

IoT++: An Enhanced Interoperability Based on Semantic for IoT Environments

Ana Aguilera¹ Dominique Garrido¹
Irvin Dongo² María Cornejo²

¹Escuela de Ing Informática, Universidad de Valparaíso, Chile

²Dept de Ing Eléctrica y Electrónica, Universidad Católica San Pablo, Perú

50^a Conferencia Latinoamericana de Informática
(L CLEI 2024)



Outline

- 1 Contexto: Interoperabilidad Semántica en IoT
- 2 IoTO++: Nuestra propuesta
- 3 Validaciones
- 4 Conclusiones y trabajos futuros

Agenda

- 1 Contexto: Interoperabilidad Semántica en IoT
- 2 IoTO++: Nuestra propuesta
- 3 Validaciones
- 4 Conclusiones y trabajos futuros

Contexto

Interoperabilidad Semántica en IoT



Sistemas IoT

- Dispositivos y sensores que observan múltiples actividades en diferentes dominios del quehacer humano.
- Heterogeneidad de sus múltiples fuentes con diferentes estándares, protocolos y sistemas operativos.

Ontologías

- Marco estructurado para definir y categorizar los datos y sus relaciones.
- Representación y gestión del conocimiento.
- Base para comprensión compartida e interpretación coherente de la información.



Interoperabilidad

- Se refiere a la capacidad de diferentes dispositivos y sistemas para comunicarse y compartir datos de manera efectiva, lo que permite una mejor gestión y coordinación de los recursos.
- Ofrece ventajas considerables en términos de eficiencia, conveniencia y recopilación de datos.

Ontologías + IoT

Marco semántico establece las bases para la interoperabilidad en IoT

- Asegurando que los dispositivos y sistemas no solo intercambien datos, sino que también entiendan su significado de manera uniforme y coherente.
- Permitiendo que los sistemas IoT no solo se comuniquen, sino que también “comprendan” y actúen de manera más autónoma y eficaz sobre la información intercambiada.

Limitaciones actuales (1/2)

- Lograr interoperabilidad semántica universal con dispositivos y sistemas heterogéneos que demandan características de conocimientos particulares de acuerdo a cada contexto de aplicación.
- Consumo energético ineficiente e insostenible y la dispersión de la información relacionada con él.
 - No existen medios suficientes para controlar, monitorear, estimar y adaptar el uso de energía de los sistemas IoT en respuesta a las situaciones dinámicas y circunstancias que los influyen.
 - Existen muchos estándares y métricas que no proveen una manera conveniente de diseñar soluciones que requieran interoperabilidad e intercambio de información energética entre industrias, estándares y métricas relacionadas.

Limitaciones actuales (2/2)

- Aspectos asociados a privacidad y seguridad de los datos.
 - Protección de la privacidad es compleja y difícil de manejar.
 - Ataques utilizando dispositivos de bajo rendimiento.
 - Aplicación de nuevas tecnologías y análisis de datos para inferir datos privados.
- Ética en el uso de IoT.
 - Situaciones que pongan en peligro valores humanos esenciales o causar daños físicos o emocionales.

Agenda

- 1 Contexto: Interoperabilidad Semántica en IoT
- 2 **IoT++: Nuestra propuesta**
- 3 Validaciones
- 4 Conclusiones y trabajos futuros

IoT++: Ontología mejorada para IoT

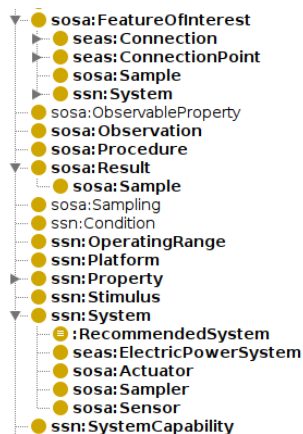


Propuesta

Sensor, Observation, Sample, and Actuator (SOSA) Ontology: *Interoperabilidad*

- Representa la interacción entre entidades que participan en actividades de observación, actuación y muestreo.
- Versión rediseñada de la ontología W3C-XG Semantic Sensor Network.
- Considera conceptos relacionados a la descripción de los elementos del sistema de IoT (*sosa:sensor*, *sosa:Sampler*, *sosa:Actuator*) y los datos que generan (*sosa:Observation*, *sosa:Result*, *sosa:Stimulus*).

IoT++ extiende de SOSA clases como: *sosa:phenomenonTime* y *sosa:resultTime* para un anclaje espacio-temporal de los datos.



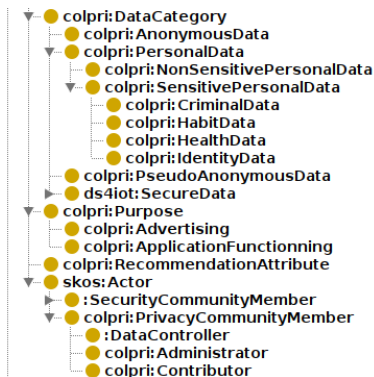
Propuesta

IoT-Collaborative Privacy Protection Knowledge Management Ontology (ColPri):

Seguridad y privacidad

- Conceptos como la normativa, las certificaciones y la procedencia, métodos de control de acceso y los mecanismos de autenticación.
- Actores envueltos en la seguridad de los datos como *ds4iot:CapabilityManager*, *ds4iot:AuthenticationProvider* y *ds4iot:CryptoManager*
- Categorización de los datos seguros: *ds4iot:SecureData* con sus subclases *ds4iot:ProtectedData* y *ds4iot:SecretData*.
- Protección de datos: *ds4iot:CryptoManager*, *ds4iot:EncryptedData* o *ds4iot:hiddenData*.
- Pseudononimización o anonimización: *PseudoAnonymousData* y *colpri:AnonymousData*.

En IoT+++, se creó la clase *:SecurityCommunityMember* para incluir a todas estas clases.

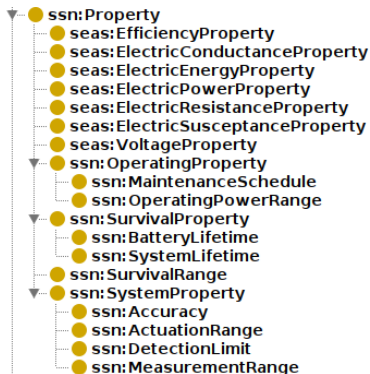


Propuesta

Smart Energy- Aware Systems Ontology (SEAS): *Consciencia del medio ambiente*

- Tipos de Energía consumidos por los elementos del sistema IoT:
seas:ElectricEnergyProperty y
seas:ElectricPowerEnergy
- Tipos de Energía que utilizan/producen los sistemas IoT: *seas:ElectricEnergy*,
seas:HeatEnergy.

Tomamos de SSN clases como:
ssn:OperatingPowerRange,
ssn:BatteryLifetime y
ssn:SystemLifetime que tienen énfasis
en la energía requerida para el
funcionamiento de los elementos IoT



Ethics: Aspectos éticos

-
- ```

graph TD
 Root((skos: Concept)) --> EC[":EthicCategory"]
 Root --> EM[":EthicMode"]
 EC --> D[":Disliked"]
 EC --> F[":Forbidden"]
 EC --> M[":Mandatory"]
 EC --> P[":Permissible"]
 EC --> R[":Recommended"]
 EM --> Def[":Default"]
 EM --> Mil[":Mild"]
 EM --> Str[":Stringent"]
 EM --> S[":Strong"]

```
- skos: Concept
    - :EthicCategory
      - :Disliked
      - :Forbidden
      - :Mandatory
      - :Permissible
      - :Recommended
    - :EthicMode
      - :Default
      - :Mild
      - :Stringent
      - :Strong

# Agenda

- 1 Contexto: Interoperabilidad Semántica en IoT
- 2 loTO++: Nuestra propuesta
- 3 Validaciones
- 4 Conclusiones y trabajos futuros

Cardinale et al.<sup>1</sup> propone un proceso metodológico para comparar cualitativa y cuantitativamente ontologías a nivel:

- Léxico: incluye aspectos lingüísticos, de vocabulario y sintácticos. Usa métricas de similitud para analizar la proximidad de conceptos y vocabulario relacionado dentro del dominio.
- Estructural: usa el framework OQuaRE<sup>2</sup> considerando su modelo y métricas de calidad. OQuaRE está basado en SQuaRE un estándar para la evaluación de calidad del software.
- Conocimiento del dominio: considera su nivel de cobertura.

---

<sup>1</sup>[doi:10.1108/IJWIS-03-2021-0036](https://doi.org/10.1108/IJWIS-03-2021-0036)

<sup>2</sup>[doi/10.3316/ielapa.265844843145749](https://doi.org/10.3316/ielapa.265844843145749)



### Similitud lingüística (LS)

- *StringSim*: la similitud de cadenas usando la distancia de Levenshtein.
- *DocSim*: la similitud de documentos relacionada a la ocurrencia de un recurso en la ontología (TFIDFVectorizer, scikit-learn de Python).
- $LS(O_i, O_j) = \gamma * StringSim(O_i, O_j) + \sigma * DocSim(O_i, O_j)$  con  $\gamma = \sigma = 0.5$

| Pair            | StringSim   | DocSim      | LS          |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| SEAS/SSN-SOSA   | <b>0.80</b> | 0.37        | <b>0.59</b> |
| SEAS/colpri     | 0.31        | 0.23        | 0.27        |
| SEAS/ds4IoT     | 0.39        | 0.20        | 0.29        |
| SSN-SOSA/ColPri | 0.35        | 0.23        | 0.29        |
| SSN-SOSA/ds4IoT | 0.33        | 0.21        | 0.27        |
| ColPri/ds4IoT   | 0.62        | <b>0.63</b> | <b>0.62</b> |

# Validaciones

## Validaciones: Nivel estructural

| Ontología | Clases | Relaciones |       |       | Propiedades | Anotaciones |
|-----------|--------|------------|-------|-------|-------------|-------------|
|           |        | is-a       | has-* | other |             |             |
| SOSA      | 41     | 129        | 73    | 0     | 44          | 286         |
| SEAS      | 101    | 83         | 50    | 90    | 140         | <b>741</b>  |
| ColPri    | 68     | 60         | 29    | 0     | 21          | 77          |
| ds4IoT    | 27     | 25         | 15    | 0     | 5           | 2           |
| IoTO++    | 153    | 144        | 76    | 0     | 52          | 392         |

# Validaciones

Validaciones: Nivel estructural usando el Puntaje de Métricas OQUARE<sup>3</sup>

- Lack of Cohesion in Methods (LCOM<sub>Onto</sub>): The semantic and conceptual relatedness of classes can be used to measure the separation of responsibilities and independence of components of ontologies.  $LCOM_{Onto} = \sum path(|C(leaf)i|)/m$ , where  $path|C(leaf)i|$  is the length of the path from the leaf class  $i$  to *Thing*, and  $m$  is the total number of paths in the ontology.
- Weighted Method Count (WMC<sub>Onto</sub>): Mean number of properties and relationships per class.  $WMC_{Onto} = (\sum |P_{Ci}| + \sum |R_{Ci}|) / \sum |Ci|$ , where  $Ci$  is the  $i$ -th class in the ontology.
- Depth of subsumption hierarchy (DIT<sub>Onto</sub>): Length of the largest path from *Thing* to a leaf class.  $DIT_{Onto} = Max(\sum D|Ci|)$ , where  $Ci$  are the classes and  $D|Ci|$  is the length of the path from the  $i$ th leaf class of the ontology to *Thing*.
- Number of Ancestor Classes (NAC<sub>Onto</sub>): Mean number of ancestor classes per leaf class. It is the number of direct superclasses per leaf class.  
 $NAC_{Onto} = \sum |Sup_{C(Leaf)i}| / \sum |C(leaf)i|$
- Number of Children (NOC<sub>Onto</sub>): Mean number of direct subclasses. It is the number of relationships divided by the number of classes minus the relationships of *Thing*.  
 $NOC_{Onto} = \sum |R_{Ci}| / (\sum |Ci| - |R_{Thing}|)$

<sup>3</sup><https://www.irit.fr/publis/MELODI/OQuareExpertSystemAppli2013.pdf>

# Validaciones

Validaciones: Nivel estructural usando el Puntaje de Métricas OQUARE

| <b>Score</b><br><b>Metric</b> | 1       | 2        | 3        | 4        | 5     |
|-------------------------------|---------|----------|----------|----------|-------|
| <b>LCOnto</b>                 | > 8     | (6-8]    | (4,6]    | (2, 4]   | <=2   |
| <b>WMCOnto</b>                | > 15    | (11,15]  | (8,11]   | (5,8]    | <=5   |
| <b>DITOnto</b>                | > 8     | (6-8]    | (4,6]    | (2, 4]   | [1,2] |
| <b>NACOnto</b>                | > 8     | (6-8]    | (4,6]    | (2, 4]   | [1,2] |
| <b>NOCOnto</b>                | > 12    | (8-12]   | (6,8]    | (3,6]    | [1,3] |
| <b>CBOOnto</b>                | > 8     | (6-8]    | (4,6]    | (2, 4]   | [1,2] |
| <b>RFCOnto</b>                | > 12    | (8-12]   | (6-8]    | (3-6]    | [1-3] |
| <b>NOMOnto</b>                | > 8     | (6-8]    | (4,6]    | (2, 4]   | < =2  |
| <b>RROnto</b>                 | [0,20]% | (20-40)% | (40-60)% | (60-80)% | > 80% |
| <b>AROnto</b>                 | [0,20]% | (20-40)% | (40-60)% | (60-80)% | > 80% |
| <b>INROnto</b>                | [0,20]% | (20-40)% | (40-60)% | (60-80)% | > 80% |
| <b>CROnto</b>                 | [0,20]% | (20-40)% | (40-60)% | (60-80)% | > 80% |
| <b>ANOnto</b>                 | [0,20]% | (20-40)% | (40-60)% | (60-80)% | > 80% |
| <b>TMOnto</b>                 | > 8     | (6-8]    | (4,6]    | (2, 4]   | (1,2] |

# Validaciones

## Validaciones: Nivel estructural usando el Puntaje de Métricas OQUARE

| Métricas                                        | SSN-SOSA |         | SEAS  |         | ColPri |         | ds4IoT |         | IoTO++ |         |
|-------------------------------------------------|----------|---------|-------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
|                                                 | Valor    | Puntaje | Valor | Puntaje | Valor  | Puntaje | Valor  | Puntaje | Valor  | Puntaje |
| <i>Lack of Cohesion in Methods (LCOMOnto)</i>   | 3.778    | 4       | 2.417 | 4       | 3.971  | 4       | 1.600  | 5       | 2.531  | 4       |
| <i>Weigh method per class (WMCOnto)</i>         | 6.000    | 4       | 1.061 | 5       | 2.755  | 5       | 1.330  | 5       | 2.183  | 5       |
| <i>Depth of subsumption hierarchy (DITOnto)</i> | 4.000    | 4       | 3.000 | 4       | 5.000  | 3       | 3.000  | 4       | 5.000  | 3       |
| <i>Number of Ancestor Concepts (NACOnto)</i>    | 5.611    | 3       | 1.621 | 5       | 1.816  | 5       | 1.666  | 5       | 0.854  | 5       |
| <i>Number of Children Concepts (NOCOnto)</i>    | 4.280    | 4       | 3.435 | 4       | 3.000  | 5       | 2.500  | 5       | 4.028  | 4       |
| <i>Coupling between Objects (CBOOnto)</i>       | 0.651    | 5       | 0.804 | 5       | 0.897  | 5       | 1.923  | 5       | 1.000  | 5       |
| <i>Response for a concept (RFCOnto)</i>         | 0.651    | 0       | 3.390 | 4       | 1.435  | 5       | 1.250  | 5       | 1.293  | 5       |
| <i>Number of properties (NOMOnto)</i>           | 1.073    | 5       | 1.386 | 5       | 0.308  | 5       | 0.185  | 5       | 0.339  | 5       |
| <i>Relationship Richness (RROnto)</i>           | 17%      | 1       | 51%   | 3       | 19%    | 1       | 11%    | 1       | 21%    | 2       |
| <i>Attribute Richness (AROnto)</i>              | 129%     | 5       | 100%  | 5       | 275%   | 5       | 174%   | 5       | 418%   | 5       |
| <i>Relationships per concept (INROnto)</i>      | 492%     | 5       | 131%  | 5       | 130%   | 5       | 148%   | 5       | 128%   | 5       |
| <i>Annotation Richness (ANOnto)</i>             | 697%     | 5       | 733%  | 5       | 113%   | 5       | 7%     | 1       | 256%   | 5       |
| <i>Tangledness (TMOnto)</i>                     | 0.674    | 5       | 0.781 | 5       | 0.884  | 5       | 0.890  | 5       | 0.874  | 5       |

<https://github.com/Alex23013/ontoSLAM/tree/main/formal-validation>

# Validaciones

Validaciones: Nivel estructural usando el Puntaje de Métricas OQUARE

Modelo de Calidad considera las siguientes categorías:

- Estructural
- Adecuación Funcional
- Fiabilidad
- Operabilidad
- Compatibilidad
- Transferibilidad y
- Mantenibilidad

# Validaciones

Validaciones: Nivel estructural usando el Puntaje de Métricas OQUARE

Adecuación Funcional: capacidad de las ontologías para proporcionar funciones concretas. Subcaracterísticas evaluadas:

# Validaciones

Validaciones: Nivel estructural usando el Puntaje de Métricas OQUARE

Adecuación Funcional: capacidad de las ontologías para proporcionar funciones concretas. Subcaracterísticas evaluadas:

- Adquisición de conocimientos - representación: capacidad de la Ontología para representar el conocimiento adquirido. Métricas: ANOnto, RROnto y NOMOnto.



# Validaciones

Validaciones: Nivel estructural usando el Puntaje de Métricas OQUARE

Adecuación Funcional: capacidad de las ontologías para proporcionar funciones concretas. Subcaracterísticas evaluadas:

- Adquisición de conocimientos - representación: capacidad de la Ontología para representar el conocimiento adquirido. Métricas: ANOnto, RROnto y NOMOnto.
- Reutilización del conocimiento: grado en que el conocimiento de la ontología puede ser utilizado para construir otras ontologías. Métricas: ANOnto, AROnto, INROnto, NOMOnto y LCOMOnto.

# Validaciones

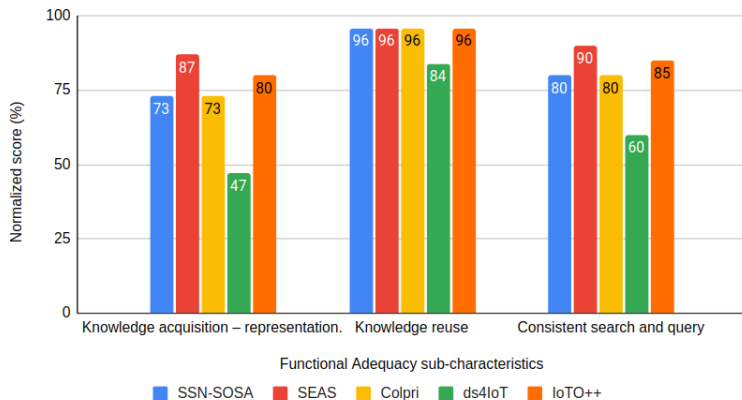
Validaciones: Nivel estructural usando el Puntaje de Métricas OQUARE

Adecuación Funcional: capacidad de las ontologías para proporcionar funciones concretas. Subcaracterísticas evaluadas:

- Adquisición de conocimientos - representación: capacidad de la Ontología para representar el conocimiento adquirido. Métricas: ANOnto, RROnto y NOMOnto.
- Reutilización del conocimiento: grado en que el conocimiento de la ontología puede ser utilizado para construir otras ontologías. Métricas: ANOnto, AROnto, INROnto, NOMOnto y LCOMOnto.
- Búsqueda y consulta consistente: grado en que el modelo y la estructura de la ontología, proporcionan un contexto semántico para evaluar cuáles son los datos deseados por los usuarios, permitiendo mejores métodos de búsqueda y consulta. Métricas: ANOnto, RROnto, AROnto y INROnto.

# Validaciones

Validaciones: Nivel estructural usando el Puntaje de Métricas OQUARE



# Validaciones

## Validaciones: Nivel de conocimiento

Considera lo bien que se cubre el conocimiento del dominio y cómo se mejoran los resultados de la aplicación IoT mediante el uso de la ontología.

### 1. Interoperability:

- (a) IoT elements description
- (b) IoT data description
- (c) Spatio-temporal anchoring of data
- (d) Automated Orchestration
- (e) Standardized Protocols

### 2. Data Privacy:

- (a) Privacy Policies
- (b) Privacy Data Actors
- (c) Sensitive and non-sensitive data
- (d) Consent
- (e) Data Protection Principles

### 3. Security:

- (a) Secure Data
- (b) Categorizes Access Control
- (c) Regulations & Certifications
- (d) Data Security Actors
- (e) Data Protection Techniques

### 4. Environmental Awareness:

- (a) IoT elements Energy Consumption
- (b) Energy Types Categorization

### 5. Ethics:

- (a) Ethics Categories
- (b) Ethics Modes
- (c) Ethics Actors
- (d) Legislations

Figure: Gold Standard

# Validaciones

## Validaciones: Nivel de conocimiento

Resultado de la evaluación de Cobertura del Conocimiento donde se evidencia loTO++ alcanza la mejor adecuación de la ontología pues considera todos los aspectos críticos lo que la hace más general.

| Ontologies | Interoperability |     |     |     |     | Data Privacy |     |     |     |     | Security |     |     |     |     | Environmental Awareness |     | Ethics |     |     |     | Questions answered |
|------------|------------------|-----|-----|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-------------------------|-----|--------|-----|-----|-----|--------------------|
|            | (a)              | (b) | (c) | (d) | (e) | (a)          | (b) | (c) | (d) | (e) | (a)      | (b) | (c) | (d) | (e) | (a)                     | (b) | (a)    | (b) | (c) | (d) | %                  |
| SOSA       | ✓                | ✓   | ✓   |     | ✓   |              |     |     |     |     |          |     |     |     |     | ✓                       |     |        |     |     |     | 23.81              |
| SEAS       |                  | ✓   |     | ✓   | ✓   |              |     |     |     |     |          |     |     |     |     | ✓                       | ✓   |        |     |     |     | 23.81              |
| ColPri     |                  |     | ✓   |     |     | ✓            | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |          |     |     |     | ✓   |                         |     |        |     |     |     | 19.05              |
| ds4IoT     |                  |     |     |     |     |              |     |     |     |     | ✓        | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |                         |     |        |     |     |     | 23.81              |
| loTO++     | ✓                | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓            | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓        | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓                       | ✓   | ✓      | ✓   | ✓   | ✓   | 100%               |

# Agenda

- 1 Contexto: Interoperabilidad Semántica en IoT
- 2 loTO++: Nuestra propuesta
- 3 Validaciones
- 4 Conclusiones y trabajos futuros

# Conclusiones y trabajos futuros

## Conclusiones y trabajos futuros

### Resumen

- Este trabajo presenta una ontología mejorada en el contexto de la interoperabilidad llamada loTO++ que incluye aspectos críticos como la consciencia energética, la seguridad y privacidad de los datos y aspectos éticos.



- La ontología se diseña, implementa y valida teniendo en cuenta diferentes niveles como el léxico, la estructura y el conocimiento del dominio.

# Conclusiones y trabajos futuros

## Conclusiones y trabajos futuros

### Trabajos futuros

- Aunque las ontologías pretenden ser de alto nivel para ser reutilizables y fáciles de aplicar en diferentes escenarios. La categoría de conocimiento de ética, leyes y reglamentos está vinculada a un carácter más especializado, por lo que el módulo de ética propuesto podría ampliarse:
  - Especificaciones de leyes y reglamentos por país.
  - Adaptarse a las normas internacionales (Unión Europea, APEC y OCDE).
- La validación posterior podría incluir evaluaciones empíricas del rendimiento de loTO++ en entornos reales.



# Gracias!

**ana.aguilera@uv.cl**

Este estudio fue financiado por PROCENCIA como entidad ejecutora de CONCYTEC bajo el acuerdo de subvención no.PE501083407-2023-PROCENCIA, proyecto: Repositorio Semántico y Distribuido para Dispositivos de Bajos Recursos y Rápida Respuesta en Turismo Urbano.

