Mecanismos de adaptación autonómica de arquitectura software para la plataforma Smart Campus UIS

Daniel David Delgado Cervantes

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de Sistemas

Director

PhD. Gabriel Rodrigo Pedraza Ferreira

Escuela De Ingeniería De Sistemas e Informática

Codirector

MSc. Henry Andrés Jiménez Herrera

Escuela De Ingeniería De Sistemas e Informática

Universidad Industrial de Santander

Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela De Ingeniería De Sistemas E Informática

14 de septiembre de 2023

Dedicatoria

Agradecimientos

Contenido

Lista de figuras

Lista de tablas

Glosario

IoT: Internet of Things

LDA: Lenguaje de Descripción de Arquitectura (Architecture Description Language)

Introducción

La computación autonómica, concebida inicialmente por IBM en el año 2001, se refiere al uso de sistemas auto-gestionados con la capacidad de operar y adaptarse, o en lo posible, sin la intervención de un ser humano. En este sentido, este acercamiento tiene como objetivo la creación de sistemas computacionales capaces de reconfigurarse en respuesta a cambios en las condiciones del entorno de ejecución al igual que los objetivos del negocio (Horn, 2001).

Esta autonomía es adquirida con el uso de ciclos de control, en el caso de la computación autonómica, de los ciclos más populares es el ciclo MAPE-K, sigla de *Monitor Analyze Plan Execute - Knowledge* (Arcaini, Riccobene, y Scandurra, 2015). Estos le dan la capacidad al sistema de monitorear tanto su estado actual como el entorno en el que este se encuentra, analizar la información recolectada para luego planear y ejecutar los cambios requeridos sobre el sistema a partir de una base de conocimiento (Rutanen, 2018).

Una de las áreas que pueden verse especialmente beneficiadas de la computación autonómica es la del internet de las cosas (IoT). Algunos de estos aspectos están relacionados con la heterogeneidad de estos dispositivos, en cuanto a marcas, protocolos y características; la dinamicidad, en cuanto al movimiento que estos presentan entre entornos de ejecución o incluso una desconexión; al igual que la distribución geográfica de estos lo cual dificulta la intervención directa sobre ellos (Tahir, Mamoon Ashraf, y Dabbagh, 2019).

Esto puede verse el Smart Campus UIS, una plataforma IoT de la Universidad Industrial de Santander, que permite usar dispositivos con el fin de monitorear y recolectar de información en tiempo real con el objetivo de apoyar la toma de decisiones, mejora de servicios, entre otros (Jiménez, Cárcamo, y Pedraza, 2020).

Ahora, esta plataforma ha tenido esfuerzos en el desarrollo de características propias de un sistema autonómico. Uno de estos ha sido la integración de mecanismos para la auto-descripción de la arquitectura desplegada en un momento dado (Jiménez Herrera, 2022). En el contexto de la computación autonómica, esta capacidad hace parte del monitoreo dentro

del ciclo de control.

Partiendo de lo anterior, y con la intención de dar continuidad con los esfuerzos de desarrollo realizados en Smart Campus UIS, se plantea como caso de estudio, a partir de las capacidades de auto-descripción que la plataforma, se pretende el proveer a esta la capacidad de auto-configuración a partir de un conjunto de mecanismos de adaptación que permitan, desde la definición de un objetivo a lograr, la alteración de la arquitectura desplegada.

1 Planteamiento del problema

La complejidad de los sistemas computacionales tiene origen en diversos factores. El aumento de la cantidad de dispositivos que los componen; la heterogeneidad debido a diferentes marcas, protocolos y características; e incluso las cambiantes condiciones de sus entornos de ejecución; dificulta la administración de los sistemas computacionales (Salehie y Tahvildari, 2005).

Una de las posibles maneras de dar solución a esta problemática, en cuanto al manejo de sistemas, está en el área de la computación autonómica. Este acercamiento basado en conceptos biológicos busca solventar los problemas de complejidad, heterogeneidad e incertidumbre (Salehie y Tahvildari, 2005) a partir de la abstracción de las metas de los administradores y delegación del manejo del sistema a sí mismo (Lalanda, Diaconescu, y McCann, 2014).

Considerando lo anterior, una de las aplicaciones de la computación autonómica, dentro del IoT, son los Smart Campus; una variación de las Smart Cities en las cuales se busca la recolección de información y monitoreo en tiempo real con el fin de apoyar la toma de decisiones, mejora de servicios, entre otros (Min-Allah y Alrashed, 2020). Es en este tipo de aplicaciones donde los problemas, en especial la heterogeneidad, dinamicidad, al igual que la distribución geográfica; donde la reducción de la dependencia de intervención humana, facilitaría el manejo de estos.

De lo anterior, surge la pregunta del cómo realizar dichas adaptaciones a la arquitectura, o estado del sistema. Qué clase de mecanismos y requerimientos han de ser satisfechos con

el fin de considerar, a un sistema computacional, con la capacidad de auto-adaptarse dados unos objetivos o metas establecidas por los administradores del sistema.

Dentro del marco del presente proyecto, se tiene Smart Campus UIS, una plataforma de IoT de la Universidad Industrial de Santander, en la cual se han realizado implementaciones parciales de una arquitectura autonómica con capacidad de auto-describirse (Jiménez Herrera, 2022), una de las características principales de un sistema autonómico (Horn, 2001).

Dicho esto, se busca explorar algunas de las maneras en las que se realizan adaptaciones con características autonómicas en sistemas computacionales. De esto, se buscaría probar un conjunto de estos mecanismos de modificación del estado, tomando como caso de estudio la implementación de estos en la plataforma de Smart Campus UIS.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

- Diseñar un conjunto de mecanismos autonómicos para permitir la adaptación de la Arquitectura Software IoT respecto a un modelo objetivo en la plataforma Smart Campus UIS

2.2 Objetivos Específicos

- Proponer una notación (lenguaje) para describir una arquitectura objetivo de un sistema software IoT.
- Diseñar un mecanismo para determinar las diferencias existentes entre una arquitectura actual en ejecución y una arquitectura objetivo especificada.
- Diseñar un conjunto de mecanismos de adaptación que permitan disminuir las diferencias entre la arquitectura actual y la arquitectura objetivo.
- Evaluar la implementación realizada a partir de un conjunto de pruebas con el fin de establecer la efectividad de los mecanismos usados.

3 Estado del Arte

Con el objetivo de explorar a fondo el panorama actual de la computación autonómica, y en particular, los mecanismos de adaptación de arquitecturas de software y los requisitos fundamentales para su implementación, se llevó a cabo una revisión de la literatura en diversas bases de datos. Esta revisión abarcó un recorrido que partió de una visión general y se adentró en aspectos cada vez más específicos. Durante este proceso, se examinaron detalladamente las propuestas y componentes clave de sistemas de software autonómicos, así como las diversas nociones relacionadas con notaciones, algoritmos para la comparación de estructuras de datos y los mecanismos esenciales para la adaptación de arquitecturas de software.

3.1 Computación Autonómica

El concepto de computación autonómica, definido inicialmente por IBM (2001), se refiere a un conjunto de características que presenta un sistema computacional el cual le permite actuar de manera autónoma, o auto-gobernarse, con el fin de alcanzar algún objetivo establecido por los administradores del sistema (Lalanda y cols., 2014).

Los 8 elementos clave, definidos por IBM, que deberían presentar este tipo de sistemas son:

1. Auto-conocimiento: habilidad de conocer su estado actual, las interacciones del sistema.
2. Auto-configuración: capacidad de reconfigurarse frente a los constantes cambios en el entorno.
3. Auto-optimización: búsqueda constante de optimizar el funcionamiento de sí mismo.
4. Auto-sanación: aptitud de restaurar el sistema en el caso de que se presenten fallas.
5. Auto-protección: facultad de protegerse a sí mismo de ataques externos.

6. Auto-conciencia: posibilidad de conocer el ambiente en el que el sistema se encuentra.

7. Heterogeneidad: capacidad de interactuar con otros sistemas de manera cooperativa.

8. Abstracción: ocultar la complejidad a los administradores del sistema con objetivos de alto nivel de abstracción.

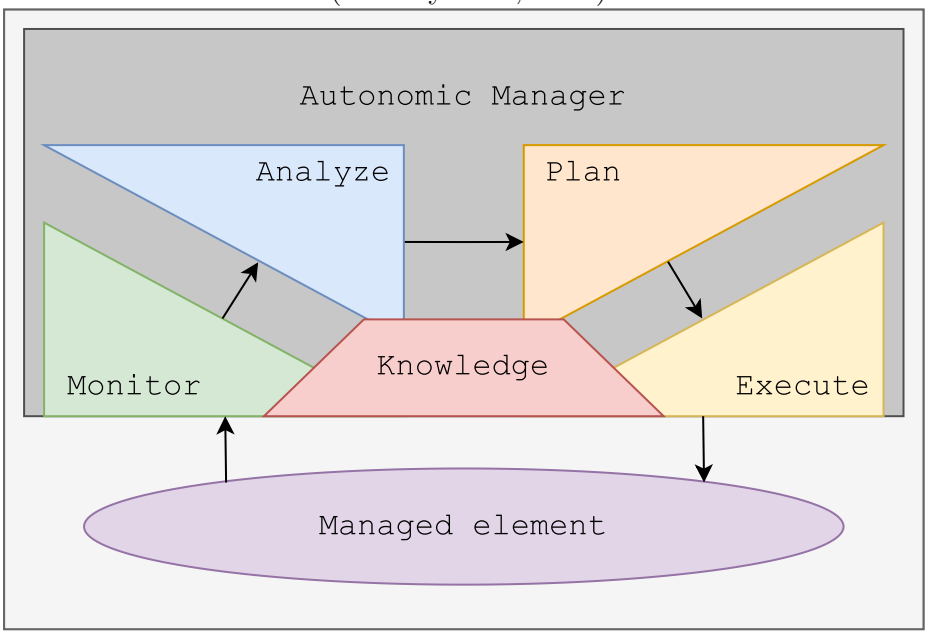
En el caso de que un sistema tenga una implementación parcial de estas características, este podría considerarse autonómico. En este sentido debería tener la capacidad de lidiar con los problemas como la complejidad, heterogeneidad e incertidumbre (Salehie y Tahvildari, 2005) al igual que reducir la cantidad de recursos tanto técnicos como humanos requeridos para mantener los sistemas en funcionamiento.

3.1.1 MAPE-K

IBM, en cuanto a la implementación de las características, propone una modelo de ciclo auto-adaptativo, denominado MAPE-K (Krikava, 2013). Este acercamiento, compuesto de cinco fases, es uno de ciclos de control más usado en implementaciones de sistemas auto-adaptativos y computación autonómica (Arcaini y cols., 2015). En la figura 1, se presentan las fases que *manejador* debe desarrollar para así administrar cada uno de los elementos del sistema computacional basado en una base de conocimiento común (Gorla, Pezzè, Wuttke, Mariani, y Pastore, 2010).

Figura 1: El ciclo auto-adaptativo MAPE-K.

(Gorla y cols., 2010)



Cada una de estas fases son:

- Monitorear (M): Esta fase se compone de la recolección, filtración y reportar la información adquirida sobre el estado del elemento a manejar.
- Analizar (A): La fase de análisis se encarga del interpretar el entorno en el cual se encuentra, el predecir posibles situaciones comunes y diagnosticar el estado del sistema.
- Planear (P): Durante la planificación se determina las acciones a tomar con el fin de llegar a un objetivo establecido a partir de una serie de reglas o estrategias.
- Ejecutar (E): Finalmente, se ejecuta lo planeado usando los mecanismos disponibles para el manejo del sistema.

Es de resaltar que este modelo, aunque útil para el desarrollo de este tipo de sistemas, es bastante general en cuanto a la estructura y no usan modelos de diseño establecidos (Ouareth, Boulehouache, y Mazouzi, 2018).

3.1.2 Mecanismos de Descripción

La fase de monitoreo dentro del ciclo MAPE-K es vital para el funcionamiento del manejador autonómico pues es a partir de la información que se construirá la base de conocimiento requerida por las demás partes del ciclo. Parte de esta, está compuesta por el *estado del sistema* el cual incluye la descripción del sistema en un momento dado (Weiss, Zeller, y Eilers, 2011).

Existen varias maneras de realizar implementaciones de mecanismos de auto-descripción y la utilidad de cada uno de estos varía dependiendo en el tipo de sistema de software que se esté usando. Para el marco del proyecto, nos interesan aquellos que estén orientados a los sistemas embebidos e IoT, algunos de estos son:

- **JSON Messaging**: Iancu y Gatea (2022) plantean un protocolo que emplea mensajería entre *gateways* con el fin de recibir información sobre estas. En términos simples, estas funcionan como un *ping* hacia el nodo que luego retorna sus datos, al igual que los dispositivos conectados a ella, al encargado de recolectar toda esta información con el fin de construir una descripción del sistema.-

- **IoT Service Description Model**: O IoT-LMsDM, es un servicio de descripción desarrollado por Zhen y Aiello (2021) el cual está orientado al contexto, servicios e interfaz de un sistema IoT. De este se espera poder contar no solo con descripciones del estado del sistema en términos del ambiente, pero la funcionalidad (es decir, los *endpoints* a usar) al igual que las estructuras de datos que estos consumen.

- **Adaptadores de Auto-descripción**: En este acercamiento a los mecanismos de auto-descripción, se tienen adaptadores los cuales emplean los datos generados por los sensores del componente gestionado con el fin de realizar la determinación de la arquitectura desplegada. De igual manera, este acercamiento permite realizar modificaciones a la descripción de manera manual en caso de que se detecten problemas (Jiménez Herrera, 2022).

De esto podemos ver no solo las diferentes maneras en las que las implementaciones realizan las descripciones de los sistemas asociados, sino que también el alcance de estos en cuanto a lo que pueden describir.

3.1.3 Mecanismos de Adaptación

La adaptación, en el contexto de la computación autonómica, es la parte más importante en cuanto a la auto-gestión de un sistema de software se refiere. Así mismo, presenta el mayor reto debido a la necesidad de modificar código de bajo nivel, tener que afrontarse a incertidumbre de los efectos que pueden tener dichas alteraciones al sistema al igual que lidiar con esto en *runtime* debido a los problemas que el *downtime* tendría en los negocios (Lalanda y cols., 2014).

Esta adaptabilidad puede exponerse en múltiples puntos dentro de un sistema de software. Pueden realizarse adaptaciones en sistema operativo, lenguaje de programación, arquitectura e incluso datos (Lalanda y cols., 2014).

Manteniéndose en el marco del proyecto, son las implementaciones relacionadas con la modificación de la arquitectura los cuales nos interesan. Siendo así, nos centraremos en los mecanismos de adaptación de componentes, o de reconfiguración:

- **Binding Modification**: Este mecanismo hace referencia a la alteración de los vínculos entre los diferentes componentes de la arquitectura. Estos tienen el objetivo de modificar la interacción entre componentes, lo que es especialmente común en implementaciones con *proxies*. Este tipo de mecanismo de adaptación fue usado por Kabashkin (2017) para añadir fiabilidad a la red de comunicación aérea.

- **Interface Modification**: Las interfases funcionan como los puntos de comunicación entre los diferentes componentes de la arquitectura. Siendo así, es posible que la modificación de estos sea de interés con el fin de alterar el comportamiento de un sistema al igual que soportar la heterogeneidad del sistema. Esto puede verse en el trabajo

desarrollado por Liu, Parashar y Hariri (2004) en donde definen la utilidad de dichas adaptaciones al igual que la implementación de las mismas.

- **Component Replacement, Addition and Subtraction**: En términos simples, este mecanismo se encarga de alterar los componentes que componen la arquitectura; de esta manera, modificando su comportamiento. Ejemplos de esto puede verse en el trabajo de Huynh (2019) en el cual se evalúan varios acercamientos a la reconfiguración de arquitecturas a partir del remplazo de componentes a nivel individual al igual que grupal.

  Este acercamiento a la mutación de la arquitectura también puede verse en el despliegue de componentes como respuesta a cambios en los objetivos de negocio de las aplicaciones al igual que como respuesta a cambios inesperados dentro de la aplicación. Esto puede verse en trabajos como el de Patouni (2006) donde se realizan este tipo de implementaciones.

3.2 Internet of Things

El Internet de las cosas, o IoT (Internet of Things); es una de las áreas de las ciencias de la computación en la cual se embeben diferentes dispositivos en objetos del día a día. Esto les da la capacidad de enviar y recibir información con el fin de realizar monitoreo o facilitar el control de ciertas acciones (Berte, 2018).

Esta tecnología, debido a su flexibilidad al igual que el alcance que puede tener, presenta una gran cantidad de aplicaciones que va desde electrónica de consumo hasta la industria. Encuestas realizadas en el 2020 reportan su uso en smart homes, smart cities, transporte, agricultura, medicina, etc. (Dawood, 2020). Su impacto no ha sido poco.

3.2.1 Sistemas Embebidos

Los sistemas de cómputo embebidos hacen referencia a un sistema compuesto de microcontroladores los cuales están orientados a llevar a cabo una función o un rango de funciones

específicas (Heath, 2002). Este tipo de sistemas, debido a la posibilidad de combinar hardware y software en una manera compacta, se ha visto en multiples campos de la industria como lo son el sector automotor, de maquinaria industrial o electrónica de consumo (Deichmann, Doll, Klein, Mühlreiter, y Stein, 2022).

3.2.2 Smart Campus

Un Smart Campus, equiparable con el concepto de Smart City, es una plataforma en la que se emplean tecnologías, sumado a una infraestructura física, con la cual se busca la recolección de información y monitoreo en tiempo real (Min-Allah y Alrashed, 2020). Los datos recolectados tienen el objetivo de apoyar la toma de decisiones, mejora de servicios, entre otros (Anagnostopoulos, 2023).

Estas plataformas, debido a su escala y alcance en cuanto a la cantidad de servicios que pueden ofrecer, requieren de infraestructuras tecnológicas las cuales den soporte a los objetivos del sistema. Es posible ver implementaciones orientadas a microservicios en trabajos como los de Jiménez, Cárcamo y Pedraza (2020) donde se desarrolla una plataforma de software escalable con la cual se pueda lograr interoperatividad y alta usabilidad para todos.

3.2.3 Location-based Services

4 Marco Teórico

4.1 Notación

De manera general, notación se refiere a una serie de caracteres, símbolos, figuras o expresiones usadas con el fin de expresar un sistema, método o proceso (Merriam, Webster, 2023). Más específicamente en el contexto de las ciencias de la computación, las notaciones han sido usadas para la representación de estructuras y arquitecturas en el software, como lo son lenguajes de modelado tales como UML (Object Management Group, 2005); lenguajes de programación, como C/C++, Ruby (Bansal, 2013); algoritmia de manera visual (Rutanen,

2018); entre otros.

4.1.1 Lenguajes

En el contexto de la computación

4.1.2 Gramática

La gramática, más específicamente gramáticas libres de contexto, son un conjunto de reglas descriptivas. Este conjunto de reglas, en conjunto de una notación, cumplen la función de dictar si una frase es válida para un lenguaje dado (Sipser, 2012, p. 101).

4.1.3 Sintaxis

4.1.4 Domain-Specific Languages

Los *Domain-Specific Languages* (DSL), o Lenguaje de dominio específico, son lenguajes de programación los cuales se usan con un fin específico. Estos están orientados principalmente al uso de abstracciones de un mayor nivel debido al enfoque que estos tienen para la solución de un problema en específico (Kelly y Tolvanen, 2008). Ejemplos de este tipo de acercamiento, en el caso del modelado (*Domain-specific modeling*), pueden observarse en los diagramas de entidad relación usados en el desarrollo de modelos de base de datos (Celikovic, Dimitrieski, Aleksic, Ristić, y Luković, 2014).

4.2 Serialización de Datos

La serialización de datos se refiere a la traducción de una estructura de datos a una manera en la que pueda ser almacenada o transmitida de manera eficiente (Mozilla Foundation, 2023a). Este proceso ha sido, principalmente, adoptado por lenguajes de programación orientada a objetos en donde existe un soporte nativo, tales como Go, JavaScript, o PHP; o existe algún tipo de framework o librería que permite hacerlo, como lo es en el caso de C/C++, Rust o Perl.

4.2.1 Métodos de Serialización de Datos

Dentro del ámbito de la programación, se encuentran diversas opciones en cuanto a formatos y técnicas empleadas para la serialización de datos. Cada uno de estos enfoques presenta sus particularidades, lo que resulta en ventajas y desventajas específicas las cuales deben ser consideradas según las necesidades del proyecto

5 Metodología de la Investigación

Para el desarrollo del trabajo de grado, se propone un modelo de prototipado iterativo compuesto de 5 fases (Ver fig. 2). De esta manera, se avanzará a medida que se va completando la fase anterior y permitirá a futuro el poder iterar sobre lo que se ha desarrollado anteriormente.

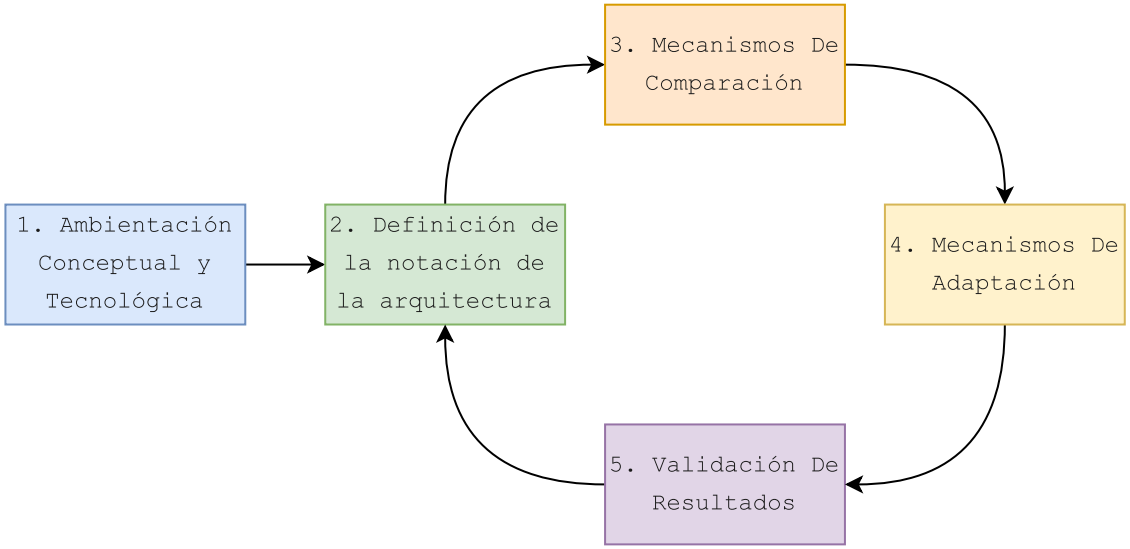


Figura 2: Metodología del proyecto

5.1 Ambientación Conceptual y Tecnológica

La primera fase de la metodología se basa en la investigación de la literatura, al igual que de la industria, necesaria para cubrir las bases tanto conceptuales como técnicas necesarias para el desarrollo del proyecto.

Actividades

1. Identificación de las características principales de un sistema auto-adaptable.
2. Análisis de los mecanismos de adaptación de la arquitectura.
3. Análisis los algoritmos empleados para la comparación de la comparación de las arquitecturas.
4. Determinación de los criterios de selección para el lenguaje de notación.
5. Evaluación de los posibles lenguajes de programación para la implementación a realizar.

Productos

1.

5.2 Definición de la notación de la arquitectura

La segunda fase está en la definición del cómo se realiza la declaración de la arquitectura. Partiendo de los criterios de selección establecidos en la fase 1, se espera determinar un lenguaje de notación el cual nos permita definir la arquitectura objetivo a alcanzar, al igual que la gramática correspondiente para poder realizar dicha declaración.

Actividades

1. Selección del lenguaje de marcado a usar a partir de los criterios establecidos.
2. Definición la gramática a usar para la definición de la arquitectura.
3. Implementación la traducción de la notación al modelo de grafos.
4. Determinación como se realizará la representación de los componentes y partes de la arquitectura.

Productos

1.

5.3 Mecanismos De Comparación

Durante la tercera fase del proyecto, se buscará poder determinar e implementar cómo se realizará la comparación entre el estado de la arquitectura obtenido durante la auto-descripción de la misma y el objetivo establecido. Así mismo, y con el fin de reportar a los administradores de los sistemas, también será necesario definir *niveles* de similitud entre las 2 arquitecturas.

Actividades

1. Selección del mecanismo de comparación a usar para evaluación de estado de la arquitectura.
2. Implementación del mecanismo de comparación seleccionado.
3. Determinación de los diferentes niveles de similitud entre arquitecturas.

Productos

1.

5.4 Mecanismos De Adaptación

La cuarta fase del proyecto está orientada a la selección, al igual que la implementación en Smart Campus UIS, del conjunto de mecanismos de adaptación de la arquitectura.

Actividades

1. Definición el conjunto de mecanismos de adaptación.
2. Implementación el conjunto de mecanismos de adaptación seleccionados.

Productos

1.

5.5 Validación De Resultados

La fase final del proyecto se encargará principalmente de la realización de pruebas de los mecanismos implementados, los resultados obtenidos al igual que la documentación de todo lo que se desarrolló durante el proyecto.

Actividades

1. Realización de las pruebas del funcionamiento de la implementación realizada con diversas arquitecturas objetivo.
2. Recopilación la documentación generada durante el desarrollo de cada una de las fases del proyecto.
3. Compilación de la documentación para generar el documento de final.
4. Correcciones y adiciones para la presentación final del proyecto de grado.

Productos

1.

6 Lenguajes de Descripción de Arquitectura

6.1 La necesidad de una arquitectura de referencia

La necesidad de una arquitectura de referencia, o arquitectura objetivo; es una parte esencial dentro de la computación autonómica. Esta forma parte directamente a la base de conocimiento (K), y, de manera indirecta, a los objetivos del administrador del sistema (Lalanda y cols., 2014, p. 24).

Con el fin de fijar un objetivo para nuestro sistema autonómico, fue necesario determinar una manera de realizar la declaración de dicha arquitectura, que estableciera un punto de referencia. Esto permitiría, durante el proceso de comparación de la arquitectura establecida

con la que se encuentra en tiempo de ejecución en un momento dado, identificar el estado del sistema.

6.2 Criterios de selección

Con el fin de establecer la notación a usar para la declaración de las arquitecturas objetivo, se establecieron unos lineamientos con los cuales se realizaría la evaluación de las diferentes notaciones ya desarrolladas anteriormente. De esta manera se podría escoger la manera a representar los modelos, o en el caso de ser necesario, establecer los criterios por el cual se podría desarrollar uno.

En la tabla 1, se presentan los criterios usados para la selección, con su respectiva explicación y valor considerado para la selección.

Tabla 1: Criterios usados para la determinación de la notación a utilizar

	Criterio	Explicación	Valor
C1	Describir la arquitectura de un sistema IoT	Este criterio es una base a establecer con el fin de descartar aquellos lenguajes de notación generales o no necesariamente usados para la descripción de arquitecturas IoT.	Alto
C2	Permitir la especificación de la ubicación del componente	La especificación de la ubicación de los componentes es importante en los sistemas IoT, especialmente dentro del contexto del proyecto en el cual se está trabajando con un Smart Campus; ya que los componentes pueden estar distribuidos en diferentes ubicaciones físicas y la evaluación de su integridad puede depender de su presencia en un lugar dado.	Alto
C3	Habilitar el modelado del componente a nivel de sus entradas	Es importante poder describir las entradas de los componentes, específicamente los datos que manejan, así como su rol dentro del sistema.	Alto
C4	Modelar el comportamiento de los componentes	La notación debe permitir modelar el comportamiento de los componentes, de manera que se puedan entender sus interacciones y su función en el sistema IoT. Dentro del contexto del proyecto, no es tan relevante, ya que no se está evaluando la funcionalidad del sistema, sin embargo, para futuros trabajos, podría facilitar la extensión de Smart Campus UIS.	Bajo
C5	Posibilitar el establecer los estados de los componentes	La notación debe poder definir los estados de los componentes. Estos estados pueden ser tanto de comportamiento o operacionales.	Medio
C6	Permitir de exportar el modelo descrito a gráficas u otros formatos	Es importante que la herramienta permita exportar el modelo descrito en diferentes formatos para facilitar su integración con otras herramientas y sistemas, y para permitir su visualización en diferentes formatos.	Medio

6.3 Búsqueda de Alternativas

Una vez establecidos los criterios de selección, se realizó una exhaustiva búsqueda de alternativas disponibles en la literatura y en la industria para describir arquitecturas para describir la arquitectura de sistemas IoT. Esta búsqueda se realizó a partir de la revisión en

diferentes bases de datos, como *Scopus*; al igual que algunas de las revistas especializadas en el tema, y el internet en general.

Durante la búsqueda, se identificaron una gran variedad de opciones. Sin embargo, la gran mayoría de estos se filtraron, o descartaron; a partir de los criterios de selección establecidos. Esto se debe a que los LDAs usados en la tanto en la industria y academia, como AADL (Architecture Analysis and Design Language), tienen un enfoque a los campos de aviónica, equipos médicos y aeronáutica (lo que complicaría su implementación hacia sistemas de software IoT) (Carnegie Mellon University, 2022, 2017); o SysML, que son demasiado genéricos y abarcan hardware, software e incluso personas y procesos (Object Management Group, 2015).

Entonces, de las posibles opciones de notación, se seleccionaron cinco las cuales fueron evaluadas con el fin de determinar si alguna de las opciones hubiera podido ser usada, o si era necesario desarrollar nuestra propia notación. A continuación, se presentan las alternativas evaluadas:

- **MontiThings:** Basado en MontiArc, otro LDA más general; está diseñado para el modelado y prototipado de aplicaciones de IoT. Este realiza las descripciones de sus arquitecturas en un modelo componente-conector, donde los componentes están compuestos por otros componentes; y los conectores definen la manera en la que se comunican estos componentes a nivel de los datos y la dirección de estos. (Kirchhof, Rumpe, Schmalzing, y Wortmann, 2022b, 2022a)

- **Eclipse Mita**: Mita, creado por la Eclipse Foundation; es un lenguaje de programación orientado al facilitar la programación de sistemas IoT. Aunque como tal no es un LDA, está orientada a la descripción de los componentes y el comportamiento del sistema establecido, de esta manera, puede generar el código que debe correr en los dispositivos embebidos (Eclipse Foundation, 2018).

- **SysML4IoT:** Es un perfil de SysML[1] en la cual se usan estereotipos de UML con el fin de abstraer las diferentes partes de los sistemas de IoT. Al igual que SysML, este permite el modelado más allá de dispositivos incluso llegando a personas y procesos, con la diferencia del enfoque dado al *dominio de IoT* [2] (Costa, Pires, y Delicato, 2016).

- **ThingML:** Similar a Mita, ThingML, es un lenguaje de modelado el cual tiene capacidades de generar el código requerido por los dispositivos embebidos. En términos del proyecto, este permite el modelado de los sistemas de IoT a partir de *state machine models*[3] los cuales permiten describir los componentes del sistema al igual que el comportamiento de estos (Harrand, Fleurey, Morin, y Husa, 2016).

- **IoT-DDL**: Iot-DDL es un LDA, implementado en XML, que describe objetos dentro de los ecosistemas IoT con base en sus componentes, identidad y servicios entre otros. Este tiene la capacidad de describir parte de la base de conocimiento que tienen los diferentes componentes (Principalmente relaciones y asociaciones entre componentes) (Khaled, Helal, Lindquist, y Lee, 2018).

Una vez seleccionadas las alternativas a evaluar, se utilizó la matriz de evaluación en la tabla 2 para determinar la solución ideal para el desarrollo del proyecto.

[1] Los perfiles se refieren a extensiones a UML, en este caso es una extensión de SysML en sí (Andre, 2007).

[2] El *dominio del IoT*, hace referencia al *Architecture Reference Model* establecido por IoT-A, un consorcio Europeo el cual buscaba el establecer un modelo para la interoperatividad de dispositivos IoT. (IoT-A, 2014)

[3] Los *state machine model*, también conocidas como Autómatas Finitos; son modelos matemáticos que describen todos los posibles estados de un sistema a partir de unas entradas dadas (Mozilla Foundation, 2023b).

Tabla 2: Evaluación de las alternativas en función de los criterios establecidos

	MontiThings	Eclipse Mita	SysML4IoT	ThingML	IoT-DDL
C1	✓	✓	✓	✓	✓
C2	✗	✗	✗	✗	✗
C3	✓	✓	✓	✓	✓
C4	✓	✓	✓	✓	✗
C5	✓	✓	✗	✓	✗
C6	✗	✗	✗	✓	✗

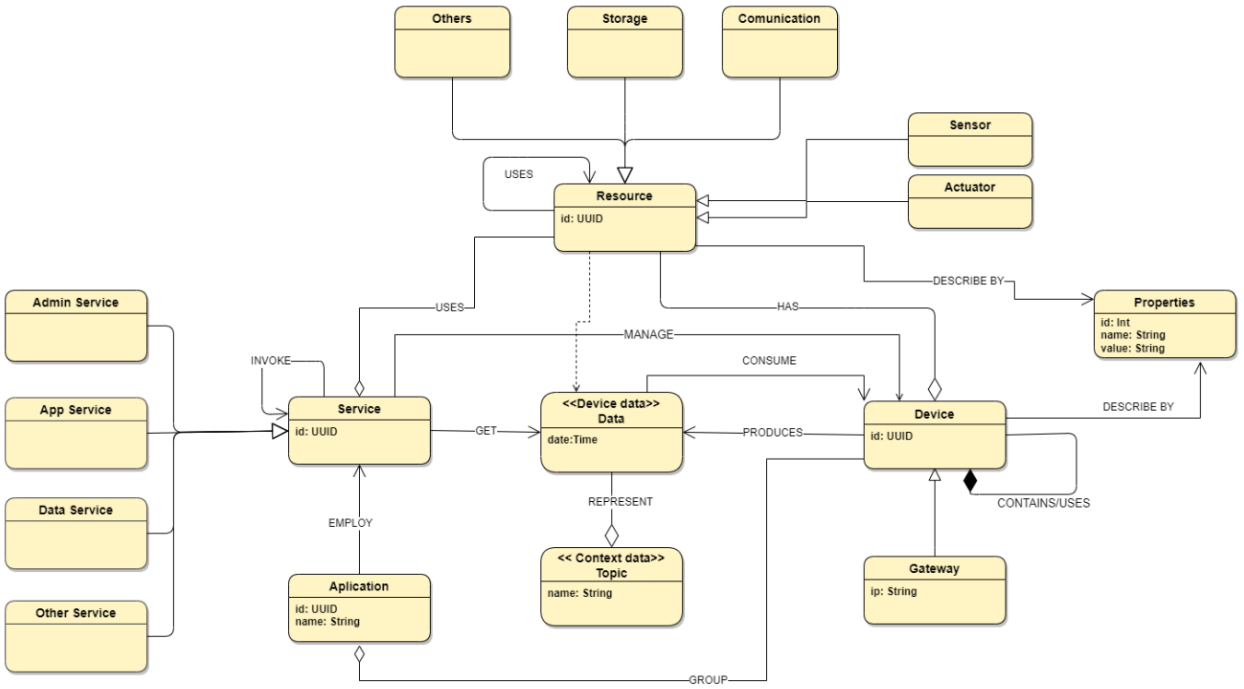
Partiendo de los resultados de la evaluación, se puede apreciar que ninguno de estos LDA cumple con los criterios establecidos para el proyecto. Aunque estos están orientados hacia la descripción y desarrollo de sistemas IoT, no están enfocados hacia su contexto en términos de aplicación más allá de la definición de comportamiento. Esto se debe a los objetivos de cada una de estas notaciones, de una u otra manera; buscan el representar como tal el sistema IoT en términos de su funcionalidad técnica y no la aplicación en si.

6.4 Un nuevo modelo para Smart Campus

Dado que no hay una alternativa que se adapte completamente a las necesidades del proyecto, se tuvo que definir nuestro propia notación la cual permita modelar las arquitecturas a nivel de aplicación bajo el contexto de un Smart Campus, tomando en cuenta los criterios definidos como guía para el desarrollo.

Primeramente, fue necesario que definir un metamodelo el cual permita establecer la manera en la que se verán estas arquitecturas. Para ello, y partiendo de la implementación a realizar, nos basamos parcialmente en el modelo establecido por Jiménez Herrera (2022, p. 63).

Figura 3: Versión 2 del modelo concepto planteado por Jiménez Herrera (2022, p. 63)



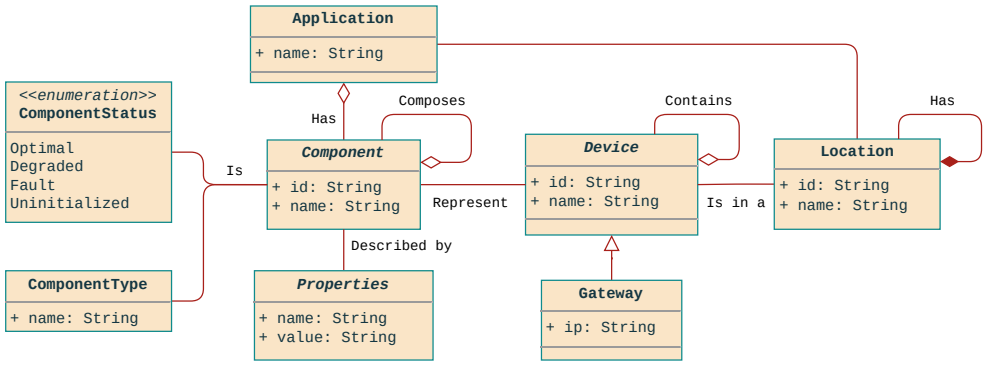
Basarnos en el modelo de la figura 3, nos da la capacidad de describir a un nivel técnico un sistema IoT. Ahora, aunque se podría usar para el desarrollo del proyecto, fue necesario modificarlo con el fin de acercarnos más hacia la descripción de un sistema IoT a nivel de aplicación.

Lo primero fue el establecer el contexto de los dispositivos. Esto específicamente se refiere al criterio *C2* de la tabla 1, en donde, dada la necesidad de establecer la ubicación geográfica en algunas de las aplicaciones de los Smart Campus, era necesario poder describir los lugares pertenecientes a la aplicación.

Así mismo, se cubre el criterio *C3* cambiando las propiedades del dispositivos de una clase, externa a los dispositivos; a un atributo, interno, el cual le permite a los componentes manejar su propia información en cuanto a los datos que estos manejan. Estas propiedades puede referirse a las entradas que tienen, en el caso de ser actuadores o procesadores de la información; o a los valores que reportan al sistema en el caso de ser sensores.

Partiendo de esto, se planteó el modelo presente en la figura 4.

Figura 4: Versión 1 del metamodelo planteado para SCampusADL



El enfoque principal del modelo se centra los componentes (*Component*). Estos son las representaciones lógicas, o de software, de las partes de la aplicación. De manera general, pueden ser tanto servicios usados por la aplicación como agregadores de datos, pre-procesadores de datos encargados de transformar los datos recolectados, o incluso los mismos sensores o actuadores que hacen parte del sistema (*componentType*).

Los componentes pueden ser atómicos, funcionando como entidades independientes, o formar parte de componentes, así como integrarse en componentes aún más grandes. Asimismo, los componentes se describen por una serie de propiedades que hacen referencia tanto al comportamiento al igual que las condiciones las con las cuales se puede evaluar el estado del mismo.

Estos elementos están presentes en diversos dispositivos (*Device*), los cuales se encargan de la ejecución de partes de la aplicación, o puntos de comunicación entre diversos componentes (*Gateway*). Estos pueden verse como los recursos físicos de la aplicación los cuales se encuentran ubicados en diferentes puntos, o locaciones (*location*), dentro del Campus (*Campus*).

Lo anterior nombrado hace parte del contexto de la aplicación. Siendo así, estos están relacionados contra la aplicación la cual sirve como un punto de acceso común entre el contexto geográfico y los componentes de software que deben ser manejados.

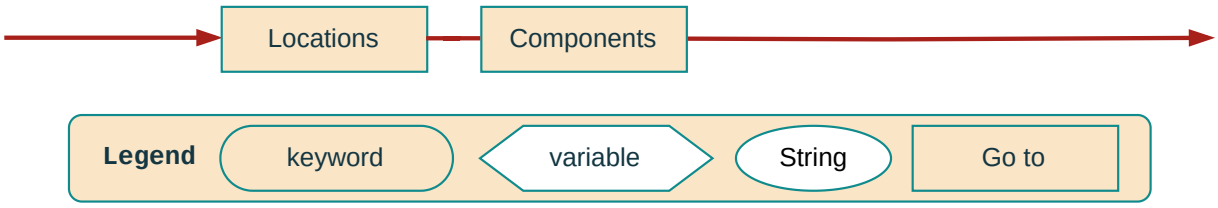
Finalmente, los estados de los componentes (*ComponentStatus*), reflejan el como estos se encuentran dentro del contexto de la aplicación. Estos pueden variar de óptimo (*optimal*), donde todos los componentes están funcionales según las propiedades establecidas; degradado (*degraded*), donde uno o más de los componentes opcionales está fallado; y fallo (*fault*), que es cuando alguno de los dispositivos obligatorios no está en funcionamiento.

6.5 Sintaxis de la notación

Partiendo de esto, lo siguiente que se realizó fue la definición de la sintaxis de la notación a usar, basados en lo definido por el metamodelo. Para esto, se decidió a usar `YAML`, un lenguaje de serialización de datos orientado a la legibilidad, reconocido y usado principalmente para la creación de archivos de configuración (Red Hat Foundation, 2023).

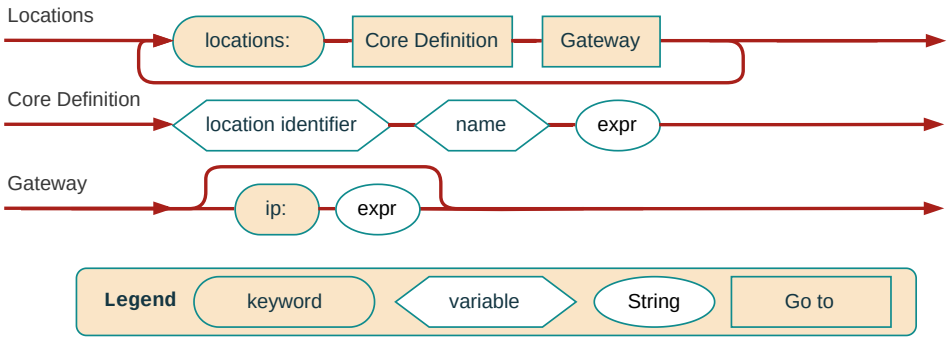
La sintaxis, como puede observarse en la figura 5, se compone de 2 partes: `locaciones`, para establecer el contexto geográfico de la aplicación; y `componentes`, con el cual se definen las partes de la aplicación al igual que las propiedades y lugar en el cual deben estar para el funcionamiento de la aplicación.

Figura 5: Diagrama de rail de la sintaxis definida para la notación de SmartCampusADL



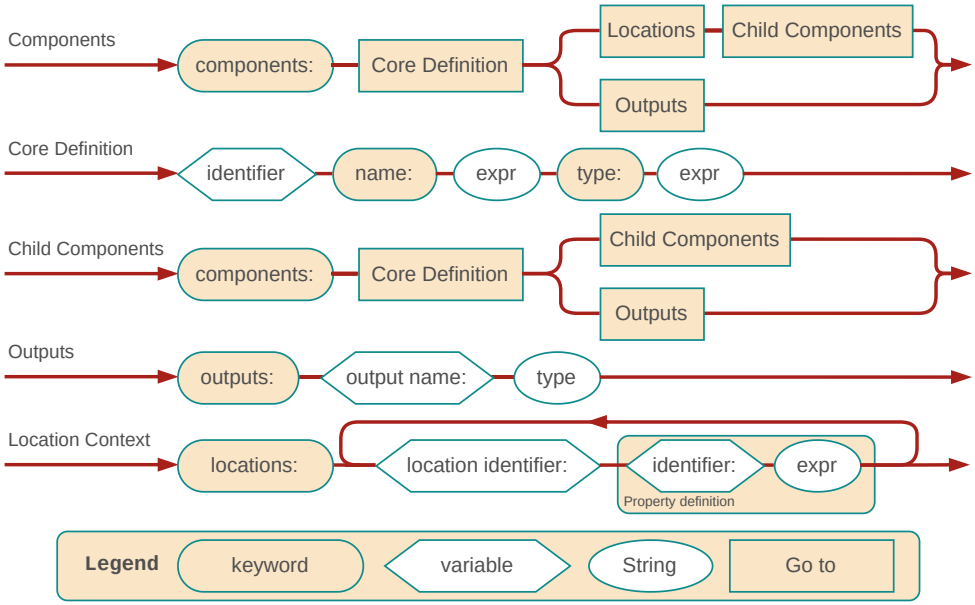
Para especificar las `locaciones` dentro del contexto de la aplicación, se definió la sintaxis que puede observarse en la figura 6. De esta manera, tras especificar la *keyword* `locations`, se pueden los puntos geográficos necesarios, al igual que las locaciones que lo componen. Así mismo, es posible declarar de manera implícita la ip de la *gateway* que se encuentra en el lugar con el fin de poder establecer el origen de los datos recolectados.

Figura 6: Diagrama de rail de la sintaxis definida para la notación del contexto geográfico de la aplicación



Un enfoque similar se aplicó a los componentes. En la figura 7 se presenta la sintaxis a usar para poder definir y ubicar los componentes dentro de la aplicación. De esta forma, se pueden declarar los componentes, al igual que sus propiedades; y algunas de las características que estos deben cumplir para poder ser evaluados dentro del contexto de la aplicación.

Figura 7: Diagrama de rail de la sintaxis definida para la notación de los componentes de la aplicación



Al definir esta notación, hemos creado un marco sólido para representar las aplicaciones de Smart Campus UIS. Este enfoque bien definido nos permitirá avanzar en el desarrollo de nuestras funcionalidades de comparación de los modelos, y la implementación de los

mecanismos de adaptación a usar. Un ejemplo de como se vería un archivo de notación válido para nuestras necesidades puede encontrarse en el anexo A.1.

6.6 Implementando Una Validación

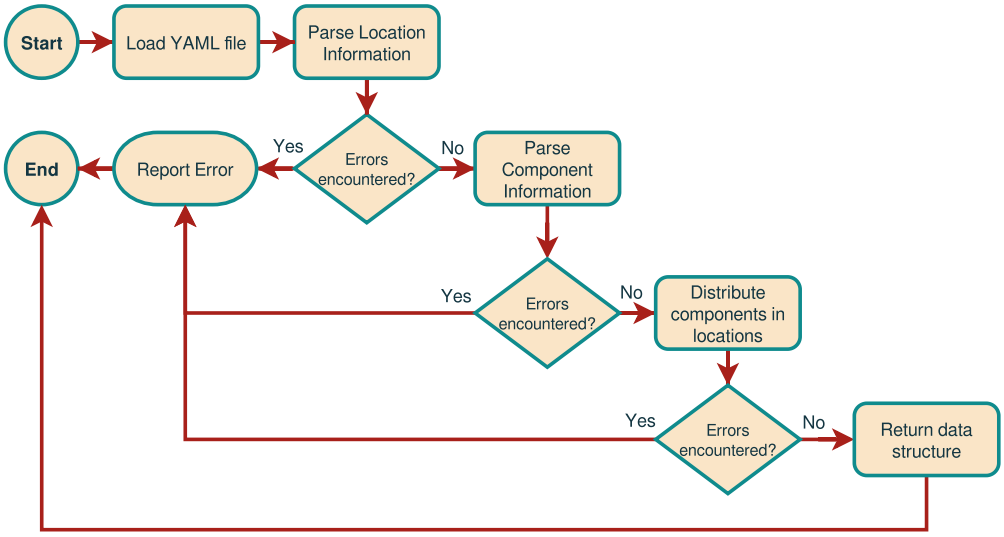
Teniendo definida la notación a usar para la declaración de las arquitecturas objetivo, lo siguiente a realizar era un módulo el cual se encargara de la validación, y construcción, los modelos a usar como referencia. La implementación, se dividió en dos partes. Una librería, la cual contiene toda la definición de los objetos definidos en el metamodelo, y será utilizada para la construcción de los modelos en todo el proyecto. La otra parte es un módulo de validación, que se encargará de verificar que los modelos definidos en la notación sean válidos de acuerdo con las reglas establecidas en el metamodelo.

La librería, apodada *StarDuck*, incluye clases para representar los componentes, dispositivos, gateways, locaciones y el contexto de la aplicación. Cada clase tiene atributos y métodos que permiten establecer y acceder a sus propiedades de acuerdo con el metamodelo. Por ejemplo, la clase `Component` tiene atributos como `name` (nombre del componente), `component_type` (tipo de componente), `components` (componentes internos), `properties` (propiedades del componente), y `outputs` (salidas del componente).

El módulo de validación, apodado *Lexical*, se encarga de verificar que los modelos definidos en la notación sigan las reglas establecidas en el metamodelo. Esto incluye verificar que se definan las locaciones y componentes de acuerdo con la estructura del metamodelo, que las propiedades de los componentes sean válidas.

Para implementar la validación, se *parsea* el archivo YAML y se construye una estructura de objetos de acuerdo con las clases definidas en la librería. Durante esta construcción, se aplican las reglas de validación. Si se encuentra algún error, se genera un mensaje de error indicando la ubicación del problema en el archivo de notación. En la figura 8 se puede observar un diagrama de flujo simplificado de este proceso.

Figura 8: Diagrama de flujo del proceso realizado por el módulo *Lexical*



El desarrollo de estos módulos, se realizó en Rust. Escogido debido a su capacidad para garantizar la integridad de los datos y prevenir errores comunes, lo que es esencial en un entorno donde la precisión y la confiabilidad son críticas. Además, su ecosistema de herramientas y bibliotecas facilita la implementación eficiente de los módulos de validación y construcción de modelos. [4]

Con la implementación de este módulo de validación, hemos completado la primera fase del desarrollo de nuestra notación y herramienta para describir y validar arquitecturas de aplicaciones de Smart Campus. Ahora podemos avanzar en la implementación de las funcionalidades de comparación y adaptación de modelos, que son parte fundamental de nuestro enfoque de computación autonómica para Smart Campus.

7 El manejador

Ahora, con la notación de las arquitecturas objetivo establecidas, al igual que el desarrollo del módulo encargado de la construcción y validación de los archivos de configuración; lo siguiente era la definición del proceso de la comparación entre la arquitectura actual y la

[4]Todo el código realizado para el proyecto puede encontrase en el grupo `https://github.com/ChipDepot/`

arquitectura de referencia.

Referencias

Anagnostopoulos, T. (2023). Smart campus. En *Iot-enabled unobtrusive surveillance systems for smart campus safety* (p. 17-25). doi: 10.1002/9781119903932.ch3

Andre, C. (2007). *Uml extensions: the sysml profile.* Descargado 2023-05-19, de `https://www.i3s.unice.fr/~map/Cours/MASTER_TSM/Cours7_SysML.pdf` (Presentation on UML extensions)

Arcaini, P., Riccobene, E., y Scandurra, P. (2015). Modeling and analyzing mape-k feedback loops for self-adaptation. En *2015 ieee/acm 10th international symposium on software engineering for adaptive and self-managing systems* (p. 13-23). doi: 10.1109/SEAMS.2015.10

Bansal, A. K. (2013). *Introduction to programming languages.* Boca Raton, FL: CRC Press.

Berte, D.-R. (2018, 05). Defining the iot. *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, *12*, 118-128. doi: 10.2478/picbe-2018-0013

Carnegie Mellon University. (2017). *Aadl and osate: A tool kit to support model-based engineering.* Online. Carnegie Mellon University. Descargado de `https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/FactSheet/2017_010_001_506838.pdf`

Carnegie Mellon University. (2022). *Architecture analysis and design language.* Carnegie Mellon University. Descargado de `https://www.sei.cmu.edu/our-work/projects/display.cfm?customel_datapageid_4050=191439%2C191439`

Celikovic, M., Dimitrieski, V., Aleksic, S., Ristić, S., y Luković, I. (2014). A dsl for eer data model specification. En *Integrated spatial databases.*

Costa, B., Pires, P. F., y Delicato, F. C. (2016). Modeling iot applications with sysml4iot. En *2016 42th euromicro conference on software engineering and advanced applications (seaa)* (p. 157-164). doi: 10.1109/SEAA.2016.19

Dawood, A. (2020, 09). Internet of things (iot) and its applications: A survey. *International Journal of Computer Applications*, *175*, 975-8887. doi: 10.5120/ijca2020919916

Deichmann, J., Doll, G., Klein, B., Mühlreiter, B., y Stein, J. P. (2022, Mar). *Cracking the complexity code in embedded systems development.* McKinsey's Advanced Electronics Practice.

Eclipse Foundation. (2018). *Eclipse mita.* Eclipse Foundation. Descargado 2023-05-13, de `https://www.eclipse.org/mita/`

Gorla, A., Pezzè, M., Wuttke, J., Mariani, L., y Pastore, F. (2010, 01). Achieving cost-effective software reliability through self-healing. *Computing and Informatics*, *29*, 93-115.

Harrand, N., Fleurey, F., Morin, B., y Husa, K. (2016, 10). Thingml: a language and code generation framework for heterogeneous targets. En (p. 125-135). doi: 10.1145/2976767.2976812

Heath, S. (2002). *Embedded systems design*. Elsevier.

Horn, P. (2001, Oct). *autonomic computing: Ibm's perspective on the state of information technology.* IBM. Descargado de `https://homeostasis.scs.carleton.ca/~soma/biosec/readings/autonomic_computing.pdf`

Huynh, N.-T. (2019). An analysis view of component-based software architecture reconfiguration. En *2019 ieee-rivf international conference on computing and communication technologies (rivf)* (p. 1-6). doi: 10.1109/RIVF.2019.8713678

Iancu, B., y Gatea, A. (2022). Towards a self-describing gateway-based iot solution. En *2022 ieee international conference on automation, quality and testing, robotics (aqtr)* (p. 1-5). doi: 10.1109/AQTR55203.2022.9801938

IoT-A. (2014). *Internet of things architecture.* Online. Descargado 2023-05-20, de `https://www.iot-a.eu/public/`

Jiménez, H., Cárcamo, E., y Pedraza, G. (2020). Extensible software platform for smart campus based on microservices. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, *2020*(E38), 270-282. Descargado de `www.scopus.com`

Jiménez Herrera, H. A. (2022). *Mecanismos autónomos para la autodescripción de ar-*

quitecturas iot distribuidas. Descargado de https://noesis.uis.edu.co/items/c5d1cce7-3f8f-4e3e-a083-66bd3c4745f3

Kabashkin, I. (2017). Dynamic reconfiguration of architecture in the communication network of air traffic management system. En *2017 ieee international conference on computer and information technology (cit)* (p. 345-350). doi: 10.1109/CIT.2017.13

Kelly, S., y Tolvanen, J.-P. (2008). *Domain-specific modeling.* Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.

Khaled, A. E., Helal, A., Lindquist, W., y Lee, C. (2018). Iot-ddl–device description language for the "t" in iot. *IEEE Access*, *6*, 24048-24063. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2825295

Kirchhof, J. C., Rumpe, B., Schmalzing, D., y Wortmann, A. (2022a). *Montithings.* Online. Descargado 2023-05-13, de https://github.com/MontiCore/montithings

Kirchhof, J. C., Rumpe, B., Schmalzing, D., y Wortmann, A. (2022b). Montithings: Model-driven development and deployment of reliable iot applications. *Journal of Systems and Software*, *183*, 111087. Descargado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0164121221001849 doi: https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111087

Krikava, F. (2013, 11). *Domain-specific modeling language for self-adaptive software system architectures.*

Lalanda, P., Diaconescu, A., y McCann, J. A. (2014). *Autonomic computing: Principles, design and implementation.* Springer.

Liu, H., Parashar, M., y Hariri, S. (2004). A component-based programming model for autonomic applications. En *International conference on autonomic computing, 2004. proceedings.* (p. 10-17). doi: 10.1109/ICAC.2004.1301341

Merriam, Webster. (2023). *Notation.* Descargado de https://www.merriam-webster.com/dictionary/notation

Min-Allah, N., y Alrashed, S. (2020, agosto). Smart campus—a sketch. *Sustainable Cities and Society*, *59*, 102231. Descargado de https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102231 doi: 10.1016/j.scs.2020.102231

Mozilla Foundation. (2023a). *Serialization.* https://developer.mozilla.org/en-US/

docs/Glossary/Serialization.

Mozilla Foundation. (2023b). *State machine.* Online. Descargado de https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/State_machine

Object Management Group. (2005). *What is uml?* Descargado de https://www.uml.org/what-is-uml.htm

Object Management Group. (2015). *What is sysml?* Online. Descargado de https://www.omgsysml.org/what-is-sysml.htm

Ouareth, S., Boulehouache, S., y Mazouzi, S. (2018). A component-based mape-k control loop model for self-adaptation. En *2018 3rd international conference on pattern analysis and intelligent systems (pais)* (p. 1-7). doi: 10.1109/PAIS.2018.8598529

Patouni, E., y Alonistioti, N. (2006). A framework for the deployment of self-managing and self-configuring components in autonomic environments. En *2006 international symposium on a world of wireless, mobile and multimedia networks(wowmom'06)* (p. 5 pp.-484). doi: 10.1109/WOWMOM.2006.11

Red Hat Foundation. (2023). *What is yaml?* Descargado 2023-5-27, de https://www.redhat.com/en/topics/automation/what-is-yaml

Rutanen, K. (2018). Minimal characterization of o-notation in algorithm analysis. *Theoretical computer science*, *713*, 31–41.

Salehie, M., y Tahvildari, L. (2005, 01). Autonomic computing: emerging trends and open problems. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, *30*, 1-7.

Sipser, M. (2012). *Introduction to the theory of computation* (3.ª ed.). Belmont, CA: Wadsworth Publishing.

Tahir, M., Mamoon Ashraf, Q., y Dabbagh, M. (2019). Towards enabling autonomic computing in iot ecosystem. En *2019 ieee intl conf on dependable, autonomic and secure computing, intl conf on pervasive intelligence and computing, intl conf on cloud and big data computing, intl conf on cyber science and technology congress (dasc/picom/cbdcom/cyberscitech)* (p. 646-651). doi: 10.1109/DASC/PiCom/CBDCom/

CyberSciTech.2019.00122

Wang, Z., Sun, C.-a., y Aiello, M. (2021). Lightweight and context-aware modeling of microservice-based internet of things. En *2021 ieee international conference on web services (icws)* (p. 282-292). doi: 10.1109/ICWS53863.2021.00046

Weiss, G., Zeller, M., y Eilers, D. (2011). *Towards automotive embedded systems with self-x properties.* Fraunhofer-Gesellschaft. Descargado de `https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/224379` doi: 10.24406/PUBLICA-FHG-224379

A Apéndices

A.1 Ejemplo de un YAML de una aplicación válida

```yaml
locations:
    campus-central:
        name: "Campus Central"
        locations:
            laboratorios-pesados:
                name: "Laboratorios Pesados"
                ip: '192.168.0.2'
            mecanica:
                name: "Mecanica"
                ip: '192.168.0.3'
            camilo-torres:
                name: "Camilo Torres"
                locations:
                    ct-primero:
                        name: "Primer Piso"
                        ip: '192.168.0.6'
                    ct-segundo:
                        name: "Segundo Piso"
                        ip: '192.168.0.5'

    malaga:
        name: "Sede Malaga"
        locations:
            reconver-gan:
                name: "Laboratorio De Reconversion Ganadera"
                ip: '192.168.0.127'
            admon-malaga:
                name: "Administracion Sede Malaga"
                ip: '192.168.0.126'

    barichara:
        name: "Sede Barichara"
        ip: "192.168.1.1"

components:
    dol139:
        name: "DOL 139 Environmental Monitor"
        component-type: "sensor"
        locations:
            malaga:
                quantity: 3
                timeout: 15
                required: true
            campus-central:
                quantity: 3
                timeout: 15
                required: true
            camilo-torres:
                quantity: 1
                timeout: 15
                required: false
        components:
            temperature-sensor:
```

```
            name: "Temperature Sensor"
            component-type: "sensor"
            required: true
            outputs:
                temperature: "float"
        co2-sensor:
            name: "CO2 Sensor"
            component-type: "sensor"
            required: true
            outputs:
                ppm: "float"
        humidity-sensor:
            name: "Humidity Sensor"
            component-type: "sensor"
            required: true
            outputs:
                RH: "float"
pm:
    name: "Particulate Matter Monitor"
    component-type: "sensor"
    locations:
        mecanica:
            quantity: 1
            timeout: 60
            required: false
        admon-malaga:
            quantity: 2
            timeout: 60
            required: true
    components:
        pm25:
            name: "PM2.5 Sensor"
            component-type: "sensor"
            required: false
            outputs:
                ppm: "float"

        pm10:
            name: "PM10 Sensor"
            component-type: "sensor"
            required: false
            outputs:
                ppm: "float"

barometric:
    name: "Barometric Pressure Sensor"
    locations:
        campus-central:
            quantity: 1
            required: true
            timeout: 3600
        malaga:
            quantity: 1
            required: true
            timeout: 3600
    component-type: "sensor"
    outputs:
        atm: "float"
```