



Universidad del Azuay

Facultad de Ciencias de la Administración

Escuela de Ingeniería de Sistemas y Telemática

**MOTOR DE SINCRONIZACIÓN ENTRE  
SISTEMAS DE IOT Y MODELOS DE  
ARQUITECTURA-AUTOCONSCIENCIA EN  
TIEMPO DE EJECUCIÓN**

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL GRADO EN INGENIERO EN SISTEMAS Y  
TELEMÁTICA

Autores:

**Christian Andres Alvarado Carrera  
Walter Rodrigo Larriva Avila**

Director:

**Ing. Lenin Erazo Garzón MSc.**

**Cuenca – Ecuador  
2022**

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermano, quienes me han apoyado incondicionalmente para poder llegar a esta instancia de mis estudios y por siempre ayudarme a alcanzar la motivación necesaria y perseverar ante cualquier situación.

Christian Alvarado Carrera

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicada a mis padres, Walter y Caroline, que me han apoyado en cada etapa de mis estudios, mi hermano Caleb y mi hermana Amanda por su amor incondicional, mis abuelos(as), mis tíos(as) y personas tan queridas que, aunque les parezca poco, su constante aliento me dio las fuerzas para continuar.

Walter Larriva Avila

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro sincero agradecimiento al ingeniero Lenin Erazo, por su gran apoyo como nuestro director del presente trabajo; al ingeniero José Moyano y a todos los involucrados en este proyecto de investigación. También queremos agradecer el apoyo de la Doctora Priscila Cedillo, y los miembros de tribunal, al Doctor Juan Pablo Carvallo y a el Ingeniero Fabián Carvajal. Finalmente agradecemos a la Universidad del Azuay y a nuestras familias, amigos y compañeros.

# Índice

DEDICATORIA .....	I
DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
Índice.....	IV
Índice de Figuras .....	VIII
Índice de tablas.....	X
RESUMEN: .....	XII
Abstract: .....	XIII
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación de la investigación .....	1
1.2 Problemática .....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo general .....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Metodología .....	3
1.5 Estructura del trabajo .....	4
2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	7
2.1 Internet de las cosas .....	7
2.1.1 Dispositivos.....	8
2.1.2 Arquitectura.....	9
2.1.3 Protocolos.....	9
2.1.4 Aplicaciones .....	12
2.1.5 Computación en la nube .....	13
2.1.6 Computación en la niebla.....	13
2.2 Modelos en tiempo de ejecución (models@runtime) .....	13

2.2.1	Objetivos .....	14
2.2.2	Técnicas.....	14
2.2.3	Arquitecturas .....	15
2.2.4	MAPE-K.....	16
2.3	Estado tecnológico: Metodología .....	17
2.4	Estado tecnológico: Planificación.....	17
2.4.1	Preguntas de investigación.....	17
2.4.2	Estrategias de búsqueda .....	18
2.4.3	Cadena de búsqueda .....	18
2.4.4	Criterios de extracción de datos .....	19
2.4.5	Criterios de inclusión y exclusión .....	20
2.4.6	Evaluación de calidad.....	20
2.4.7	Síntesis de datos .....	20
2.5	Estado tecnológico: Ejecución.....	21
2.5.1	Selección de estudios primarios .....	21
2.5.2	Aseguramiento de calidad .....	22
2.5.3	Bibliotecas digitales .....	23
2.5.4	Estudios primarios por años .....	24
2.6	Estado tecnológico: Reporte .....	24
2.6.1	Criterios individuales .....	24
2.6.2	Comparación de criterios .....	29
2.6.3	Discusión.....	31
3	ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MOTOR DE SINCRONIZACIÓN .....	34
3.1	Ámbito del sistema .....	34
3.2	Requisitos del motor de sincronización.....	35
3.2.1	Requisitos de alto nivel.....	35

3.2.2	Descripción de actores .....	36
3.2.3	Diagrama de casos de uso .....	36
3.2.4	Casos de uso .....	37
3.3	Arquitectura del motor de sincronización.....	39
3.3.1	Componentes de la arquitectura .....	41
3.3.2	Procesos.....	43
3.4	Interfaz de usuario del motor de sincronización.....	44
4	INSTANCIACIÓN DEL MOTOR DE SINCRONIZACIÓN.....	47
4.1	Recursos utilizados en la instanciación del motor.....	47
4.1.1	Meta-modelo Monitor-IoT .....	47
4.1.2	DSL Monitor-IoT .....	49
4.1.3	JavaScript .....	50
4.1.4	Node.js.....	51
4.1.5	Ponte.....	52
4.1.6	PostgreSQL .....	52
4.2	Implementación .....	52
4.2.1	Instanciación.....	52
4.2.2	Arquitectura de monitoreo IoT de prueba.....	59
4.2.3	Pruebas de funcionamiento: .....	61
5	EVALUACIÓN DEL MOTOR DE SINCRONIZACIÓN.....	64
5.1	Diseño y planificación .....	64
5.1.1	Diseño.....	64
5.1.2	Planificación.....	65
5.2	Preparar la recolección de datos .....	68
5.3	Recolección de datos .....	73
5.4	Análisis y resultados .....	73

5.4.1	Análisis de Percepción del Usuario.....	73
5.4.2	Análisis del Rendimiento del Usuario.....	75
5.4.3	Análisis de Relaciones Causales .....	76
5.4.4	Resultados de la evaluación .....	79
5.5	Discusión .....	82
5.6	Amenazas a la validez.....	84
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	87
6.1	Conclusiones .....	87
6.2	Recomendaciones y trabajo futuro .....	89
	Bibliografía .....	90
	Anexos .....	94
	Apéndice A. Estudios primarios seleccionados. ....	94
	Apéndice B. Matriz de resultados de la indagación bibliográfica .....	97
	Apéndice C. Evaluación del motor de sincronización .....	99
	C.1. Página Web.....	99
	C.2. Boletín de evaluación .....	99
	C.3. Formulario de Evaluación .....	101
	C.4. Cuestionario.....	105
	C.5. Resultados de Métricas de calificación .....	107
	C.6. Resultados de Cuestionario de variables de percepción.....	108
	C.7. Evaluación .....	110



## Índice de Figuras

Figura 1.1 Metodología de la investigación de Gorschek et al. (2006) aplicada al trabajo de titulación .....	3
Figura 1.2 Estructura del trabajo de titulación .....	6
Figura 2.1. Ciclo MAPE-K (Dar, 2012) .....	17
Figura 2.2. Proceso de selección de estudios primarios. ....	22
Figura 2.3. Evaluación de calidad .....	23
Figura 2.4. Librerías estudios primarios.....	23
Figura 2.5. Número de estudios por año de publicación .....	24
Figura 2.6 Porcentajes de estudios primarios por tipo de solución propuesta para la implementación de la relación causal.....	25
Figura 2.7 Porcentajes de estudios primarios por tipo de modelos utilizados para la implementación de la relación causal.....	26
Figura 2.8. Porcentajes de estudios primarios por lenguajes utilizados para la implementación de la relación causal.....	27
Figura 2.9. Porcentajes de estudios primarios por alcance del enfoque.....	28
Figura 2.10. Porcentajes de estudios primarios por tipo de estudio. ....	28
Figura 2.11. Porcentajes de estudios primarios por tipo de validaciones.....	29
Figura 2.12 Comparación entre el criterio EC1 y EC2. ....	30
Figura 2.13. Comparación entre los criterios EC1, EC2 con EC7. ....	31
Figura 3.1 Arquitectura de la infraestructura de soporte para la construcción y operación de sistemas auto-conscientes de IoT (Erazo-Garzón et al., 2021b).....	34
Figura 3.2 Diagrama de casos de uso del motor de sincronización.....	37
Figura 3.3 Arquitectura para la implementación de la infraestructura de monitoreo IoT .....	40
Figura 3.4 Wireframe de visualización en tiempo real.....	45
Figura 3.5 Wireframe de visualización en histórico.....	45
Figura 4.1 Meta-Modelo Monitor-IoT (Erazo-Garzón et al. 2021a).....	48
Figura 4.2 Componentes del modelo DSL (Erazo-Garzón et al. 2021a).....	50
Figura 4.3 Fragmento convert.js e Init.js.....	53
Figura 4.4 Archivos de datos.....	53
Figura 4.5 Fragmento SplitEntities.js.....	54
Figura 4.6 Fragmento routing.js .....	54
Figura 4.7 Fragmento controller.js y Comparator.js .....	55
Figura 4.8 Fragmento apiscreator.js y servicecreator.js .....	55
Figura 4.9 Fragmento conectorBD.js y appcreator.js.....	55

Figura 4.10 Fragmento brokerClient.js.....	56
Figura 4.11 Fragmento index.html .....	57
Figura 4.12 Fragmento index_desktop.css. ....	57
Figura 4.13 Fragmento chart.js.....	57
Figura 4.14 Fragmento routes.js.....	58
Figura 4.15 Fragmento DB.js .....	58
Figura 4.16 Fragmento functions.js.....	58
Figura 4.17 Modelo de arquitectura de monitoreo de prueba.....	59
Figura 4.18 fragmento package.json.....	61
Figura 4.19 Comandos de ejecución .....	62
Figura 4.20 Procesos de recolección .....	62
Figura 4.21 Visor de datos.....	63
Figura 5.1 Contexto del cuasi-experimento.....	66
Figura 5.2 Figura método de evaluaciones modelo (MEM) (Moody,2001) .....	69
Figura 5.3 Distribución de preguntas del cuestionario basado en: (Cedillo,2016).....	70
Figura 5.4 Modelo teórico para la evaluación del motor de sincronización. basado en: (Cedillo, 2016).....	71
Figura 5.5 Diagrama de cajas para las variables PEOU, PU e ITU. ....	74
Figura 5.6 Diagrama de caja para la variable Eficiencia en la evaluación.....	79
Figura 5.7 Diagrama de caja para la variable Efectividad en la evaluación.....	80
Figura 5.8 Conclusiones de la aplicación de MEM al Motor de sincronización.....	83

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Vista de alto nivel de la arquitectura IoT. ....	9
Tabla 2.2. Protocolos para redes IoT.....	9
Tabla 2.3. Preguntas de investigación. ....	18
Tabla 2.4. Palabras de la cadena de búsqueda.....	18
Tabla 2.5. Criterios de extracción.....	19
Tabla 2.6 Distribución de estudios primarios para el criterio de extracción EC1 .....	24
Tabla 2.7 Distribución de estudios primarios para el criterio de extracción EC2.....	25
Tabla 2.8 Distribución de estudios primarios para el criterio de extracción EC3.....	26
Tabla 2.9. Distribución de estudios primarios para el criterio de extracción EC4.....	27
Tabla 2.10. Distribución de estudios primarios para el criterio de extracción EC5.....	28
Tabla 2.11. Distribución de estudios primarios para el criterio de extracción EC6.....	29
Tabla 3.1 Requisitos de alto nivel .....	36
Tabla 3.2 Actores del sistema.....	36
Tabla 3.3 Caso de uso CU-01 .....	37
Tabla 3.4 Caso de uso CU-02.....	38
Tabla 3.5 Caso de uso CU-03.....	38
Tabla 3.6 Caso de uso CU-04.....	39
Tabla 3.7 Caso de uso CU-05.....	39
Tabla 3.8 Descripción de los componentes de la arquitectura del motor de sincronización .....	42
Tabla 3.9 Descripción de los componentes de la arquitectura del visor de datos .....	43
Tabla 5.1 Variables dependientes basadas en la percepción .....	67
Tabla 5.2 Variables dependientes basadas en rendimiento .....	67
Tabla 5.3 Cuestionario para medir las variables de percepción. ....	72
Tabla 5.4 Prueba de Shapiro Wilk para las variables subjetivas.....	74
Tabla 5.5 Resultados del test Wilcoxon one-tailed one-sample.....	75
Tabla 5.6 Estadística descriptiva para variables basadas en el Rendimiento del Usuario .....	75
Tabla 5.7 niveles de significancia sugeridos por Moody (2001).....	76
Tabla 5.8 Regresión Simple entre la Eficiencia Real y la Facilidad de Uso Percibida..	76
Tabla 5.9 Regresión Simple entre la Efectividad Real y la Utilidad Percibida.....	77
Tabla 5.10 Regresión Simple entre la Facilidad de Uso Percibida y la Utilidad Percibida .....	77
Tabla 5.11 Regresión Simple entre la Facilidad de Uso Percibida y la Intención de Uso .....	78

Tabla 5.12 Regresión Simple entre la Intención de Uso y la Utilidad Percibida .....	78
Tabla 5.13 Tabla de resumen de estadísticos descriptivos .....	79
Tabla 5.14 Tabla de resumen de la media de la Facilidad de Uso Percibida (PEOU) ...	80
Tabla 5.15 Tabla de resumen de la media de la Utilidad Percibida (PU).....	81
Tabla 5.16 Tabla de resumen de la media de la Intención de Uso (ITU).....	81
Tabla 5.17 Tabla de resumen de aceptación y rechazo de hipótesis .....	81
Tabla A.0.1 Estudios primarios seleccionados.....	94
Tabla B.0.2 Matriz de resultados de la indagación bibliográfica. ....	97

## RESUMEN:

Hoy en día el desarrollo de sistemas IoT representa un gran desafío debido a su complejidad y dinamismo. El presente trabajo ofrece una solución para facilitar y agilizar el desarrollo de sistemas IoT por medio de un motor de sincronización que soporta la relación causal entre el sistema y su modelo de arquitectura en tiempo de ejecución. Este motor permite detectar automáticamente los cambios realizados en el modelo e instanciar los correspondientes recursos de software sin detener la operación del sistema. Para evaluar la herramienta se realizó un cuasi-experimento con la participación de estudiantes de los últimos años de la carrera de Ingeniería en Sistemas y Telemática, quienes demostraron una alta eficacia y eficiencia con el uso del motor de sincronización. También se evidenció que los participantes perciben al motor como útil y fácil de usar, por lo que estarían dispuestos a utilizarlo en el futuro.

**Palabras clave:** Ingeniería dirigida por modelos (MDE), modelos en tiempo de ejecución, metamodelo, Internet de las Cosas (IoT), Lenguaje de Dominio Especifico (DSL).

## Abstract:

Nowadays, the need of more complex IoT systems represents a big challenge in the stages of its development. The present research offers a solution which facilitates development of IoT systems by means of a synchronization engine that supports the causal relation between the IoT system and its architecture at runtime. This engine allows for an automatic instantiation of all the resources specified on an architectural model. It detects the changes made on the model, and it creates them without the need of stopping operations of the IoT system. To test this engine, a quasi-experiment was held with the participation of senior year students majoring in Systems Engineering who showed high efficacy and efficiency using the synchronization engine in the test. It also established that the engine is useful and easy to operate, creating the willingness to use it in the future.

**Keywords:** Model Driven Engineering (DE), Models at Runtime, Metamodel, Internet of Things (IoT), Domain Specific Language (DSL).



Walter Larriva



Ing. Lenin Erazo Garzón



Christian Alvarado

Translated by

