colisión entre las identidades locomotora y micro. En verde, los acoplamientos entre las identidades locomotora y vagón. Y en blanco, los acoplamientos posibles no tenidos en cuenta.

Tabla 7. MAP de la identidad Humano organizacional

A33 Humano organizacional	Conductor locomotora	Ayudante de conductor	Chofer micro	Investigador
Conductor locomotora	A'11	A'12	A'13	A'16
Ayudante de conductor	A'21	A'22	A'23	A'26
Chofer micro	A'31	A'32	A'33	A'36
Investigador	A'61	A'62	A'63	A'66

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7, la interacción de identidad Humano Organizacional A33 genera una nueva MAP con los acoplamientos A' entre los elementos fácticos participantes en el suceso. En este caso, la nueva matriz tendrá a las identidades de conductor de locomotora, ayudante de conductor, chofer de micro e investigador. Las identidades podrían ser más, pero se simplificaron por una cuestión de extensión del texto. En gris, se observan las identidades de la nueva MAP, en verde, los acoplamientos entre conductor y ayudante y los acoplamientos entre el inves-

tigador y todos los posibles entrevistados; y en blanco, los acoplamientos no tenidos en cuenta, como por ejemplo el A'13 entre conductor y chofer de micro.

Los acoplamientos de identidad

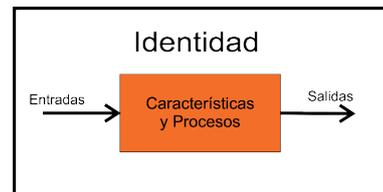
Si observamos la MAP de las Tablas 5, 6 y 7, veremos que los elementos sombreados acoplan mutuamente los factores. Estos son los elementos en donde i es igual a j. Dicho de otra forma, cuando se recorre la MAP, la fila coincide con la columna. Estos elementos se definen como identidades de la MAP de factores generales (FG) en la Tabla 5 y como identidades de los factores individuales (FI) en la MAP de las Tablas 6 y 7.

Las características de las identidades

Para definir las identidades, nos basamos en conceptos de la teoría general de sistemas. En este sentido, el propio sistema es considerado como una "caja negra"; y en los diagramas de bloques y de flujo, se representan sus relaciones con el medio y con otros sistemas.

Se describe a los sistemas en términos de entradas y salidas. En nuestro razonamiento sistémico-matricial (RSM), las identidades se definen a partir de sus características documentales y por las características de las interacciones que pueden tener en la entrada o salida del proceso. Las características documentales pueden ser fotos, textos y archivos relacionados.

Imagen 2. Definición de identidad



Fuente: elaboración propia.

Los acoplamientos posibles

Los acoplamientos posibles (AP) son aquellos elementos de la MAP que no son las identidades generales (I.G.) ni las identidades individuales (I.I.). Por ejemplo:

En la Tabla 6:

1. Los acoplamientos A13 y A31 relacionan a la I.G. humano organizacional con la vehicular.
2. A71 y A17 relacionan las I.G. vehicular con vigilancia y registro.

En la Tabla 7:

1. El A'13 y A'31 relacionan la I.I. locomotora con el micro.
2. Los acoplamientos A'12 y A'21 relacionan la I.I. locomotora con el vagón.

Los AP (acoplamientos posibles) surgen de la combinación de todas las identidades definidas en el modelo del sistema. En el ejemplo del modelo n9, las nueve identidades generales crean [(NIG 2)-NIG] o setenta y dos combinaciones posibles, y estas a su vez crean identidades individuales con la misma cantidad de combinaciones, según la cantidad de factores individuales definidos. Aquí, se observa la necesidad de desarrollar una herramienta computarizada para poder recorrer todas las combinaciones.

Aplicaciones del RSM y MAP

En este apartado se realiza una introducción a las aplicaciones. No se las analiza de forma exhaustiva, sino que se pretende mostrar algunos principios y resultados obtenidos, ya que el estudio es extenso y todavía se encuentra en proceso de desarrollo.

Para poner en práctica el razonamiento sistémico-matricial (RSM) y la matriz de acoplamientos posibles (MAP) se desarrolló un software en lenguaje C#³, donde se utiliza una base de datos (BD) MySQL local para almacenar las matrices de acoplamientos posibles que se van creando a medida que se recopila información y se carga el sistema bajo análisis, para luego poder procesarlas y analizarlas desde distintos enfoques.

En primer lugar, se definió el método. Luego, se escribieron las líneas de código computacional para almacenar la información relevada y las tablas de características de las identidades en una base de datos local en forma de MAP. En la base también se pueden almacenar imágenes, textos, archivos relacionados, etc.

Aplicación según la propiedad emergente deseada

De acuerdo a distintas interpretaciones de los acoplamientos e interacciones posibles entre las distintas identidades de las MAPs, nos podríamos ubicar en distintos enfoques sistémicos.

El modelo sistémico considera a los accidentes como fenómenos emergentes. Son también “normales” o “naturales” en cuanto a que son algo que cabe esperar. Esto guarda relación con la noción de accidentes normales de Perrow (1984), aplicable a sistemas simples y complejos (Hollnagel, 2009).

A continuación, nos focalizaremos en el enfoque de prevención de fallas (Marchitto, 2011), en donde la propiedad emergente deseada será la “confiabilidad”.

Podemos detectar algunos emergentes definidos en la RES170/2018 del Ministerio de Transporte a través del RSM en los acoplamientos de la MAP. Por ejemplo, al “fallo activo” lo podemos identificar y registrar en el posible acoplamiento del ejemplo dado en Tabla 6 A11-A'13 entre locomotora a micro, o el A11 - A'31 entre micro a locomotora que están marcados en color amarillo en la tabla 8.

Tabla 8. Emergente identificado en la MAP A11 Vehicular como fallo activo

	Locomotora	Micro
Locomotora	Identidad	A'13: Colisión
Micro	A'31: Colisión	Identidad

Fuente: elaboración propia.

Las “barreras o defensas” las podemos asignar a los acoplamientos identificados como fallos activos. En la Tabla 9 se observa un ejemplo con la asignación de una barrera automática y el toque de silbato.

Tabla 9. Ejemplo de defensa asignada a los emergentes A11- A'13 y A11-A'31

Defensa	Locomotora	Micro
Locomotora	Identidad	A'13: Toque de silbato
Micro	A'31: Instalar barrera automática	Identidad

Fuente: elaboración propia.

Hasta aquí presentamos dos ejemplos sintéticos y simples de cómo el RSM y las MAP pueden contener al enfoque prevencionista. Esta idea será ampliada y perfeccionada a medida que avance la investigación. La incorporación de la barrera modificará la identidad A22 estructural de la Tabla 4 previamente definida, que en el ejemplo no tuvo en cuenta una barrera automática. Y la aplicación del silbato modificará la identidad A88 Normativa previamente definida, que no tuvo en cuenta la aplicación de silbato. Estas modificaciones a nivel de factores generales (FG) y de factores individuales (FI) modificarán los acoplamientos posibles (AP) y creará nuevas identidades y por ende modificará las propiedades del sistema.

Cuando la propiedad emergente deseada es el “control”, en lugar de la “confiabilidad”, nos adentramos en el enfoque de la teoría de control. Daremos un ejemplo

3. C# es un lenguaje de programación moderno, basado en objetos y con seguridad de tipos. C# permite a los desarrolladores crear muchos tipos de aplicaciones seguras y sólidas que se ejecutan en .NET.

simple para identificar una estructura de control a través del RSM y lo relacionaremos con una estructura de control basada en STAMP⁴ del *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*. Tabla 10 y 11. Matriz simplificada de los acoplamientos A13 y A31

A13 Vehicular - Humano organizacional	Conductor Locomotora
Locomotora	A'11

A31 Humano organizacional - Vehicular	Locomotora
Conductor Locomotora	A'11

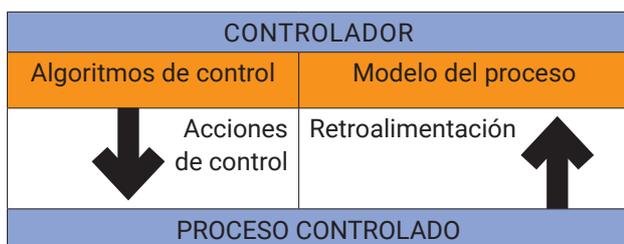
Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Estructura de control contenida en la MAP simplificada

Conductor		
A13 - A'11		A31 - A'11
Locomotora		

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 12 muestra una estructura de control entre el Conductor y la Locomotora comparable con la de la Imagen 4.



Fuente: elaboración propia.

Como se demuestra hasta aquí, el RSM también puede utilizarse desde el enfoque de la teoría de control, identificando estructuras en las MAPs, lo cual será desarrollado en futuras investigaciones, junto a las demás propiedades emergentes que se vayan identificando con el razonamiento sistémico-matricial (RSM).

4. The Systems Theoretic Accident Model and Process (STAMP) es un modelo teórico de accidentes y procesos que se basa en la teoría de sistemas de control para tratar de averiguar todo lo posible sobre los factores involucrados en un peligro, y proporcionar una guía clara en cuanto a la estructura de control que conduce al peligro.

Conclusiones

Se concluye parcialmente que la metodología del RSM permite la identificación de varios enfoques en una sola matriz de acoplamientos posibles general (MAP) y en sus MAP individuales, a partir de las cuales se pueden obtener distintas propiedades emergentes. Con la definición correcta de las identidades se pueden analizar accidentes por fallos de componentes y con el análisis de los acoplamientos posibles se puede analizar accidentes por interacción de componentes. Para avanzar en su desarrollo, resulta necesario continuar con la escritura del software presentado en este artículo de forma parcial, lo cual permitirá, a su vez, automatizar la base de datos y distintas partes del procedimiento para volverlo más inteligible.

Bibliografía

- Covello, A. y Muro, M. (2020), *Análisis sistémico de la pandemia del coronavirus. Un accidente normal*. Libro digital, EPUB.
- González, N. (2016). *El error humano en el análisis de accidentes ferroviarios*. *Revista de Ciencias Sociales*. Vol. IV, (158), 149-165.
- Hollnagel, E. (2009) *Barreras y prevención de accidentes*. Modus Laborandis.
- Ludwig von Bertalanffy (1976). *Teoría general de los sistemas*. Fondo de cultura económica.
- Marchitto, M. (2011). *El error humano y la gestión de seguridad: la perspectiva sistémica en las obras de James Reason*. *Laboreal*. Vol. VII (2), 1-12.
- Perrow, C. (1984). *Normal Accidents: Living With High Risk Technologies*. (Revised edition, 1999). Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Resolución 170 de 2018. Por medio de la cual se aprueba la primera directiva nacional de seguridad operacional ferroviaria. 3 de abril de 2018. B.O. N° 33842.

