

*RED IBEROAMERICANA INDUSTRIA 4.0*

**Proyecto de Red Temática CYTED**

# RED IBEROAMERICANA INDUSTRIA 4.0



- Proyecto de Red Temática CYTED
- CYTED: PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA PARA EL DESARROLLO
- **Industria 4.0:** *propone un aumento considerable de la cantidad de información disponible sobre el sistema de producción. Este incremento se debe entre otras cosas a los sensores Wireless, Tecnologías RFID, sistemas ciber-físicos, Internet de las cosas, aplicaciones de Big Data, y otras tecnologías. Esta información propia del proceso productivo y de otras áreas de la cadena de valor, suministrada en tiempo real, permite mejorar los procesos de toma de decisión, y particularmente, en las decisiones respecto a planificación de la producción.*
  - *En este sentido se estudiarán tanto los sistemas de información y los procesos de planificación para lograr una sustantiva mejora en la eficiencia de las PYMES. Los temas serán abordados por herramientas propias del campo de Big Data y Data Mining, Investigación Operativa, Sistemas e Inteligencia Artificial. **La agenda de investigación y trabajo será desarrollada en forma colaborativa entre los grupos empresariales y académicos, logrando de este modo contribuir al desarrollo de los entornos Industria 4.0 en Iberoamérica.***

# RED IBEROAMERICANA INDUSTRIA 4.0

- **Académicos:**

- Argentina (Universidad Nacional del Sur) – Coordinador: Fernando Tohmé,
- Uruguay (Universidad de la República) – Coordinador: Pedro Piñeyro
- Chile (Universidad de Santiago de Chile) – Coordinador: Óscar Vásquez
- Brasil (Universidad Federal do Rio Grande do Sul) – Coordinador: Marcus Ritt
- Colombia (Universidad de la Sabana) – Coordinador: Gonzalo Mejía
- Perú (Universidad de San Agustín) – Coordinador: Alexander Benavides
- España (Universidad de las Palmas de Gran Canaria) – Coordinador: Máximo Méndez Babey

- **Empresas:**

- Argentina
  - Empresa Ingeniería en Sistemas – Coordinador Ernesto Castagnet
  - Unión Industrial Bahía Blanca – Coordinadora Martín Goslino
- España
  - Corporación Tecnológica Andalucía – Coordinador Fabián Varas Sánchez.

- **Secretarías de Vinculación u organismo similar:**

- Argentina: Subsecretaría de Vinculación Tecnológica, Universidad Nacional del Sur - Coordinador Pablo Marinangelli (Paula Messina)

# Escalabilidad del Funcionamiento Óptimo de Redes de Sistemas Ciber-Físicos

Fernando Tohmé - Daniel Rossit

29 de Julio de 2019

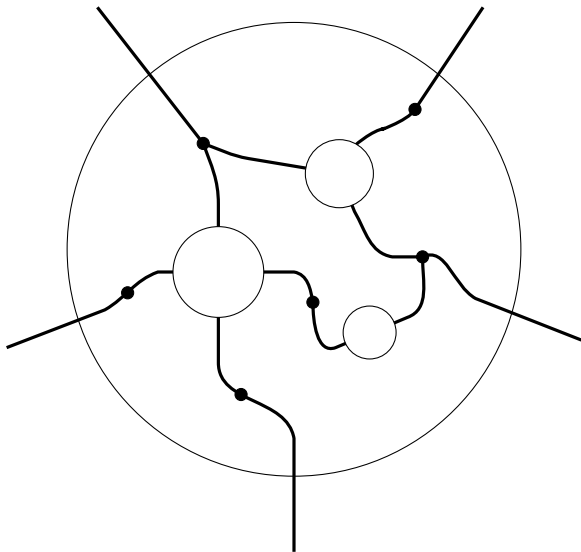
- Los Sistemas Ciber-Físicos (CPS, por sus siglas en inglés) son componentes fundamentales de los ambientes de producción **Industria 4.0**.
- Proveen soporte para la producción flexible distribuida. Pueden, en sí mismos, resolver el problema de optimización de asignar los recursos de menor costo para producir bienes con la mejor calidad.
- Esto es posible porque los CPS se pueden interconectar. De hecho, pueden conectarse y desconectarse de las redes que representan el sistema productivo.
- Conectar un nuevo CPS puede cambiar la forma en la que funciona el ambiente productivo.
- Lo que queremos estudiar es cómo interconectar sistemas de forma de preservar *escalabilidad*, es decir, preservando el comportamiento (la optimalidad, en este caso) de la red.

# Principio de Composicionalidad

- Lingüística: *“The meaning of a complex expression is determined by its structure and the meaning of its constituents”*.
- Ciencia de la Computación: *“Small programs can be put together to form larger ones”*.
- Compositionality is the principle that a system should be built by joining together (*composing*) simpler systems and that all reasoning about the system should be done recursively on the way that it was built.

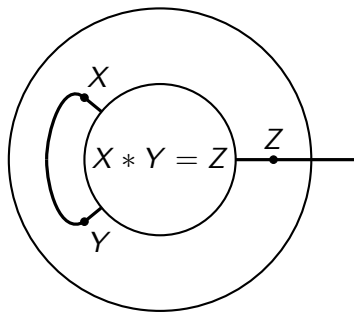
- *Society of Mind*: la mente humana está compuesta por una sociedad de *agencias*, que a su vez están compuestas por agencias menores (M. Minsky 1988).
- *Circuitos*: circuitos eléctricos pueden conectarse entre sí para crear circuitos más complejos (J. Baez - B. Fong 2015).
- *Procesos de Markov* (J. Baez - B. Fong - B. Pollard 2016).
- *Computación Cuántica*: el *entanglement* entre  $n$ -qubits tiene estructura composicional (B. Coecke - A. Kissinger 2010).

# Composicionalidad como cableado





- “A wiring diagram of wiring diagrams is a wiring diagram” .
- Cada círculo en la Figura 1, puede representar un circuito, una agencia mental, un  $n$ -qubit, etc.
- El modelo formal es llamado *Wiring Diagram Operad* (D. Spivak 2014).

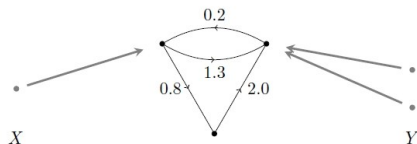


“all perfect squares”

# Cómo cablear entidades genéricas

- El punto crítico es cómo se conectan los componentes.
- Los elementos básicos a considerar son *cospans*, *operads* y un tipo especial de categoría (*hypergraph category*) que además de composición de morfismos tiene un producto tensorial.
- Veamos...

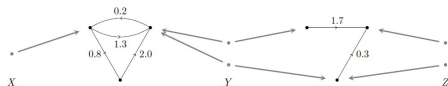
# Qué es un *cospan*?



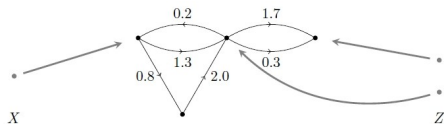
Aquí el grafo central puede interpretarse como un “circuito”, mientras que  $X$  e  $Y$  se pueden interpretar como *puertos de input y output*, respectivamente. Si el grafo es  $G$ ,  $X \rightarrow G \leftarrow Y$  es un *cospan* cuyo *apex* es  $G$ , mientras que  $X$  e  $Y$  son sus *pies*.

# Cómo se conectan *cospanns*?

Supongamos otro *cospann* que comparte  $Y$  con el anterior. Tenemos:



Esto es equivalente a conectar los dos “circuitos” para dar uno nuevo, con input  $X$  y output  $Z$ :

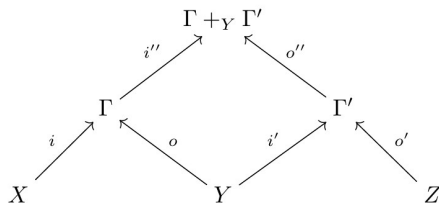


# Una categoría en la que los cospans son morfismos

- Queremos definir una entidad matemática llamada **categoría**, llamada  $\mathbf{Cospan}_C$  que consiste de:
  - **Objetos**: Inputs y Outputs (del tipo  $X, Y$ ) y “circuitos” (de tipo  $G$ ).
  - **Morfismos** (“funciones”): cospans entre **objetos**.
- Para que  $\mathbf{Cospan}_C$  esté bien definida tenemos que poder componer cospans para dar lugar a nuevos cospans.

# Composición de *cospan*s

Los morfismos en **Cospan** <sub>$\mathcal{C}$</sub>  se pueden componer así:



$\mathbf{Cospan}_{\mathcal{C}}$  se dice *monoidal simétrica*, es decir, consiste de los siguientes elementos:

- Un objeto inicial, al que denotaremos  $\emptyset$ , tal que para cada objeto  $A$  en  $\mathcal{C}$  existe un único morfismo  $! : \emptyset \rightarrow A$ .
- Un functor  $\sqcup : \mathbf{Cospan}_{\mathcal{C}} \times \mathbf{Cospan}_{\mathcal{C}} \rightarrow \mathbf{Cospan}_{\mathcal{C}}$  (el así llamado **coproducto** de  $\mathcal{C}$ ).
- Para cualquier par de objetos  $A$  y  $B$ ,  $A \sqcup B$  es isomorfo a  $B \sqcup A$ .



# La categoría de cableados

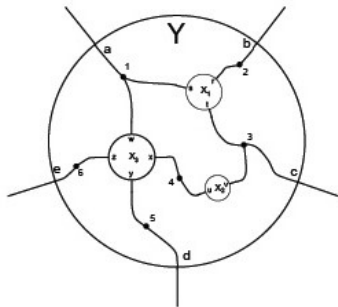
Llamaremos  $\mathbf{W}_\Delta$  a la categoría monoidal simétrica del tipo antedicho en la cual:

- A los objetos los llamamos *interfaces*. Los morfismos (cospans)  $X \rightarrow N \leftarrow Y$  son diagramas de cableado (*wiring diagrams*) y el apex  $N$  es el conjunto de *conexiones*.
- De esta forma podemos representar que conectamos a un conjunto de objetos  $X_1, X_2$  y  $X_3$  para dar lugar a un nuevo objeto  $Y$  como un cospan  $X_1 \sqcup X_2 \sqcup X_3 \rightarrow C \leftarrow Y$ .

# Representación operádica

El cospan  $X_1 \sqcup X_2 \sqcup X_3 \rightarrow C \leftarrow Y$  puede traducirse al siguiente diagrama de cableado (el morfismo operádico  $X_1, X_2, X_3 \rightarrow Y$ ), donde

- $Y$  se identifica con los puertos  $\{a, b, c, d, e\}$ , mientras que  $X_1 \equiv \{r, s, t\}$ ,  $X_2 \equiv \{u, v\}$  y  $X_3 \equiv \{w, x, y, z\}$ .
- $C$  consiste de los cables  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .



# Hypergraph Category

- Una *Hypergraph category* es una variante de categoría monoidal simétrica cuyos diagramas de cableado son *redes* (esto significa que, en particular, los cables se pueden unir y bifurcar).
- Una forma de describirla es como  $(\Lambda, H)$  donde  $\Lambda$  es un conjunto de tipos y  $H$  un functor que manda de  $\mathbf{W}_\Lambda$  en conjuntos, tal que:

$$\sqcup : H(X) \times H(Y) \rightarrow H(X \sqcup Y) \quad \emptyset : I \rightarrow H(\emptyset)$$

- Esto quiere decir que  $H$  define los **comportamientos** asociados a las **estructuras** representadas como diagramas de cableado.

# Representación categorial de CPS

Tenemos que definir la representación matemática de Sistemas Ciber-Físicos. Lo mejor es basarlos en sus funcionalidades:

*Cyber-physical systems combine cyber capabilities with physical capabilities to solve problems that neither part could solve alone (Platzer, 2018).*

Con esta descripción tenemos muchos ejemplos, desde autos hasta robots. Actúan físicamente en el mundo, bajo la guía de algoritmos discretos que ajustan sus *actuadores* basados en la lectura que los sensores hacen del estado físico del sistema.

# Representación categorial de CPS

Un CPS se puede definir como  $X = \langle I_X, O_X, S_X, \gamma_X, \rho_X \rangle$  con los siguientes elementos:

- Un conjunto de *inputs*  $I_X$ , cada uno se identifica con un sensor. Cada  $i_X \in I_X$  tiene un *tipo* (una cámara, por ejemplo, tiene un tipo  $\mathbb{R}^{2^{\mathbb{N}}}$  representando el hecho de que registra imágenes bidimensionales en el tiempo).
- Un conjunto de *outputs*  $O_X$ , cada uno identificado con un actuator. Cada uno de ellos también tiene un tipo, identificado con su posible acción (un brazo robótico puede hacer una serie de movimientos de tipo  $\mathbb{R}^{3^{\mathbb{N}}}$ , indicando un número de posiciones en el espacio tridimensional hasta alcanzar la posición indicada).

# Representación categorial de CPS

- Un conjunto de *estados internos*,  $S_X$ , sumalizando toda la información procesada por el CPS.
- Dos funciones:
  - $\gamma_X : I_X \times S_X \rightarrow S_X$ , representando la modificación del estado interno después de recibir nuevos inputs.
  - $\rho_X : S_X \rightarrow O_X$ , representando las ordenes a los actuadores, generando nuevos outputs.

# Representación categorial de CPS

Consideremos una categoría de CPS, con un conjunto de tipos común  $\Lambda$  de inputs y outputs, a la que llamaremos  $\mathcal{CPS}$ :

- Cada objeto es un CPS  $X = \langle I_X, O_X, S_X, \gamma_X, \rho_X \rangle$ .
- Dados dos objetos

$$X = \langle I_X, O_X, S_X, \gamma_X, \rho_X \rangle \quad \text{y} \quad X' = \langle I_{X'}, O_{X'}, S_{X'}, \gamma_{X'}, \rho_{X'} \rangle,$$

un morfismo es:

$$X \rightarrow X'$$

La existencia de un morfismo  $X \rightarrow X'$  indica que  $X$  es un subsistema de  $X'$ :

- 1  $I_X \subseteq I_{X'}$ , es decir que los sensores de  $X'$  leen al menos los mismos datos que  $X$ .
- 2  $O_X \subseteq O_{X'}$ , lo que quiere decir que  $O_{X'}$  los mismos actuadores que  $O_X$ .
- 3  $S_X \subseteq S_{X'}$ . Esto es, los estados internos de  $X$  son un subconjunto de los de  $X'$ .
- 4  $\gamma_X$  es la restricción de  $\gamma_{X'}$  sobre  $I_X \times S_X$ , mientras que  $\rho_X$  es la restricción de  $\rho_{X'}$  sobre  $S_X$ .



Consideremos la categoría monoidal simétrica  $\mathbf{W}_{CPS}$ . Por definición:

$$\mathbf{W}_{CPS} = \text{cospan}_{CPS}$$

- Cada CPS  $X$  es una **interface** de tipo  $\langle I_X, O_X \rangle$ .
- Morfismos  $X \rightarrow C \rightarrow X'$  definen **diagramas de cableado**. La interpretación es que existe un CPS  $C$  que conecta a  $X$  y  $X'$ .
- Esto se extiende a varios CPS:  $\phi : X^1 + X^2 + \dots + X^n \rightarrow \bar{X}$ .

Definimos el par  $\langle \mathcal{CPS}, \text{Bhv} \rangle$  tal que:

- $\text{Bhv} : \mathbf{W}_{\mathcal{CPS}} \rightarrow \bigcup_{X \in \mathcal{CPS}} S_X$ .
- Para cada  $X$  en  $\mathbf{W}_{\mathcal{CPS}}$ ,  $\text{Bhv}(X)$  representa el funcionamiento de  $X$ , codificado en sus estados internos.
- Se define una operación  $\hat{\cup}$  tal que dados dos estados internos  $s \in \text{Bhv}(X)$  y  $s' \in \text{Bhv}(X')$ , arroja un estado interno de  $X + X'$ .

Tenemos dos resultados:

## Proposition

*Para cada par de CPS,  $X$  y  $X'$ ,  $Bhv(X) \hat{\cup} Bhv(X') = Bhv(X + X')$ .*

Más aún  $\emptyset = Bhv(X^\emptyset)$ , donde  $X^\emptyset$  es el objeto inicial de  $\mathbf{W}_{CPS}$ .

## Proposition

*$Bhv$  es un functor monoidal laxo.*

- Los sistemas ciber físicos pueden combinarse para generar sistemas más grandes y complejos.
- El problema de diseño es combinarlos de tal manera que el resultado funcione óptimamente.
- Pero para que esto funcione tenemos que asegurarnos de que las conexiones no generen comportamientos inesperados.
- Lo que presentamos es la base matemática para un lenguaje de diseño que asegure que el comportamiento del sistema complejo puede describirse en términos de los comportamientos de los CPS individuales.

Muchas Gracias!!