

EVALUACIÓN DE IMPACTO DE TECNOLOGÍA EN SISTEMAS DE SISTEMAS
MEDIANTE UN ENFOQUE BASADO EN CAPACIDADES

DARÍO JOSÉ DELGADO QUINTERO
Ingeniero de sistemas

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
DOCTORADO EN INGENIERÍA, ÁREA GESTIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
BUCARAMANGA
2017

EVALUACIÓN DE IMPACTO DE TECNOLOGÍA EN SISTEMAS DE SISTEMAS
MEDIANTE UN ENFOQUE BASADO EN CAPACIDADES

DARÍO JOSÉ DELGADO QUINTERO
Ingeniero de sistemas

Informe final del trabajo de investigación para optar al título de
Doctor en Ingeniería, área Gestión y Desarrollo Tecnológico

Director
PhD. RICARDO LLAMOSA VILLALBA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
DOCTORADO EN INGENIERÍA, ÁREA GESTIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
BUCARAMANGA
2017

Es atemorizante asumir un reto, pero la satisfacción de cumplirlo es la recompensa.

Agradecimientos

A mi director Ricardo Llamosa Villalba por el cambio de perspectiva.

A mis compañeros del CIDLIS por las experiencias vividas.

A Francy, mi compañera en la vida.

A mis padres, los promotores de todo.

Tabla de contenido

Introducción.....	19
Organización del documento.....	21
1. Evaluación de tecnología en sistemas complejos	23
1.1. La evaluación de tecnología en contexto.....	24
1.2. Evaluación de tecnología	26
1.3. La evaluación de tecnología hoy en día.....	27
1.4. Los enfoques experimentales.....	28
1.5. Basados en asesores científicos.....	28
1.6. Enfocado al desarrollo tecnológico (TDA)	29
1.7. Índice de riesgo en el rendimiento de tecnologías (TPRI)	29
1.8. Identificación evaluación y selección de tecnología (TIES).....	30
1.9. Medición cuantitativa de tecnología (QTA)	31
1.10. Aspectos a tener en cuenta en la evaluación de tecnología sobre SoS	31
2. Sistemas de sistemas (SoS) e ingeniería de sistemas de sistemas (SoSE).	33
2.1. Sistemas de Sistemas	34
2.2. Ingeniería de Sistemas de Sistemas (SoSE).....	35
2.3. Ingeniería de sistemas de sistemas (SoSE) y la ingeniería de sistemas empresariales (ESE).....	36
2.4. Sistemas de sistemas y el diseño arquitectural.....	38
2.5. Proceso de análisis arquitectural basado en capacidades	39
3. Arquitecturas de sistemas	42
3.1. La taxonomía de una arquitectura empresarial	43
3.2. TOGAF & DoDAF.....	45
3.3. Las arquitecturas empresariales y el ciclo de vida para el desarrollo de sistemas.....	51
3.4. Arquitecturas de sistemas y evaluación de tecnología.....	52
4. Retos técnicos e hipótesis	54
4.1. Análisis de las técnicas para evaluación de tecnología en SoS	54
4.2. Técnicas cuantitativas de evaluación de tecnología	55
4.3. Problemas y oportunidades	57
4.4. Arquitecturas de sistemas y evaluación de tecnología.....	58
4.5. Arquitecturas ejecutables.....	59
4.6. Preguntas de investigación.....	59
4.7. Descripción de la hipótesis.....	60
4.7.1. Punto de vista técnico.....	60
4.7.2. Punto de vista estratégico	61
5. Modelo de evaluación de impacto de tecnología	62
5.1. Definición del problema.....	63
5.2. Capacidades y requerimientos.....	66
5.3. Factores de impacto de la tecnología.....	67
5.4. Tecnología a incorporar y los requerimientos de incorporación.....	69
5.5. Definición de los escenarios de incorporación.....	70
5.6. Validación de modelos como técnica para la verificación de capacidades.....	72

5.6.1. Modelos de comportamientos y las estructuras Kripke	73
5.6.2. Especificaciones lógico temporales (LTLs).....	78
5.6.3. Uso de los TS para verificar formulas LTLs.....	79
5.6.4. Herramientas para la verificación de modelos	81
5.6.5. Análisis de capacidades utilizando Model-checking	82
5.7. Análisis de resultados.....	90
6. Aplicación del enfoque desarrollado para la evaluación de impacto de tecnología	93
6.1. Caso de aplicación, Sistema de implantes médicos a la medida.....	94
6.1.1. Caso de aplicación SIMM 1	95
6.1.2. Caso de aplicación SIMM 2	127
6.2. Discusión y análisis de los resultados	136
7. Discusión, conclusiones y recomendaciones	139
7.1. Ficha de navegación de resultados	139
7.2. Acerca del enfoque de evaluación de impacto desarrollado	140
7.3. Acerca del enfoque de evaluación y las restricciones para su aplicación	143
7.3.1. Limitaciones.....	143
7.4. Acerca de la potencial aplicabilidad.....	145
7.5. Recomendaciones y trabajo futuro	146
7.5.1. Plan de mejora.....	147
Bibliografía.....	149

Lista de figuras

Figura 1. Organización del documento	22
Figura 2. El proceso de adquisición de tecnología, (Mortara, L., & Ford, 2012)	25
Figura 2. Proceso de análisis basado en capacidades, adaptada de (Rui et al., 2012)	41
Figura 3. Esquema genérico para un marco arquitectural	44
Figura 4. Dominios arquitecturales de base para cualquier arquitectura	45
Figura 5. Vistas arquitecturales para el marco arquitectural TOGAF	47
Figura 6. Modelo de implementación y gestión de la arquitectura AMD	48
Figura 7. Vistas arquitecturales para el marco arquitectural DoDAF	49
Figura 8. Vistas y modelos arquitecturales para el marco arquitectural DoDAF 2.0	50
Figura 9. Modelo V para procesos en ingeniería de sistemas.....	51
Figura 10. Relación entre requerimientos y capacidades.....	52
Figura 11. Impacto Vs Rendimiento	53
Figura 12. Jerarquía de un entorno para modelado y simulación, para una efectiva evaluación cuantitativa sobre SoS	56
Figura 13. Conexión entre niveles jerárquicos de sistemas.....	56
Figura 14. Características de los sistemas y sus paradojas, imagen adaptada de (Gorod et al., 2008)	57
Figura 15. Esquema general de información relacionada al modelo de evaluación de impacto de tecnología propuesto.....	62
Figura 16. Esquema general para evaluar el impacto de una tecnología empleando artefactos arquitecturales	65
Figura 17. Adaptación de la HOQ para relacionar requerimientos de incorporación y capacidades (los valores en la gráfica son utilizados para entender el concepto y no corresponden a ningún ejemplo en particular).....	67
Figura 18. Factor de impacto de una tecnología sobre un sistema, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012).	69
Figura 19. Reconfiguración de la arquitectura de un sistema ante la incorporación de una tecnología.	71
Figura 20. Esquema general para la validación de requerimientos empleando técnicas de validación de modelos.	73
Figura 21. Esquema genérico para la arquitectura de un sistema.....	74
Figura 22. Posibles modelos arquitecturales que pueden ser construidos utilizando SysML como lenguaje de modelado	75
Figura 23. Estructura, comportamiento y requerimientos de diseño	76
Figura 24. Elementos principales de un diagrama de estados	76
Figura 25. Relación entre los requerimientos, las proposiciones atómicas (PA) y la función de etiquetado L	78
Figura 26. Vista intuitiva de un LTL	80
Figura 27. Esquema metodológico para el análisis de capacidades usando técnicas de <i>model- checking</i>	85
Figura 28. Representación gráfica del indicador de cumplimiento, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012)	89
Figura 29. Cuadro comparativo para opciones tecnologías, adaptado de (Mortara, L., & Ford, 2012)	91
Figura 30. Esquema general para la arquitectura del sistema de diseño de prótesis a la medida (SIMM)	94
Figura 31. Perspectiva general del sistema para el diseño de implantes médicos a la medida SIMM	96
Figura 32. Modelo CV-2, Jerarquía de capacidades.....	99
Figura 33. Modelo CV-4, Dependencia de capacidades.....	100

Figura 34. Matriz de relaciones (HOQ) entre capacidades del sistema y requerimientos de incorporación.....	103
Figura 35. Representación gráfica para el factor de impacto asociado a la herramienta MIMICS.....	104
Figura 36. Escenarios posibles para las configuraciones BIOCAD+CAD+CAE+RP respecto a las tecnologías propuestas y su impacto estimado.....	107
Figura 37. Modelo OV-6a (Modelo de reglas operacionales) para el sistema SIMM, escenario de incorporación de capacidades tecnológicas	109
Figura 38. Modelo OV-6b (Modelo de descripción de transición de estados) para el sistema SIMM, escenario de incorporación de capacidades tecnológicas	110
Figura 39. Modelo ejecutable (<i>Labeled Transition System</i> – LTS) en términos de los requerimiento para el modelo OV-6b.....	117
Figura 40. Representación grafica para el factor cumplimiento T_c para el escenario de incorporación.....	120
Figura 41. Representación grafica para el factor cumplimiento T_r para el escenario AMIRA + RHINOSEROS + ANSYS + ACCULAS BA-30 (AFIO)	120
Figura 42. Escenarios posibles para las configuraciones BIOCAD+CAD+CAE+RP respecto a las tecnologías propuestas y su indicador de cumplimiento T_r	121
Figura 43. a) [T_c Vs T_f] relación entre el indicador de cumplimiento de las capacidades diseñadas para incorporar la tecnología T_c y le factor de impacto calculado T_f calculado para las diferentes configuraciones tecnológicas. b) [T_r Vs T_f] relación entre los escenarios de incorporación para las diferentes tecnologías teniendo en cuenta el cumplimiento de los requerimientos en el marco operativo general del sistema T_r y el factor de impacto calculado T_f para las diferentes configuraciones tecnológicas.	124
Figura 44. Detalles en los resultados para las configuraciones tecnológicas en la relación con [T_c Vs T_f].....	125
Figura 45. Detalles en los resultados para las configuraciones tecnológicas en relación con [T_r Vs T_f].....	126
Figura 46. Relación entre los requerimientos de incorporación para las herramientas BioCAD y las capacidades del sistema SIMM.....	129
Figura 47. Representación grafica de los factores de impacto T_f para las diferentes opciones tecnológicas	130
Figura 48. Representación gráfica para el factor de cumplimiento T_c asociado al sistema BioCAD en el sistema SIMM	133
Figura 49. Cuadro de análisis para el análisis comparativo entre opciones tecnológicas	136
Figura 50. Visualización de los casos 1,2,3 y 4 en los resultados obtenidos por el enfoque abordado en este trabajo.	138

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación entre marcos arquitecturales y las variantes en términos de vistas para el modelado de sistemas, modelos de desarrollo y lenguajes de modelado.	46
Tabla 2. Comparación entre las diferentes técnicas de evaluación de tecnología respecto a las cualidades que debe tener una técnica enfocada a los SoS. Bueno □, Muy bueno □□, Excelente □□□, Malo □, Deficiente □□, El mejor en su clase #. Tabla tomada de (Patrick Thomas Biltgen & Brown, 2007).	55
Tabla 3. Niveles de incertidumbre del impacto de una tecnología sobre una capacidad en un sistema	68
Tabla 4. Definición de los factores de impacto de la tecnología a incorporar respecto a las capacidades del sistema, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012).....	69
Tabla 5. Operadores para formular formulas LTL	80
Tabla 6. Herramientas para verificación de modelos que permitan verificar propiedades LTL en LTS.....	82
Tabla 7. Análisis de resultados para la capacidad C_i	87
Tabla 8. Explicación de los siete posibles tipos de resultados en el proceso de análisis de capacidades	88
Tabla 9. Asignación de valores propuesta para los resultados obtenidos al evaluar O_s, i, O_a, i, O_l, i	88
Tabla 10. Niveles de certidumbre para el cumplimiento de una capacidad, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012)	89
Tabla 11. Análisis de cumplimiento e indicador de cumplimiento, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012)	89
Tabla 12. Ficha técnica para los dos casos de aplicación en los cuales se utiliza el modelo de evaluación propuesto en este trabajo	93
Tabla 13. Listado de requerimientos para los diferentes sistemas a incorporar	96
Tabla 14. Soluciones comerciales seleccionada para evaluar en cada sistema	97
Tabla 15. Listado de Capacidades obtenidas del modelo CV-2, jerarquía de capacidades	101
Tabla 16. Definición del factor de impacto (<i>k-factor</i>) para el paquete MIMICS respecto a las capacidades del sistema SIMM	104
Tabla 17. Factores de impacto relacionados con los paquetes software para cada sistema a incorporar.....	104
Tabla 18. Requerimientos y tecnologías a incorporar, segmento de tabla tomada de (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013).....	108
Tabla 19. Asignación de etiquetas (Propiedades atómicas) a los requerimientos para la incorporación de tecnología.....	112
Tabla 20. Función de etiquetado L, relación entre los estados del diagrama OV-6b y las propiedades atómicas.	114
Tabla 21. Organización de las funciones LTL asociadas a cada requerimiento y a cada capacidad y su respectivo resultado al ser evaluadas en una herramienta de <i>Model-Checkin</i>	118
Tabla 22. Análisis de cumplimiento e indicadores de cumplimiento	119
Tabla 23. Análisis de cumplimiento para el indicador de cumplimiento para la configuración de tecnologías AMIRA + RHINOSEROS + ANSYS + ACCULAS BA-30 (AFIO).....	120
Tabla 24. Listado de requerimientos para la adquisición de una herramienta BioCAD	128
Tabla 25. Selección de paquetes software como candidatos para aportar la capacidad asociada al BioCAD en el sistema SIMM.....	128
Tabla 26. Definición de los factores de impacto (k-factores) para el paquete MIMICS en el sistema SIMM.....	130
Tabla 27. Factores de impacto estipulados para las tecnologías a incorporar.....	130
Tabla 28. Paquetes de Software Vs Requerimientos	131

Tabla 29. Organización de los requerimientos de incorporación para el sistema BioCAD en el las capacidades del sistema SIMM	132
Tabla 30. Análisis de cumplimiento para las capacidades del sistema SIMM respecto a los requerimientos para el sistema BioCAD	133
Tabla 31. Análisis de capacidades en relación al cumplimiento de los requerimientos para la herramienta AMIRA	133
Tabla 32. Análisis de cumplimiento e indicador de cumplimiento teniendo en cuenta el cumplimiento de los requerimientos para la herramienta AMIRA.	134
Tabla 33. Indicador de cumplimiento Tr para cada tecnología a incorporar	134
Tabla 34. Posibles configuraciones exitosas para la integración de tecnologías obtenidas en (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013)	137
Tabla 35. Ficha técnica de los resultados obtenidos en el trabajo	139
Tabla 36. Enfoque de evaluación desarrollado y los aspectos a tener en cuenta en la evaluación de tecnología en SoS	141
Tabla 37. Estructuración de las líneas de investigación a seguir para mejorar el enfoque de evaluación propuesto en el trabajo.	147

Lista de Anexos

Anexo A. Glosario de términos	157
Anexo B. Definición de los factores de impacto para las tecnologías a incorporar en el caso de aplicación SIMM 1	161
Anexo C. Determinación de un escenario de incorporación para un conjunto de tecnologías en particular.....	169
Anexo D. Cuantificación del indicador de cumplimiento T_r para todos los escenarios de incorporación	171

Lista de acrónimos

AE	Arquitectura empresarial
AMB	Método basado en actividades para el diseño de sistemas
AMD	Marco para el desarrollo arquitectural
AP	Preposiciones atómicas
AS	Arquitectura de sistemas
AV	Todas las vistas
BA	Bünchi Automanton
BioCAD	Diseño biológico asistido por computador
BPMN	Notación para el modelado de procesos de negocio
C4ISR	<i>Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i>
CAD	Diseño asistido por computado
CAE	Ingeniería asistida por computador
CBM	Enfoque arquitectural basado en capacidades
CV	Vista de capacidades
DIV	Vista de datos
DoDAF	Marco arquitectural del departamento de defensa de los Estados Unidos de América
EAfs	Marcos arquitecturales
ESE	Ingeniería de sistemas empresariales
ET	Evaluación de tecnología
FEAF	Marco arquitectural para la arquitectura federal
HOQ	Casa de la calidad
I+D	Investigación y desarrollo
IEC	Comisión electrónica internacional
IEEE	Instituto de ingeniería eléctrica y electrónica
IGES	<i>Archivo de imagen con especificaciones de intercambio grafico (Initial Graphics Exchange Specification)</i>
IS	Ingeniería de sistemas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , Organización internacional para la estandarización
LTL	Lógica lineal temporal (<i>Linear temporal logic</i>)
LTS	Sistemas de transición etiquetados (<i>Labeled transition systems</i>)
M3	Meta modelo de MODAF
MC	Verificación de modelos
MinTIC	Ministerio de las tecnologías de la información y las comunicaciones
MO	Marco operativo
MoEs	Mediciones de la efectividad
MoPs	Mediciones del rendimiento
OOM	Método orientado a objetos para el diseño de sistemas
PA	Procesos administrativos

PV	Vista de proyectos
QFD	Despliegue de la función de calidad
QTA	Medición cuantitativa de tecnología
RM-ODP	Modelo de referencia para <i>Open Distributed Processing</i>
RP	Prototipado rápido
RUP	<i>Rational Unified Process</i>
SAB	Evaluación de tecnología basada en asesores científicos
SAM	Método de análisis estructurado para el diseño de sistemas
SC	Diagrama de estados
SIMM	Sistema para implantes médicos hechos a la medida
SM	Máquina de estados
SoS	Sistema de sistemas
SoSE	Ingeniería de sistemas de sistemas
StdV	Vista de estándares
STEP	Archivo para intercambio de volúmenes digitales (<i>Automation systems and integration — Product data representation and Exchange</i>)
STL	<i>STereo Lithography</i>
SV	Vista de sistemas
SvcV	Vista de servicios
SysML	Lenguaje de modelado de sistemas
TDA	Evaluación de tecnología basada en el desarrollo tecnológico
TI	Tecnologías de la información
TIES	Identificación, evaluación y selección de tecnología
TOG	<i>The open group</i>
TOGAF	Marco arquitectural del <i>Open Group</i>
TPRI	Índice de riesgo en el rendimiento de la tecnología
TS	Sistema de transiciones
TXT	Extensión para archivos de texto plano
UML	Lenguaje unificado de modelado
UML4ODP	UML para RM-ODP
UPDM	<i>Unified Profile For The Department Of Defense Architecture Framework (DoDAF) And The Ministry Of Defence Architecture Framework (MODAF).</i>
VO	Vista de operaciones

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE IMPACTO DE TECNOLOGÍA EN SISTEMAS DE SISTEMAS MEDIANTE UN ENFOQUE BASADO EN CAPACIDADES*

AUTOR: Darío José Delgado Quintero**

PALABRAS CLAVE: Arquitectura empresarial, Arquitectura de sistemas, Capacidades, Evaluación de impacto de tecnología, Evaluación de modelos.

DESCRIPCIÓN:

Esta tesis presenta el desarrollo de un enfoque de evaluación de impacto de tecnología sobre entornos de integración de sistemas mediante el uso de arquitecturas con un enfoque de diseño basado en capacidades. Se reservan tres capítulos a discutir la definición de una línea base de las técnicas para la evaluación de tecnología en sistemas complejos, a presentar los sistemas de sistemas como alternativa para la integración de sistemas y finalmente las arquitecturas empresariales o de sistemas como herramienta para la gestión del cambio y complejidad. Luego se integra la información compilada (línea base para evaluación de tecnología, sistemas de sistemas, arquitecturas empresariales) para analizar las brechas y establecer las preguntas de investigación y una hipótesis a verificar. Se inicia estableciendo la evaluación cuantitativa de tecnología como la mejor opción para la evaluación de impacto de tecnologías y su asequibilidad y rapidez como sus principales falencias. A partir de las falencias se presenta a las arquitecturas ejecutables como alternativa para abordar los problemas de asequibilidad y rapidez. Se destinan un capítulo a la formulación de un modelo de evaluación de impacto de tecnología en el cual se define un enfoque de verificación de modelos basado en capacidades mediante la utilización de una técnica de *model-checking* la cual permite mediante el análisis dinámico de los modelos arquitecturales (arquitectura ejecutable) establecer el impacto de una tecnología en un sistema. Utilizando el modelo planteado se presentan dos casos de aplicación que describen detalles de su implementación y aplicabilidad, a partir de los cuales se muestra como el enfoque permite analizar aspectos más allá de la mera evaluación tecnología, permitiendo realizar análisis de escenarios y un refinamiento de requerimientos de manera asequible y rápida en términos de una división de ingeniería relacionada con el desarrollo, implementación y uso de arquitecturas empresariales.

* Tesis doctoral

** Facultad de ingenierías físico mecánicas, Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, Director: Ricardo Llamosa Villalba PhD en telecomunicaciones

ABSTRACT

TITLE: TECHNOLOGY IMPACT EVALUATION IN SYTEM-OF-SYSTEM USING A CAPABILITY-BASED APPROACH*

AUTHOR: Darío José Delgado Quintero**

KEYWORDS: Capability, Enterprise architecture, Model checking, System architecture, Technology impact evaluation.

DESCRIPTION:

In this thesis, we develop a technology impact evaluation approach in a system integration environment using system architectures with a capability-based design approach. The three first chapters define a base line to the technology evaluation techniques in complex systems. Also, present the system-of –systems theory as an alternative in the theory of systems integration, and finally is presented the system and enterprise architectures as a change or complexity management tool. In the next chapters, we make the information integration (technology evaluation, system-of-systems, enterprise and systems architectures) to realize a gaps analysis and define the research question and stablish a hypothesis to verify. We started by stablishing the quantitative technology evaluation as the best technique to evaluate the technology impact. And we find that the affordability and the implementation quickness are its main shortcomings. Using the shortcomings in the quantitative technology evaluation techniques, we present the executable architectures as an alternative to boarding the affordability and quickness weaknesses. Additionally, we present a chapter with the formulation of a technology impact model based on a model checking technique with a capability-based approach, this approach allows the dynamic models analysis in system architectures (executable architectures) to stablish the technology impact potential in a system. Using the developed model, two application cases are presented that describes its applicability and its implementation details. The application examples allow present how the technology impact evaluation approach, based on executable architectures and an architecture modeling approach based on capabilities, allows the aspect analysis beyond the technology evaluation, like the architectural scenarios analysis, and the refinement of requirement elicitation. All these attributes, in a quickly and easy way in the context of an engineering division related to the enterprise architecture implementation, develop and use.

* Doctoral Thesis

** Physico Mechanical engineering faculty, Electrical and electronic and telecommunication engineering school. Advisor: Ricardo Llamosa Villalba PhD in telecommunications

Introducción

La tecnología es el corazón de muchas de las actividades que las organizaciones y los sistemas realizan, y se encuentra al principio de la lista cuando los gobiernos hablan de políticas para el desarrollo industrial, crecimiento económico, y empleo. Adicionalmente la tecnología y el crecimiento tecnológico son reconocidos como una fuente importante de innovación (Ferràs Hernández, 2011). Algunas de las razones por las cuales la tecnología se considera como una fuente fundamental de innovación son: i) la tecnología permite un crecimiento no lineal de la producción, ii) la tecnología es un recurso infinito, esencialmente la tecnología es conocimiento aplicado, y las fronteras del conocimiento humano se expanden cada día, iii) la tecnología le permite a las organizaciones competir bajo condiciones de monopolio, desarrollos tecnológicos exclusivos o tecnologías patentadas le permite a las organizaciones eliminar competidores y preservar el conocimiento adquirido, iv) existen instrumentos públicos que promueven la innovación de base tecnológica, los gobiernos nacionales y regionales ofrecen herramientas para brindar soporte a las organizaciones en términos de investigación y desarrollo (I+D) tales como créditos blandos, capital de riesgo público y privado, ayudas en impuesto, ayudas directas, entre otros.

Innovación significa cambios, cualquier cambio en un sistema u organización tiene como objetivo mejorar la competitividad. Sin embargo, muchos cambios no implican una mejora en sus productos o servicios, y el único efecto obtenido está relacionado con el gasto financiero. La innovación como un proceso empresarial significa identificar las oportunidades del mercado para introducir nuevos productos, servicios, procesos, o la modificación significativa de los productos y procesos actuales, ejecutados con capacidades tecnológicas internas o externas que contribuyen directamente a la competitividad de la organización. Por tanto, cualquier cambio en la organización no es considerado como una innovación.

Muchas de las innovaciones tecnológicas son llevadas a cabo mediante procesos de adquisición externos o mediante investigación y desarrollo (I+D) interna. Estas innovaciones tienen un costo relacionado con i) la identificación de tecnologías potenciales, ii) identificación de oportunidades y la selección de tecnologías prometedoras en términos de adquisición, iii) negociación, y iv) transferencia. Este trabajo se centra en la evaluación de oportunidades y la selección de los mejores hallazgos. Para mejorar los procesos de innovación tecnológica orientados a la adquisición externa de tecnología, la medición de impacto reduce la incertidumbre relacionada con ventaja competitiva, como consecuencia puede determinar si una tecnología a incorporar puede convertirse en una innovación o en un gasto financiero (Smits, 1990), (Petrella, 1992), (M Jamshidi, 2008).

Para reducir la incertidumbre en la innovación tecnológica relacionada con la adquisición de tecnologías, los modelos para la evaluación de tecnología (ET) los cuales se definen como la medición del beneficio relativo de una o más tecnologías propuestas para un propósito en particular respecto a una o más métricas (Smits, R, & Leyten. 1990)(Petrella, R., 1992)(Cronberg, T., 1994)(Mo Jamshidi. 2008), permiten analizar a priori alternativas tecnológicas a incorporar a un sistema u organización y tomar decisiones acerca de su adquisición.

En este trabajo, se busca como objetivo principal el uso de arquitecturas empresariales o arquitecturas de sistemas (Rhodes, Ross, & Nightingale, 2009) y de arquitecturas ejecutables (Bueno, Carreño, Delgado, & Llamosa-Villalba, 2014) (Bueno et al., 2014)(Robbins, 2009) como facilitador para la evaluación cuantitativa de impacto de tecnología en sistemas complejos o sistemas de sistemas (SoS)(Mo Jamshidi, 2008). Para abordar este objetivo se propone un enfoque para evaluar el impacto de tecnologías en etapas tempranas del diseño de sistemas mediante el uso de modelos arquitecturales basados en capacidades, y técnicas de verificación de modelos (*Model-Checking*) (Baier, C., Katoen, J. P., & Larsen, 2008), para evaluar el impacto de una o varias tecnología en un proceso

de adquisición (Patrick Thomas Biltgen & Brown, 2007), (Patrick T Biltgen & Mavis, 1970). El enfoque busca relacionar el análisis de capacidades, los modelos arquitecturales, los requerimientos asociados a la adquisición de tecnología, y el impacto tecnológico.

Organización del documento

Para describir el enfoque de evaluación de impacto de tecnología propuesto se presenta a continuación la estructura del documento, ver Figura 1; en el Capítulo 2 se define una línea base en relación a las técnicas para la evaluación de tecnología en sistemas complejos, así como una descripción de las propiedades que estas deberían cumplir para ser consideradas una buena técnica de evaluación de tecnología en este tipo de sistemas. En el Capítulo 3 se hace una introducción a los sistemas de sistemas y su relación con los sistemas empresariales, se describen aspectos fundamentales para entender la diferencia entre un enfoque de ingeniería de sistemas tradicional y uno orientado a sistemas de sistemas. A partir del concepto de SoS y sistemas empresariales se presenta en el Capítulo 4 las arquitecturas de sistemas o arquitecturas empresariales, se hace una descripción conceptual de estas y de los marcos arquitecturales, así de cómo estas son una herramienta importante para abordar la complejidad de los sistemas descritos en el Capítulo 3. Además, se da especial relevancia a las arquitecturas como herramienta para gestionar la complejidad y como activo de conocimiento estratégico para la evaluación de tecnología.

A partir de la contextualización realizada en los Capítulos 2,3 y 4, en el Capítulo 5 se hace un análisis de las diferentes técnicas de evaluación de tecnología y su relación directa con las propiedades que se espera estas tenga en un entorno de sistemas complejos y de cómo las arquitecturas de sistemas pueden ser de ayuda para la construcción de enfoques de evaluación de tecnología en este tipo de entornos, a partir de esta relación se hace una discusión de la pregunta de investigación y la hipótesis propuesta. A partir de la hipótesis planteada, en el

Capítulo 6 se presenta un enfoque de evaluación de tecnología basado en la utilización de arquitecturas de sistemas el cual permite determinar el impacto de la inclusión de una tecnología a un sistema complejo (SoS o Empresarial).

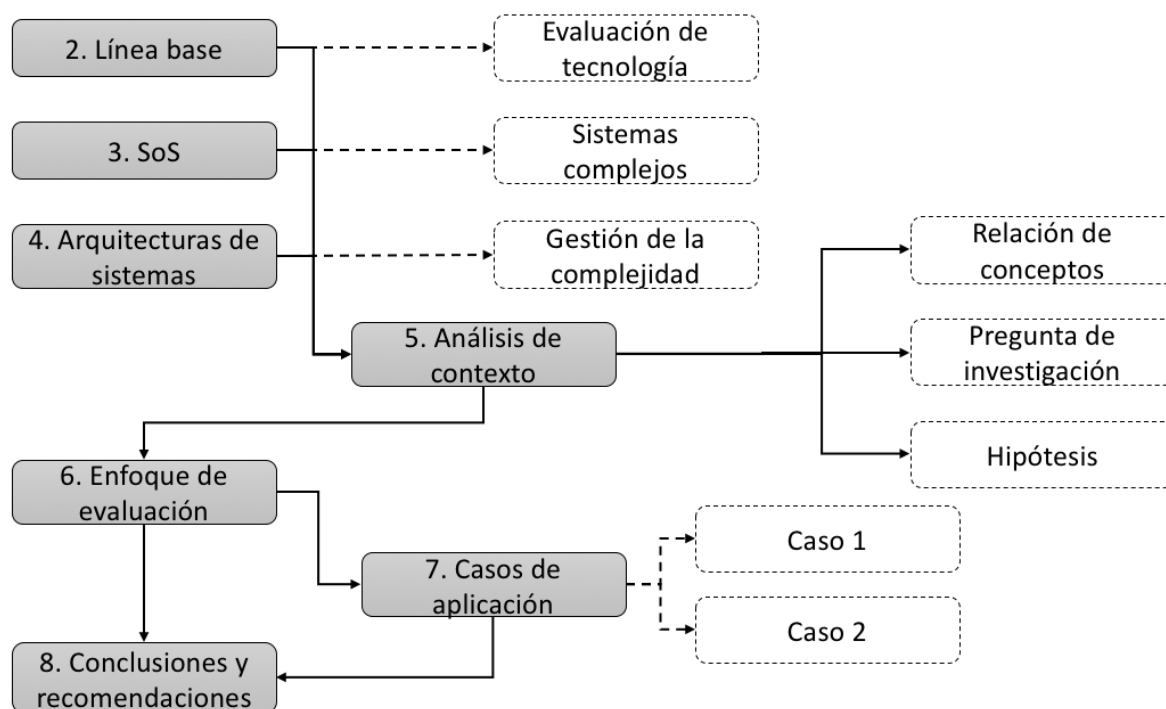


Figura 1. Organización del documento

Para contextualizar el enfoque de evaluación propuesto, en el Capítulo 7 se describen dos casos de aplicación contextualizados en un mismo problema de estudio, con los dos casos de aplicación se muestran las diferentes facetas del modelo propuesto y sus fortalezas, así como una comparación entre los resultados obtenidos con el enfoque de evaluación propuesto y los resultados obtenidos por una técnica tradicional de evaluación de tecnología aplicada al problema de estudio utilizado. Finalmente, en el Capítulo 8 se realiza la discusión, conclusiones y recomendaciones asociadas al modelo de evaluación de impacto de tecnología presentado en este trabajo. Adicionalmente a los diferentes capítulos descritos anteriormente, como material de soporte para algunos apartados del documento se pueden referenciar algunos apéndices.

1. Evaluación de tecnología en sistemas complejos

La palabra tecnología proviene del griego “*τεχνολογία*” compuesta por *téchne* (*τέχνη*, arte, técnica u oficio, que puede ser traducido como destreza) y *logía* (*λογία*, el estudio de algo). Según palabras de Betz, tecnología se puede definir de forma amplia como “El conocimiento de cómo manipular la naturaleza para los propósitos humanos” (Betz, 1998). Sin embargo, el concepto de tecnología puede tener diversas concepciones, de acuerdo con (White, M. A., & Bruton, 2010), algunas de las definiciones de tecnología son:

- i. El proceso utilizado para cambiar las entradas en salidas.
- ii. La aplicación de conocimiento para desarrollar un trabajo.
- iii. El conocimiento teórico y práctico, habilidades y artefactos que pueden ser utilizados para desarrollar productos, así como su producción y los sistemas de entrega.
- iv. Los medios técnicos que las personas usan para mejorar su entorno.
- v. La aplicación de ciencia, especialmente para objetivos industriales o comerciales, el cuerpo completo de materiales y métodos usados para alcanzar un objetivo.

Sin embargo, se debe aclarar previamente dos conceptos importantes en el desarrollo de este trabajo, el concepto de tecnología y el concepto de producto tecnológico. Los productos tecnológicos son objetos materiales (Tangibles) que han sido diseñados por personas y desarrollados a través de prácticas tecnológicas para servir en una función particular. Pero que sin embargo encajan en las definiciones de tecnología.

Un producto es tecnología aplicada. Muchos productos combinan diferentes tecnologías para resolver problemas. (La rueda y la palanca son dos tecnologías muy útiles, pero muestran su verdadero potencial al ser aplicadas conjuntamente en una carretilla). Se podría decir que las tecnologías son sub-componentes, mientras que los productos son la integración de múltiples tecnologías al servicio

de un problema en particular. Así como también se podría decir que la tecnología puede ser vista como un facilitador en un momento del tiempo para un producto. La tecnología no es un producto, pero si es un subconjunto del producto.

Para este trabajo, no se busca evaluar productos tecnológicos. Se busca evaluar las capacidades tecnológicas que un producto tecnológico o una tecnología pueda proveer a un sistema u organización. En ese orden de ideas, un producto tecnológico puede ofrecer una o muchas capacidades asociadas a las diferentes tecnologías que lo componen. En este trabajo interesa evaluar solo aquellas capacidades de interés para un problema de incorporación en particular.

1.1. La evaluación de tecnología en contexto

La evaluación de tecnología se puede enmarcar en procesos de adquisición de tecnología o en procesos de desarrollo de esta. En términos de adquisición, en lo cual se enfoca principalmente este trabajo, se busca adquirir nuevas tecnologías de fuentes externas, más que el uso de las capacidades de investigación y desarrollo internas. Una empresa puede no contar con las capacidades o con los especialistas con habilidades técnicas necesarias o simplemente puede no tener la intención para desarrollar la tecnología internamente. Sin embargo, introducir nuevas tecnologías le puede brindar a las empresas la oportunidad de desarrollar nuevos productos y de entrar a nuevos mercados.

Por naturaleza la adquisición de tecnología es un proceso de transferencia con costos de transacción asociados a las diversas etapas del proceso de adquisición (Mortara, L., & Ford, 2012) (IEEE/std/12207-2008, 2008), ver Figura 2. Es por tanto una necesidad, dedicar recursos sustanciales a asimilar, adaptar y mejorar las tecnologías originalmente adquiridas y establecer estrategias adecuadas para protegerlas.

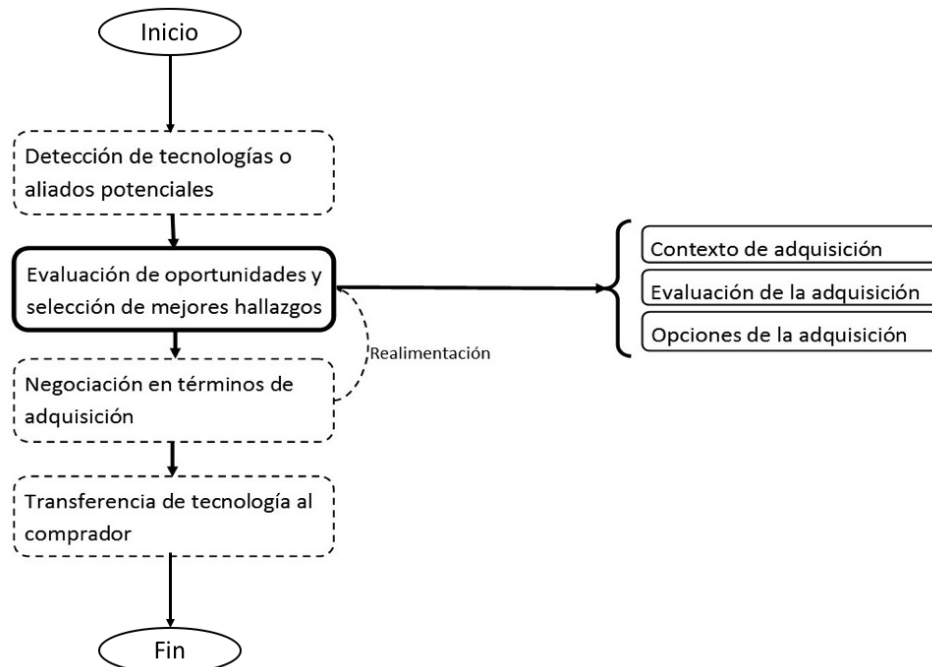


Figura 2. El proceso de adquisición de tecnología, (Mortara, L., & Ford, 2012)

En los términos simples, un proceso de adquisición de tecnología consta de cuatro etapas a seguir:

1. Identificación de tecnologías atractivas o socios con capacidades tecnológicas (vigilancia tecnológica).
2. Evaluación de oportunidades, selección de las tecnologías más prometedoras considerando los términos de la adquisición.
3. Negociación de los términos de adquisición entre adquirentes y vendedores
4. Transferencia de la tecnología al adquirente, si las negociaciones en la etapa tres (3) han sido exitosas.

El trabajo presentado se centra en la etapa dos (2) del proceso de adquisición de tecnología, en la cual se busca evaluar las alternativas tecnológicas a adquirir en términos del contexto de incorporación buscando conocer los impactos (positivos o negativos) sobre las capacidades del entorno de aplicación, en otras palabras se busca definir un criterio para evaluar los cambios en el comportamiento del sistema, capacidad, o la operación en el medio ligado a la consecución de una

meta o estado final, el logro de un objetivo, o la creación de un efecto (U.S. Department of Defense. 2012).

1.2. Evaluación de tecnología

La evaluación de tecnología (ET) se define como la medición del beneficio relativo de una o más tecnologías propuestas para un propósito en particular con respecto a una o más métricas (Smits, R, & Leyten. 1990)(Petrella, R., 1992)(Cronberg, T., 1994)(Mo Jamshidi. 2008). La evaluación de tecnología busca identificar de manera rápida y eficiente tecnologías de alto rendimiento y establecer el nivel de recursos requerido que permitan madurar una tecnología hasta su punto de aplicación. En ambientes complejos producto de las interacciones entre sistemas, se convierte en un problema el cálculo de las métricas sobre las cuales se pueda medir el beneficio relativo que la tecnológica evaluada provea al sistema sobre el que se aplica. Este problema se debe a la incertidumbre relacionada con el entorno operativo, a las interacciones entre sistemas, las interacciones entre los humanos y los sistemas las cuales no son fácilmente capturadas en las fases de exploración, conceptualización y diseño (Lawton, C. R., Longsine, D. E., et al., 2008).

Durante las últimas décadas, muchos métodos para la evaluación de tecnología han sido propuestos, algunos de ellos son válidos para su aplicación en contextos de sistemas complejos. Entre todos ellos, el menos elegante, pero sin duda alguna el más efectivo es la experimentación física. Sin embargo, es también el más costoso y riesgoso de todos. En este capítulo se busca mostrar cuales son las alternativas vigentes que puedan ser una alternativa confiable a la evaluación experimental de tecnología.

En el estudio de la evaluación de tecnología en sistemas complejos hay que diferenciar la evaluación de rendimiento de la evaluación de efectividad. El rendimiento describe que es lo que un sistema hace, mientras que efectividad describe lo que un sistema hace en un contexto o escenario relevante. La

medición del rendimiento (MoPs) hace referencia a una métrica usada para evaluar que tan bien un sistema realiza una tarea. Mientras que la medición de la efectividad (MoEs) es un criterio utilizado para evaluar los cambios en el comportamiento del sistema, capacidad, o la operación en el medio ligado a la consecución de una meta o estado final, el logro de un objetivo, o la creación de un efecto (U.S. Department of Defense. 2012). MoPs Es una métrica empleada usualmente para un nivel de evaluación de sistema, y MoEs es más relevante para un nivel de evaluación en SoS.

Diversos son los enfoques que se han llevado a cabo en materia de evaluación de tecnología, tanto en la medición de rendimiento como en la medición de impacto. A continuación, se presenta un análisis de éstos y su pertinencia en la evaluación de impacto de la tecnología sobre arquitecturas de sistemas complejos.

1.3. La evaluación de tecnología hoy en día

De acuerdo con el estado mayor conjunto de los Estados Unidos de Norte América, la evaluación de tecnología para arquitecturas de sistemas heterogéneos a gran escala tiene inconvenientes debido a problemas de equilibrio ocasionados por dos factores opuestos, la necesidad de un análisis altamente detallado y el deseo de mantener un enfoque de generalidad del problema (Shelton, H. H. 2001). Este mismo problema se evidencia en otros campos como el financiero, meteorología, ingeniería del software, entre otros. Una revisión de los posibles enfoques para evaluar tecnología reveló que una alternativa para satisfacer los inconvenientes antes mencionados es la de utilizar métodos cualitativos o borrosos. Esto debido a la dificultad para el modelado de dichos sistemas, sistemas como los que estudian los patrones del clima, los mercados financieros, o preferencias comerciales de las personas, entre otros. Sin embargo, también evidencia la necesidad de enfoques cuantitativos que permitan abordar aspectos que las técnicas cualitativas no permiten abordar.

Los recursos mediante los cuales se puede abordar el proceso de evaluación de tecnología se pueden ver reflejados en las siguientes formas generales de ET:

- Enfoques experimentales.
- Basados en asesores científicos (SAB)
- Enfocado al desarrollo tecnológico (TDA)
- Índice de riesgo en el rendimiento de tecnologías (TPRI)
- Identificación, evaluación, y selección de tecnología (TIES)
- Medición cuantitativa de tecnología (QTA)

1.4. Los enfoques experimentales

Este método para la evaluación de tecnología se centra en la experimentación física, el más caro y menos elegante. Se refiere a la implementación directa de una nueva tecnología en un campo específico, esta es una técnica ampliamente empleada por empresas desarrolladoras de software (Zelkowitz, Park, & Wallace, 1998), en productos tecnológicos como teléfonos celulares, reproductores de música y computadores, en ciencias mediante el uso de laboratorios de experimentación, entre otros.

Los modelos experimentales ofrecen una clara evaluación de las capacidades, proveyendo tecnologías candidatas mediante la experimentación en un ambiente realista. Sin embargo, en un ambiente con recursos financieros limitados en donde se necesite incorporar tecnologías altamente especializadas es imperante la implementación de una metodología de evaluación analítica que permita solventar dicha falencia de recursos financieros.

1.5. Basados en asesores científicos

Otra forma de evaluar tecnologías, puede ser abordada empleando un conjunto de expertos que ofrezcan su conocimiento y experticia en el área. Son personas que tienen un rol muy importante, pues crean un vínculo entre las organizaciones y la

comunidad científica, también promueven el intercambio de los últimos avances en ciencia y tecnología que mejoren el cumplimiento de las labores misionales de las organizaciones (UE-AF, 2011). Sin embargo, no siempre es posible encontrar un experto que pueda desempeñar el rol del evaluador de tecnología.

1.6. *Enfocado al desarrollo tecnológico (TDA)*

Este método para la evaluación de tecnología fue propuesto por Donald Dix, es un método cualitativo para dirigir el impacto esperado de una tecnología. TDA examina diversas tecnologías, sus esfuerzos y objetivos, con lo cual provee puntos de estimación de impacto de cada tecnología. Para la aplicación de esta metodología se deben agrupar las tecnologías de acuerdo con alguna meta particular de algún sistema propuesto, hecho esto se extrapolan las mejoras previstas sobre dicho sistema junto con las medidas de su máximo nivel de efectividad (MoEs), dicha extrapolación se realiza empleando la opinión de un experto, lluvia de ideas, y análisis cualitativos. El inconveniente principal de la técnica, radica en la dificultad de asignar valores numéricos de los resultados esperados, la incapacidad de especificar un valor de confianza en los datos propuestos, la falta de trazabilidad en el proceso de análisis, y la ausencia de un método para dar cuenta de las interacciones entre los elementos en conflicto o relacionados dentro de los sistemas (Patrick Thomas Biltgen & Brown, 2007).

1.7. *Índice de riesgo en el rendimiento de tecnologías (TPRI)*

Muchos de los problemas de desempeño en las organizaciones se deben a la transición al uso de tecnologías inmaduras. Mahafza propuso el TPRI (Mahafza, S., Componation, P., and Tippet, 2005). El cual es una metodología para hacer un seguimiento en el rendimiento y en el grado de dificultad que se presenta para la implantación de una tecnología a través de un programa de desarrollo. El resultado de esta técnica es una medida de rendimiento obtenida con relación a un umbral de riesgo aceptable dado un determinado grado de dificultad.

Para cada tecnología, el $TPRI_j$ puede ser calculado según la Ecuación 1.

$$TPRI_j = \frac{\sum_{i=1}^n 1 - \frac{A_i}{1 + (1 - A_i)DD_i}}{n} \quad (1)$$

En donde A_i es las i -ésima medida de rendimiento MoP, DD_i es el grado de dificultad para hacer frente al MoP requerido, y n es el número de MoPs que fueron considerados. Esta medida debe ser aplicada en diferentes tiempos de madurez de una tecnología hasta que el valor numérico del $TPRI$ sea cero.

Mientras que el $TPRI$ ofrece transparencia durante el ciclo de vida del desarrollo de una tecnología, no es muy adecuado para un enfoque de sistemas de sistemas ya que solo hace seguimiento a los MoPs y no a los MoEs.

1.8. Identificación evaluación y selección de tecnología (TIES)

Desarrollada por Kirby (Kirby, 2001) , TIES es un método global y estructurado para el diseño de sistemas complejos cuyos resultados serán de alta calidad y competitividad para satisfacer los requisitos futuros y los agresivos requerimientos de los clientes (Plenge, 2007). Esta técnica usa modelado y simulación para cuantificar y medir el impacto de tecnologías mediante la representación de éste como “ k -factores”.

TIES puede ser vista como una extensión cuantitativa de TDA, la aplicación tradicional del método esta principalmente centrada en la evaluación de los MoPs para un sistema dado. Además, a la fecha no se ha encaminado a la evaluación de tecnología sobre sistemas heterogéneos de gran envergadura.

La evaluación de tecnología en SoS requiere de la integración de uno o más escenarios y envuelve interacciones significativas entre las plataformas y sus labores específicas (Hale, 2012). Sin embargo, elementos de TIES tales como el modelado y la simulación como medio para calcular el rendimiento de un sistema y el uso de los k -factores para representar el impacto de una tecnología,

proporcionan un marco para evaluar de manera cuantitativa el impacto de una tecnología sobre un SoS.

1.9. Medición cuantitativa de tecnología (QTA)

Las organizaciones, fabricas, laboratorios, centros de investigación, farmacéuticas, entre otras, buscan incorporar tecnologías que cumplan con los estándares establecidos por éstas. Por tanto, también están interesadas en cuantificar el impacto de cualquier tecnología propuesta en cada capacidad clave de la organización (Tejtel, Zeune, Revels, Held, & Braisted, 2005). Bajo esta idea, QTA tiene como objetivo reducir el tiempo del ciclo analítico combinando modelos multidisciplinarios y permite ampliar la exploración en el espacio del diseño. También provee una trazabilidad de los procesos lo cual permite informar de las decisiones en I+D (Brown, 2006), ofrece un análisis cuantitativo de la efectividad de una tecnología sobre la operación en una organización. En un marco de trabajo QTA, un ambiente puede ser construido y habilitado en tiempo real para la integración entre organizaciones mediante un vínculo directo de herramientas de simulación. Esta metodología está bien situada para la valoración de impacto de tecnologías en SoS respecto a un nivel de capacidad MoEs.

1.10. Aspectos a tener en cuenta en la evaluación de tecnología sobre SoS

Ahora bien, cualquier método desarrollado para evaluar tecnología sobre sistemas de sistemas SoS, debería cumplir con una serie de condiciones o características las cuales se enuncian a continuación. (Patrick T Biltgen, 2007) (Tian, Tang, & Wang, 2009) (Mo Jamshidi, 2009b)(Mo Jamshidi, 2009a):

- **Cuantitativo:** se debe poder realizar la medición de los procesos de forma numérica, lo cual permitirá comparar sus soluciones y brindar niveles de confianza de dichas soluciones o respuestas.

- **Tangible:** debe permitir identificar los factores de eficiencia de una solución tecnológica propuesta.
- **Flexible:** debe poder ser generalizable a múltiples problemas de la misma clase con mínimas modificaciones.
- **Reusable:** El método y el medio pueden ser usados para estudiar múltiples atributos del mismo problema.
- **Rápido:** Puede ser aplicado en un periodo de tiempo razonable sin requerimientos de recursos no realistas.
- **Paramétrico:** Evita soluciones puntuales y proporciona visibilidad de comportamientos ocultos por la complejidad del problema.
- **Escalable:** Para SoS, permite una relación simplificada de las interacciones de los sistemas.
- **Asequible:** Produce resultados reales, sin altos compromisos de mano de obra y uso comercial de herramientas cuando sea posible.
- **Simple:** Los pasos en la metodología son lógicos, razonables.

2. Sistemas de sistemas (SoS) e ingeniería de sistemas de sistemas (SoSE)

La sociedad hoy en día realiza cada vez más trabajo colaborativo o en redes de colaboración. Transnacionales, entidades militares, organizaciones empresariales, sistemas generales de transporte, sistemas de alerta temprana, sistemas inteligentes de distribución de energía, industrias de servicios, manufacturas, sistemas ambientales, sistemas de atención de desastres son solo algunos de los ejemplos de sistemas trabajando en redes colaborativas que se pueden encontrar en los gobiernos y empresas comerciales (Crossley, 2003) (Lopez, 2006) (Wojcik & Hoffman, 2006). Cada día se observa una inevitable dependencia a dicho esquema de trabajo. Se observa también que estos sistemas han evolucionado de elementos independientes a sistemas colaborativos (Kilicay & Dagli, 2007) en donde sus funcionalidades no se pueden encontrar en ninguno de los sistemas constituyentes.

Ante la evidente evolución de los sistemas tradicionales, su análisis e interpretación se espera cambie también. Se necesitan nuevos enfoques que permitan gestionar el logro exitoso de los objetivos de dichos esquemas de trabajo colaborativo. Son muchos los problemas que se presentan en los esquemas organizativos de los sistemas que las técnicas tradicionales de análisis de estos no permiten resolver (Despotou, Alexander, & Hall-may, 2003)(Valerdi et al., 2008)(Mirakhorli, Azim Sharifloo, & Shams, 2008)(Keating, 2005). Una nueva corriente para el análisis de este tipo de sistemas complejos que busca explotar sus propiedades emergentes se le ha denominado Sistemas de Sistemas (SoS).

2.1. Sistemas de Sistemas

El cómo abordar sistemas a gran escala de forma sencilla, es la promesa que el estudio de los SoS brinda, lidiar con la complejidad que se genera a partir de la conjunción de múltiples sistemas complejos en sí mismos, lidiar con la heterogeneidad de cada uno de ellos, con la multiplicidad en las ubicaciones geográficas, y la autonomía de cada sistema constituyente. Son sólo algunas de las ventajas que el uso de un enfoque de análisis y administración de sistemas generalizado como lo es SoS puede proveer (Abel, 2006).

Actualmente existe un creciente interés por el estudio de sistemas complejos en donde a su vez, los elementos constituyentes son complejos también. Usualmente con el estudio de esta clase de sistemas lo que se busca es optimizar el rendimiento y la fiabilidad mediante la adecuada administración de un conjunto de sistemas heterogéneos por medio de los cuales se puede alcanzar un fin común. Existe un interés creciente y generalizado por lograr una sinergia entre sistemas independientes con el fin de lograr un rendimiento deseado para un sistema general que involucre los sistemas constituyentes antes mencionados (Azarnoush et al., 2006).

Existen múltiples puntos de vista acerca de lo que un SoS es. sin embargo, con base en las definiciones dadas por diferentes autores se pueden encontrar múltiples conceptualizaciones de lo que potencialmente podría ser un SoS:

De acuerdo a Jamshidi, (Mo Jamshidi, 2009b) se habla de la existencia de los sistemas de sistemas cuando se cumplen la mayoría de las siguientes características: administración y operación independiente, presencia de una distribución geográfica de los sistemas independientes, Ambientes emergentes, y desarrollo evolutivo del sistema general.

Para Carlock, (Carlock & Lane, 2006) la ingeniería de sistemas de sistemas empresariales se centra en el acoplamiento de las actividades tradicionales de la

ingeniería de sistemas asociadas a la planificación estratégica y el análisis de inversiones.

Pei (Pei, R. S; 2000) ve la integración de sistemas de sistemas como un método que busca mejorar el desarrollo, integración, interoperabilidad, y optimización de sistemas para mejorar el rendimiento en posibles escenarios de futuros campos de batalla.

Carlock y Jamshidi (Mo Jamshidi, 2009a)(Carlock & Lane, 2006) ven los Sistemas de Sistemas como sistemas a gran escala concurrentes y distribuidos compuestos por sistemas complejos a su vez.

Lukasik (Lukasik, S. J. 1998) aborda la ingeniería de sistemas de sistemas como el área que envuelve la integración de sistemas en una más grande denominada sistema de sistemas que en última instancia contribuye a la evolución de la infraestructura social.

2.2. Ingeniería de Sistemas de Sistemas (SoSE)

Son diferentes las concepciones para referirse al trabajo colaborativo entre sistemas para la solución de problemas, desde lo militar, gubernamental a lo empresarial. Teniendo en común que en todas ellas hay un claro interés en la integración de sistemas para la obtención de sus metas. La ingeniería sistemas tradicional busca cómo gestionar el desarrollo, rendimiento y evolución de los sistemas de forma individual asegurando soluciones particulares que atiendan metas preestablecidas (Gorod, Sauser, & Boardman, 2008). Por tanto existe una necesidad por una disciplina que se enfoque en la ingeniería para la integración de múltiples sistemas (Keating, C., Rogers, R., Unal, R., Dryer, D., Sousa-Poza, A., Safford, R., ... & Rabadi, 2003). SoSE representa una extensión o evolución necesaria de la ingeniería de sistemas tradicional. Se distinguen algunas diferencias entre la ingeniería de sistemas (IS) tradicional y SoSE, tradicionalmente la IS se enfoca en solucionar problemas para sistemas complejos

de forma individual y se centra en optimizar el rendimiento de un sistema en particular. En contraste SoSE se enfoca en la integración de múltiples sistemas y en la generación de valor más que en un rendimiento óptimo de todos los sistemas (SIMON, 1960). Soluciones optimas, en el sentido de una única configuración que represente el mejor rendimiento no existe para un contexto SoS. SoSE se centra en el desarrollo de soluciones satisfactorias para problemas en sistemas complejos, en los cuales dicha solución puede evolucionar dependiendo de las condiciones del medio en el cual se encuentra inmerso el sistema y en las demandas del mismo que no pueden ser anticipadas previamente. SoSE se enfoca principalmente en plantear una metodología más que en un proceso, es decir se provee una guía (más específica que una filosofía), pero no provee algo tan prescriptivo como un método (Checkland, 1999).

La IS tradicional se centra en producir un sistema para atender un problema o una necesidad. Por tanto, las expectativas del esfuerzo se encuentran en la solución propuesta. Sin embargo, en el caso de SoSE debe hacer frente a un tipo de problemas complejos en los que la solución final no es necesariamente la expectativa. De hecho, se centra en la idea que la solución va a cambiar con el tiempo.

2.3. Ingeniería de sistemas de sistemas (SoSE) y la ingeniería de sistemas empresariales (ESE)

En el conjunto posible de sistemas complejos que se adaptan a la ingeniería de sistemas de sistemas, en este trabajo se abordan los sistemas empresariales. Desde el punto de la SoSE para este tipo de sistemas se estudia el conjunto de procesos y actividades dedicadas al diseño, entrega e integración de capacidades para la planificación de la consecución de la misión de un sistema empresarial. El proceso de diseño de capacidades traduce y pone en práctica las metas y

objetivos de la empresa en una arquitectura global y coherente (Carlock & Lane, 2006).

La ingeniería de sistemas empresariales (ESE) es la aplicación de los principios, conceptos y métodos de la IS a la planeación, diseño, mejora y operación de una organización (SeBook, 2014). ESE se consolida como una disciplina emergente que se enfoca en marcos de trabajo, herramientas, y enfoques para la solución de problemas, los cuales permiten lidiar con la complejidad inherente a una empresa.

Se considera una empresa a una combinación de recursos (personas, procesos, organizaciones, tecnologías, sistemas, entre otros) con un propósito en el que interactúan entre otros, i) los recursos para coordinar funciones, compartir información, asignar recursos, tomar decisiones, ii) el medio para lograr las metas y objetivos de negocio a través de interacciones complejas en red distribuidas en espacio y tiempo (Rebovich, G., 2011).

Algunas de las definiciones dadas para una empresa son:

- i. Una o más organizaciones compartiendo una misión, metas y objetivos definidos para ofrecer productos o servicios (ISO 2000),
- ii. Una empresa soporta el alcance y la misión definida por el negocio que incluye los recursos los cuales deben coordinar sus funciones y compartir información para soportar una misión común (CIO Council, 1999).
- iii. Un sistema socio técnico complejo compuesto por personas, procesos, tecnologías, sistemas, organizaciones, que interactúan unos con otros y con el medio en búsqueda de lograr una misión común (Giachetti, 2010).

El paradigma de la ingeniería de sistemas es altamente adecuado para el análisis de empresas modernas, en donde se haga uso intensivo de tecnología en todas las facetas de la empresa.

La ESE en SoS provee un enfoque para gestión del cambio organizacional mediante la utilización de tres componentes clave (Carlock & Lane, 2006):

- i. La necesidad de una arquitectura general basada en la misión empresarial centralizada y organizada,
- ii. Una estrategia de gestión que use la arquitectura como vínculo entre los procesos organizacionales, la gestión organizacional, y la tecnología.
- iii. Los procesos de ingeniería de sistemas empresariales (mejores prácticas industriales) que utilicen tanto la arquitectura como la estrategia de gestión para evolucionar la arquitectura y gestionar su propia implementación

En este trabajo es de interés el uso de la arquitectura como activo de conocimiento para la evaluación de tecnología sobre este tipo de sistemas complejos. por tanto, es de interés conocer el primero de los tres aspectos claves en la gestión de sistemas empresariales.

2.4. Sistemas de sistemas y el diseño arquitectural

Existen diversos métodos para el diseño y desarrollo arquitectural de sistemas que se dividen generalmente en tres categorías. El método de análisis estructurado (SAM, por sus siglas en ingles), el método orientado a objetos (OOM, por sus siglas en inglés), y el método basado en actividades (AMB) (Rui, Wang, & Yu, 2012).

El método de análisis estructurado (Levis, 2000), el cual es un método orientado a procesos basado en las técnicas de diseño y análisis estructurado en ingeniería de software. Este enfoque utiliza como punto de inicio el concepto de operación o misiones operacionales para poder crear los productos arquitecturales mediante un proceso jerárquico de descomposición.

El método orientado a objetos (Bienvenu, M. P., Shin, I., & Levis, 2000), caracterizado por la utilización de técnicas arquitecturales y notación de diseño basada en el lenguaje unificado de modelado (UML). El enfoque describe las necesidades operacionales, el diseño de datos en el contexto de uso, y provee una base para la trazabilidad en el diseño de los sistemas. Se basa en el concepto de abstracción de datos y herencia desde un punto de vista orientado a servicios.

El método basado en actividades (AMB) (Ring, S. J., Nicholson, D., Thilenius, J., & Harris, 2007), está basado en el alineamiento de las vistas operacionales y de sistemas las cuales proveen los bloques de construcción básicos para la construcción de la arquitectura. Sin embargo, ninguno de los tres métodos antes descritos aborda los problemas asociados a el trabajo colaborativo en red entre diferentes sistemas, por lo cual no se consideran enfoques apropiados para diseño arquitectural de sistemas complejos como los SoS. En (Rui et al., 2012) se habla de un enfoque para el diseño arquitectural basado en capacidades (CBM) el cual se centra en la utilización de una vista arquitectural adicional denominada vista de capacidades. La vista de capacidades permite capturar las metas empresariales asociadas a una visión general a través de la ejecución de un curso especificado de acciones, o la habilidad de alcanzar un efecto deseado bajo unas condiciones específicas mediante la combinación de medios o recursos que permiten llevar a cabo un conjunto de tareas. Esta vista provee un contexto estratégico para las capacidades y su evolución.

2.5. *Proceso de análisis arquitectural basado en capacidades*

Se define la capacidad (del inglés *capability*) de un sistema como la habilidad que tiene para ejecutar un curso de acciones para alcanzar un efecto deseado, bajo un conjunto específico de condiciones (SeBook, 2014)

Las capacidades de un negocio o sistema están íntimamente relacionadas con el plan estratégico y están diseñadas para satisfacer las estrategias operativas o de negocio, metas y objetivos, por lo cual proveen una excelente base para la construcción de una arquitectura. Usualmente las capacidades se expresan en términos de los resultados o del valor que les aporta a los sistemas y no en términos puramente funcionales asociados a las unidades de negocio o a soluciones particulares de IT. Asegurando con esto el alineamiento del negocio y las TI. Que las capacidades se expresen en términos de resultados implica también que estas están atadas al ambiente en el cual está inmerso el sistema en lugar de la estructura interna del mismo (Manning, H., Bodine, K., & Bernoff, 2012)(Faculty, Iacobucci, & Fulfillment, 2012)(Rui et al., 2012).

Para que un sistema u organización pueda llevar a cabo una actividad, diferentes partes de esta deben estar involucradas. En consecuencia, una capacidad es modelada en función de otros conceptos relacionados con la arquitectura del sistema, conceptos tales como:

- Personas
- Unidades organizacionales
- Funciones
- Procesos
- Servicios de negocio
- Información y datos
- Aplicaciones y servicios
- Infraestructura

Desde esta perspectiva, una capacidad puede ser vista como una vista transversal de la arquitectura de un sistema o empresa (Bredemeyer, D., Malan, R., Krishnan, R., & Lafrenz, 2003). Las capacidades se utilizan para la gestión del cambio estratégico y proporcionar soporte al portafolio de proyectos. En consecuencia, los proyectos crearan soluciones dirigidas a crear nuevas capacidades o a potenciar

capacidades existentes. Tanto las capacidades como el incremento en las capacidades proveen la base para la construcción de un mapa de ruta del desarrollo de la arquitectura de un sistema o una empresa.

El diseño arquitectural tradicional presenta las arquitecturas de sistemas en cuatro vistas principales, datos, funciones, organización e infraestructura tecnológica. Un análisis basado en capacidades, ver Figura 3, utiliza un CBM para el diseño arquitectural en lugar de un enfoque basado en la misión. Se parte de una visión de las capacidades de alto nivel, la cual se enfoca en el desarrollo de capacidades y busca dar soporte a múltiples objetivos en lugar de una tarea o misión específica. A partir de las capacidades se desarrollan las demás vistas arquitecturales las cuales despliegan las capacidades propuestas en el sistema en términos de sus procesos operativos, conceptos funcionales (servicios y aplicaciones), su infraestructura tecnológica y sus datos.

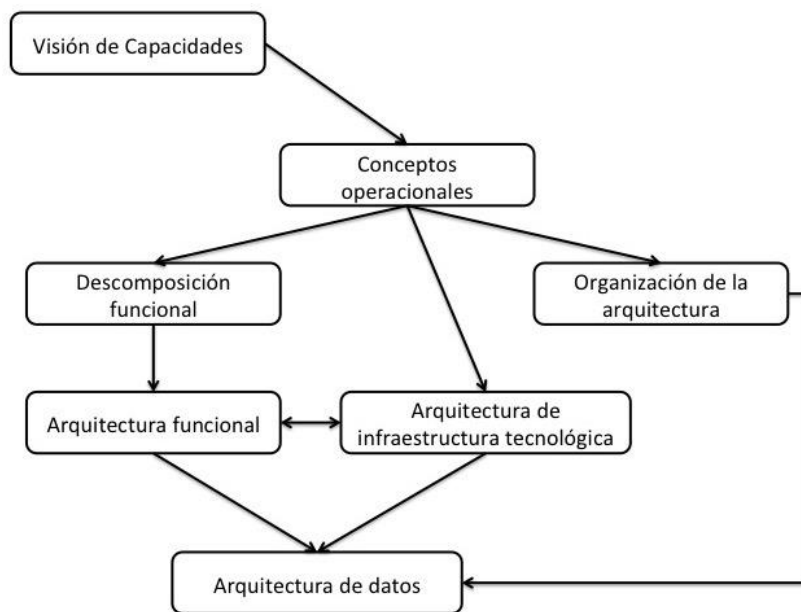


Figura 3. Proceso de análisis basado en capacidades, adaptada de (Rui et al., 2012)

3. Arquitecturas de sistemas

Gestionar organizaciones complejas que utilizan sistemas sofisticados y hacen uso intensivo de tecnología para alcanzar sus objetivos misionales, demandan de un método estructurado y repetible para evaluar inversiones y alternativas de inversión, desarrollar nuevos sistemas y desplegar tecnologías (DoDAFT, 2007). Para satisfacer esta demanda, las arquitecturas empresariales (AE) o las arquitecturas de sistemas (AS) fueron desarrolladas. Una AE es la organización fundamental desde un punto de vista holístico de un sistema o una organización representada por sus elementos (personas, procesos, aplicaciones, datos, sistemas, etc.), las relaciones entre elementos y su ambiente, y sus principios de evolución y diseño (S. Engineering & Committee, 2000). Las arquitecturas son activos de conocimiento estratégico en las organizaciones (Shah & El Kourdi, 2007), sin embargo una AE es también una técnica estratégica diseñada para asistir a los administradores de alto nivel en el análisis de las metas empresariales y en la gestión del cambio.

Una AE busca gestionar el cambio mediante el diseño, una estructurada gestión del cambio orientado hacia la visión organizacional puede ser alcanzada de forma efectiva mediante el entendimiento de los activos de conocimiento existentes, procesos de negocio, estructura organizacional, estructuras de información, y aplicaciones tecnológicas representadas en la arquitectura que presenta el estado actual de la organización “*as-is*”, y la proyección de aquello que puede hacerse de forma diferente, innovadora, y orientada a alcanzar una visión en particular representada en una arquitectura objetivo “*to-be*” (Janssen & Hjort-Madsen, 2007). El equipo arquitectural, aquel encargado de gestionar y operar una AE necesita interactuar con todos los procesos administrativos (PA), especialmente con los de las tecnologías de la información (TI). Cuando todos los PA trabajan juntos de forma efectiva, la AE permite hacer cambios estratégicos efectivos de una manera eficiente (J. W. Ross, Weill, & Robertson, 2006). Por tanto, se espera que una AE

haga parte fundamental de los procesos de toma de decisiones de cualquier naturaleza administrativa.

3.1. La taxonomía de una arquitectura empresarial

Las arquitecturas empresariales aparecieron en escena gracias al trabajo de Jhon Zachman en 1987 “*A framework for information systems architecture*”(J. a. Zachman, 1987). Con la llegada de las arquitecturas empresariales aparecieron también los marcos arquitecturales (EAFs) los cuales permiten diseñar y documentar una AE. Múltiples EAFs se encuentran en uso, por ejemplo, el marco arquitectural del *The Open Group* TOGAF (ToG, 2009), el marco de arquitectura federal para el gobierno de los Estados Unidos de América FEAF (Council, 2001), el marco arquitectural del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América DoDAF (AFT, 2004); solo por nombrar algunos de los mas conocidos.

Las AE se identifican principalmente como una disciplina administrativa (Saha, 2013). Sin embargo, la adopción de un enfoque arquitectural transfiere los problemas asociados a la complejidad en ingeniería y la complejidad en la gestión de sistemas(DeLaurentis, Dan and Callaway, 2004)(Saha, 2013), a un marco para la gestión de la complejidad, teniendo en cuenta que la complejidad en ingeniería y gestión están relacionadas (FP Jr, 1987). Un marco arquitectural define como crear y utilizar una arquitectura, provee los principios y las prácticas para crear y utilizar las vistas y modelos arquitecturales, y organiza la arquitectura dividiéndola en dominios o vistas y proveyendo modelos, típicamente matrices y diagramas, que documentan las vistas, ver Figura 4.

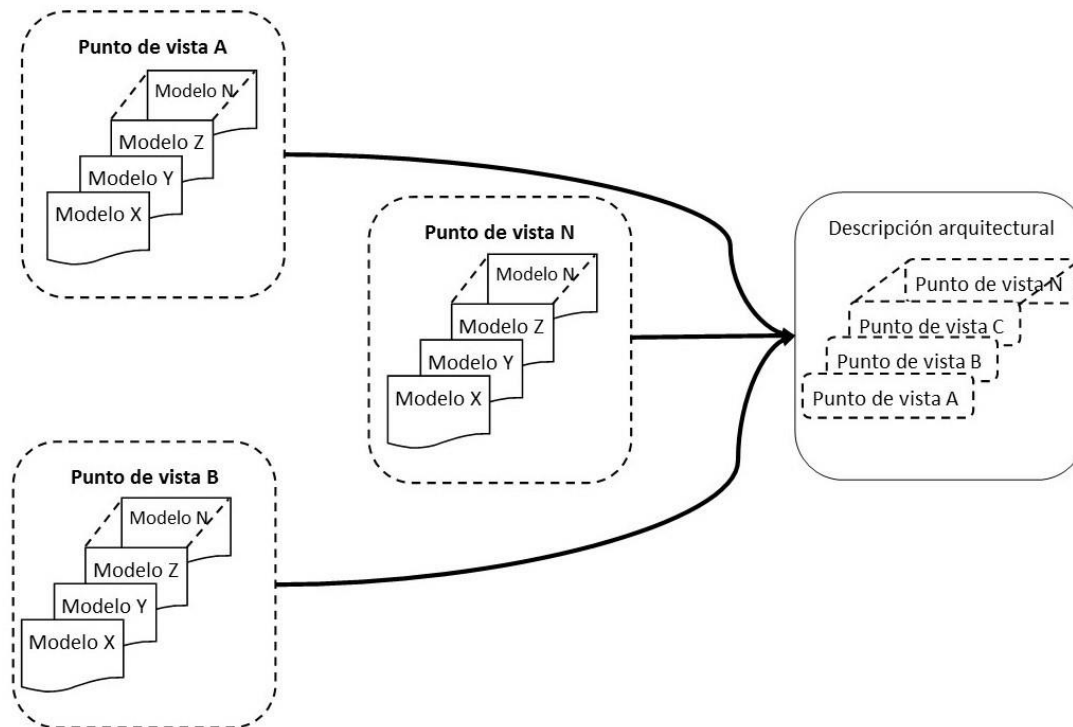


Figura 4. Esquema genérico para un marco arquitectural

Los modelos que describen una arquitectura pueden ser vistos como los planos para la adquisición o realización de un sistema. Sin embargo, las arquitecturas contienen más que solo descripciones abstractas de la estructura y el comportamiento de un sistema. Contiene entre otros, los principios, políticas, estándares que aseguran el buen diseño, desarrollo, gobierno y evolución del sistema.

Es normal que para cualquier tipo de marco arquitectural se divida la arquitectura en cuatro dominios principales (Tang, 2004), i) Arquitectura de negocios, en la cual se plasman todos los procesos y actividades que permiten alcanzar los objetivos estratégicos de la organización o sistema, ii) Arquitectura de datos, en la cual se describen la estructura y diseño de los datos que soportan los procesos de negocio, iii) Arquitectura de aplicaciones, en la cual se describen, se estructura y se documenta el software que presta los servicios a los procesos de negocio, y hace uso de los datos producto de la operación de la organización, y una iv)

Arquitectura de tecnología, la cual describe, la estructura y documenta la infraestructura tecnológica necesaria para soportar las aplicaciones y procesar los datos producto de la operación de la organización, ver Figura 5.

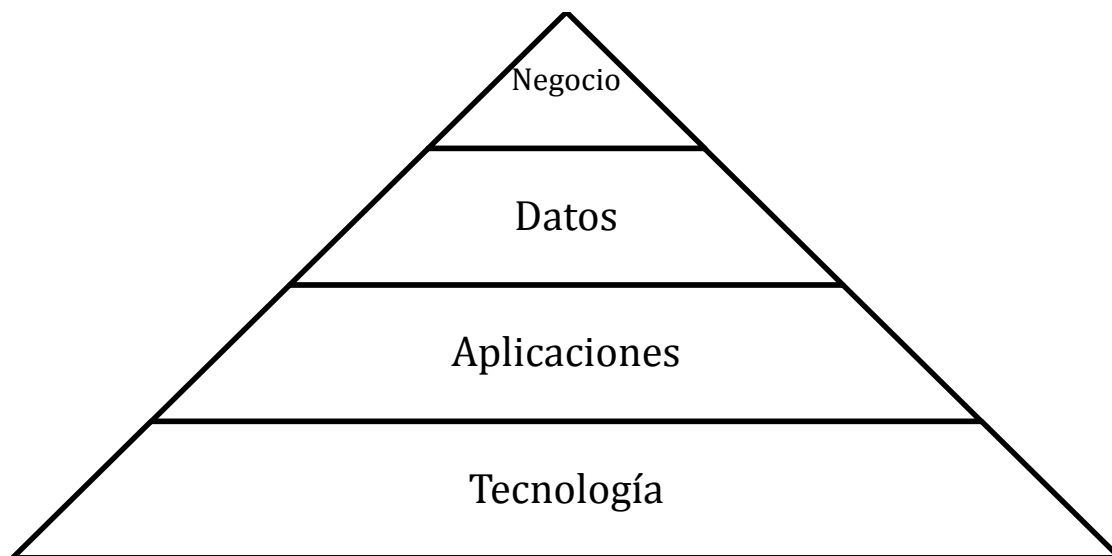


Figura 5. Dominios arquitecturales de base para cualquier arquitectura

Sin embargo, dependiendo del marco arquitectural que se emplee y la finalidad que dicho marco arquitectural tenga, las vistas en las cuales se divide la arquitectura puede variar. Se muestra en Tabla 1, un listado de marcos arquitecturales en los cuales se evidencia la variación en términos de taxonomía de estos, tanto en división de las vistas arquitecturales como en términos de los lenguajes de modelado.

3.2. TOGAF & DoDAF

Para este trabajo en particular se empleará nomenclatura y terminología propia de dos marcos arquitecturales en particular, DoDAF y TOGAF. TOGAF por su relación con la industria y su modelo de desarrollo y gobernanza, y DoDAF por su taxonomía claramente definida y la posibilidad de orientar el diseño arquitectural mediante un enfoque basado en capacidades el cual es el ideal para la integración de sistemas (SoS). A continuación, se profundiza en las características principales de los dos marcos arquitecturales y las ventajas que trae el uso conjunto de los mismos.

The Open Group (TOG) (TOG, 2016) es el consorcio internacional que busca mejorar el logro de los objetivos del negocio a través de estándares en TI. El foro de arquitecturas del TOG es el encargado de desarrollar TOGAF desde mediados de los años 90. TOGAF es un marco arquitectural que provee un enfoque comprensivo para el diseño, planeación, y gobernanza de una arquitectura empresarial. El modelado de arquitecturas mediante este marco arquitectural divide los sistemas u organizaciones en cuatro dominios principales, negocios, aplicaciones, datos y tecnología, ver Figura 6. Además cuenta con un método que describe el proceso de desarrollo y de cómo utilizar la arquitectura denominado AMD, ver Figura 7.

Tabla 1. Comparación entre marcos arquitecturales y las variantes en términos de vistas para el modelado de sistemas, modelos de desarrollo y lenguajes de modelado.

EAFs	REFERENCIA	PUNTOS DE VISTA	DEFINE METAMODELO	NOTACIÓN RECOMENDADA
DoDAF	(AFT, 2004)	8 vistas	No	SySML, UPDM
MODAF	(Biggs, 2005)	7 vistas	No	M3, UPDM
RM-ODP	(Linington, 1995)	5 puntos de vista	Sí	UML4ODP
"4+1" Kruchten	(Kruchten, 1995)	5 puntos de vista	No	UML
TOGAF	(ToG, 2009)	4 dominios	Sí	UML
NAF	(Handley, Holly AH and Smillie, 2008)	7 vistas + subvistas	Extiende metamodelo de UML	UPDM
FEAF	(Council, 2001)	3 tipos arquitectura x 5 perspectivas	No	-
TEAF	(Urbaczewski & Mrdalj, 2006)	4 vistas x 4 perspectivas	(No es público)	UML (sigue RUP)
Zachman	(Origins, Zachman, Open, & Architecture, 2007)	6 puntos de vista x 6 focos de interés	No (Sólo modelos conceptuales)	Sí

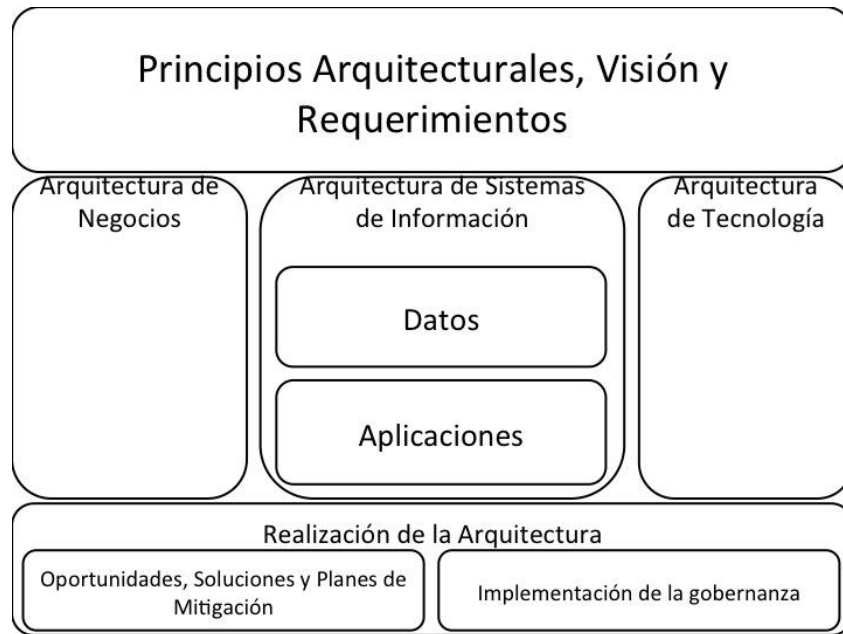


Figura 6. Vistas arquitecturales para el marco arquitectural TOGAF

El marco arquitectural del Departamento de Defensa (DoDAF) o C4ISR (*Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*) como era conocido anteriormente, es el marco arquitectural utilizado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos que fue lanzado por primera vez en 1997.

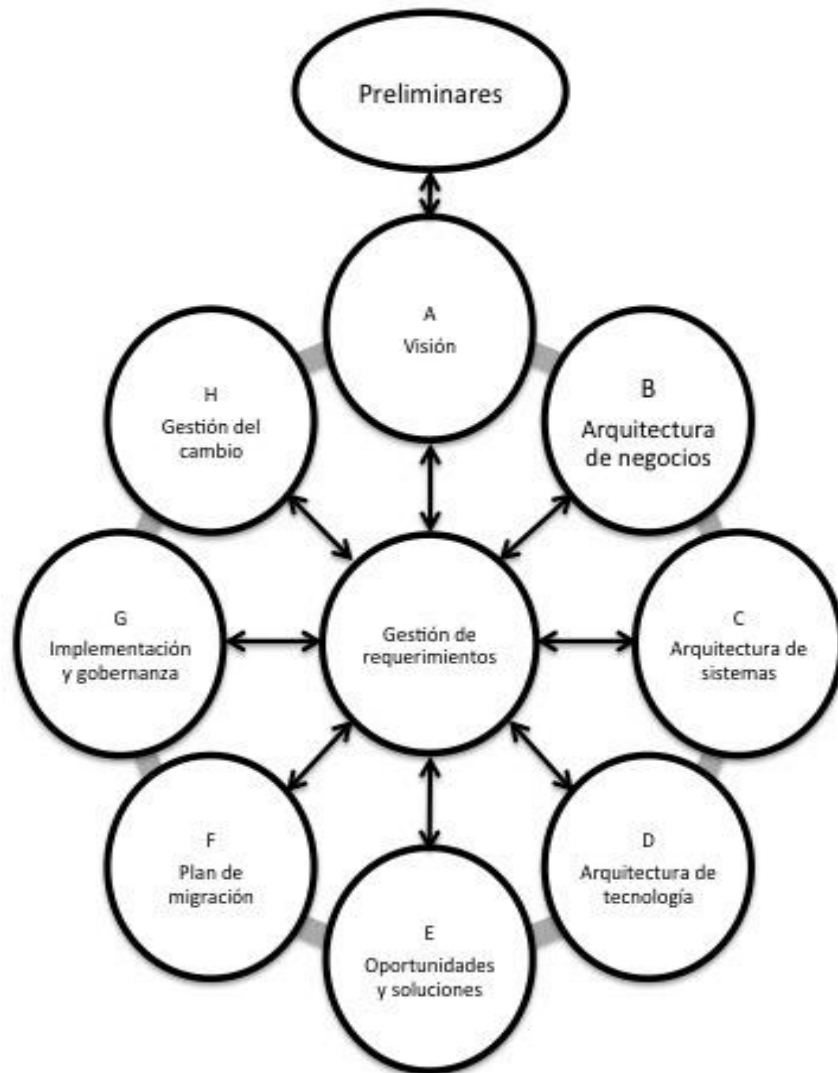


Figura 7. Modelo de implementación y gestión de la arquitectura AMD

DoDAF proporciona una dirección general para el desarrollo, uso y gestión de las arquitecturas con énfasis en la interoperabilidad entre sistemas complejos de gran tamaño. Una arquitectura desarrollada con DoDAF está compuesta por un conjunto de descripciones o vistas relacionadas entre sí, las cuales contienen información del sistema desde una perspectiva particular, ver Figura 8 y Figura 9. DoDAF 2.0 propone ocho vistas principales denominadas Vista de Capacidades (VC), Vista de Operaciones (VO), Vista de Servicios (SvcV), Vista de sistemas (SV), Vista de Datos (DIV), Vista de Estándares (StdV), Vista de Proyectos (PV), y Todas las Vistas (AV).



Figura 8. Vistas arquitecturales para el marco arquitectural DoDAF

DoDAF tiene un enfoque orientado a la taxonomía de la arquitectura y a los modelos de referencia que las organizaciones deben utilizar cuando se encuentran describiendo el estado actual de la organización y en la descripción de su visión futura. Además, orienta su diseño al alineamiento orientado por capacidades el cual busca diseñar el cambio organizacional orientado a un conjunto de capacidades relevantes para la misión organizacional. Otra cualidad de DoDAF es su orientación al propósito “*fit-for-purpose*” lo cual permite a las organizaciones, seleccionar solo aquellas vistas arquitecturales que sean relevantes para el despliegue, evolución o introducción de nuevas capacidades.

DoDAF provee cierta guía para el desarrollo, implementación y gobernanza de la arquitectura. Sin embargo, es TOGAF quien provee un método estructurado para el desarrollo y gestión de estas, el AMD (*Architecture Development Method*) describe como conducir la realización de la arquitectura objetivo mediante la integración de los ciclos de vida para la entrega de productos en ingeniería de sistemas y provee un marco de gobierno para la gestión evolutiva de la arquitectura.

En resumen, DoDAF provee un vocabulario común para el contenido de la arquitectura, mientras que TOGAG provee un vocabulario común para el desarrollo y uso de su contenido.

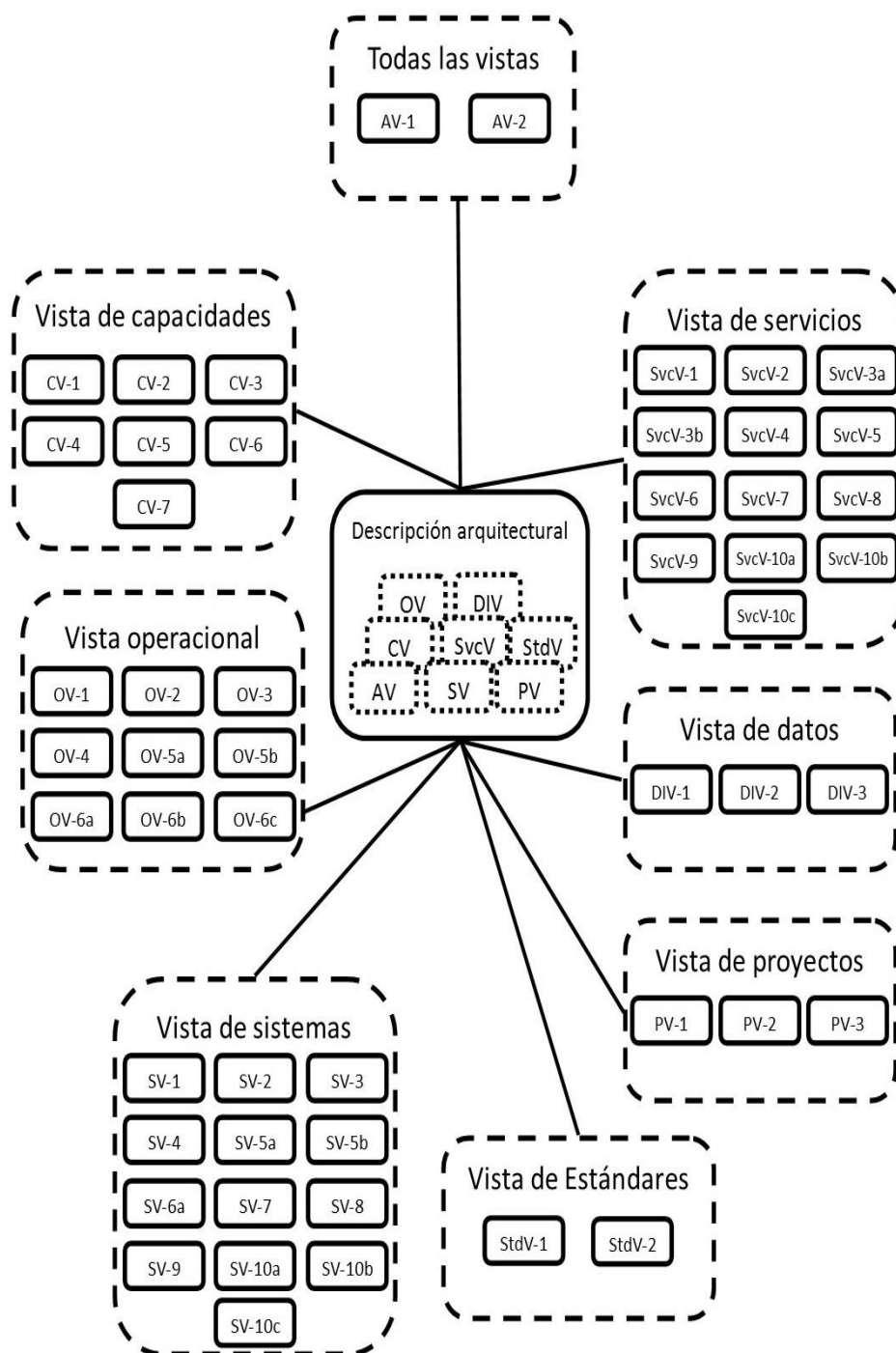


Figura 9. Vistas y modelos arquitecturales para el marco arquitectural DoDAF 2.0

3.3. Las arquitecturas empresariales y el ciclo de vida para el desarrollo de sistemas

Como una parte en el ciclo de vida para el desarrollo de sistemas, una AE es empleada como soporte en el desarrollo de los modelos del sistema, específicamente en i) la definición de requerimientos, ii) la construcción de escenarios, iii) el desarrollo de un diseño bien definido mediante un proceso de eliminación de opciones, iv) un diseño y análisis estructurado. En este trabajo es de especial interés el uso de las AE para la toma de decisiones en compra y selección de las mejores opciones para la incorporación de tecnología en etapas tempranas del ciclo de vida del desarrollo de sistemas.

En el proceso de diseño de un sistema complejo es común el uso de ciclos de vida para el desarrollo de Software, en el desarrollo de Software se emplean modelos de desarrollo como el de Cascada, Espiral, modelo V, entre otros (Kelly Ann Griendling, 2011), Estos modelos buscan mejorar el desarrollo de los sistemas, reducir costos, riesgos, entre otros aspectos. El modelo V, el cual es uno de los más utilizados en ingeniería de sistemas y el cual es la base para los modelos V+ y V++ (Forsberg & Mooz, 2001), ubica las arquitecturas de un sistema en las etapas tempranas del análisis de soluciones y diseño para desarrollar o mejorar un sistema, Figura 10.

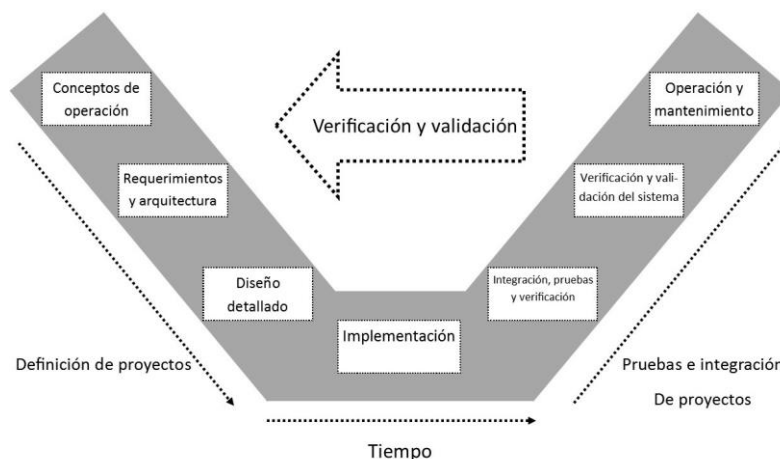


Figura 10. Modelo V para procesos en ingeniería de sistemas

3.4. Arquitecturas de sistemas y evaluación de tecnología

Las AE proveen un método estructurado y repetible para evaluar inversiones y alternativas de inversión, así como la capacidad de aplicar un cambio organizacional efectivo, desarrollar nuevos sistemas, y desplegar nuevas tecnologías (Bachmann, Bass, Chastek, Donohoe, & Peruzzi, 2000). Las AE buscan describir un sistema en términos de capacidades requeridas en lugar de los requisitos del sistema, esto se debe a que los requerimientos del sistema están más relacionados con las necesidades de los *Stakeholders*, y las capacidades están más relacionadas con los objetivos operacionales y las metas visionales, ver Figura 11, (Kelly A Griendling, 2011).



Figura 11. Relación entre requerimientos y capacidades

La toma de decisiones en procesos de adquisición de tecnología tradicionales es desarrollada bajo enfoques técnicos en donde las tecnologías son seleccionadas de acuerdo a su habilidad para alcanzar un conjunto de requerimientos técnicos. Estos requerimientos se enfocan principalmente en la madurez de la tecnología

más que en mejorar una capacidad interna del sistema en el que van a ser incorporadas, esto significa que los enfoques tradicionales están más enfocados en el rendimiento de la tecnología (MoPs) que en el posible impacto que la tecnología pueda tener sobre el sistema a incorporar (MoEs), ver Figura 12. Un enfoque basado en capacidades se centra en las capacidades que una tecnología le pueda proveer a una organización o a un sistema, en contraste con un enfoque tradicional que se enfoca en las especificaciones técnicas. En términos de una AE, una capacidad se despliega por medio de un conjunto de actividades u operaciones, dichas actividades están representadas por la arquitectura de negocios o la vista operacional de la arquitectura. El desarrollo arquitectural desde un enfoque de capacidades trata de vincular las actividades operacionales con posibles soluciones candidatas que puedan ser comparadas o evaluadas, estas soluciones proveen el significado y la forma mediante el cual las capacidades pueden ser llevadas a cabo.

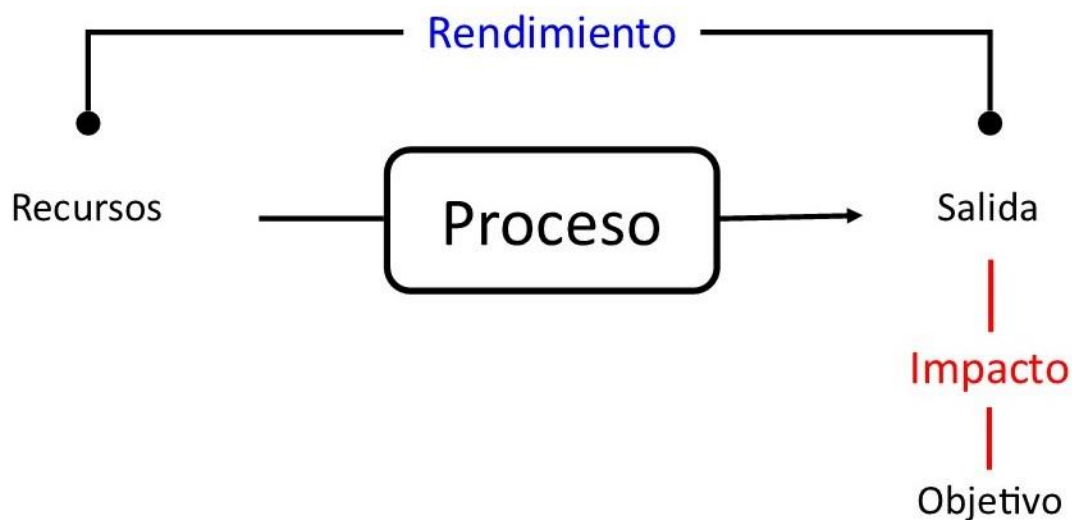


Figura 12. Impacto Vs Rendimiento

La adquisición de tecnología desde un enfoque basado en capacidades busca relacionar directamente las adquisiciones tecnológicas y las metas organizacionales.

4. Retos técnicos e hipótesis

Este capítulo se centra en la exploración de brechas para la posible creación de un enfoque alternativo que permita evaluar el impacto de tecnología en sistemas complejos como los SoS. La búsqueda de brechas parte de la línea base en términos de enfoques de evaluación de tecnología en sistemas complejos mostrado en el Capítulo 2, los retos técnicos presentes en el dominio de conocimientos para el estudio de sistemas de sistemas mostrado en el Capítulo 3, y la noción, mostrada en el Capítulo 4, de que las arquitecturas de sistemas, además de ser una herramienta para la gestión de la complejidad en SoS también pueden ser un activo de conocimiento importante para la evaluación de tecnología.

4.1. *Análisis de las técnicas para evaluación de tecnología en SoS*

Los enfoques para la evaluación de tecnología que se mencionan en el Capítulo 2, son cada uno de ellos un compendio de métodos, herramientas, procesos, prácticas que facilitan la medición de impacto, valoración o contribución de la tecnología en un contexto. En el trabajo realizado por Biltgen en 2007 (Patrick Thomas Biltgen & Brown, 2007) se hace una comparación entre los diferentes métodos de evaluación y las propiedades deseables para una técnica de evaluación de tecnología aplicable a sistemas complejos, ver Tabla 2. En donde los métodos asociados con la evaluación cuantitativa de tecnología resultan ser los más adecuados.

La fundación nacional de la ciencia (*National science foundation*) 2006. Reporto en “*Simulation-Based Engineering Science*” que la simulación puede usarse como base para explorar nuevas teorías y el diseño de nuevos experimentos que verifiquen dichas teorías y permite también, observar fenómenos que en condiciones experimentales no permitan su observación, o cuando las mediciones son parciales o muy costosas de realizar (Oden, J. T., Belytschko, T., Fish, J., Hughes, T. J. R., Johnson, C., Keyes, D., & Yip, 2006).

Tabla 2. Comparación entre las diferentes técnicas de evaluación de tecnología respecto a las cualidades que debe tener una técnica enfocada a los SoS. Bueno □, Muy bueno □□, Excelente □□□, Malo □, Deficiente □□, El mejor en su clase #. Tabla tomada de (Patrick Thomas Biltgen & Brown, 2007).

	Experimental	SAB	TDA	TPRI	TIES	QTA
Cuantitativo	□□	□□	□□	□	□□	□□□#
Tangible	□□□	□	□□	□□	□□	□□□#
Flexible	□	□□	□□	□	□□□#	□□
Reusable	□□	□	□□	□□	□□□#	□□
Rápido	□□	□□	□□#	□□	□	□□
Paramétrico	□	□	□□	□□	□□□#	□□
Escalable	□	□□	□□	□	□	□□□#
Asequible	□	□□	□□□#	□□□	□	□□
Simple	□□	□□	□□□	□□□#	□	□
Consolidado	□□	□	□	□	□□#	□□#

4.2. Técnicas cuantitativas de evaluación de tecnología

Teniendo en cuenta las anteriores características, el modelado y simulación como herramienta de evaluación permite en las técnicas de evaluación de tecnología el calculo de las medidas de eficacia MoEs para tecnologías candidatas sin la necesidad de entrar a entornos reales. La finalidad de éstos es la construcción de funciones de transferencia que permitan medir el rendimiento de la tecnología. Mediante un modelado y una simulación apropiada se pueden crear funciones de transferencia que puedan mapear información desde un nivel de sistema MoPs o medidas de rendimiento, a uno de sistema de sistemas MoEs. Lo primero que se debe tener en cuenta es un esquema de modelado jerárquico y un entorno de simulación en el cual se puedan diferenciar jerárquicamente los SoS de los sistemas y sus subsistemas. ver Figura 13.

Los retos se encuentran en la dificultad de mapear el nivel de sistema al de SoS. El comportamiento a nivel de sistemas independientes resulta ser muy diferente al comportamiento en SoS. Por ejemplo, la optimización de un sistema independiente puede disminuir el rendimiento del SoS. Es decir, tener optimizado el nivel de sistema no implica un SoS optimizado. El mismo paradigma es aplicado en el ámbito de los niveles de Sistema/Subsistema, esto debido a la naturaleza

independiente de cada sistema constitutivo (Gorod, A., Sauser, B., & Boardman, 2008) (Sauser, Boardman, & Verma, 2010).

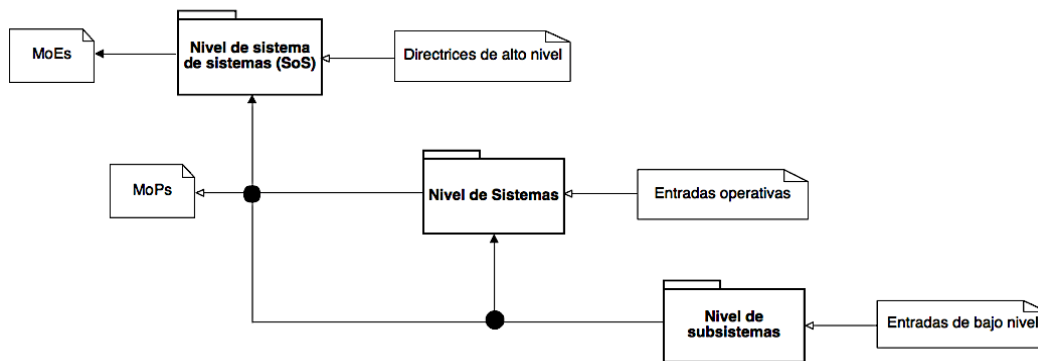


Figura 13. Jerarquía de un entorno para modelado y simulación, para una efectiva evaluación cuantitativa sobre SoS

La literatura recomienda crear modelos que vinculen el nivel jerárquico de sistemas con el nivel jerárquico mas alto de Sistema de Sistemas, uniendo las salidas del primero con las entradas del segundo, ver Figura 14.

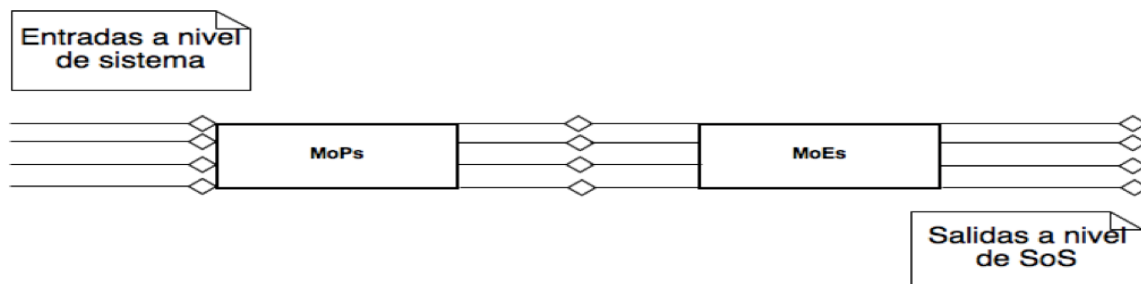


Figura 14. Conexión entre niveles jerárquicos de sistemas

La creación de un modelo jerárquico y un ambiente de simulación que desarrolle una función de transferencia que mapee de un nivel atómico los parámetros de las tecnologías a un nivel de SoS para poder obtener los MoEs, es el primer nivel para habilitar la evaluación de tecnología. Teniendo como base este ambiente, los estudios cuantitativos pueden permitir la realización de la optimización de los recursos. Sin embargo en el modelado se deben superar ciertas paradojas o contradicciones inherentes a los niveles jerárquicos de los sistemas, ver Figura 15, las cuales evidencian la gran diferencia entre el modelado y simulación

tradicional empleado para los sistemas tradicionales y aquel que debe ser empleado en SoS. Donde se destaca la necesidad de solucionar problemáticas inherentes a la presencia de autonomía en los modelos de cada sistema, en cómo cada modelo de sistema no está centrado en una plataforma particular, sino que funcionan como entes con una pertenencia descentralizada, evidenciándose esto en sus interacciones basadas en redes de comunicaciones cooperativas entre los diferentes sistemas constituyentes. Además cada uno de éstos sistemas no son homogéneos, existe una diversidad de funcionalidades entre todos los sistemas constitutivos, razones por las cuales la funcionalidad de un SoS, a diferencia de los sistemas tradicionales, no puede determinarse con antelación, solo como producto de su evolución e interacción entre los diferentes sistemas constituyentes, lo cual se señala como una necesidad de incorporar en el modelado de SoS (Alex Gorod, Dr. Brian Sauser, Dr. John Boardman, 2008) (Brian Sauser, John Boardman, and Dinesh Verma, 2010).



Figura 15. Características de los sistemas y sus paradojas, imagen adaptada de (Gorod et al., 2008)

4.3. Problemas y oportunidades

Se evidencia la necesidad de crear o mejorar técnicas cuantitativas que permitan evaluar el impacto que una nueva tecnología pueda tener sobre un sistema complejo. En la Tabla 2, se muestran las falencias en aspectos fundamentales como la rapidez de aplicación y su asequibilidad. Es decir, se necesitan muchos recursos e investigación lo cual se ve reflejado en tiempo y dinero para la creación

de modelos de simulación adecuados para la creación de un esquema de evaluación de tecnología de manera cuantitativa.

Dichas técnicas se han implementado en gran medida en entornos militares o gubernamentales en los cuales la cultura de investigación e inversión en la planificación basada en simulaciones numéricas es muy común. Sin embargo, En la mayoría de las situaciones dichos entornos de investigación que provean los modelos que puedan habilitar un entorno de simulación no existen y realizarlos es poco viable tanto por factores temporales como monetarios. Por tanto, es de esperarse que los inconvenientes mostrados en los modelos de evaluación de tecnología cuantitativos se acentúen aún más y como consecuencia el uso de este tipo de técnicas sea no viable de implementar. Por tanto es necesario crear alternativas que permitan realizar una caracterización de los diferentes componentes de un SoS, organizarlos de manera efectiva y además poder crear modelos que habiliten un entorno de simulación simplificado que sea ágil de realizar desde un punto de vista temporal (Rápido) y que cualquier organización con un nivel apropiado de formación sin la necesidad de tener una división formal de investigación lo pueda realizar (Asequible).

4.4. Arquitecturas de sistemas y evaluación de tecnología.

Como se mencionó en el Capítulo 4, las arquitecturas de sistemas se muestran como un enfoque alternativo empleado para visualizar, conceptualizar, planear, crear, comunicar y construir sistemas complejos como lo pueden ser los SoS (Tan, Y.H., Yeoh, 2006), Las arquitecturas se crean a partir de las necesidades de los interesados y las consideraciones de los expertos. Un buen diseño de un SoS debería tener atributos tales como la flexibilidad, adaptabilidad, y una estructura evolutiva, los cuales son aportados por los modelos arquitecturales. Estos atributos crean una estructura duradera que se podrá adaptar a los cambios y posibles inserciones de nuevos sistemas, nuevas tecnologías, nuevas condiciones operacionales que obliguen al SoS a evolucionar o adaptarse a un ambiente cambiante, a las necesidades de los interesados o a los requerimientos de las nuevas tecnologías. Sin embargo, las arquitecturas no dejan de ser documentos,

tablas y modelos estáticos que describen la estructura y el comportamiento de los sistemas.

4.5. Arquitecturas ejecutables

Una representación arquitectural proveniente de cualquier marco arquitectural (FEAF, TOGAF, DODAF, Zachman, etc.) es un modelo, D.T. Ross define un modelo como “ M es un modelo de A respecto a un conjunto de preguntas Q si y solo si M puede ser utilizado para resolver preguntas acerca de A en Q con una tolerancia T ” (D. T. Ross, 1977). Esta definición implica que las representaciones arquitecturales de un marco arquitectural podrían ser un modelo para un SoS si y solo si la arquitectura puede ser utilizada para responder preguntas acerca del sistema con cierta tolerancia. Sin embargo, los artefactos provenientes de los marcos arquitecturales son representaciones pictóricas utilizadas para modelar sistemas. En muchos casos una representación pictórica es suficiente para responder preguntas de un sistema (ToG, 2009)(Tao, Luo, Chen, Wang, & Ni, 2015). Pero en otros casos un modelo de simulación debe ser asociado al artefacto para que este pueda ser el modelo apropiado para responder un conjunto particular de preguntas acerca del comportamiento del sistema. Una arquitectura ejecutable es comúnmente definida como un modelo dinámico ejecutable que puede ser generado de forma automática o semiautomática a partir de un artefacto arquitectural (Bueno et al., 2014)(Delgado, Torres-Sáez, & Llamosa-Villalba, 2014)(Baumgarten & Silverman, 2007). En el caso de que la simulación sea necesaria, las arquitecturas ejecutables pueden ser utilizadas para crear un vínculo entre el modelado de artefactos arquitecturales y ambientes de modelado y simulación.

4.6. Preguntas de investigación

Las técnicas de evaluación cuantitativa de tecnología parecen perfilarse como una buena opción para evaluar el impacto de tecnología sobre SoS. Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 2, tienen falencias en términos de

asequibilidad y rapidez en su aplicación. Ante la necesidad de postular formas alternativas para evaluar el impacto de tecnología sobre sistemas complejos, se presentan las siguientes preguntas de investigación.

1. ¿Pueden las arquitecturas ejecutables proveer información relevante para responder preguntas acerca del impacto de una posible inserción de tecnología dentro de un sistema?
2. ¿Pueden las arquitecturas ejecutables aplicadas a la evaluación de tecnología influir en aspectos relacionados con la asequibilidad y la rapidez en los enfoques de evaluación cuantitativa de tecnología?

4.7. Descripción de la hipótesis

A partir de las necesidades evidenciadas en las técnicas cuantitativas de evaluación de tecnología y buscando responder las preguntas de investigación, se presenta a continuación la formulación de la hipótesis planteada en este trabajo para el diseño de un enfoque de evaluación de impacto que permita realizar procesos de evaluación cuantitativa de forma asequible y rápida para organizaciones que no cuenten con los conocimientos o recursos necesarios para desarrollar modelos formales de simulación que representen el comportamiento dinámico de sistemas complejos. La formulación de la hipótesis se da desde dos puntos de vista complementarios, desde un punto de vista técnico y desde un punto de vista estratégico.

4.7.1. Punto de vista técnico

El uso de arquitecturas ejecutables producto de los modelos arquitecturales pueden ser utilizadas como herramientas de simulación que describen el comportamiento dinámico de los sistemas (Kelly Ann Griendling, 2011)(Ge, Hipel, Li, & Chen, 2012)(Jian, Bing-feng, Xiao-ke, Ke-wei, & Ying-wu, 2010)(Kilicay-Ergin & Dagli, 2008), y pueden ser empleadas para la evaluación de impacto de tecnología como modelos de simulación que representen el comportamiento de los

sistemas de estudio (Baumgarten & Silverman, 2007)(K. Griendling & Mavris, 2011).

4.7.2. Punto de vista estratégico

Las arquitecturas ejecutables como herramienta de simulación para determinar el impacto de una tecnología al ser incorporada en un sistema pueden abordar los problemas de asequibilidad inherentes a las técnicas de evaluación cuantitativa de tecnología. Las arquitecturas ejecutables se desarrollan a partir de los artefactos arquitecturales (Khan, 2010)(Baumgarten & Silverman, 2007)(Wang & Dagli, 2008)(Bueno et al., 2014) (Delgado et al., 2014). Por tanto, no se necesitan modelos matemáticos complejos o datos históricos para la construcción de modelos de simulación, lo cual permite que organizaciones que no cuenten con centros de investigación y desarrollo, pero si con una arquitectura, implementar modelos de evaluación cuantitativa de tecnología.

5. Modelo de evaluación de impacto de tecnología

Para dar sentido y forma a la hipótesis planteada en este trabajo, se plantea la formulación de un enfoque que permita evaluar el impacto de tecnología empleando arquitecturas orientadas a capacidades las cuales son las más adecuadas para entornos de sistemas de sistemas y que además sea asequible y rápido de aplicar. A continuación, se presenta una explicación general y de contexto del enfoque formulado.

El modelo que se plantea, busca impactar en los procesos de adquisición de tecnología en etapas tempranas del ciclo de vida de diseño de una solución arquitectural. El enfoque evalúa el impacto de una o varias tecnologías sobre los modelos de comportamiento de un sistema mediante una relación directa con las capacidades modeladas en la arquitectura, así como también determinar si los modelos de comportamiento del sistema están preparados para adaptarse a las posibles tecnologías a incorporar en este. Para ello, ver Figura 16, se busca relacionar el cumplimiento de los requerimientos de incorporación tanto por los modelos de comportamiento del sistema (capacidades), como por parte de las tecnologías candidatas a incorporar, así como la opinión de los expertos.

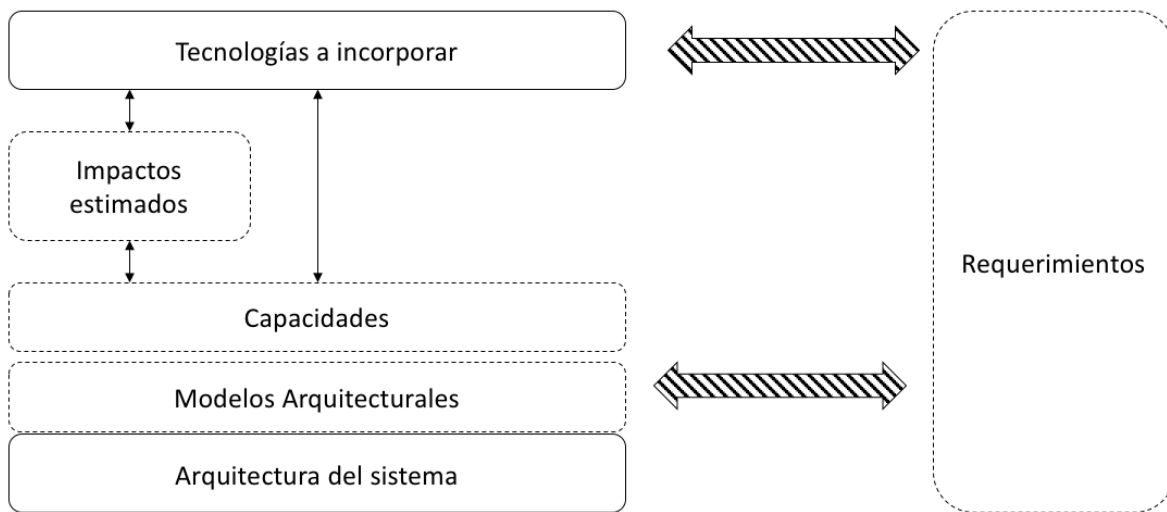


Figura 16. Esquema general de información relacionada al modelo de evaluación de impacto de tecnología propuesto

A continuación se presenta la estructura metodológica del modelo planteado para evaluar el impacto de tecnología utilizando artefactos arquitecturales, ver Figura 17.

1. Planteamiento del problema y los requerimientos que se espera el sistema debe satisfacer con la incorporación de una tecnología en particular.
2. Relacionar las capacidades del sistema con los requerimientos de incorporación, a partir de esta relación se determinan los requerimientos que cada capacidad debe satisfacer en el eventual caso de incorporación, las capacidades y requerimientos más importantes.
3. A partir de las capacidades del sistema obtenidas de la arquitectura, definir los factores de impacto que la tecnología candidata a ser incorporada tiene sobre cada capacidad.
4. A partir de los requerimientos de incorporación verificar el cumplimiento de estos, si es posible, en la tecnología candidata a ser incorporada.
5. A partir de la arquitectura del sistema, plantear los escenarios arquitecturales de incorporación que satisfagan los requerimientos que los interesados tienen del sistema como consecuencia de la adquisición de la tecnología.
6. Empleando una técnica de validación de modelos, verificar las capacidades del sistema mediante la verificación de los requerimientos asociados a cada capacidad.
7. Relacionar los factores de impacto de la tecnología en las capacidades, el cumplimiento de estas en los escenarios de incorporación planteados, y los niveles de importancia de las capacidades y los requerimientos para dar un indicador de impacto (MoE) de la tecnología en evaluación sobre las capacidades del sistema.

5.1. Definición del problema

En cualquier proceso de incorporación de tecnología, la primera actividad a realizar es definir el problema en cuestión en términos de los interesados. La

formulación del problema parte de una necesidad existente, debe existir una petición para la incorporación de la nueva tecnología la cual incluya las necesidades de los interesados (requerimientos), las cuales son típicamente cualitativas, o ambiguas.

De acuerdo con el estándar ISO/IEC/IEEE 24765 (ISO/IEC/IEEE, 2011). Un requerimiento se define como “Una condición o capacidad necesitada por un usuario para resolver un problema o alcanzar un objetivo. Una condición o capacidad que debe cumplir o poseer un sistema, o componente de un sistema, producto o servicio para satisfacer un acuerdo, estándar, especificación, u otras formalidades impuestas”. En el contexto de este trabajo, los requerimientos estarán íntimamente relacionados con las capacidades o condiciones con los que un sistema debería contar ante la futura incorporación de una tecnología.

Es decir, en un escenario de incorporación exitoso se esperaría que el sistema mejore o actualice sus capacidades, desde este punto de vista el levantamiento de requerimientos se refiere a la obtención de los objetivos de alto nivel que debe alcanzar un sistema previsto ante dicha incorporación de tecnología, al refinamiento de dichos objetivos y de su operacionalización en las especificaciones de los servicios y sus limitaciones, así como la asignación de responsabilidades a seres humanos, dispositivos y software.

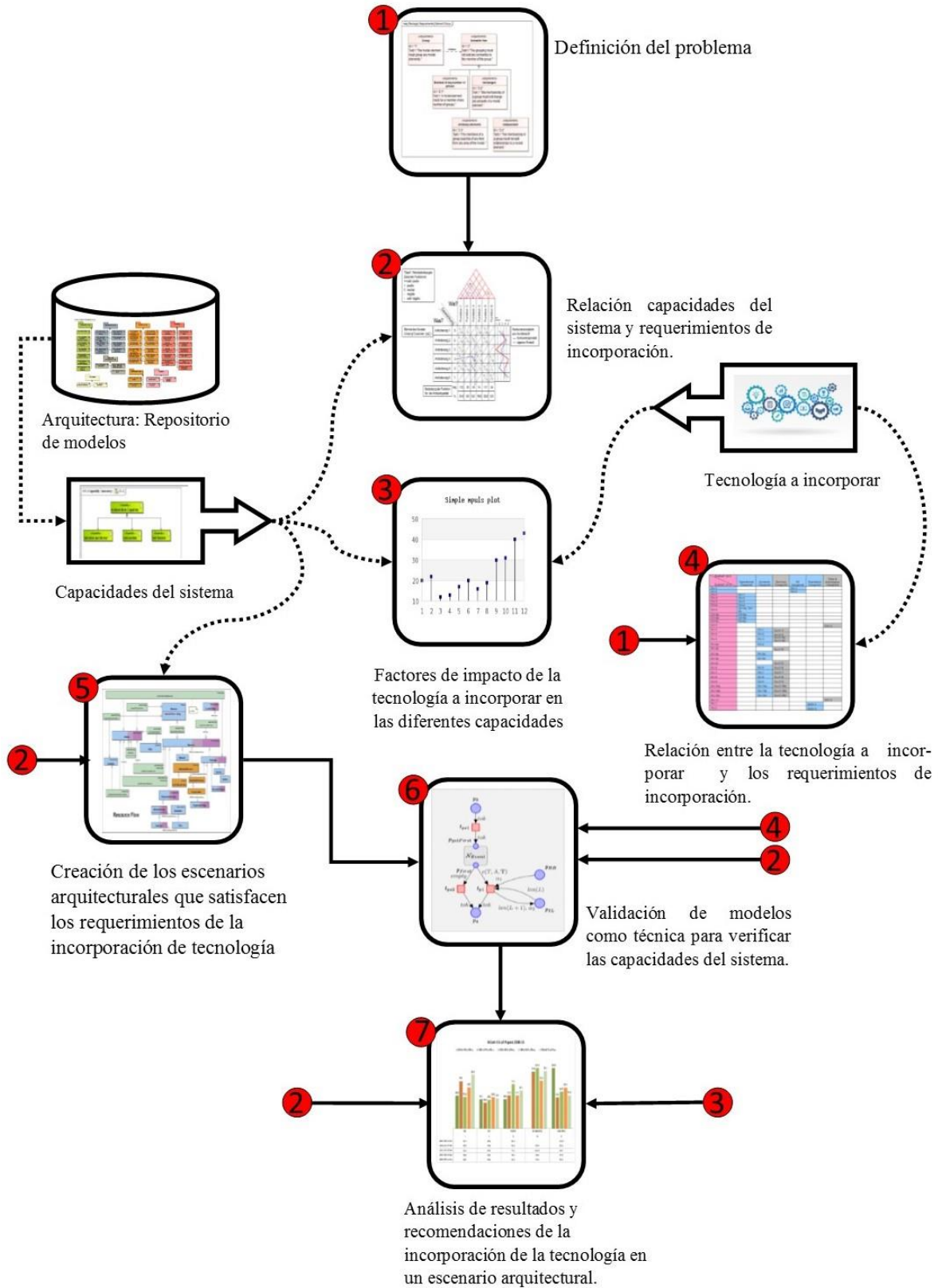


Figura 17. Esquema general para evaluar el impacto de una tecnología empleando artefactos arquitecturales

5.2. Capacidades y requerimientos

Una técnica organizada y eficiente para trasladar la “voz de los interesados” a la “voz de los ingenieros” o de los diseñadores es el proceso despliegue de la función de calidad (QFD) (Kelly A Griendling, 2011), herramienta ampliamente usada para asociar necesidades o requerimientos cualitativos y ambiguos en atributos propios de un sistema. En este trabajo se realiza una adaptación de la casa de la calidad HOQ , ver Figura 18, para relacionar los requerimientos de incorporación de una nueva tecnología con propiedades concretas del sistema en el cual se espera incorporar. Se busca cotejar los requerimientos estipulados en la definición del problema con las capacidades diseñadas en el planteamiento de los escenarios de incorporación y los modelos existentes en la arquitectura.

En esta etapa se busca determinar que capacidades en el sistema se verán afectadas por la definición del problema de incorporación. A partir de la HOQ se obtienen las capacidades involucradas en el proceso de incorporación, así como las capacidades aportadas por la tecnología a incorporar, las cuales ya han sido modeladas previamente en la arquitectura, así como una asignación de pesos tanto a las capacidades como a los requerimientos que permiten determinar su aporte individual en el proceso de incorporación.

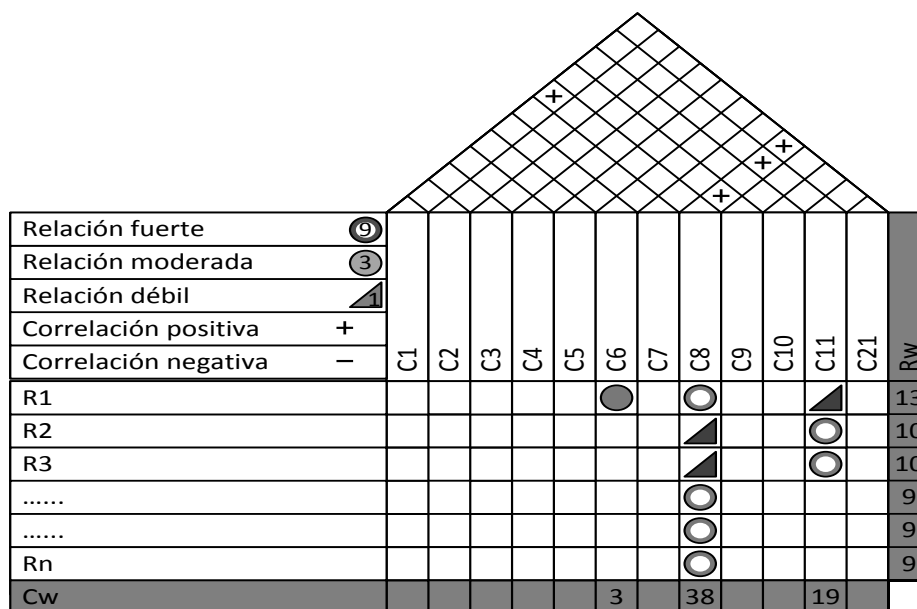


Figura 18. Adaptación de la HOQ para relacionar requerimientos de incorporación y capacidades (los valores en la gráfica son utilizados para entender el concepto y no corresponden a ningún ejemplo en particular)

5.3. Factores de impacto de la tecnología

Una vez se haya identificado una tecnología que se quiera adquirir y la posible fuente de la cual se puede obtener, se necesita indagar si la adquisición realmente cubre las necesidades de la organización. Para ello se deben tener en cuenta tres factores importantes (Mortara, L., & Ford, 2012):

- La habilidad de la organización para absorber y utilizar la tecnología
- La compatibilidad de la organización y la tecnología
- Conveniencia de dicha tecnología para las necesidades de la organización

Para ellos se hace uso de la información contenida en la arquitectura en donde se puede conocer en que componentes y operaciones específicas la tecnología a incorporar generara un impacto, ya sea positivo o negativo.

En esta etapa se busca formular una tecnología en términos de variables elementales, la mayoría de las técnicas basan esta etapa en la medición y síntesis de herramientas que realizan estimaciones a partir de datos históricos, lo cual limita o excluye de los estudios aquellas tecnologías muy nuevas o exóticas,

o en etapas de desarrollo. Sin embargo la introducción de los factores de impacto (“*k*” factores) permiten valorar cuantitativamente el impacto de una tecnología. Los *k – factores* modifican las mediciones técnicas realizadas sobre un sistema, sustituyendo las simulaciones de una tecnología por los premios o castigos producto del desempeño que esta pueda tener sobre un sistema (Kirby, 2001).

Una matriz de compatibilidad ayuda a determinar el impacto potencial que una tecnología puede tener sobre las diferentes capacidades del sistema, los impactos plasmados en la matriz son impactos estimados los cuales pueden provenir de tres fuentes diferentes:

- i. Cuestionarios a equipos de expertos
- ii. Modelos físicos
- iii. Revisiones de la literatura

Cada fuente de estimación de impacto tiene un grado de incertidumbre asociado, en este trabajo se estipula una escala de incertidumbre dada entre -3 y 3 (Mortara, L., & Ford, 2012), ver Tabla 3.

Tabla 3. Niveles de incertidumbre del impacto de una tecnología sobre una capacidad en un sistema

Valor de certeza	Impacto sobre una capacidad en el sistema
-3	Existe una certeza alta de un impacto negativo
-2	Existe un nivel de certeza medio de un impacto negativo
-1	Baja certeza de un impacto negativo
0	No se conoce o no existe relación alguna de impacto
1	Baja certeza de un impacto positivo
2	Existe un nivel de certeza medio de un impacto positivo
3	Existe una certeza alta de un impacto positivo

Para una tecnología en particular, el impacto sobre una capacidad u otra debe tener diferentes niveles de importancia, para ello se definen pesos relativos asociados a las capacidades y a un tipo particular de tecnología, dichos pesos determinan el grado de impacto de una tecnología en particular sobre una capacidad en concreto, ver Tabla 4.

Tabla 4. Definición de los factores de impacto de la tecnología a incorporar respecto a las capacidades del sistema, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012)

Capacidades	Importancia	Factor de impacto							Medición k-factor (k_f)
		Bajo	-2	-1	0	1	2	Alto	
Capacidad 1	w_1					x			$Kf_1 = 1 \times w_1$
Capacidad 2	w_2				x				$Kf_2 = 0 \times w_2$
Capacidad ...	$w_{...}$	x							$Kf_{...} = -3 \times w_{...}$
Capacidad n	w_n						x		$Kf_n = 2 \times w_n$
Total importancia T_i :	$\sum_{i=1}^n w_i$	Total medición T_f :							$\sum_{i=1}^n k f_i$
$K_f = T_i \times 3$									

A partir de los $k - factores$ se puede calcular un valor de impacto general T_f de una tecnología en particular, el cual puede ser utilizado para definir el grado general de impacto de la tecnología sobre un sistema, ver Figura 19. El valor K_f representa los extremos tanto negativos como positivos en los cuales T_f puede estar, siendo cero un valor nulo de aporte en capacidades al sistema, y cualquier valor diferente a cero, ya sea positivo o negativo indica la naturaleza del aporte, ya sea en pro de mejorar de forma integral al sistema o en detrimento de sus capacidades. Entre más distante se encuentre valor T_f de cero (0), mejor o peor es el impacto estimado de la tecnología sobre el sistema.

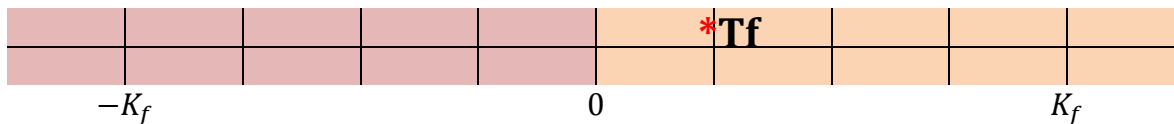


Figura 19. Factor de impacto de una tecnología sobre un sistema, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012).

5.4. Tecnología a incorporar y los requerimientos de incorporación

El impacto real de la tecnología y el cumplimiento de los requerimientos de incorporación por parte de la misma puede estar en direcciones opuestas, esto significa que la tecnología puede afectar de forma positiva a las capacidades del sistema, pero puede presentarse que la misma tecnología no cumpla de manera parcial o total con los requerimientos de incorporación planteados, o se puede

presentar el caso contrario en el que a pesar de cumplir con los requerimientos de incorporación tenga un impacto negativo sobre las capacidades del sistema. Esta situación se puede presentar debido a la mala formulación de los requerimientos de incorporación o a las características propias de operación y entorno del sistema. Por ello en esta etapa se hace una relación tecnología versus requerimientos que permita indagar más adelante la pertinencia de los requerimientos planteados.

5.5. Definición de los escenarios de incorporación

Los procesos de incorporación de tecnología son procesos administrativos. Sin embargo, los insumos operacionales necesarios para la planeación de las adquisiciones, así como las actividades que resultan de la invocación de dichos planes necesitan información del negocio u operaciones de la organización o sistema, dicha información puede ser hallada en la arquitectura de negocios o arquitectura de operaciones (Ulrich, William, 2010).

En la arquitectura de negocios u operaciones se puede visualizar los cambios en el marco operativo general de la organización producto de la incorporación de una tecnología mediante la construcción de escenarios arquitecturales. Los escenarios arquitecturales han sido ampliamente usados y documentados como una técnica empleada durante el levantamiento requerimientos especialmente respecto a los usuarios del sistema, durante el diseño como método para comparar alternativas de diseño e incluso como herramienta para el análisis de calidad y rendimiento de un diseño en particular (Dardenne, 1993)(Kazman, Abowd, Bass, & Clements, 1996). En este trabajo se habla de escenarios arquitecturales desde el punto de vista de los modelos de una arquitectura de un sistema.

La razón para tener los modelos de una arquitectura de sistemas y conducir análisis de estos modelos, es el facilitar la toma racional de decisiones acerca de los componentes del sistema. Tomar una decisión racional implica responder a

tres preguntas: “¿es factible?”, “¿es deseable?” y “¿es la mejor alternativa de acuerdo a la noción de deseabilidad, dadas las restricciones de factibilidad?” (Johnson, Lagerström, Närman, & Simonsson, 2007). En un contexto de análisis arquitectural, los escenarios arquitecturales responden la primera pregunta, la factibilidad. La factibilidad usualmente se refiere a la valides de los posibles cambios que se puedan realizar en un sistema, dichos cambios se relacionan usualmente con la evolución de este. Un sistema evoluciona debido a diferentes motivos. Por ejemplo la modificación de los requerimientos originales, cambios del ambiente en el que el sistema opera, incorporación de tecnología ver Figura 20, entre otros (Naslavsky, Alspaugh, Richardson, & Ziv, 2005).

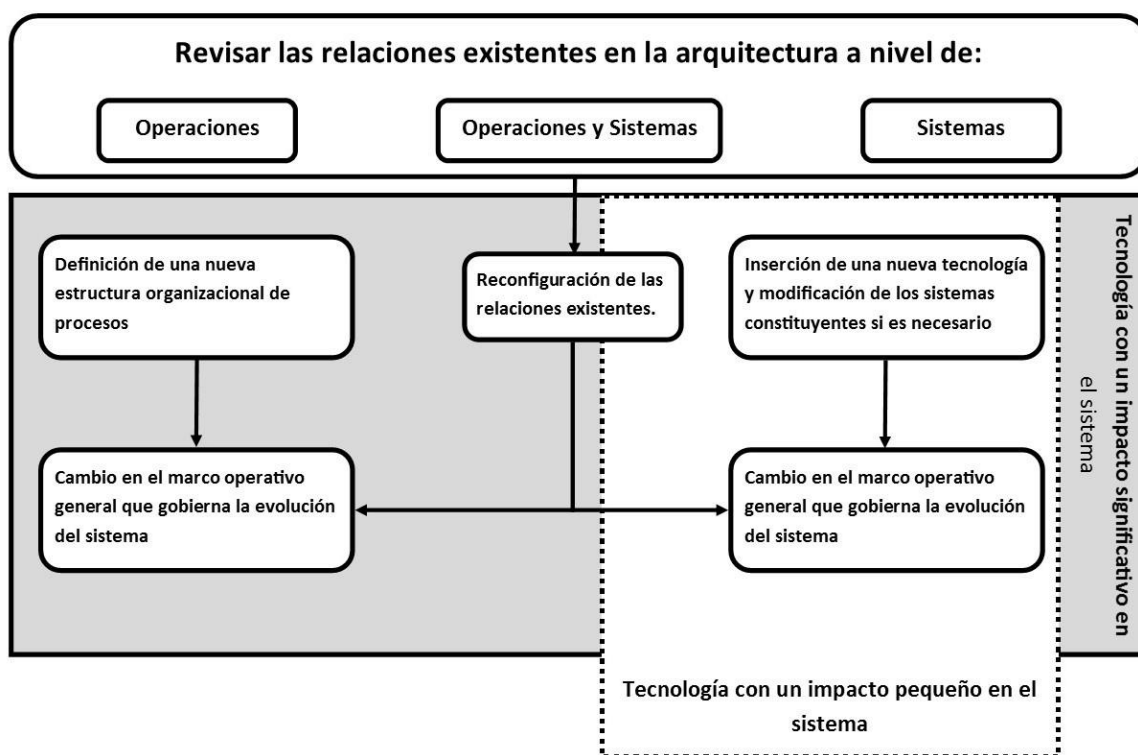


Figura 20. Reconfiguración de la arquitectura de un sistema ante la incorporación de una tecnología.

A partir de los requerimientos estipulados para el sistema ante una eventual incorporación de tecnología se plantea la construcción de escenarios arquitecturales que contemplen los posibles cambios en el marco operativo general del sistema producto de los cambios esperados como consecuencia de las nuevas capacidades adquiridas o de la actualización de las ya existentes.

5.6. Validación de modelos como técnica para la verificación de capacidades

Una capacidad en un sistema representa una habilidad que necesita este para llevar a cabo una actividad que genere valor (Blevins, T., Dandashi, F., & Tolbert, 2010). Desde un punto de vista arquitectural, las capacidades son modeladas para satisfacer los requerimientos de los interesados y soportar las metas organizacionales. Este apartado del modelo de evaluación de impacto de tecnología busca determinar si los modelos diseñados (escenarios arquitecturales) aportan las capacidades necesarias para soportar los requerimientos de la tecnología a incorporar y busca verificar si su inclusión en el sistema tiene un impacto adicional. Para ello se propone un enfoque para realizar un análisis de capacidades empleando artefactos arquitecturales y una técnica de verificación de modelos (*Model-Checking*).

La técnica de verificación de modelos (MC) propuesta por Clarke & Emerson (Clarke & Emerson, 1981) y Queille & Sifakis (Queille & Sifakis, 1982), es una técnica para la verificación sistemas con estados finitos respecto a algunas especificaciones lógico temporales. El enfoque estándar se centra en los modelos semiformales (SysML, UML, BPMN, etc.), especialmente aquellos que describen el comportamiento del sistema. Utilizando los modelos de comportamiento se desarrollan modelos formales (ejecutables) para verificar los aspectos dinámicos en los sistemas y de esta forma detectar posibles fallas empleando una herramienta para el MC, ver Figura 21.

La detección de fallas utilizando MC sigue los siguientes pasos metodológicos:

- i. Convertir los modelos de comportamiento en modelos formales ejecutables,
- ii. Especificar los requerimientos del sistema en términos de especificaciones lógico temporales,

- iii. Usar una herramienta para la validación de modelos que permita ejecutar las especificaciones lógico temporales y determinar su cumplimiento

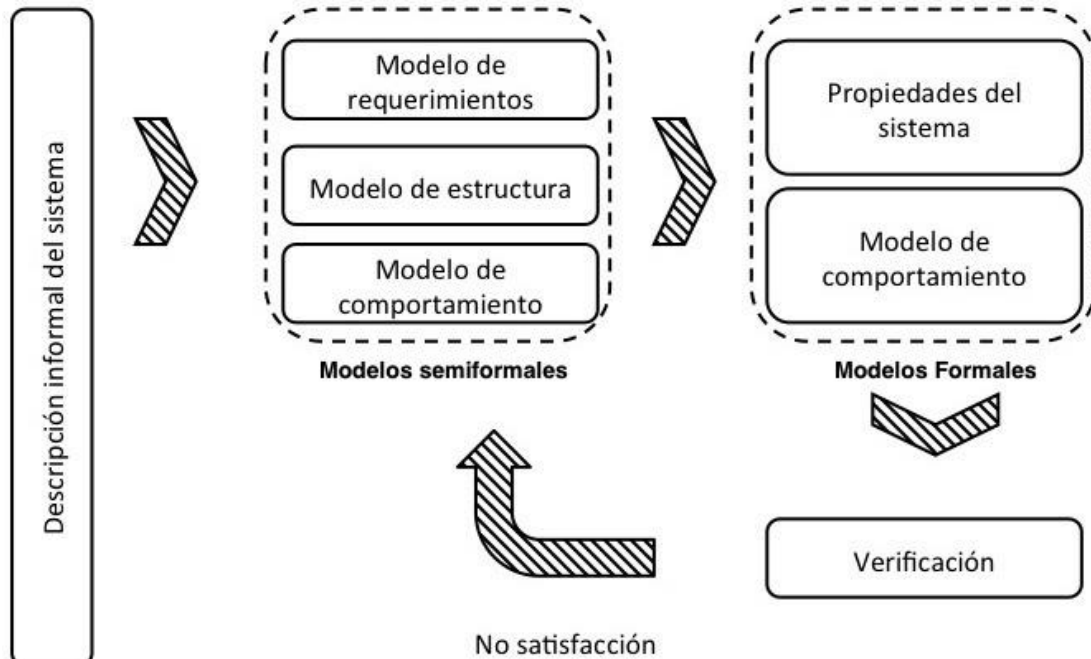


Figura 21. Esquema general para la validación de requerimientos empleando técnicas de validación de modelos.

5.6.1. Modelos de comportamientos y las estructuras Kripke

Las arquitecturas son desarrolladas para trabajar como puente entre los requerimientos y el diseño en sistemas complejos (Giannakopoulou, 1999). La arquitectura describe la organización de un sistema en términos de sus componentes y sus interacciones. Desde un punto de vista básico en el modelado de sistemas, las arquitecturas hacen una separación en el análisis de un sistema; el análisis estructural y el análisis funcional de componentes son actividades relacionados pero diferentes, ver Figura 22.

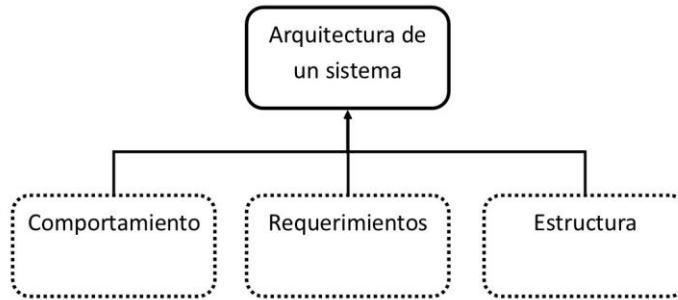


Figura 22. Esquema genérico para la arquitectura de un sistema

Los modelos arquitecturales son desarrollados utilizando lenguajes de modelado tales como UML (Björkander & Kobryn, 2003) , SysML (“OMG Systems Modeling Language (OMG SysML TM),” 2012), BPMN (Bocanegra, Pena, & Ruiz, 2011), entre otros. En términos de un lenguaje de modelado en particular, SysML por ejemplo, se tiene un conjunto particular de modelos en los cuales se puede describir tanto la estructura como el comportamiento de un sistema, ver Figura 23.

En términos de un marco arquitectural como TOGAF o DoDAF, las posibles vistas y modelos que componen dichas vistas tienen una clasificación diferente, para el caso particular de DoDAF se categoriza la arquitectura en 8 vistas y 52 modelos, En el caso de TOGAF se clasifica la arquitectura en cuatro puntos de vista, negocios, sistemas (datos y aplicaciones), y una vista de tecnología, y no se dan recomendaciones especiales acerca de que modelos en particular realizar para cada vista arquitectural. sin embargo, las vistas arquitecturales ya sean de DoDAF o TOGAF continúan representando estructura o comportamiento de un sistema, solo que desde los diferentes puntos de vista recomendados por cada marco arquitectural.

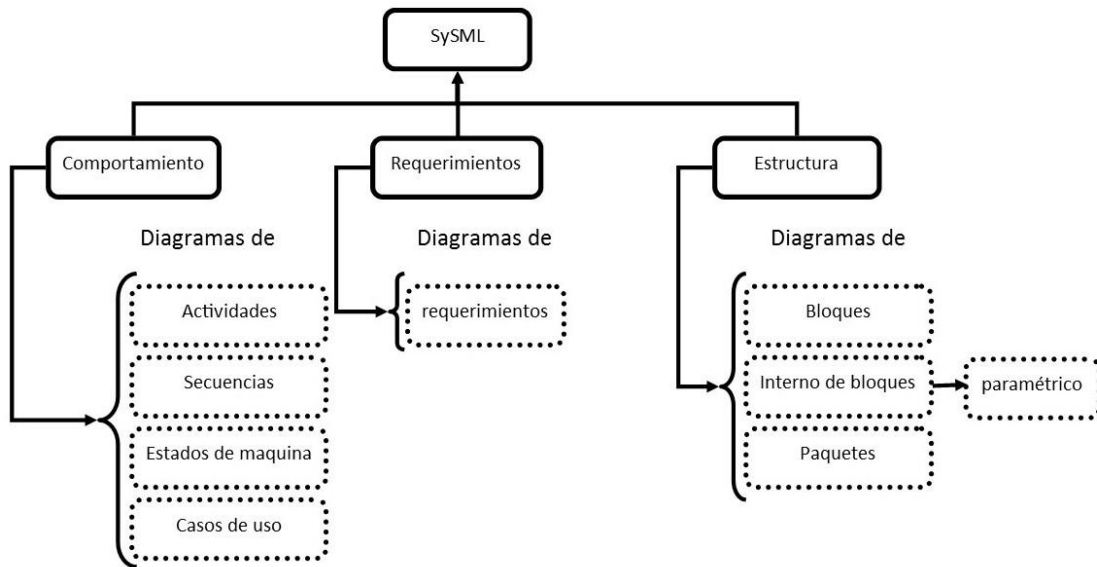


Figura 23. Posibles modelos arquitecturales que pueden ser construidos utilizando SysML como lenguaje de modelado

En este trabajo se utilizan conceptos de los dos marcos arquitecturales (EAFs) mencionados, TOGAF y DoDAF, la razón para utilizar estos EAFs es la de tener un conjunto estandarizado de modelos, los cuales los provee DoDAF, incluyendo los modelos de Capacidad. Y un método de implementación y gobernanza junto con un lenguaje propio de la industria que provee TOGAF (Tao et al., 2015). Por esta razón el uso mezclado de terminología propia de DoDAF y TOFAF. Para realizar el análisis de capacidades en una arquitectura se necesitan los modelos de requerimientos, capacidades (CV) y modelos de negocio y operaciones (OV).

Un comportamiento apropiado del sistema se relaciona con el cumplimiento de los requerimientos estipulados por los *Stakeholders*, las técnicas de MC buscan verificar el cumplimiento adecuado de los requerimientos usando los modelos de comportamiento del sistema, ver Figura 24.

Para el propósito particular de este trabajo, son utilizados los diagramas de estados de maquina (SM), los SM son una herramienta grafica útil para describir el comportamiento dinámico de un sistema. Desde un punto de vista arquitectural, los modelos OV representan el comportamiento del sistema directamente relacionado con las capacidades del mismo y por ende el más relacionado con la

obtención de las metas. En particular, OV-6b (descripción de la transición de estados) representa un diagrama de estados (SC), ver Figura 25. Un SC puede ser definido como una tupla, $SC = \{S, Var, G, E, Edges\}$ en donde S es el conjunto de estados, E es el conjunto de eventos, Var es el conjunto de variables, G es el conjunto de guardas, y Edges es el conjunto de transiciones.

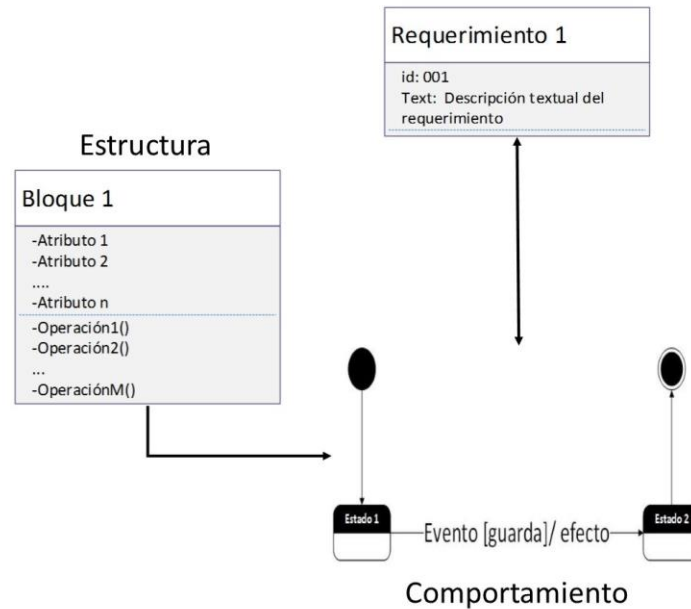


Figura 24. Estructura, comportamiento y requerimientos de diseño

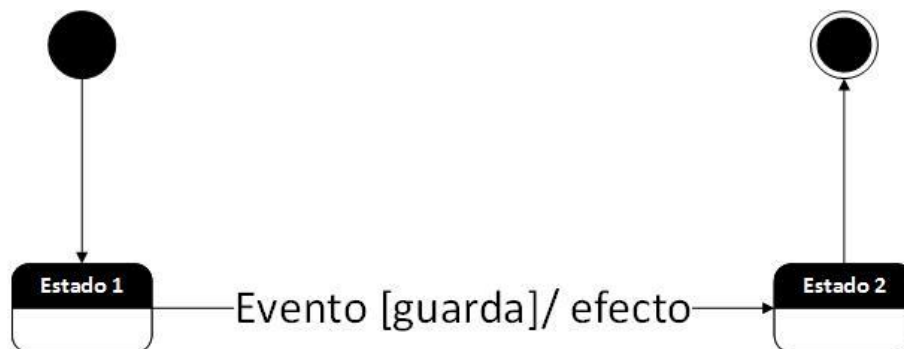


Figura 25. Elementos principales de un diagrama de estados

Los SC propios de UML que se incorporan como modelos en SysML definen una semántica y una sintaxis. Este modelo es solo una representación gráfica del comportamiento del sistema. Por tanto, se necesita una transformación de los

diagramas SC en términos de un modelo ejecutable con una formalidad matemática.

Para realizar este cambio en los diagramas SC se utilizan los sistemas de transición etiquetados (Labeled *Transition Systems* (LTS)) o sistemas de transición (TS) para representar el comportamiento dinámico y la comunicación entre componentes en sistemas concurrentes. Un TS es la tupla $(S, Act, \rightarrow, I, AP, L)$ en donde:

- i. S es el conjunto de estados,
- ii. Act es el conjunto de acciones,
- i. $\rightarrow \subseteq S \times Act \times S$ es una relación de transición,
- ii. $I \subseteq S$ es el conjunto de estados iniciales,
- iii. AP es el conjunto de proposiciones atómicas,
- iv. $L: S \rightarrow 2^{AP}$ es una función de etiquetado.

Los diagramas de estados como los TS tienen elementos en común como; el conjunto de estados S , los eventos E , las restricciones G , las transiciones $Edges$, están relacionados con las transiciones $\rightarrow \subseteq S \times Act \times S$ en el TS. Sin embargo el diagrama SC no contiene información referente a las proposiciones atómicas AP y a la función de etiquetado $L: S \rightarrow 2^{AP}$. Las AP se presentan como acciones ocultas en el modelo y la función L crea una relación entre los estados $s_i \in S$ y las proposiciones $p_j \in AP$. En este trabajo las AP y la función L son utilizadas para crear una relación entre los requerimientos del sistema y el comportamiento del modelo ver Figura 26. Por tanto, después de transformar el diagrama SC en un TS, se representan los requerimientos del sistema en etiquetas y se relacionan con el comportamiento de este mediante la función de etiquetado L , la cual permite ejecutar el TS en términos de los requerimientos del sistema.

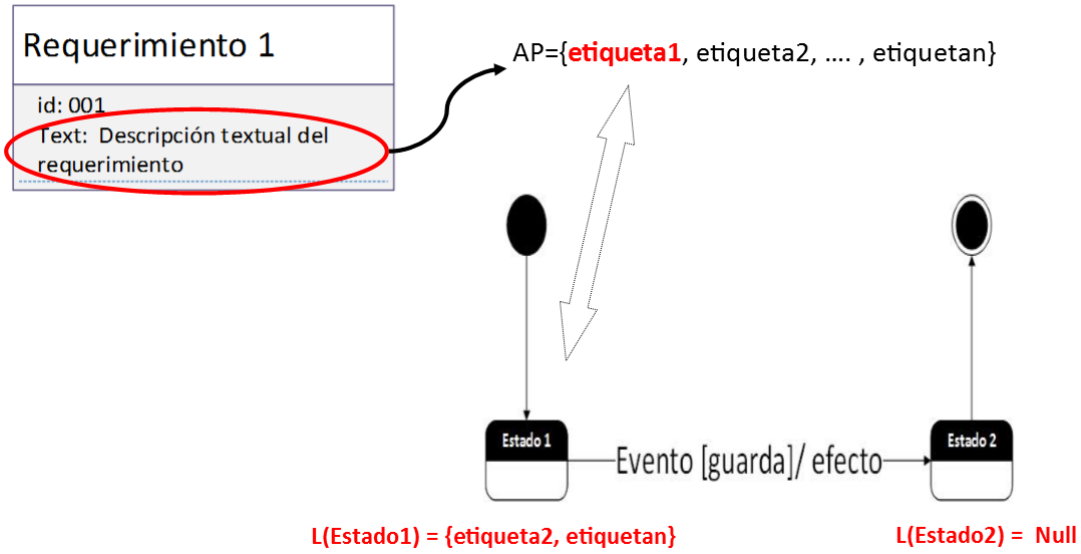


Figura 26. Relación entre los requerimientos, las proposiciones atómicas (PA) y la función de etiquetado L

5.6.2. Especificaciones lógico temporales (LTLs)

Una ejecución para un TS es una secuencia de acciones (2^{AP}) que TS puede ejecutar iniciando en el estado inicial I . Un $TS = (S, Act, \rightarrow, I, AP, L)$ transita a $TS' = (S, Act, \rightarrow, I', AP, L)$ por una acción $a \in Act$ denotada como $as TS \xrightarrow{a} TS' \leftrightarrow (I, a, I') \in \rightarrow$. La función L en un LTS $ts = (S, Act, \rightarrow, I)$, toma un conjunto de PA que contienen información relacionada con los requerimientos del sistema, y transforma al LTS en $TS = (S, Act, \rightarrow, I, AP, L)$, en donde TS es etiqueta el comportamiento del sistema con un conjunto de acciones directamente relacionadas con los requerimientos. Con una ejecución de TS, específicamente con el uso de la función L y su ejecución se puede evaluar el comportamiento del sistema.

Dado un conjunto de PA, un conjunto de fórmulas LTL es definido de forma inductiva usando operadores Booleanos, y utilizando los operadores temporales $\times$ (siguiente) y $\cup$ (asta) como sigue:

- i. $p_i \in AP$ es una formula
- ii. Si φ y ψ son formulas, entonces $\neg\varphi$, $\varphi \vee \psi$, $\varphi \wedge \psi$, $X\varphi$, $\varphi U \psi$ también lo son.

Una interpretación de una formula LTL es una palabra finita $w = x_0x_1x_2 \dots$ sobre el conjunto 2^{AP} . Para cada instante de tiempo en la ejecución del sistema existe un subconjunto de AP que es activado en ese instante de tiempo. Sea w_i la palabra w iniciando en x_i que proviene de una ejecución del TS. La semántica LTL es definida como, ver Figura 27:

- i. $w \models p \text{ if } p \in x_0, \text{ To } p \in AP$
- ii. $w \models \varphi \vee \psi \text{ if } (w \models \varphi) \vee (w \models \psi)$
- iii. $w \models \neg \varphi \text{ if } \neg(w \models \varphi)$
- iv. $w \models \varphi \wedge \psi \text{ if } (w \models \varphi) \wedge (w \models \psi)$
- v. $w \models X\varphi \text{ if } w_i \models \varphi$
- vi. $w \models \varphi U \psi \text{ if } \exists i \geq 0 \mid (w_i \models \psi) \wedge \forall 0 \leq j \leq i, (w_j \models \varphi)$

Giannakopoulou en (Giannakopoulou, 1999) propone operadores adicionales: " $true \equiv \varphi \vee \neg \varphi$ ", " $false \equiv \neg true$ ", el operador Booleano $\Rightarrow$ que se define como $\varphi \Rightarrow \psi \equiv \neg \varphi \vee \psi$, el operador temporal $<>$ (eventualmente), $[]$ (siempre), W (débil hasta) definidos en términos de los operadores principales como: $<> \varphi \equiv true U \varphi$, $[] \equiv \neg F \neg \varphi$, y $\varphi W \psi \equiv ((\varphi U \psi) \vee G \varphi)$.

5.6.3. Uso de los TS para verificar formulas LTLs

El esquema básico para la verificación de una LTL se basa en el uso de los Büchi Automats (BA) (Vardi & Wolper, 1986), un BA es una tupla $B = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$, donde Q es un conjunto finito de estados, Σ es un conjunto finito de etiquetas, $\delta \subseteq Q \times \Sigma \times Q$ es una relación de transición etiquetada, $q_0 \in Q$ es el estado inicial, y $F \subseteq Q$ es el conjunto de estados aceptados. Una ejecución de B es una palabra finita $\langle a_0a_1a_2 \dots \rangle$ sobre Σ , es una palabra infinita $\langle s_0s_1s_2 \dots \rangle$ sobre Q , tal que $s_0 = q_0$ y $\forall i \in N, (s_i, a_i, s_{i+1}) \in \delta$. Una ejecución es aceptada si algunos elementos en F ocurren infinitamente, una palabra infinita w sobre Σ es aceptada por el automaton B si existe alguna ejecución aceptada de B en w .

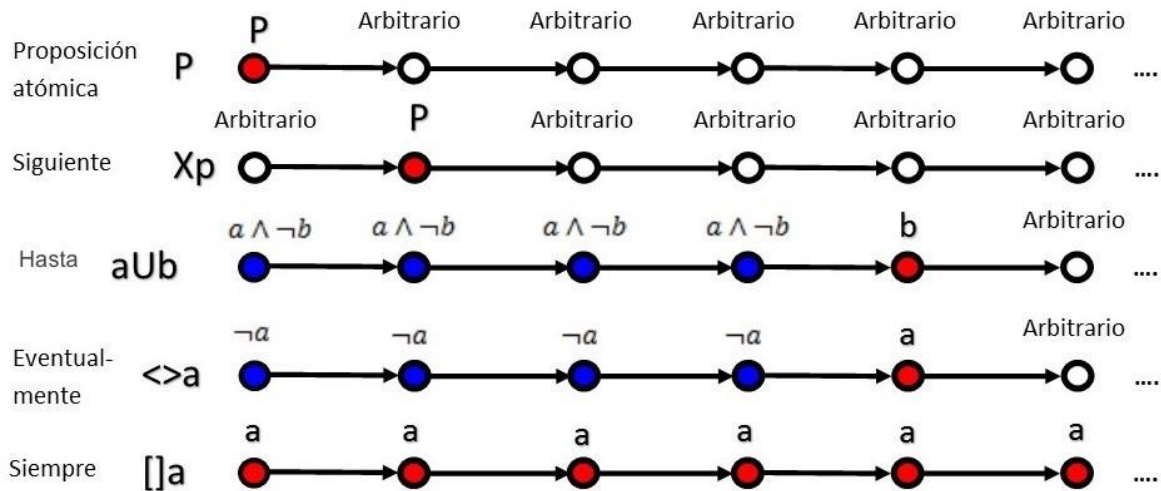


Figura 27. Vista intuitiva de un LTL

Para una formula LTL sobre un conjunto de AP, se formula un BA que acepte palabras sobre 2^{AP} que satisfaga φ . Un sistema de estados finitos es verificado por una especificación LTL φ calculando la intersección entre el sistema y el BA ($\neg\varphi$). El TS satisface φ si la intersección no acepta ninguna palabra.

Las funciones LTL intentan verificar los requerimientos en los modelos de comportamiento del sistema. Las funciones LTL se diseñan en términos de las AP, para describir una función LTL, se utiliza un set específico de operadores, ver Tabla 5.

Tabla 5. Operadores para formular formulas LTL

Operadores temporales	Operadores binarios
[] Siempre (G)	U hasta
< > Eventualmente (F)	W débil hasta
X Siguierte	&& Operador lógico AND
! Negación lógica	operador lógico OR
	→ Implicación
	↔ Equivalencia

Una formula LTL φ se debe desarrollar para cada requerimiento, para verificar φ se utiliza una herramienta que compara φ y el modelo de comportamiento del

sistema que haya sido designado, para esto se emplea una herramienta de *model-checking*.

Cuando un requerimiento es validado utilizando una formula LTL se puede obtener tres posibles resultados.

- i. La propiedad (requerimiento) se cumple
- ii. La propiedad no se cumple, se muestra un contraejemplo
- iii. La prueba realizada sobre la propiedad no genera resultados concluyentes

5.6.4. Herramientas para la verificación de modelos

Las herramientas para la verificación de modelos permiten evaluar las formulas LTL en los modelos ejecutables LTS contruidos a partir de los modelos de comportamiento de los sistemas. Usualmente estas herramientas sintetizan algoritmos que permiten verificar el correcto funcionamiento y diseño de un sistema (Frappier, M., Fraikin, B., Chossart, R., Chane-Yack-Fa, R., & Ouenzar, 2010). Existen múltiples herramientas que permiten llevar a cabo procesos de verificación de modelos como los postulados en este trabajo. En la Tabla 6, se presentan algunas herramientas frecuentemente mencionadas en la literatura y que pueden ser utilizadas para la implementación del proceso de evaluación de modelos estipulado anteriormente.

Cualquiera de las herramientas mencionadas pueden ser empleadas para verificar propiedades LTL en modelos LTS. sin embargo, para el desarrollo de este trabajo la herramienta utilizada fue *LTSA Analyser* la cual en comparación con las demás herramientas mencionadas resulta más sencilla de utilizar e interpretar sus resultados.

Tabla 6. Herramientas para verificación de modelos que permitan verificar propiedades LTL en LTS

Herramienta	Lenguaje	Propiedades	Referencia
SPIN	Promela	LTL	(Holzmann, 1997)
NuSMV	SMV	CTL, LTL, PSL	(Cimatti, A., Clarke, E., Giunchiglia, E., Giunchiglia, F., Pistore, M., Roveri, M., ... & Tacchella, 2002)
UPPAAL	Timed Automata, C	TCTL, LTL	(Larsen, K. G., Pettersson, P., & Yi, 1997)
LTSA	FSP	LTL	(Magee, Kramer, & Uchitel, 2004)
ProB	B-Method, Event-B, Z, TLA+, CSP	Assertions, LTL, CTL	(Leuschel, M., & Butler, 2003)
Spot	Petri nets, DVE Input Language	LTL, PSL	(Duret-Lutz, A., & Poitrenaud, 2004)

5.6.5. Análisis de capacidades utilizando Model-checking

Una capacidad en un sistema representa la habilidad que tiene este para llevar a cabo ciertas acciones o producir ciertas salidas mediante un conjunto de facultades, características, funciones, procesos o servicios, que sean medibles y controlables. Desde un punto de vista arquitectural, se modelan capacidades para satisfacer los requerimientos de los interesados (*stakeholders*) y las metas organizacionales. Se entiende que para un conjunto de requerimientos $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, se diseñan un conjunto de capacidades $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ que satisfacen dichos requerimientos y que permiten alcanzar las metas organizacionales. Las capacidades C representadas en la arquitectura como un conjunto de modelos de comportamiento que despliegan las capacidades en términos de las vistas de negocio o modelos de actividades operacionales.

En este trabajo se propone un enfoque de verificación de capacidades mediante el uso de un esquema de *model-checking*, este enfoque se basa en las siguientes asunciones:

- i. Una capacidad es diseñada para satisfacer, uno o más requerimientos
- ii. Un requerimiento es una condición o capacidad necesitada por un usuario para resolver un problema o alcanzar un objetivo,
- iii. Las capacidades proveen un ambiente para alcanzar las metas organizacionales.

Para resumir el análisis de capacidades utilizando *model-checking* se presentan los siguientes pasos generales, ver Figura 28:

- i. Relacionar capacidades y requerimientos
- ii. Validar requerimientos usando un enfoque de model-checking
- iii. Analizar y categorizar los resultados en términos de capacidades

5.6.5.1. Capacidades y requerimientos

La primera asunción, una capacidad es diseñada para satisfacer uno o más requerimientos. Esta suposición sugiere que una capacidad puede ser analizada a partir de un conjunto de requerimientos. Sin embargo, una capacidad es un componente formal del sistema, pero los requerimientos son necesidades informales de los *stakeholders*. Las propiedades de interés en el sistema son las capacidades. Se denota la relación entre las capacidades y los requerimientos como fuertes $\odot$, moderadas $\circ$, o débiles Δ , y también en esta etapa se denotan la relación entre capacidades como positivamente correlacionadas $+$, y negativamente correlacionadas $-$. A partir de la relación entre capacidades y requerimientos, se obtiene un vector de pesos asociados a las capacidades C_w , así como un vector de pesos asociado a los requerimientos R_w . Se obtiene también para cada capacidad los vectores $C_{R,i}$ to $i = 1, 2, \dots, n$, donde n es el número de capacidades en el sistema. $C_{R,i}$ contiene todos los requerimientos (fuertes, moderados, o débiles) relacionados con la capacidad C_i . Además se obtiene también la matriz de correlación entre capacidades C_c que contiene las relaciones entre las capacidades, ver el techo de la HOQ en la Figura 18.

5.6.5.2. Análisis de capacidades

Para el análisis de capacidades se necesita: un modelo de comportamiento del sistema el cual representa las capacidades diseñadas para satisfacer los requerimientos, se necesita también las formulas LTL para cada requerimiento, y una herramienta que permita mediante una técnica de *model-checking* verificar la valides de las LTL en el modelo de comportamiento.

A partir del vector $C_{R,i}$, que contiene los requerimientos para la capacidad C_i , se definen tres vectores adicionales $R_{s,i}, R_{a,i}, R_{l,i} \in R$ en donde $R_{s,i} \cap R_{a,i} \cap R_{l,i} = \emptyset$, los cuales representan los requerimientos fuertes, moderados y débiles relacionados con la capacidad C_i .

Adicionalmente, para las formulas LTL relacionadas con los requerimientos $R_{s,i}, R_{a,i}, R_{l,i}$, se formulan los vectores $\varphi_{s,i}, \varphi_{a,i}, \varphi_{l,i}$ los cuales contienen las formulas LTL para su respectivo conjunto de requerimientos (fuertes, moderados, y débiles). Sea ξ el modelo de comportamiento, empleando una herramienta para *model-checking* se procede a verificar si el modelo ξ satisface las formulas $\varphi_{s,i} \models \xi$, $\varphi_{a,i} \models \xi$, $\varphi_{l,i} \models \xi$.

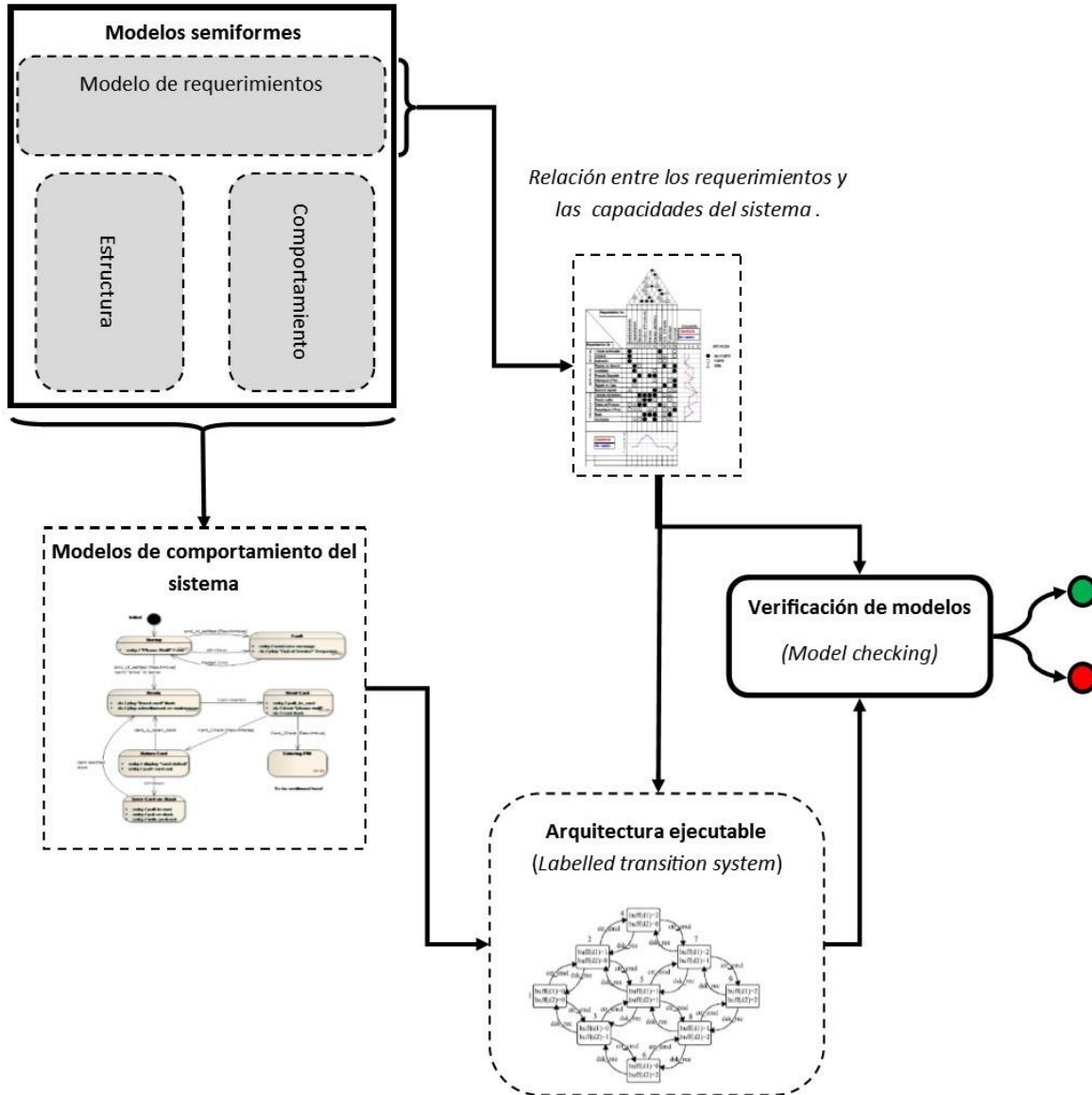


Figura 28. Esquema metodológico para el análisis de capacidades usando técnicas de *model-checking*

Cuando el conjunto de propiedades $\varphi_{s,i}, \varphi_{a,i}, \varphi_{l,i}$ es verificado, se puede obtener los vectores $O_{s,i}, O_{a,i}, O_{l,i}$ que contienen los resultados del proceso de verificación de los requerimientos en los modelos de comportamiento.

Para definir si una capacidad es alcanzada, el siguiente conjunto de variables es definido, sea $N_{\square}$ el numero de propiedades a verificar en ξ para la capacidad C_i , sea $K_i, L_i, T_i \in \mathbb{N}$ el número de propiedades evaluadas en $O_{s,i}, O_{a,i}, O_{l,i}$, sea $\alpha_{s,i}, \beta_{s,i}, \gamma_{s,i}$ los resultados positivos, negativos e inconclusos obtenidos relacionados con

las propiedades fuertes $\varphi_{s,i}$, de la misma forma se definen $\alpha_{a,i}, \beta_{a,i}, \gamma_{a,i}$ para las propiedades moderadas $\varphi_{a,i}$, y $\alpha_{l,i}, \beta_{l,i}, \gamma_{l,i}$ para las propiedades débiles $\varphi_{l,i}$. Para realizar el análisis de capacidades se definen las ecuaciones 2, 3, y 4 que indican el número de propiedades a verificar para los requerimientos fuertes, moderados y débiles relacionados con una capacidad en particular C_i , y la ecuación 5 representa el número total de requerimientos relacionados con la misma capacidad.

$$\alpha_{s,i} + \beta_{s,i} + \gamma_{s,i} = K_i \quad (2)$$

$$\alpha_{a,i} + \beta_{a,i} + \gamma_{a,i} = L_i \quad (3)$$

$$\alpha_{l,i} + \beta_{l,i} + \gamma_{l,i} = T_i \quad (4)$$

$$K_i + L_i + T_i = N_i \quad (5)$$

Para un conjunto en particular $O_{s,i}, O_{a,i}$, o $O_{l,i}$ hay seis posibles tipos de resultados cuando se realiza el proceso de *model-checking*.

- i. Para la capacidad C_i , todo el conjunto de propiedades se cumplen,
- ii. Algunas propiedades no se cumplen y se muestran los contraejemplos
- iii. Ninguna propiedad se cumple y se muestran los contraejemplos
- iv. Algunos resultados son no concluyentes
- v. El conjunto completo de propiedades es no concluyente
- vi. Algunas propiedades del conjunto de propiedades se cumplen

En una verificación de capacidades utilizando *model-checking*, es posible obtener una combinación de resultados cuando los tres conjuntos de propiedades $O_{s,i}, O_{a,i}$, y $O_{l,i}$ se tienen encuentra. Para resumir los resultados obtenidos se presenta la Tabla 7.

Tabla 7. Análisis de resultados para la capacidad C_i

	O_{S_j}	O_{a_j}	O_{l_j}
i	$\sum \alpha_s = k$	$\sum \alpha_a = l$	$\sum \alpha_l = t$
ii $\wedge$ iv	$\sum \beta_s + \gamma_s = k$	$\sum \beta_a + \gamma_a = l$	$\sum \beta_l + \gamma_l = t$
iii	$\sum \beta_s = k$	$\sum \beta_a = l$	$\sum \beta_l = t$
v	$\sum \gamma_s = k$	$\sum \gamma_a = l$	$\sum \gamma_l = t$
ii $\wedge$ iv $\wedge$ vi	$\sum \alpha_s + \beta_s + \gamma_s = k$	$\sum \alpha_a + \beta_a + \gamma_a = l$	$\sum \alpha_l + \beta_l + \gamma_l = t$
iv $\wedge$ vi	$\sum \alpha_s + \gamma_s = k$	$\sum \alpha_a + \gamma_a = l$	$\sum \alpha_l + \gamma_l = t$
ii $\wedge$ vi	$\sum \beta_s + \alpha_s = k$	$\sum \beta_a + \alpha_a = l$	$\sum \beta_l + \alpha_l = t$

Una explicación más detallada de las ecuaciones en la Tabla 7, se da en la Tabla 8, en donde se muestran las siete posibles resultados a obtener.

De acuerdo con las Tabla 7 y la Tabla 8, solo una de las siete opciones es seleccionada como salida para los conjuntos $O_{s,i}$, $O_{a,i}$, $O_{l,i}$. Para general un resultado cuantitativo relacionado con el análisis de las salidas provenientes del proceso de *model-checking*, se propone asignar un valor a cada posible resultado obtenido, Tabla 9.

Los valores en la tabla se relacionan con el nivel de confianza en el posible impacto sobre las capacidades que puede tener el cumplimiento de un requerimiento. Bajo el supuesto de que el incumplimiento de un requerimiento tiene un mayor impacto sobre la capacidad si proviene de un requerimiento fuertemente relacionado que si este proviene de uno medianamente o débilmente relacionado. Por ello se observa en la columna de los requerimientos fuertemente relacionados tienen una mayor penalización que la de los medianamente relacionados, y esta a su vez tiene una mayor penalización que la de los débilmente relacionados.

Tabla 8. Explicación de los siete posibles tipos de resultados en el proceso de análisis de capacidades

Caso	Resultado	Explicación
Caso 1	i	Todas las propiedades se cumplen
Caso 2	ii & iv	Algunas propiedades no se cumplen y las propiedades restantes son no concluyentes.
Caso 3	iii	Ninguna propiedad se cumple
Caso 4	v	Todas las propiedades tienen resultados no concluyentes
Caso 5	ii & iv & vi	Algunas propiedades no se cumplen, las propiedades restantes, algunas son no concluyentes y algunas se cumplen.
Caso 6	iv & vi	Algunos resultados son no concluyentes y las propiedades restantes se cumplen.
Caso 7	ii & vi	Algunas propiedades no se cumplen y las propiedades restantes se cumplen.

Tabla 9. Asignación de valores propuesta para los resultados obtenidos al evaluar $O_{s,i}$, $O_{a,i}$, $O_{l,i}$

	Of_j	Om_j	Od_j
<i>i</i>	3	3	3
<i>ii</i> $\wedge$ <i>iv</i>	-2	-2	-1
<i>iii</i>	-3	-3	-3
<i>v</i>	0	0	0
<i>ii</i> $\wedge$ <i>iv</i> $\wedge$ <i>vi</i>	-1	0	1
<i>iv</i> $\wedge$ <i>vi</i>	1	2	2
<i>ii</i> $\wedge$ <i>vi</i>	-1	1	1

Para poder obtener un resultado general, es decir que resuma los resultado ubicados en la Tabla 9 para los conjuntos $O_{s,i}$, $O_{a,i}$, $O_{l,i}$, se propone un valor que generalice el alcance de una capacidad, ver Ecuación 6. $\chi \in \{-3,3\}$ representa el valor de certidumbre asociado con el cumplimiento de los requerimientos par la capacidad C_i (si no existe algún tipo de propiedad se asume como cumplida totalmente, es decir el caso 1 en la Tabla 9), ver Tabla 10.

$$\chi = ceiling \left(\frac{Of_j + Om_j + Od_j}{3} \right) \quad (6)$$

Tabla 10. Niveles de certidumbre para el cumplimiento de una capacidad, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012)

Valor de certeza	Interpretación de los resultados
-3	Existe una certeza alta de no cumplimiento
-2	Existe una certeza moderada de no cumplimiento
-1	Existe una certeza baja de no cumplimiento
0	No existe certeza de cumplimiento o incumplimiento
1	Existe una certeza baja de cumplimiento
2	Existe una certeza moderada de cumplimiento
3	Existe una certeza alta de cumplimiento

5.6.5.3. Análisis de resultados

Para el sistema en general, se puede obtener un análisis de cumplimiento de las capacidades , e incluso un indicador de cumplimiento, ver Tabla 11.

Tabla 11. Análisis de cumplimiento e indicador de cumplimiento, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012)

Capacidades	$C_{w,i}$	Factor de impacto							Medición
		Bajo	-2	-1	0	1	2	Alto	$\chi_{t,i} = \chi_i \times C_{w,i}$
Capacidad 1	$C_{w,1}$					x			$\chi_{t,1} = \chi_1 \times C_{w,1}$
Capacidad 2	$C_{w,2}$				x				$\chi_{t,2} = \chi_2 \times C_{w,2}$
Capacidad ...	$C_{w,...}$	x							$\chi_{t,...} = \chi_{...} \times C_{w,...}$
Capacidad n	$C_{w,n}$						x		$\chi_{t,n} = \chi_n \times C_{w,n}$
Total importancia T_i :	$\sum_{i=1}^n C_{w,i}$	Total medición T_c :							$\sum_{i=1}^n \chi_{t,i}$
$K_f = T_i \times 3$									

Sea $\chi_{t,i} = \chi_i \times C_{w,i}$ el factor de cumplimiento para la capacidad C_i , $T_i = \sum C_{w,i}$ es el aporte total de las capacidades , $T_c = \sum_{i=1}^n \chi_{t,i}$ es el indicador de cumplimiento general de las capacidades respecto al sistema , y $K_f = T_i \times 3$ es el dominio en el que existe $\chi_{t,i} = \chi_i$.

Una representación gráfica del indicador de cumplimiento es desarrollada para analizar las implicaciones de los resultados en el análisis capacidades, ver Figura 29.

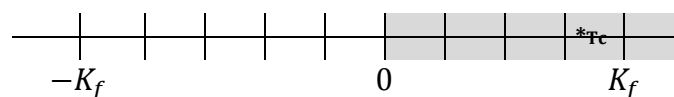


Figura 29. Representación gráfica del indicador de cumplimiento, adaptada de (Mortara, L., & Ford, 2012)

Adicionalmente se realiza el mismo procedimiento teniendo en cuenta los requerimientos que no cumple la tecnología que se quiera incorporar, y se tiene en cuenta las implicaciones sobre el cumplimiento de las capacidades en el sistema. A partir de este análisis se obtiene un indicador de cumplimiento general relacionado con el cumplimiento de los requerimientos por parte de una tecnología a incorporar T_r .

Finalmente se revisa la matriz de correlación entre capacidades C_c , con la cual se puede determinar las implicaciones en el sistema producto del cumplimiento o incumplimiento de una capacidad en particular C_i .

5.7. Análisis de resultados

En la etapa tres de la metodología de evaluación se obtiene un estimado del impacto de una tecnología en particular T_f sobre las capacidades del sistema, en la etapa 5 es posible conocer que tan bien se adapta el marco operativo general del sistema a los requerimientos de incorporación, la métrica T_c permite entender que tan bien los cambios operativos se han hecho para adaptarse a la tecnología a incorporar. Un indicador de cumplimiento adicional T_r es calculado, este se calcula en términos de las tecnologías a incorporar y el cumplimiento de los requerimientos de incorporación. T_f , T_c , y T_r muestran la relación entre el impacto de la tecnología, que tan bien preparado está el sistema para incorporar una nueva tecnología de acuerdo a los requerimientos de incorporación, y que tan bien esta la tecnología para adaptarse al marco operativo general del sistema. Concretamente se estipulan dos relaciones, (T_f, T_c) con la cual se puede relacionar el impacto de la tecnología con el diseño realizado para incorporarla, y (T_f, T_r) con el cual se relaciona nuevamente el impacto de la tecnología y que tanto se adapta dicha tecnología al diseño propuesto, ver Figura 30.

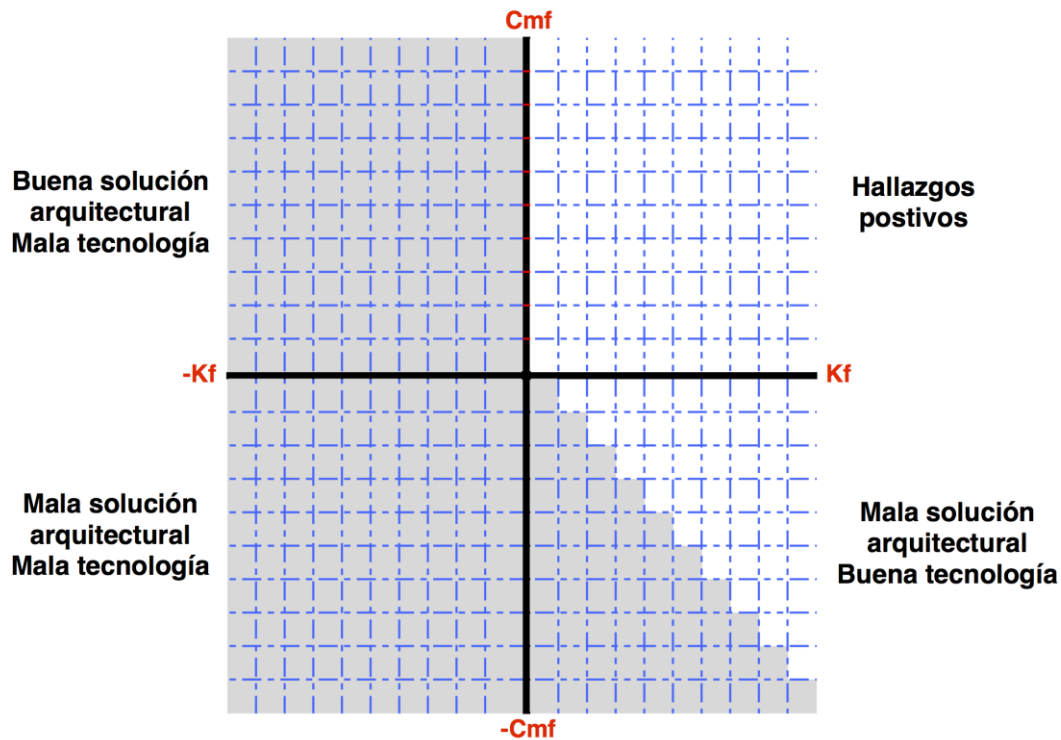


Figura 30. Cuadro comparativo para opciones tecnologías, adaptado de (Mortara, L., & Ford, 2012)

Cuatro escenarios de incorporación se pueden presentar:

- i. Hallazgos positivos: El impacto de la tecnología en la solución propuesta por el equipo arquitectural es la correcta. En este cuadrante se espera un impacto positivo.
- ii. Solución arquitectural pobre y una buena tecnología: en este caso la tecnología es la correcta para satisfacer las capacidades requeridas. Pero, la solución arquitectural propuesta no es la correcta. Se recomienda rediseñar los procesos operacionales utilizados para incorporar dicha tecnología, con el rediseño del marco operacional se espera un impacto positivo.
- iii. Solución arquitectural pobre y una mala tecnología: en este caso, la tecnología seleccionada tiene un posible impacto negativo sobre el sistema, y la solución arquitectural no es la correcta.
- iv. Buena solución arquitectural y una mala tecnología: La solución arquitectural diseñada permite cumplir con los requerimientos de

incorporación, pero la tecnología seleccionada puede tener un impacto negativo sobre el sistema.

6. Aplicación del enfoque desarrollado para la evaluación de impacto de tecnología

Para mostrar la aplicabilidad del enfoque de evaluación de impacto de tecnología mediante artefactos arquitecturales que se propone en este trabajo y para verificar su efectividad, así como evidenciar el cumplimiento de la hipótesis, se plantean dos casos de aplicación en los cuales se pueda describir en detalle los diferentes aspectos y fortalezas que el enfoque puede tener, en la Tabla 12 se enuncian las especificaciones a tener en cuenta en los dos casos de aplicación propuestos.

Tabla 12. Ficha técnica para los dos casos de aplicación en los cuales se utiliza el modelo de evaluación propuesto en este trabajo

Caso	Problema	Consideraciones
SIMM 1	Integración de capacidades mediante adquisición de tecnología.	Integración de cuatro sistemas que aportan cada uno de ellos diferentes capacidades a un sistema de diseño de implantes médicos hechos a la medida. El proceso de evaluación se basa en un trabajo previo (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013) que aborda el mismo problema de integración de capacidades mediante un enfoque de evaluación de tecnología tradicional.
SIMM 2	Integración de una sola capacidad a un sistema mediante adquisición de tecnología.	Integración de un sistema el cual aporta a un sistema de diseño de implantes médicos hechos a la medida una capacidad fundamental. El proceso de evaluación está basado en la información del caso SIMM 1. Sin embargo, se hacen variaciones en los parámetros de la información para indagar aspectos del modelo que no se pueden apreciar debido a la naturaleza de los datos recolectados.

6.1. Caso de aplicación, Sistema de implantes médicos a la medida

Para aplicar el modelo de evaluación de impacto de tecnología planteado, se utiliza un sistema para diseño de implantes médicos hechos a la medida (SIMM) (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013), con una arquitectura en DoDAF 2.0 sustentada en un diseño orientado a capacidades (Nogera Jormary, Flores Jerson, Lopez Clara, Delgado Dario, 2016) (Figura 31). Con el cual se busca realizar un proceso de incorporación de tecnologías, empleando el modelo de evaluación de impacto de tecnología presentado en este trabajo.

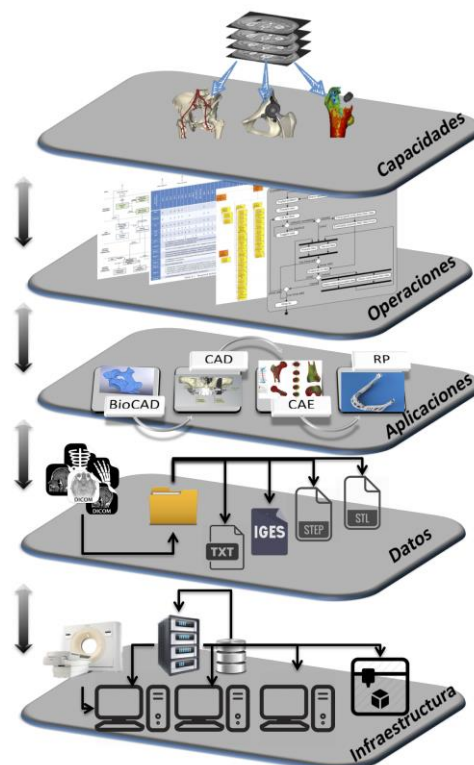


Figura 31. Esquema general para la arquitectura del sistema de diseño de prótesis a la medida (SIMM)

En este caso de aplicación propuesto, se presenta un sistema que busca integrar capacidades para la reconstrucción digital de volúmenes óseos, el modelado digital en 3D de implantes ajustables a una fractura, la evaluación y simulación de volúmenes digitales, y el modelado físico tanto de volúmenes óseos como de implantes de fracturas, y otras capacidades de gestión y coordinación de recursos que permitan generar prótesis ortopédicas hechas a la medida como productos emergentes.

6.1.1. Caso de aplicación SIMM 1

Para describir la aplicación del modelo de evaluación de impacto de tecnología se utiliza el sistema SIMM para aplicar los siete pasos estipulados en el modelo, los cuales se describen a continuación.

6.1.1.1. Problema de integración de capacidades en un sistema de implantes médicos a la medida

En este caso de aplicación, se aborda la integración de capacidades producto de la adquisición de múltiples tecnologías en un sistema para el diseño de implantes médicos hechos a la medida (SIMM) (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013). El problema de integración se centra en la incorporación de tres tecnologías software asociadas a los siguientes sistemas, un sistema BioCAD para la reconstrucción de segmentos óseos a partir de imágenes tomografías, un sistema CAD para el modelado de implantes, un sistema CAE para la validación de diseños y la adquisición de un sistema de prototipado rápido (RP) para obtener modelos físicos tridimensionales de los volúmenes óseos, ver Figura 32.

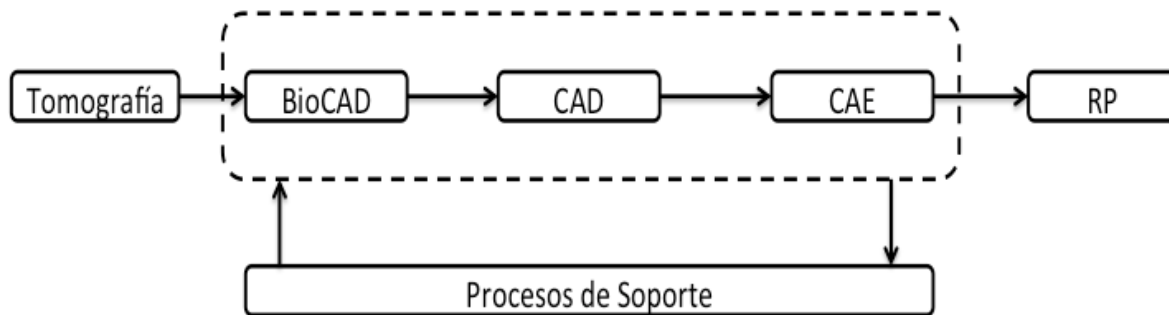


Figura 32. Perspectiva general del sistema para el diseño de implantes médicos a la medida SIMM

Para la incorporación de las diferentes tecnologías se plantea un conjunto de requerimientos los cuales se espera el sistema cumpla ante la incorporación de dichas tecnologías, ver Tabla 13. Y se presenta el listado de posibles tecnologías seleccionadas a evaluar, ver Tabla 14.

Tabla 13. Listado de requerimientos para los diferentes sistemas a incorporar

Sistema	Requerimiento
BioCAD	RBc1. El en proceso BIOCAD, la tecnología debe permitir la reconstrucción de las tomografías del trauma musculo esquelético usando técnica de ingeniería inversa.
	RBc1.1. El software debe permitir la importación de Tomografías Axiales Computarizadas mediante archivos en formato universal DICOM.
	RBc1.2. El software BIOCAD debe permitir la exportación del volumen 3D usando formatos de archivo de intercambio IGES, STEP o STL.
	RBc1.3. Se debe permitir la selección de región de imagen mediante mascarar
	RBc1.4. Se debe poder reconstruir volúmenes mediante calculo 3D
	RBc1.5. Se debe poder realizar la corrección de imperfecciones originadas en el proceso de calculo
	RBc1.6. Se debe poder realizar el suavizado de la superficie volumétrica
CAD	RCd1. En el proceso CAD, se debe diseñar el dispositivo ortopédico a la medida de los modelos propuestos por los especialistas para cada caso de estudio.
	RCd1.1. El software debe permitir la importación de modelos virtuales 3D de geometrías óseas reconstruidos en software BIOCAD mediante el uso de archivos de intercambio de modelo 3D (IGES, STEP o STL)
	RCd1.2. El software debe permitir la exportación del volumen 3D usando formatos de archivo de intercambio IGES, STEP, o

Sistema	Requerimiento
	STL.
	RCd1.3. Se debe mantener el historial de operaciones de construcción del modelo 3D permitiendo regresión
	RCd1.4. Se debe permitir la edición de parámetros de las operaciones de construcción del modelo
	RCd1.5. Se deben poder hacer planos técnicos utilizando normas estándar
CAE	RCe1. Al prototipo ortopédico diseñado se le deben realizar un análisis biomecánico virtual, para así detectar falencias.
	RCe1.1. El software debe permitir la importación de modelos 3D mediante archivos de intercambio de formatos IGES, STEP, o STL.
	RCe1.2. El software debe disponer de una base de datos de materiales Biocompatibles (Ti6Al4V, A316L) o permitir la creación de un nuevo material.
	RCe1.3. Se debe poder analizar el comportamiento mecánico de un conjunto mediante el diseño de un estudio estático realizado mediante elementos finitos (FEA)
	RCe1.4. Se deben proporcionar los datos de análisis de tensiones, desplazamientos, deformaciones unitarias y factores de seguridad resultantes de estudios estáticos
	RCe1.5. Se debe poder realizar estudios estáticos a conjuntos de piezas
	RCe1.6. Se debe poder seleccionar del sistema de ajuste "no separación" entre piezas de un conjunto.
RP	RPt1. El sistema debe proporcionar los prototipos necesarios para realizar análisis y pruebas de verificación en cada una de las fases requeridas.
	RPt1.1. El tamaño de impresión de los prototipos debe ser igual o superior a 30 centímetros en 3D.
	RPt1.2. Archivo de entrada de datos para el inicio del prototipado rápido deben ser en formato STL.
	RPt1.3. Debe soportar materiales de impresión ABS o PLA
	RPt1.4. El material de soporte debe ser removible con agua

Tabla 14. Soluciones comerciales seleccionada para evaluar en cada sistema

Sistema	Solución
BioCAD	MIMICS ® (Materialise, 2016)
	AMIRA ® (FEI, 2016)
	GEOMA GIC ® (GeomaGic, 2016)
	OSIRIX ® (OsiriX, 2016)

CAD	SOLIDWORKS ® (Systems, 2016b)
	RHINOSEROS ® (Robert McNeel & Associates., 2014)
	AUTOCAD ® (Autodesk Ink, 2016)
	SOLIDEDGE ® (SIEMENS, 2016)
CAE	ANSYS ® (Inc, 2016)
	ABAQUS ® (Systems, 2016a)
	Altair Hyperworks (A. Engineering, 2016)
	SOLIDWORKS SIMULATION ® (Systems, 2016c)
RP	BIG CREATOR II XL DUO (3D Systems)
	Dimension elite (STRATASYS)
	A4 (3ntr)
	ACCULAS BA-30 (D-Mec)

6.1.1.2. Capacidades y requerimientos

Como se menciona en la definición del enfoque de evaluación de impacto, en este apartado del modelo se busca relacionar la voz de los interesados (los requerimientos de incorporación) y la voz de los ingenieros quienes buscan encontrar una relación directa entre el lenguaje informal de los requerimientos y las propiedades específicas de los sistemas. Para este trabajo se busca relacionar las habilidades particulares del sistema, sus capacidades (Figura 33 y Figura 34) que pueden ser obtenidas de su arquitectura, y los requerimientos de incorporación, ver Tabla 13.

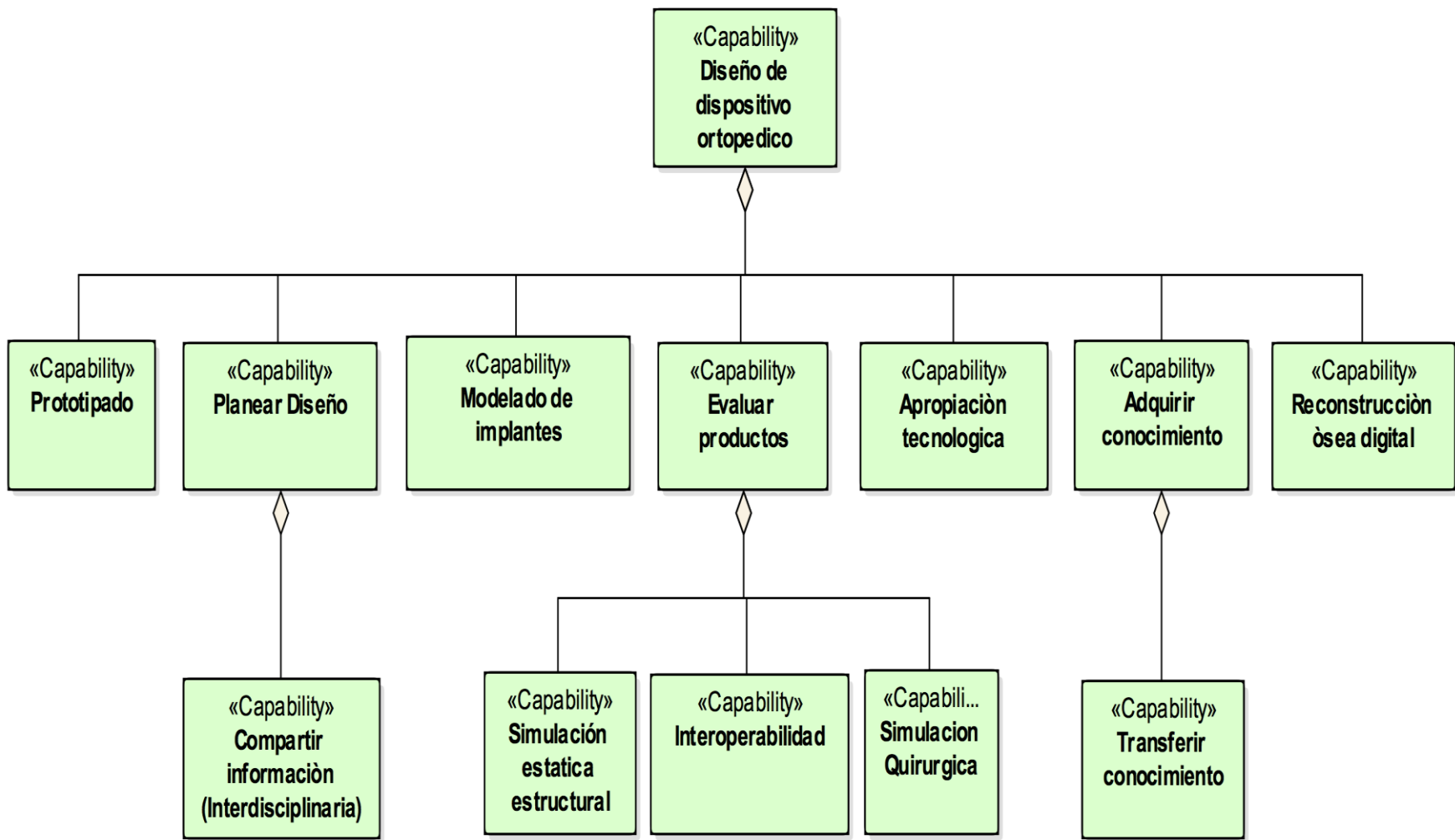


Figura 33. Modelo CV-2, Jerarquía de capacidades

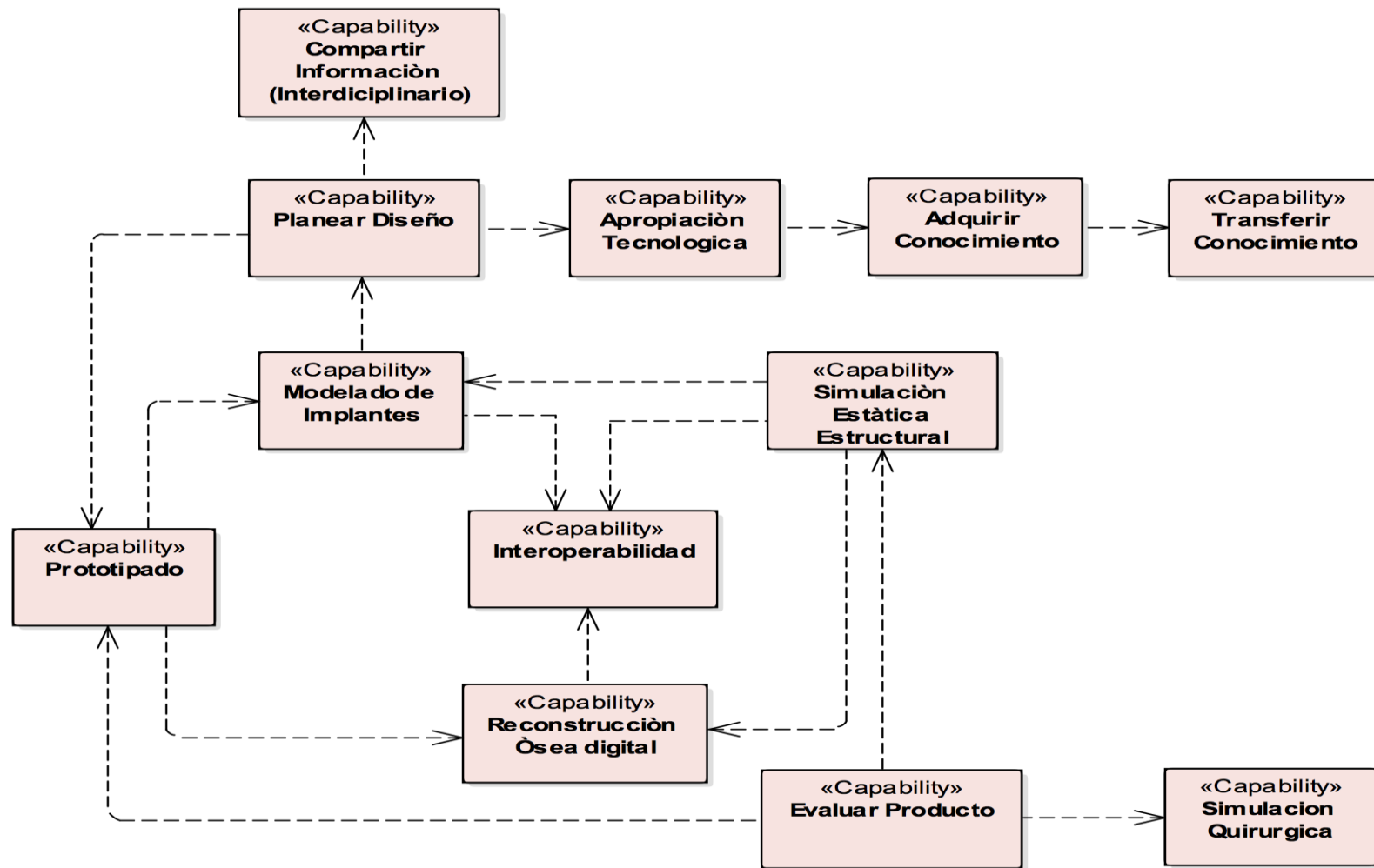


Figura 34. Modelo CV-4, Dependencia de capacidades

A partir del modelo CV-2 (Figura 33) se pueden obtener el listado de capacidades del sistema, ver Tabla 15. Con esta información se construye el cuadro de relación entre requerimientos y capacidades, ver Figura 35. Con esta relación se obtienen las capacidades particulares del sistema que se encuentran involucradas en la incorporación de tecnología, los vectores de peso para las capacidades y los requerimientos. Para la matriz de correlación entre capacidades, se necesita un modelo adicional, CV-4 (Figura 34), que muestra la relación entre las capacidades.

Tabla 15. Listado de Capacidades obtenidas del modelo CV-2, jerarquía de capacidades

CODIGO	CAPACIDAD
C1	Planear Diseño
C2	Compartir Información (Interdisciplinaria)
C3	Adquirir Conocimiento
C4	Transferir Conocimiento
C5	Evaluar Productos
C6	Apropiación tecnológica
C7	Reconstrucción Ósea Digital
C8	Modelado de Implantes
C9	Simulación Estática Estructural
C10	Simulación Quirúrgica
C11	Interoperabilidad
C12	Prototipado

6.1.1.3. Factores de impacto de la tecnología

En esta etapa se busca determinar cuál puede ser el impacto (positivo o negativo) de cada tecnología a incorporar sobre las diferentes capacidades del sistema. A partir de los resultados obtenidos en (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013) se obtienen las evidencias que permiten determinar dichos factores de impacto, que como se menciona en la definición del modelo se pueden obtener a partir de los expertos, la literatura, encuestas o modelos físicos de las tecnologías.

Utilizando las tecnologías candidatas a evaluar (Tabla 14), se muestra a continuación en la Tabla 16, un ejemplo de la plantilla a llenar para determinar el

impacto de una tecnología en particular (paquete de Software MIMICS quien es una tecnología candidata a aportar las capacidades propias del sistema de BioCAD) y el cálculo de su factor de impacto, ver Figura 36. A modo de resumen, en la Tabla 17, se muestran todas las mediciones de impacto para las diferentes tecnologías propuestas, en el Anexo B se muestran los detalles del cálculo de los demás factores de impacto.

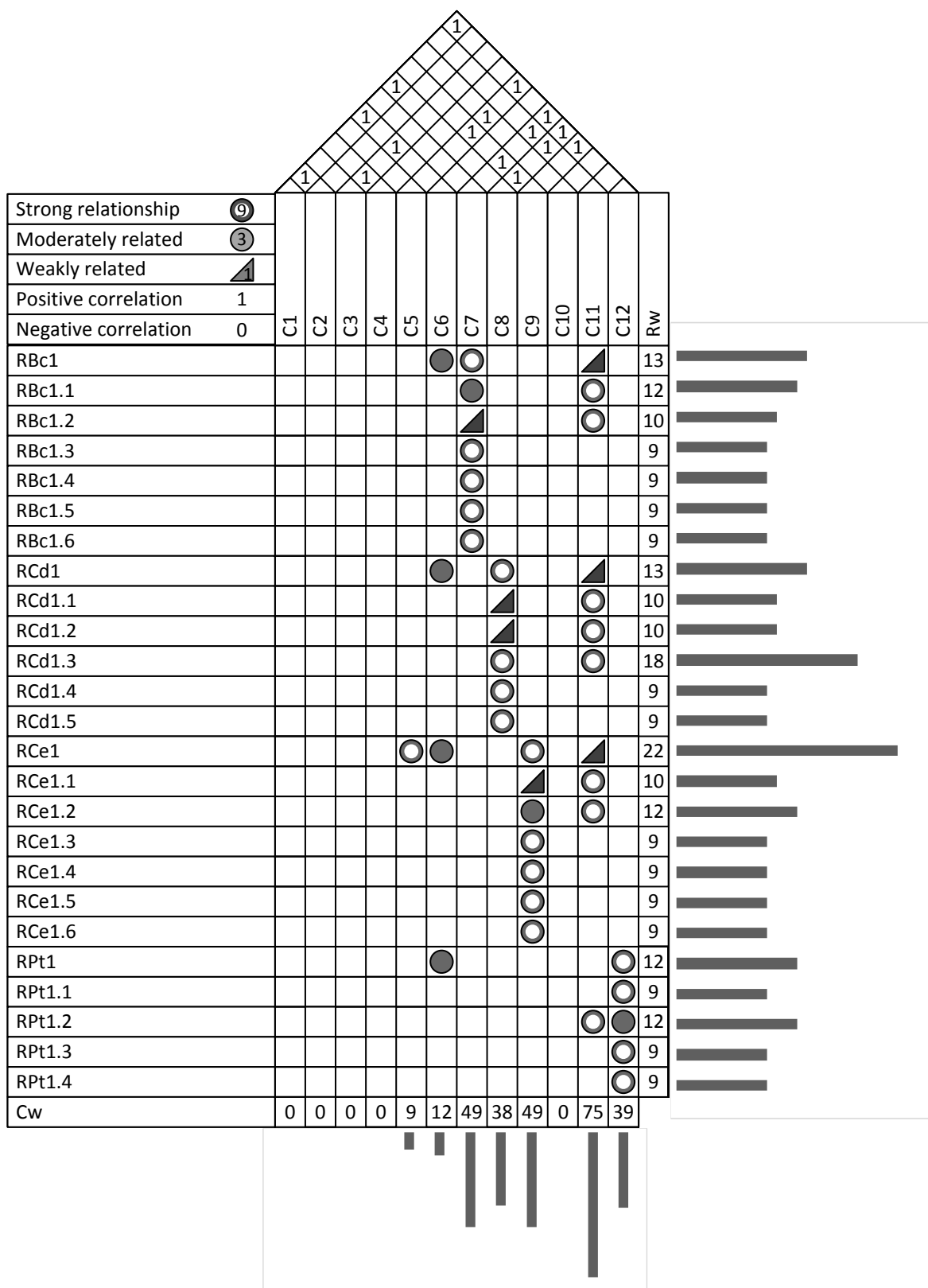


Figura 35. Matriz de relaciones (HOQ) entre capacidades del sistema y requerimientos de incorporación

Tabla 16. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete MIMICS respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12							X	36
C7	49							X	147
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75							X	225
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							408
K _f = T _i × 3									813

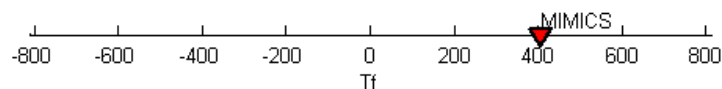


Figura 36. Representación gráfica para el factor de impacto asociado a la herramienta MIMICS

Tabla 17. Factores de impacto relacionados con los paquetes software para cada sistema a incorporar

Sistema	Paquete Software	T_f
BioCAD	MIMICS	408
	AMIRA	222
	GEOMA GIC	261
	OSIRIX	75
CAD	SOLIDWORKS	262
	RHINOSEROS	262
	AUTOCAD	100
	SOLIDEDGE	288
CAE	ANSYS	372
	ABAQUS	225
	Altair Hyperworks	225
	SOLIDWORKS SIMULATION	225
RP	BIG CREATOR II XL DUO (3D Systems)	378
	Dimension elite (STRATASYS)	252
	A4 (3ntr)	252
	ACCULAS BA-30 (D-Mec)	252

El caso de aplicación contempla un proceso de integración de tecnologías. En la Tabla 17, se muestran los impactos individuales de cada tecnología sobre las capacidades del sistema. Para tener una idea del impacto conjunto producto de la integración de las diferentes tecnologías se presenta un estimador del impacto para una configuración el cual puede calcularse utilizando la Ecuación 7.

$$T_f = T_{f(biocad)} + T_{f(cad)} + T_{f(cae)} + T_{f(rp)} \quad (7)$$

Para un caso particular de integración, por ejemplo, MIMICS + SOLIDWORKS + ANSYS + BIG CREATOR, el cálculo de su factor de impacto está dado por $T_f = 408 + 262 + 372 + 378$. Una visión general de las configuraciones de tecnologías de acuerdo a los factores de impacto calculados se puede ver en la Figura 37.

6.1.1.4. *Requerimientos del sistema y las tecnologías a incorporar*

Empleando la Tabla 13 y la Tabla 14, se busca relacionar los requerimientos de incorporación con las tecnologías a incorporar, ver Tabla 18. Lo que se busca en esta etapa es obtener la información para que posteriormente se pueda diferenciar el impacto de una tecnología en el sistema con el cumplimiento de los requerimientos que se estipulan para su adquisición, los cuales no necesariamente pueden estar alineados.

6.1.1.5. *Escenarios arquitecturales*

En la definición del modelo de evaluación se menciona que en la arquitectura de operaciones o de negocios, el cambio como consecuencia de una innovación tecnológica o de una incorporación de tecnología (el cambio directo sobre las capacidades) es visualizado en el marco operativo general en términos de escenarios arquitecturales.

Para los requerimientos de incorporación de tecnología, ver Tabla 13, se implementa en la arquitectura un escenario arquitectural con las operaciones necesarias que permitan alcanzar las capacidades propias del sistemas relacionadas con las capacidades aportadas por las tecnologías a incorporar y que se adaptan a las capacidades ya existentes. Para tener una idea del comportamiento del sistema producto de un cambio en el marco operativo general motivado por la incorporación de una nueva o nuevas capacidades (de índole tecnológico) se pueden tomar los escenarios relacionados a los modelos OV-6a (Modelo de reglas operacionales) , ver Figura 38, el cual muestra un panorama del comportamiento operacional del sistema, y el modelo OV-6b (Modelo de descripción de la transición de estados) el cual muestra un panorama general de la posibles configuraciones del sistema en su comportamiento dinámico general, ver Figura 39.

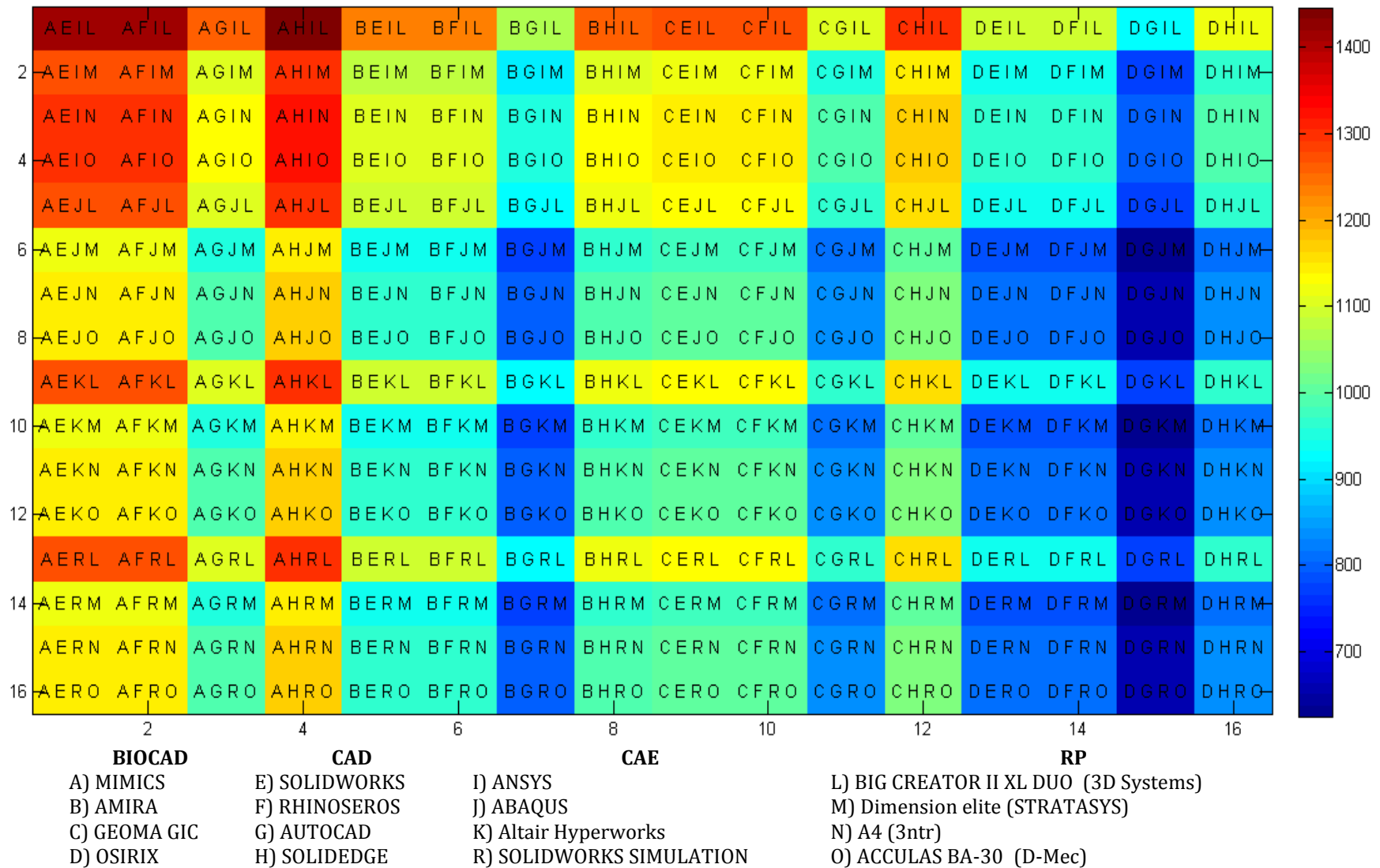


Tabla 18. Requerimientos y tecnologías a incorporar, segmento de tabla tomada de (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013)

BioCAD	MIMICS	AMIRA	GEOMA GIC	OSIRIX
RBc1. El en proceso BIOCAD, la tecnología debe permitir la reconstrucción de las tomografías del trauma musculo esquelético usando técnica de ingeniería inversa.	☐	☐	☐	☐
RBc1.1. El software debe permitir la importación de Tomografías Axiales Computarizadas mediante archivos en formato universal DICOM.	☐	☐	☐	☐
RBc1.2. El software BIOCAD debe permitir la exportación del volumen 3D usando formatos de archivo de intercambio IGES, STEP o STL.	☐	☐	☐	☐
RBc1.3. Se debe permitir la selección de región de imagen mediante mascarar	☐	☐	☐	☐
RBc1.4. Se debe poder reconstruir volúmenes mediante calculo 3D	☐	☐	☐	☐
RBc1.5. Se debe poder realizar la corrección de imperfecciones originadas en el proceso de calculo	☐	☐	☐	☐
RBc1.6. Se debe poder realizar el suavizado de la superficie volumétrica	☐	☐	☐	☐
CAD	SOLIDWORKS	RHINOSEROS	AUTOCAD	SOLIDEDGE
RCd1. En el proceso CAD, se debe diseñar el dispositivo ortopédico a la medida de los modelos propuestos por los especialistas para cada caso de estudio.	☐	☐	☐	☐
RCd1.1. El software debe permitir la importación de modelos virtuales 3D de geometrías óseas reconstruidos en software BIOCAD mediante el uso de archivos de intercambio de modelo 3D (IGES, STEP o STL)	☐	☐	☐	☐
RCd1.2. El software debe permitir la exportación del volumen 3D usando formatos de archivo de intercambio IGES, STEP, o STL.	☐	☐	☐	☐
RCd1.3. Se debe mantener el historial de operaciones de construcción del modelo 3D permitiendo regresión	☐	☐	☐	☐
RCd1.4. Se debe permitir la edición de parámetros de las operaciones de construcción del modelo	☐	☐	☐	☐
RCd1.5. Se deben poder hacer planos técnicos utilizando normas estándar	☐	☐	☐	☐
CAE	ANSYS	ABAQUS	Altair Hyperworks	SOLIDWORKS SIMULATION
RCe1. Al prototipo ortopédico diseñado se le deben realizar análisis biomecánicos virtual, para así detectar falencias.	☐	☐	☐	☐
RCe1.1. El software debe permitir la importación de modelos 3D mediante archivos de intercambio de formatos IGES, STEP, o STL.	☐	☐	☐	☐
RCe1.2. El software debe disponer de una base de datos de materiales Biocompatibles (Ti6Al4V, A316L) o permitir la creación de un nuevo material.	☐	☐	☐	☐
RCe1.3. Se debe poder analizar el comportamiento mecánico de un conjunto mediante el diseño de un estudio estático realizado mediante elementos finitos (FEA)	☐	☐	☐	☐
RCe1.4. Se deben proporcionar los datos de análisis de tensiones, desplazamientos, deformaciones unitarias y factos de seguridad resultantes de estudios estáticos	☐	☐	☐	☐
RCe1.5. Se debe poder realizar estudios estáticos a conjuntos de piezas	☐	☐	☐	☐
RCe1.6. Se debe poder seleccionar del sistema de ajuste "no separación" entre piezas de un conjunto.	☐	☐	☐	☐
RP	BIG CREATOR II XL DUO	Dimension elite	A4	ACCULAS BA-30
RPt1. El sistema debe proporcionar los prototipos necesarios para realizar análisis y pruebas de verificación en cada una de las fases requeridas.	☐	☐	☐	☐
RPt1.1. El tamaño de impresión de los prototipos debe ser igual o superior a 30 centímetros en 3D.	☐	☐	☐	☐
RPt1.2. Archivo de entrada de datos para el inicio del prototipado rápido deben ser en formato STL.	☐	☐	☐	☐
RPt1.3. Debe soportar materiales de impresión ABS o PLA	☐	☐	☐	☐
RPt1.4. El material de soporte debe ser removible con agua	☐	☐	☐	☐

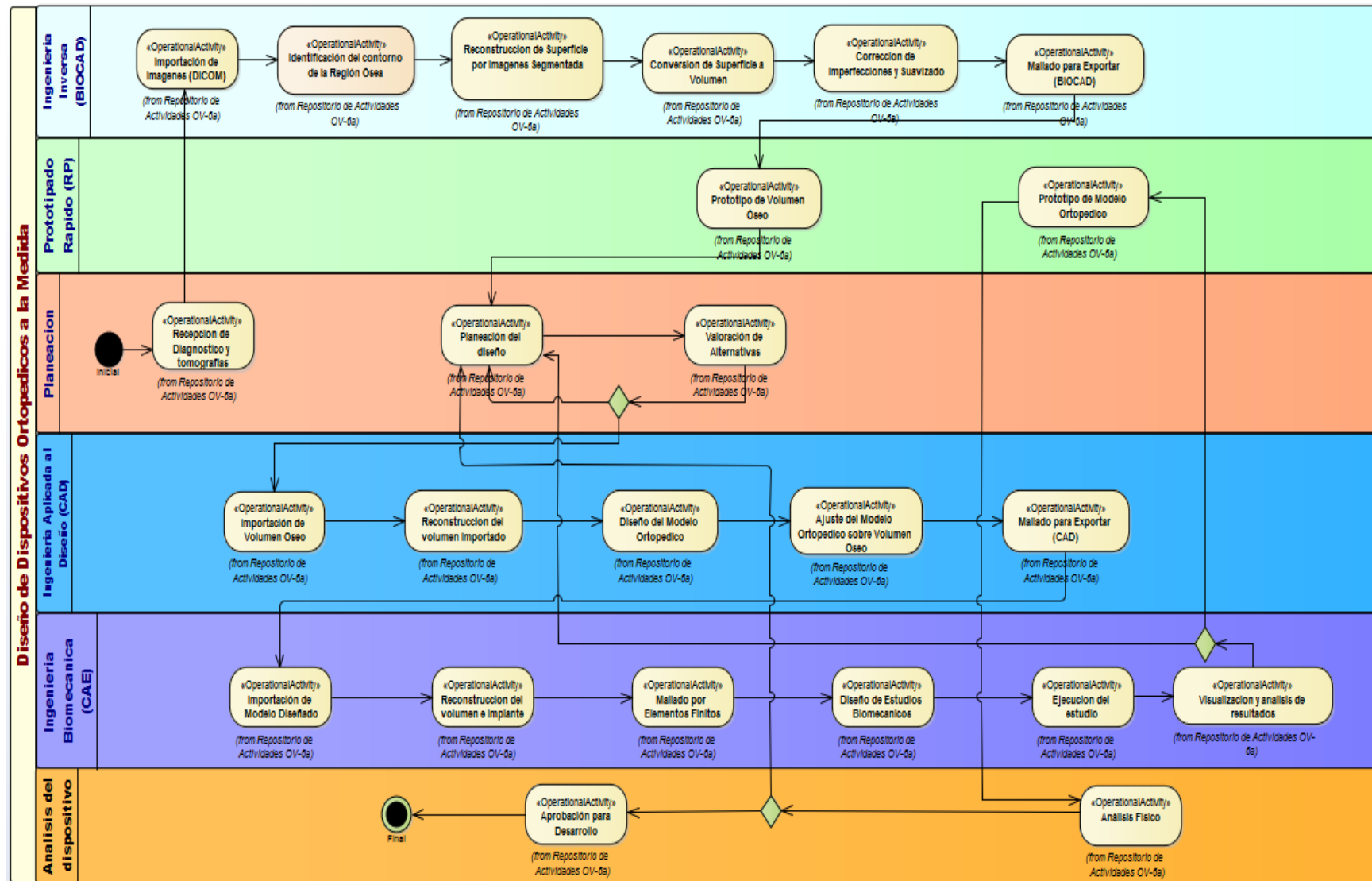


Figura 38. Modelo OV-6a (Modelo de reglas operacionales) para el sistema SIMM, escenario de incorporación de capacidades tecnológicas

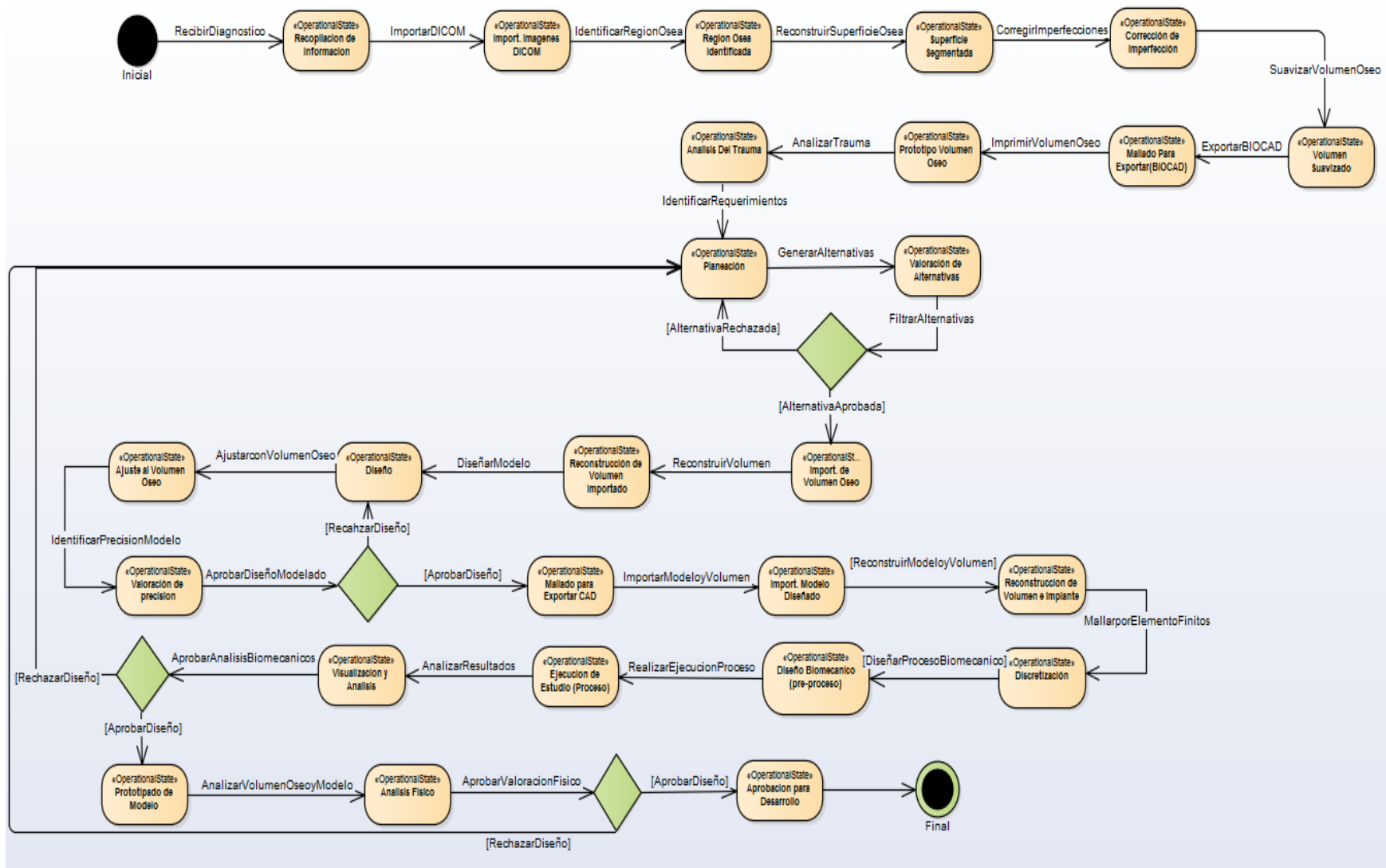


Figura 39. Modelo OV-6b (Modelo de descripción de transición de estados) para el sistema SIMM, escenario de incorporación de capacidades tecnologías

6.1.1.6. *Model-checking como técnica de verificación de capacidades*

En esta etapa del enfoque de evaluación de tecnología se quiere verificar si los escenarios de incorporación, ver Figura 38 y Figura 39, diseñados teniendo en cuenta los requerimientos para la incorporación de tecnología realmente permiten alcanzar las capacidades requeridas por el sistema, ver Figura 33. Es decir, dichos modelos representan las capacidades del sistema las cuales deben satisfacer las necesidades estipuladas por los *Stakeholders*. De acuerdo a lo propuesto en el enfoque de evaluación se procede a realizar la verificación de las capacidades diseñadas mediante el enfoque basado en la validación de modelos (*model-checking*). Para ello se presenta el siguiente procedimiento.

A partir del modelo de comportamiento OV-6b, se desarrolla un modelo ejecutable (*Labeled Transition System LTS*), ver Figura 40, que permita verificar los requerimientos asociados al proceso de adquisición de tecnología. Para ello se debe transformar el diagrama de estados representado por el modelo OV-6b en un LTS el cual es la tupla $TS = \langle S, Act, \rightarrow, I, AP, L \rangle$ donde:

- S es el conjunto finito de estados,
- Act es el alfabeto de comunicación de M ,
- $\rightarrow \subseteq S \times Act \times S$ es una relación de transición,
- $I \subseteq S$ es el conjunto de estados iniciales,
- $AP \in \tau$ es el conjunto de proposiciones atómicas,
- $L: S \rightarrow 2^{AP}$ es la función de etiquetado.

Como se menciona en la definición del modelo, la relación entre el diagrama OV-6b y el LTS se puede dar uno a uno excepto por las proposiciones atómicas AP y la función L . Las proposiciones atómicas se utilizan para relacionar la ejecución del TS con el cumplimiento de los requerimientos, siendo las proposiciones atómicas aquellas operaciones (modelo OV-6a) particulares que se llevan a cabo,

total o parcialmente, para satisfacer un requerimiento. En consecuencia se puede representar un requerimiento en términos de un conjunto de proposiciones atómicas (las etiquetas que representan una operación), ver Tabla 19.

Tabla 19. Asignación de etiquetas (Propiedades atómicas) a los requerimientos para la incorporación de tecnología

Código	Requerimiento	Propiedades Atómicas
RBc1	El en proceso BIOCAD, la tecnología debe permitir la reconstrucción de las tomografías del trauma musculo esquelético usando técnica de ingeniería inversa.	
RBc1.1	El software debe permitir la importación de Tomografías Axiales Computarizadas mediante archivos en formato universal DICOM.	importarTomografia
RBc1.2	El software BIOCAD debe permitir la exportación del volumen 3D usando formatos de archivo de intercambio IGES, STEP o STL.	suavizarVolumen exportarArchivoSTL, exportarArchivoSTEP, exportarArchivoIGES
RBc1.3	Se debe permitir la selección de región de imagen mediante mascarar	identificarContorneoOseo, importarTomografia
RBc1.4	Se debe poder reconstruir volúmenes mediante calculo 3D	reconstruirSuperficie, identificarContorneoOseo
RBc1.5	Se debe poder realizar la corrección de imperfecciones originadas en el proceso de calculo	corregirImperfecciones, reconstruirSuperficie
RBc1.6	Se debe poder realizar el suavizado de la superficie volumétrica	suavizarVolumen, corregirImperfecciones
RCd1	En el proceso CAD, se debe diseñar el dispositivo ortopédico a la medida de los modelos propuestos por los especialistas para cada caso de estudio.	
RCd1.1	El software debe permitir la importación de modelos virtuales 3D de geometrías óseas reconstruidos en software BIOCAD mediante el uso de archivos de intercambio de modelo 3D (IGES, STEP o STL)	generarAlternativa importarArchivoSTL, importarArchivoSTEP, importarArchivoIGES
RCd1.2	El software debe permitir la exportación del volumen 3D usando formatos de archivo de intercambio IGES, STEP, o STL.	valorarPrecisionModelo exportarArchivoSTL, exportarArchivoSTEP, exportarArchivoIGES

Código	Requerimiento	Propiedades Atómicas
RCd1.3	Se debe mantener el historial de operaciones de construcción del modelo 3D permitiendo regresión	reconstruirVolumen, importarArchivoSTL, importarArchivoSTEP, importarArchivoIGES
RCd1.4	Se debe permitir la edición de parámetros de las operaciones de construcción del modelo	diseñarModelo, rechazarDiseño, reconstruirVolumen,
RCd1.5	Se deben poder hacer planos técnicos utilizando normas estándar	diseñarModelo, reconstruirVolumen,
RCe1	Al prototipo ortopédico diseñado se le deben realizar análisis biomecánicos virtual, para así detectar falencias.	
RCe1.1	El software debe permitir la importación de modelos 3D mediante archivos de intercambio de formatos IGES, STEP, o STL.	[exportarArchivoSTL, exportarArchivoSTEP, exportarArchivoIGES] [importarArchivoSTL, importarArchivoSTEP, importarArchivoIGES]
RCe1.2	El software debe disponer de una base de datos de materiales Biocompatibles (Ti6Al4V, A316L) o permitir la creación de un nuevo material.	consultarMateriales crearMateriales, mallarElementoFinitos
RCe1.3	Se debe poder analizar el comportamiento mecánico de un conjunto mediante el diseño de un estudio estático realizado mediante elementos finitos (FEA)	consultarMateriales crearMateriales, ejecucionProceso
RCe1.4	Se deben proporcionar los datos de análisis de tensiones, desplazamientos, deformaciones unitarias y factores de seguridad resultantes de estudios estáticos	analizarResultados, ejecucionProceso
RCe1.5	Se debe poder realizar estudios estáticos a conjuntos de piezas	
RCe1.6	Se debe poder seleccionar del sistema de ajuste "no separación" entre piezas de un conjunto.	
RPt1	El sistema debe proporcionar los prototipos necesarios para realizar análisis y pruebas de verificación en cada una de las fases requeridas.	imprimirModelo, imprimirVol0seo
RPt1.1	El tamaño de impresión de los prototipos debe ser igual o superior a 30 centímetros en 3D.	
RPt1.2	Archivo de entrada de datos para el	importarArchivoSTL

Código	Requerimiento	Propiedades Atómicas
	inicio del prototipado rápido deben ser en formato STL.	
RPt1.3	Debe soportar materiales de impresión ABS o PLA	
RPt1.4	El material de soporte debe ser removible con agua	

La función de etiquetado intenta relacionar el alcance de los requerimientos con las diferentes configuraciones que puede tener el sistema, es decir relacionar los requerimientos con los estados presentados en el modelo OV-6b, ver Tabla 20. La función de etiquetado L permite ejecutar el LTS en términos de los requerimientos, los cuales pueden ser verificados posteriormente.

Tabla 20. Función de etiquetado L , relación entre los estados del diagrama OV-6b y las propiedades atómicas.

Estados	$L(\text{Estados})$
Recopilación de Información	recibirDiagnostico
Importar Imágenes DICOM	importarTomografia
Región Ósea Identificada	identificarContorneoOseo
Superficie Segmentada	reconstruirSuperficie
Corrección de Imperfección	corregirImperfecciones
Volumen Suavizado	suavizarVolumen
Mallado Para Exporta (BIOCAD)	exportarArchivoSTL, exportarArchivoSTEP, exportarArchivoIGES
Prototipo Volumen Óseo	imprimirVolOseo
Análisis del Trauma	Analizartrauma
Planeación	identificarRequerimiento, rechazarAlternativa, rechazarModelo, rechazarPrototipo
Valoración de Alternativas	generarAlternativa
Importar Volumen Óseo	importarArchivoSTL, importarArchivoSTEP, importarArchivoIGES
Reconstrucción de Volumen Importado	reconstruirVolumen
Diseño	diseñarModelo, rechazarDiseño
Ajuste al Volumen Óseo	ajustarVolumen
Valoración de Precisión	valorarPrecisionModelo
Mallado para exportar CAD	exportarArchivoSTL, exportarArchivoSTEP, exportarArchivoIGES
Importar Modelo Diseñado	importarArchivoSTL,

	importarArchivoSTEP, importarArchivoIGES
Reconstrucción de Volumen e Implante	reconstruirModelo
Discretización	mallarElementoFinitos
Diseño Biomecánico (pre-proceso)	consultarMateriales, crearMateriales
Ejecución de Estudio (Proceso)	ejecucionProceso
Visualización y Análisis	analizarResultados
Prototipado de Modelo	imprimirModelo
Análisis Físico	analizarPrototipo
Aprobación Para Desarrollo	aprobarDesarrollo

El modelo ejecutable *TS* permite ejecutar al sistema SIMM en términos de los requerimientos de incorporación de tecnología. A partir de *TS* se busca corroborar si las capacidades implicadas en el proceso de adquisición se cumplen, para ello se necesitan los requerimientos asociados a cada capacidad y la categorización dada en la Figura 35. Una vez organizados se pueden diseñar las funciones LTL que permitirán verificar cada requerimiento empleando *Model-Checking*, ver Tabla 21.

Una vez verificadas las propiedades asociadas a las capacidades, se debe determinar el nivel de cumplimiento de cada capacidad. Para ello el modelo de evaluación estipula que para cada capacidad en particular, la cual puede tener asociados requerimientos fuertemente, moderadamente, o débilmente relacionados, se debe determinar para cada subconjunto (fuerte, medio, débil) la pertenencia a uno de los siete posibles resultados que se pueden presentar, ver Tabla 8, y a su vez asignar los valores estipulados al tipo de resultado obtenido, ver Tabla 9. Finalmente los valores obtenidos en cada subconjunto de propiedades (fuerte, media, débil) para cada capacidad permiten calcular un valor único asociado al cumplimiento de dicha capacidad utilizando la Ecuación 6, la cual genera un valor de certeza asociado al cumplimiento de dicha capacidad, ver Tabla 10. Para el sistema SIMM se resumen los valores obtenidos para cada capacidad en la Tabla 22, con estos valores se puede calcular un indicador de cumplimiento general T_c , ver Figura 41, de las capacidades diseñadas para satisfacer los requerimientos de incorporación.

Adicionalmente al indicador de cumplimiento T_c calculado para el sistema SIMM, y la matriz de correlación de capacidades C_c . Se realiza nuevamente el análisis de capacidades sin tener en cuenta los modelos operacionales, solo se tienen en cuenta la relación entre las tecnologías a incorporar y los requerimientos de incorporación estipulados, ver Tabla 18.

A partir de la relación existente entre las diferentes tecnologías a incorporar y los requerimientos de incorporación se pueden construir los diferentes escenarios posibles de adquisición y evaluar su posible desempeño en el sistema SIMM. En la Tabla 23, se muestra un escenario para la integración de cuatro tecnologías en particular, ver Figura 42 y ANEXO C. La visión general de todos los posibles escenarios de integración (256 posibles escenarios) se puede ver en la Figura 43, en donde se muestra el comportamiento de las posibles configuraciones respecto al indicador de cumplimiento T_r , ver ANEXO D. Este indicador da una noción de la afinidad de la tecnología con los requerimientos de incorporación y permite conocer a priori las falencias que se pueden presentar en las capacidades del sistema debido al incumplimiento de algunos requerimientos. El indicador T_r se utilizara mas adelante para relacionar el impacto de las tecnologías sobre el sistema y los requerimientos de incorporación.



Figura 40. Modelo ejecutable (*Labeled Transition System* – LTS) en términos de los requerimiento para el modelo OV-6b

Tabla 21. Organización de las funciones LTL asociadas a cada requerimiento y a cada capacidad y su respectivo resultado al ser evaluadas en una herramienta de *Model-Checkin*

CAPACIDAD	SUBCONJUNTO	PROPIEDAD (φ)	SALIDA
C5	$O_{s,5}$	RCe1^{2*}	□
	$O_{a,5}$		
	$O_{l,5}$		
C6	$O_{s,6}$		
	$O_{a,6}$	RBc1*	□
		RCd1*	□
		RCe1*	□
		RPt1*	□
	$O_{l,6}$		
C7	$O_{s,7}$	RBc1*	□
		RBc1.3 = <> (importTomography -> boneRegion)	□
		RBc1.4 = <> (boneRegion -> reconstructSurface)	□
		RBc1.5 = <> (reconstructSurface -> errorDetection)	□
		RBc1.6 = <> (errorDetection -> smooth)	□
	$O_{a,7}$	RBc1.1 = <> importTomography	□
	$O_{l,7}$	RBc1.2 = <> ((smooth)->(exportSTL exportSTEP exportGES))	□
C8	$O_{s,8}$	RCd1*	□
		RCd1.3 = <> ((importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP) -> (reconstruirVolumen))	□
		RCd1.4 = (<>(reconstruirVolumen -> ((diseñarModelo W rechazarDiseño)))-> diseñarModelo)	□
		RCd1.5 = <> ((reconstruirVolumen) -> (diseñarModelo))	□
	$O_{a,8}$		
	$O_{l,8}$	RCd1.1 = <> ((generarAlternativa)-> (importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP))	□
		RCd1.2 = <> ((valorarPrecisionModelo)-> ((exportarArchivoSTL exportarArchivoSTEP exportarArchivoIGES) W (importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP)))	□
C9	$O_{s,9}$	RCe1*	□
		RCe1.3 = <> ((consultarMateriales crearMateriales) -> (ejecucionProceso))	□
		RCe1.4 = <> ((ejecucionProceso) -> (analizarResultados))	□
		RCe1.5** ³	<i>Indefinido</i>
		RCe1.6**	<i>Indefinido</i>
	$O_{a,9}$	RCe1.2 = <> ((mallarElementoFinitos) -> (consultarMateriales crearMateriales))	□
	$O_{l,9}$	RCe1.1 = <> ((exportarArchivoSTL exportarArchivoSTEP exportarArchivoIGES) -> (importarArchivoSTL importarArchivoIGES	□

² * Las propiedades que tienen una numeración única son propiedades que se cumplen cuando sus propiedades dependientes se cumplen.

³ ** Requerimiento no verificable mediante *model-checking*

CAPACIDAD	SUBCONJUNTO	PROPIEDAD (φ)	SALIDA
		importarArchivoSTEP))	
C11	$O_{s,11}$	RBc1.1 = <> importTomography	□
		RBc1.2 = <>((smooth)->(exportSTL exportSTEP exportGES))	□
		RCd1.1= <>((generarAlternativa)->(importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP))	□
		RCd1.2= <>((valorarPrecisionModelo)->((exportarArchivoSTL exportarArchivoSTEP exportarArchivoIGES) W (importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP)))	□
		RCd1.3 = <>((importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP) -> (reconstruirVolumen))	□
		RCE1.1 = <>((exportarArchivoSTL exportarArchivoSTEP exportarArchivoIGES) -> (importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP))	□
		RCE1.2 = <> importTomography	□
		RPt1.2 = <>(importarArchivoSTL)	□
	$O_{a,11}$		
	$O_{l,11}$	RBc1*	□
		RCd1*	□
		RCE1*	□
C12	$O_{s,12}$	RPt1* = <>((imprimirModelo)W(imprimirVol0seo))	□
		RPt1.1**	Indefinido
		RPt1.3**	Indefinido
		RPt1.4**	Indefinido
	$O_{a,12}$	RPt1.2 = <>(importarArchivoSTL)	□
	$O_{l,12}$		

Tabla 22. Análisis de cumplimiento e indicadores de cumplimiento

Capacidad	C _{w,i}	Cumplimiento							Medición χ _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C ₅	9							×	27
C ₆	12							×	36
C ₇	49							×	147
C ₈	38							×	114
C ₉	49						×		98
C ₁₁	75							×	225
C ₁₂	39						×		78
T _i	271	T _c :							725
Cm _f = T _i × 3									813

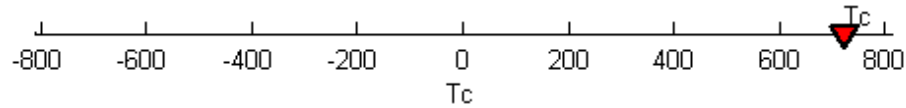


Figura 41. Representación grafica para el factor cumplimiento T_c para el escenario de incorporación

Tabla 23. Análisis de cumplimiento para el indicador de cumplimiento para la configuración de tecnologías AMIRA + RHINOSEROS + ANSYS + ACCULAS BA-30 (AFIO)

Capacidad	C _{w,i}	Cumplimiento							Medición X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C ₅	9							×	27
C ₆	12							×	36
C ₇	49					×			49
C ₈	38							×	114
C ₉	49							×	147
C ₁₁	75							×	225
C ₁₂	39					×			39
T _i	271	T _r							637
Cm _f = T _i × 3									813

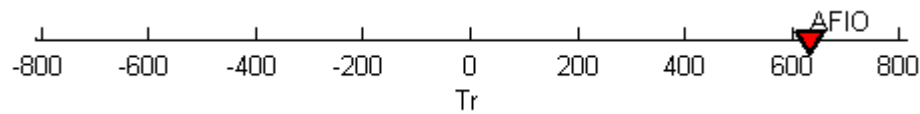


Figura 42. Representación grafica para el factor cumplimiento T_r para el escenario AMIRA + RHINOSEROS + ANSYS + ACCULAS BA-30 (AFIO)

6.1.1.7. Análisis de resultados

La etapa tres (3) en el enfoque de evaluación de tecnología presentado provee una estimación de impacto T_f para una tecnología en particular o para una configuración de tecnologías en relación a las capacidades del sistema, en la etapa cinco (5) es posible conocer que tan bien se adapta el marco operativo (MO) general a la posible incorporación de tecnologías, esta adaptación del MO se ve reflejado en dos mediciones T_c y T_r . La medición T_c permite ver que tan bien se adapta el marco operativo general a los requerimientos estipulados para la adquisición de tecnología, y la medición T_r provee un indicador de cumplimiento en términos de la relación existente entre las tecnologías candidatas a incorporar, los requerimientos de incorporación, y su posible desempeño en el marco operativo general del sistema u organización.

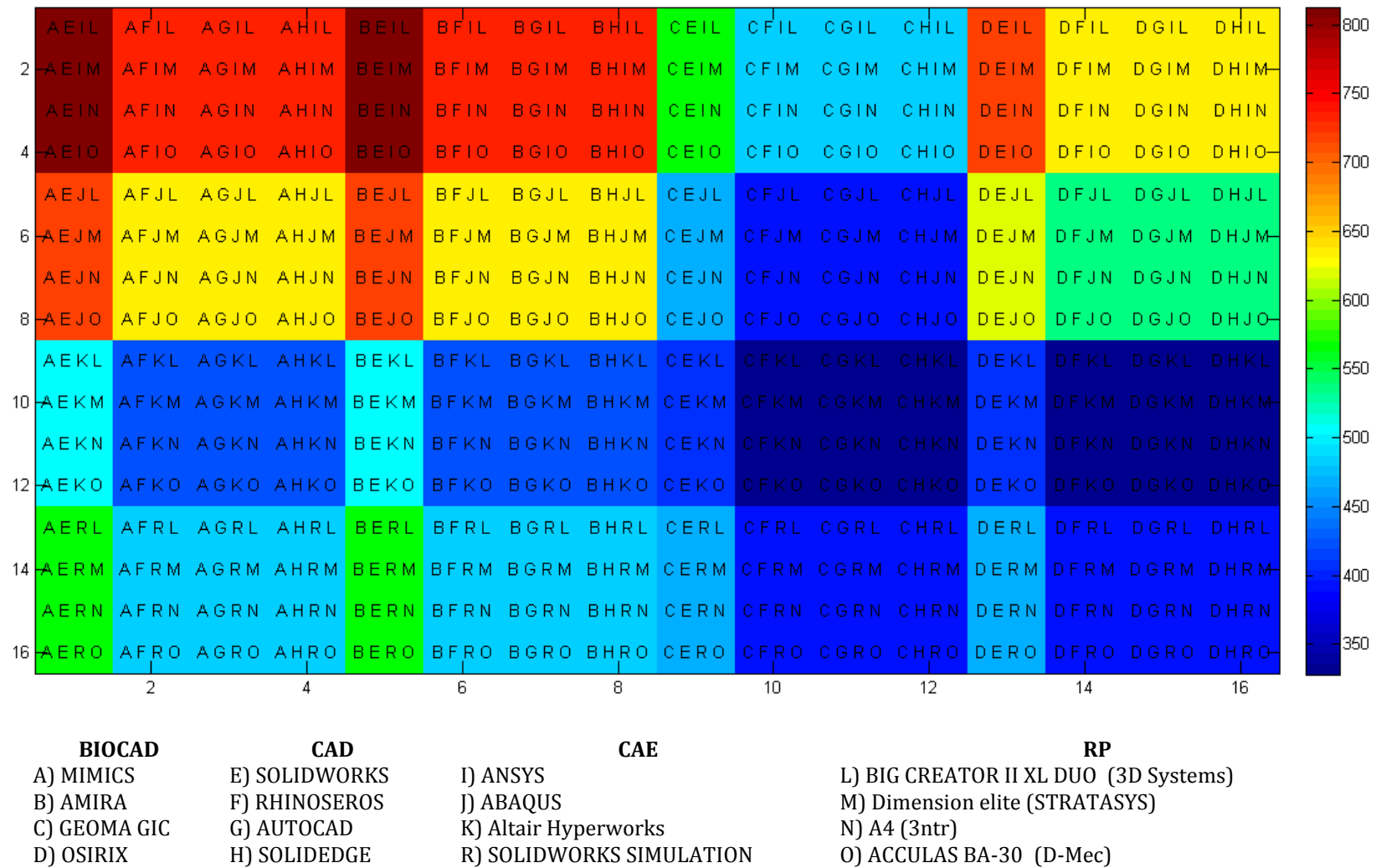
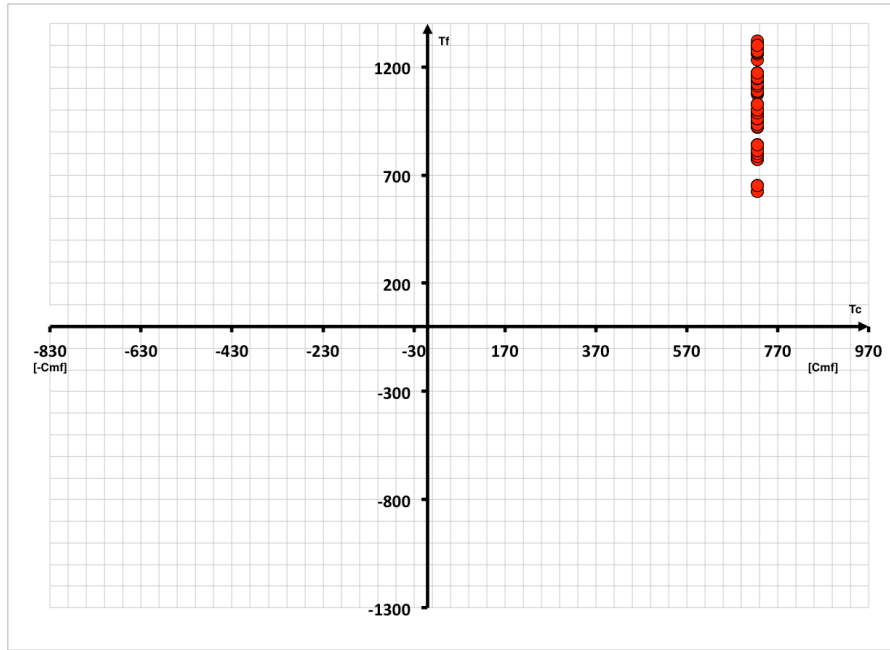


Figura 43. Escenarios posibles para las configuraciones BIOCAD+CAD+CAE+RP respecto a las tecnologías propuestas y su indicador de cumplimiento T_r .

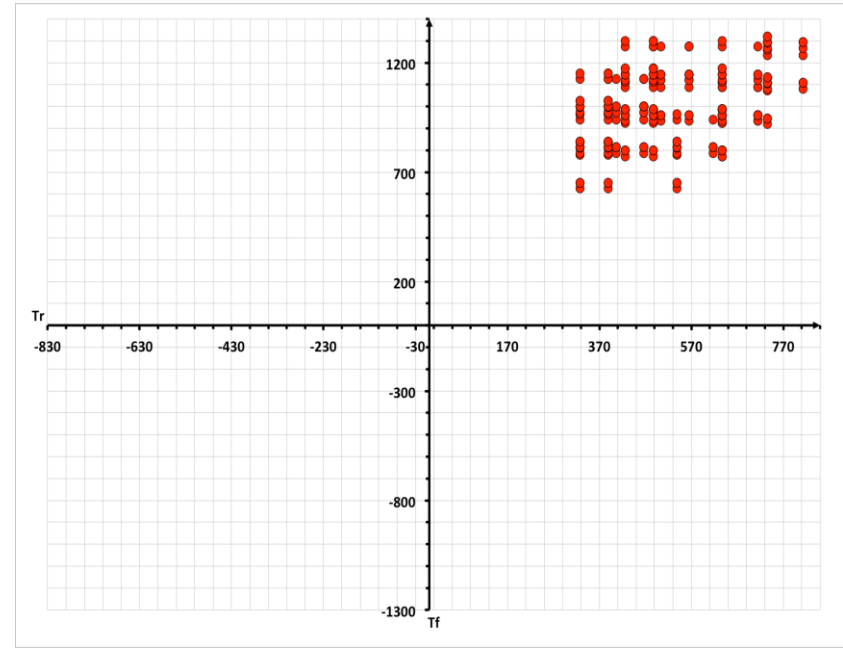
Las mediciones T_f , T_c y T_r permiten ver una relación entre el posible impacto de la tecnología en el sistema, que tan bien preparado está el sistema para incorporar un determinado tipo de tecnología, y cuáles son las implicaciones de las tecnologías a incorporar en el MO general del sistema u organización.

La primera relación a analizar es $[T_c, T_f]$, ver Figura 44-a. Con esta relación se ve reflejada el impacto que las diferentes tecnologías pueden tener sobre el sistema (T_f) teniendo en cuenta el contexto particular de aplicación, así como una idea de que tan preparado está el sistema para incorporar dichas tecnologías. En el caso del sistema SIMM, la evaluación de las capacidades involucradas en el proceso de adquisición tiene un valor de $T_c = 725$. Teniendo en cuenta que $T_c \in \{-813, 813\}$, lo cual indica que de acuerdo al modelo de verificación de capacidades utilizado las capacidades se encuentran alineadas en un 89.5% con los requerimientos estipulados para la adquisición de tecnología. La no alineación total de las capacidades del sistema con los requerimientos de incorporación se puede deber a que los requerimientos faltantes no pueden ser evaluados en el marco operativo general del sistema por ser requerimientos no funcionales, o al incumplimiento de algunos requerimientos. Para el indicador de impacto T_f por su parte, se genera un valor de impacto para cada una de las 256 posibles configuración que se pueden generar con las tecnologías candidatas, ver Figura 37. Para la relación $[T_r, T_f]$, ver Figura 44-b, la cual refleja que tan alineadas se encuentran las tecnologías a incorporar con el marco operativo de la organización y el impacto esperado sobre esta. Tanto $[T_c, T_f]$ como $[T_r, T_f]$ se encuentran en el primer cuadrante, lo cual implica hallazgos tecnológicos positivos que se adaptan en cierta forma al marco operativo general del sistema. Para el caso particular de aplicación, que la mayoría de escenarios tecnológicos se encuentren en el primer cuadrante no implican necesariamente buenos escenarios tecnológicos, lo que implica es que, en algunas de las tecnologías evaluadas, la información relacionada con su impacto no está disponible para las metas particulares del sistema. Sin embargo, se pueden destacar algunas configuraciones tecnológicas que pueden ser atractivas para los encargados de tomar las decisiones para la

negociación y adquisición de tecnología. Si se observa con detalle las dos graficas de resultados, se puede distinguir cuales configuraciones tecnológicas, desde un punto de vista de impacto en el sistema son las más prometedoras. Observando con más detalle la relación entre el indicador de cumplimiento de las capacidades T_c y el factor de impacto de las configuraciones tecnológicas T_f , ver Figura 45, se puede tener una idea de que tan bien preparado está el sistema para recibir las nuevas tecnologías, y que tecnologías tendrían una mejor efectividad sobre este teniendo en cuenta solo las capacidades a proporcionar.



(a)



(b)

Figura 44. a) $[T_c \text{ Vs } T_f]$ relación entre el indicador de cumplimiento de las capacidades diseñadas para incorporar la tecnología T_c y el factor de impacto calculado T_f calculado para las diferentes configuraciones tecnologías. b) $[T_r \text{ Vs } T_f]$ relación entre los escenarios de incorporación para las diferentes tecnologías teniendo en cuenta el cumplimiento de los requerimientos en el marco operativo general del sistema T_r y el factor de impacto calculado T_f para las diferentes configuraciones tecnologías.

Solo por nombrar unos pocos ejemplos la mejor configuración que se perfila es AEIO (MIMICS + SOLIDWORKS + ANSYS + ACCULAS), muy cerca de la anterior configuración se encuentra AEIL (MIMICS + SOLIDWORKS + ANSYS + BIG-CREATOR), AEIM (MIMICS + SOLIDWORKS + ANSYS + Dimension - elite) y como una de las peores configuraciones posibles se encuentra CRMR (OSITIX + RHINOSEROS + SOLIDWORKS SIMULATION + Dimension - elite).

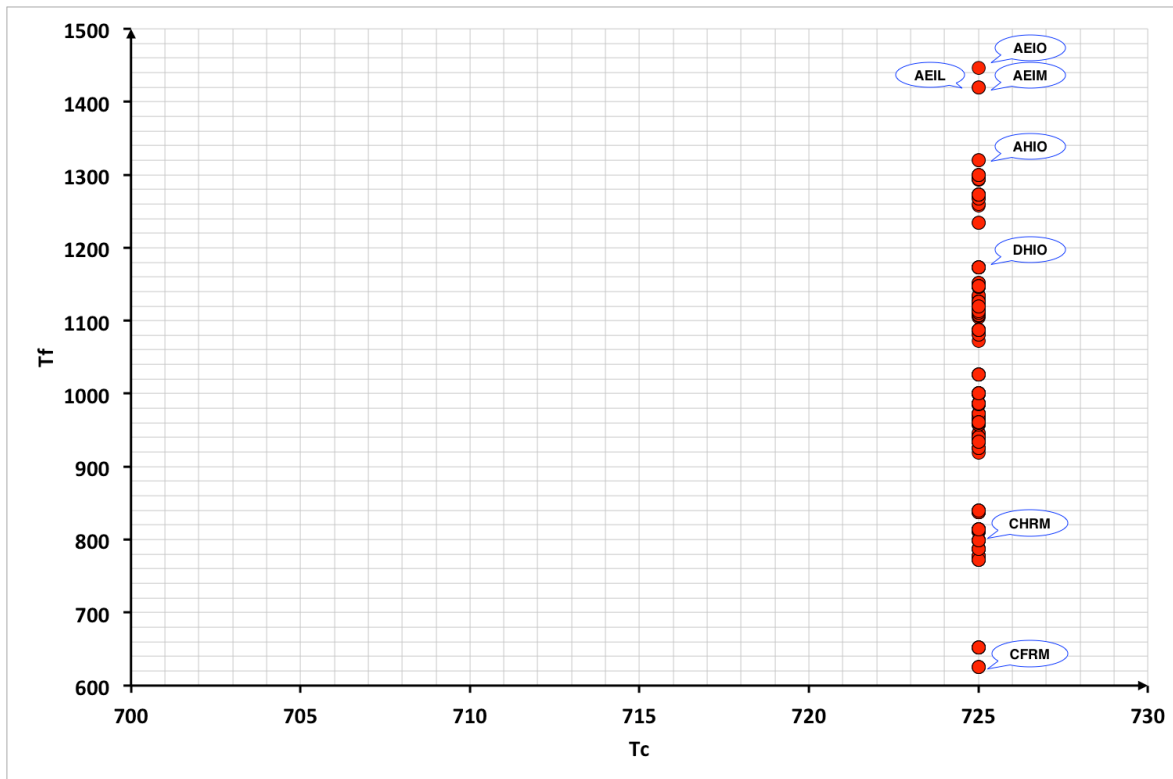


Figura 45. Detalles en los resultados para las configuraciones tecnológicas en la relación con $[T_c \text{ Vs } T_f]$

Revisando la relación entre los factores de impacto de las diferentes configuraciones tecnológicas T_f y el impacto sobre el marco operativo del sistema respecto al cumplimiento de los requerimientos por cada tecnología T_r , ver Figura 46, se puede hacer una discriminación más adecuada de las diferentes configuraciones tecnológicas. Tomando como ejemplo las mejores opciones propuestas en la Figura 45, La mejor opción que se presenta es la configuración AEIO. Sin embargo, en la Figura 46, a pesar de seguir siendo la configuración de tecnologías que mejor factor de impacto tiene sobre el sistema, es decir la que aporta de mejor forma las capacidades requeridas, no cumple de manera eficiente con los requerimientos de incorporación como si lo hacen las

configuraciones, AEIL, AFIL, AEJL, AHJL y AFJL las cuales son las configuraciones tecnológicas que cumplen a cabalidad con los requerimientos definidos.

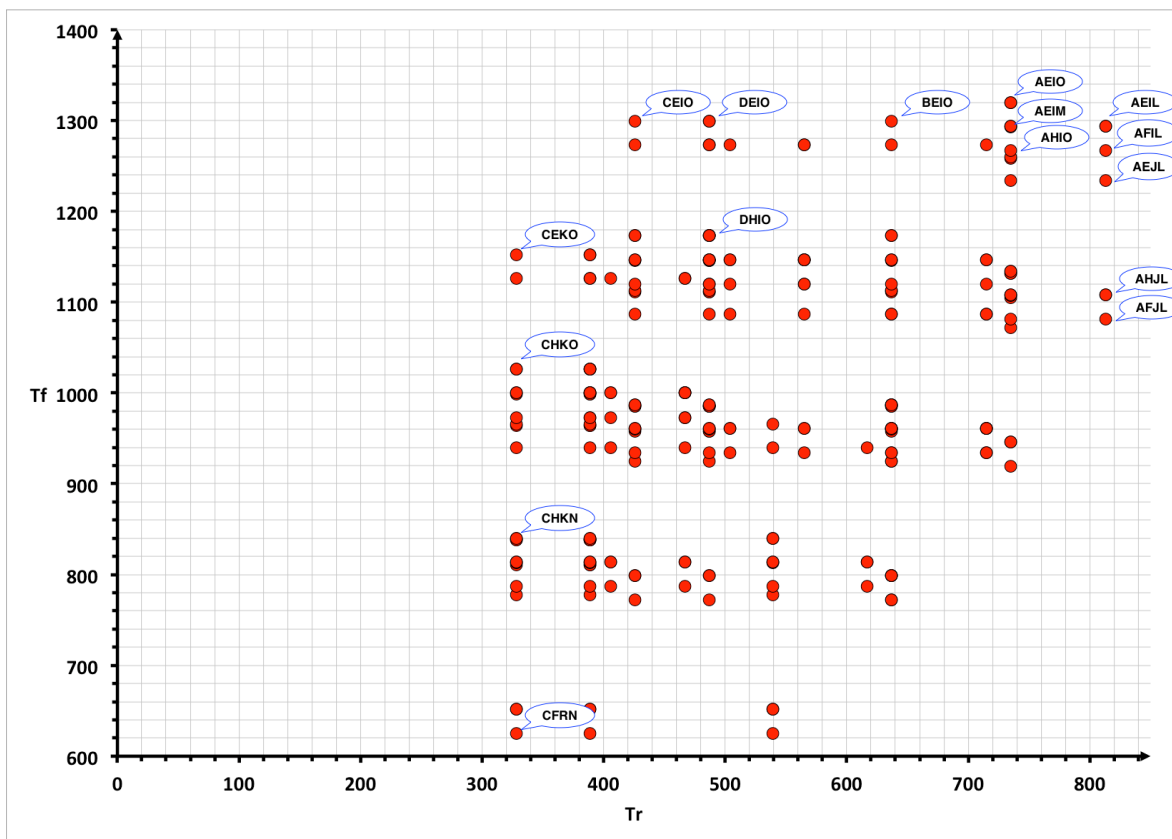


Figura 46. Detalles en los resultados para las configuraciones tecnológicas en relación con $[T_r \text{ Vs } T_f]$

Sin embargo, es la configuración AEIL quien tiene un mejor factor de impacto entre todas ellas, es decir, con estas configuraciones se muestra que no se puede utilizar solo el cumplimiento de los requerimientos como herramienta para discriminar entre opciones tecnológicas puesto que cumplir con todos ellos no necesariamente implica un impacto positivo sobre el sistema. Adicionalmente si se considera solo el impacto sobre el sistema se puede incurrir en el mismo error que se da por tomar en consideración solo el cumplimiento de los requerimientos. tomando como ejemplo un segmento de combinaciones tecnológicas con un mismo factor de impacto, CEIO, DEIO, BEIO, AEIM, y AEIL las cuales se encuentran entre las configuraciones con impacto positivo sobre el sistema, no todas ellas pueden ser implantadas debido a que la adaptación al marco operativo

no soporta dichas tecnologías, en otras palabras el marco operativo diseñado a partir de los requerimientos de incorporación no soportaría dichas tecnologías a pesar de que las capacidades que aportan al sistema son las adecuadas. En el ejemplo citado, sería la configuración AEIL la que mejor se adaptaría al sistema y la configuración CEIO la que menos se adaptaría a pesar de que ambas tienen un impacto similar sobre las capacidades del sistema.

6.1.2. Caso de aplicación SIMM 2

Para el segundo caso de aplicación se busca analizar como el modelo evaluación de impacto de tecnología opera cuando se desea incorporar una sola tecnología en un sistema. Se busca con este ejercicio analizar las implicaciones que tiene la incorporación de una tecnología en las diferentes capacidades instaladas y poder discriminar también entre opciones tecnológicas. Para ello se utilizó el mismo caso de aplicación SIMM 1 modificando los parámetros asociados a los impactos esperados de la tecnología, esto con el fin de analizar aspectos del modelo que no fueron abordados en el primer caso de aplicación. A continuación, se presenta las diferentes etapas del modelo de evaluación aplicado al caso SIMM2.

6.1.2.1. Problema de integración de capacidades en un sistema de implantes médicos a la medida

En este caso de aplicación, se aborda un problema de adquisición de una sola tecnología la cual debe aportar las capacidades necesarias para un sistema de BioCAD, es decir se busca una tecnología que permita el modelado de volúmenes digitales a partir de figuras bidimensionales. Para la incorporación de dicha herramienta se presenta un listado de requerimientos propuestos por los *Stakeholders*, ver Tabla 24. Y se presenta también el listado de posibles tecnologías seleccionadas para ser evaluadas, Tabla 25.

Tabla 24. Listado de requerimientos para la adquisición de una herramienta BioCAD

Código	Requerimientos
RBc1.	El en proceso BIOCAD, la tecnología debe permitir la reconstrucción de las tomografías del trauma musculo esquelético usando técnica de ingeniería inversa.
RBc1.1.	El software debe permitir la importación de Tomografías Axiales Computarizadas mediante archivos en formato universal DICOM.
RBc1.2.	El software BIOCAD debe permitir la exportación del volumen 3D usando formatos de archivo de intercambio IGES, STEP o STL.
RBc1.3.	Se debe permitir la selección de región de imagen mediante mascarar
RBc1.4.	Se debe poder reconstruir volúmenes mediante calculo 3D
RBc1.5.	Se debe poder realizar la corrección de imperfecciones originadas en el proceso de calculo
RBc1.6.	Se debe poder realizar el suavizado de la superficie volumétrica

6.1.2.2. Capacidades del sistema y los requerimientos

Al igual que en el caso de aplicación SIMM 1, se debe relacionar las capacidades del sistema, pero en este caso solo con los requerimientos de incorporación para el sistema BioCAD, ver Figura 47. Tanto las capacidades del sistema (Figura 33, Figura 34) como los requerimientos de incorporación (Tabla 13) están disponibles en el anterior caso de aplicación.

Tabla 25. Selección de paquetes software como candidatos para aportar la capacidad asociada al BioCAD en el sistema SIMM

Herramienta software	Referencia
MIMICS ®	(Materialise, 2016)
AMIRA ®	(FEI, 2016)
GEOMA GIC ®	(GeomaGic, 2016)
OSIRIX ®	(OsiriX, 2016)

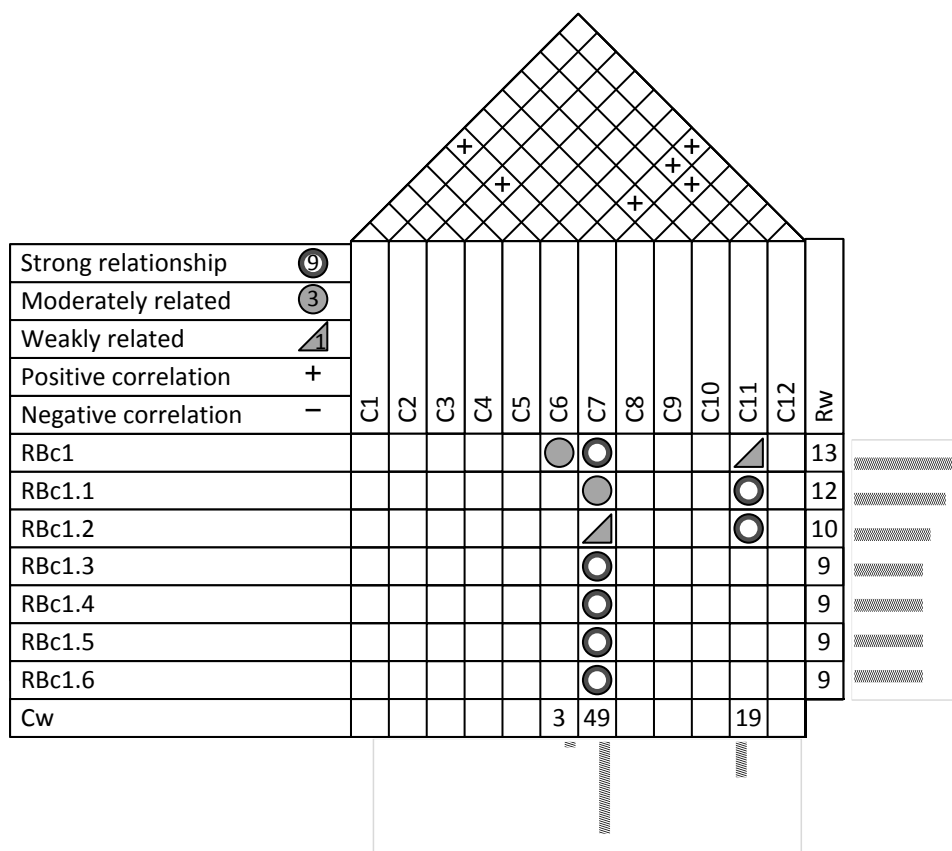


Figura 47. Relación entre los requerimientos de incorporación para las herramientas BioCAD y las capacidades del sistema SIMM

De la relación requerimientos y capacidades del sistema (Figura 47) se obtiene la categorización de los requerimientos , el vector de pesos para las capacidades involucradas en el proceso de incorporación de tecnología C_w , y las demás capacidades que se pueden ver involucradas directamente con la incorporación de una sistema BioCAD; en este caso particular se puede observar en la matriz de correlación de capacidades C_c , que ante un impacto positivo o negativo producto de la incorporación de un sistema BioCAD las capacidades $\{C_1, C_3, C_8, C_9, C_{11}, C_{12}\}$ se verían directamente implicadas.

6.1.2.3. Factores de impacto de la tecnología

Como se mencionó en la definición del problema, se busca variar los parámetros asociados al impacto de la tecnología para analizar otros aspectos relevantes del modelo de evaluación, sin embargo vale la pena destacar que a diferencia del

caso de aplicación SIMM 1 el dominio $[-K_f, K_f]$ en el cual se encuentra el factor de impacto T_f varia debido a el vector C_w el cual se ve influenciado por le número de requerimientos empleados en el caso particular de aplicación, ver Tabla 26. Los factores de impacto estipulados para las demás alternativas tecnológicas se pueden ver en la Tabla 27 y en la Figura 48.

Tabla 26. Definición de los factores de impacto (k-factores) para el paquete MIMICS en el sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	0				X				0
C6	3							X	9
C7	49							X	157
C8	0				X				0
C9	0				X				0
C10	0				X				0
C11	19							X	57
C12	0				X				0
T _i	62	T _f							213
K _f = T _i × 3									213

Tabla 27. Factores de impacto estipulados para las tecnologías a incorporar

Tecnologías	T_f
MIMICS	213
AMIRA	161
GEOMA GIC	90
OSIRIX	-62

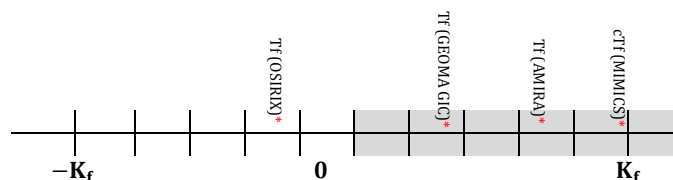


Figura 48. Representación grafica de los factores de impacto T_f para las diferentes opciones tecnológicas

6.1.2.4. *Requerimientos del sistema y tecnologías a incorporar*

En esta etapa del modelo se relacionan los requerimientos de incorporación con las diferentes alternativas tecnologías y se verifica su cumplimiento, ver Tabla 28. A partir de esta relación se evalúa más adelante el comportamiento del sistema respecto a cada opción tecnológica.

Tabla 28. Paquetes de Software Vs Requerimientos

Requerimientos	MIMICS	AMIRA	GEOMA GIC	OSIRIX
RBc1.1	✓	✓	X	✓
RBc1.2	✓	✓	X	X
RBc1.3	✓	✓	X	X
RBc1.4	✓	✓	X	X
RBc1.5	✓	X	✓	X
RBc1.6	✓	X	✓	X

6.1.2.5. *Escenarios arquitecturales*

Los escenarios arquitecturales hacen referencia a los modelos arquitecturales que describen el comportamiento diseñado del sistema con base en los requerimientos estipulados para la incorporación de la tecnología, para este caso de aplicación los escenarios arquitecturales son los mismo presentados para el caso SIMM 1 (Figura 38, Figura 39) teniendo en cuenta que resulta de interés los sub modelos asociados al comportamiento del sistema BioCAD.

6.1.2.6. *Model-checking como técnica para la verificación de capacidades*

La verificación del cumplimiento de las capacidades diseñadas en el sistema SIMM teniendo como punto de referencia los requerimientos de incorporación, en este caso los requerimientos para el sistema BioCAD, se da mediante la utilización de una técnica de verificación de modelos o *Model-checking*. Siguiendo el método especificado en el modelo de evaluación propuesto, lo primero que se especifica es la organización de los requerimientos asociados a cada capacidad involucrada, ver Tabla 29.

A partir de los requerimiento de incorporación (Tabla 24), los modelos de comportamiento para el sistema SIMM (OV-6a Figura 38, OV-6b Figura 39) , la asignación de las proposiciones atómicas (A) para cada requerimiento (Tabla 19) y la construcción de la función de etiquetado para cada estado en OV-6b (Tabla 20) se transforma los modelos de comportamiento del sistema SIMM en un modelo ejecutable que pueda ser ejecutado en términos de los requerimientos de incorporación (Figura 40) y el cual se utiliza para la verificación del cumplimiento de las capacidades del sistema diseñadas en los escenarios arquitecturales.

Tabla 29. Organización de los requerimientos de incorporación para el sistema BioCAD en el las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	Clasificación	Requerimientos
C_6	Fuerte	
	Moderada	RBc1
	Débil	
C_7	Fuerte	RBc1
	Moderada	RBc1.1, RBc1.3, RBc1.4, RBc1.5, RBc1.6.
	Débil	RBc1.2
C_{11}	Fuerte	RBc1.1, RBc1.2
	Moderada	
	Débil	RBc1

A partir de los requerimientos asociados a cada capacidad se diseña el conjunto de funciones lógico temporales LTL que permiten corroborar en los modelos LTS del sistema el cumplimiento de cada requerimiento (ver en la Tabla 21 las funciones LTL relacionadas a las capacidades C_6 , C_7 , y C_{11} cuyos requerimientos pertenecen al sistema BioCAD y sus respectivos resultados de verificación del modelo). A partir de los resultados en el proceso de verificación de modelos y la organización de los resultados se puede obtener un indicador de cumplimiento de los modelos desarrollados en relación a las capacidades involucradas , ver Tabla 30 y Figura 49.

Tabla 30. Análisis de cumplimiento para las capacidades del sistema SIMM respecto a los requerimientos para el sistema BioCAD

C	C _{w,i}	Cumplimiento							Medición χ _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C ₆	3							×	9
C ₇	49							×	147
C ₁₁	19							×	57
T _i	71	T _c :							213
Cm _f = T _i × 3									213

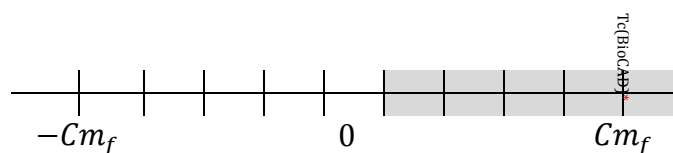


Figura 49. Representación gráfica para el factor de cumplimiento T_c asociado al sistema BioCAD en el sistema SIMM

Los resultados obtenidos permiten concluir que, de acuerdo a los requerimientos estipulados, los escenarios diseñados para el sistema SIMM responderían adecuadamente ante una posible nueva tecnología que cumpla con los requerimientos estipulados.

Adicional a la medición de cumplimiento T_c de las capacidades en los escenarios arquitecturales se realiza una medición particular por cada alternativa tecnológica a incorporar, para ello se asume el mismo procedimiento realizado para verificar las capacidades del sistema, sin embargo el cumplimiento de los requerimientos en los escenarios arquitecturales se da de acuerdo a lo estipulado en la Tabla 28. Para tener una idea de lo mencionado anteriormente, ver Tabla 31 y Tabla 32.

Tabla 31. Análisis de capacidades en relación al cumplimiento de los requerimientos para la herramienta AMIRA

Capacidad	Clasificación	Requerimientos	Resultados
C_6	Fuerte		
	Moderada	RBc1	☐
	Débil		
C_7	Fuerte	RBc1	☐
	Moderada	RBc1.1 RBc1.3, RBc1.4, RBc1.5, RBc1.6.	☐ ☐ ☐ ☐ ☐

	Débil	RBc1.2	☐
C ₁₁	Fuerte	RBc1.1, RBc1.2	☐ ☐
	Moderada		
	Débil	RBc1	☐

Tabla 32. Análisis de cumplimiento e indicador de cumplimiento teniendo en cuenta el cumplimiento de los requerimientos para la herramienta AMIRA.

C	C _{w,i}	Cumplimiento							Medición χ _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C ₆	3			×					-3
C ₇	49					×			49
C ₁₁	19				×				0
T _i	71	T _r :							46
Cm _f = T _i × 3									213

Siguiendo el mismo procedimiento para las demás alternativas tecnológicas se puede obtener un indicador de cumplimiento T_r para cada una de ellas, ver Tabla 33.

Tabla 33. Indicador de cumplimiento T_r para cada tecnología a incorporar

Tecnología	T _r
MIMICS	213
AMIRA	40
GEOMA GIC	-90
OSIRIX	-71

6.1.2.7. Resultados del proceso de evaluación de tecnología

En la etapa 3 del método se obtienen los factores de impacto T_f para cada opción tecnológica a evaluar, en la etapa 5 se conoce que tan bien preparado está el sistema para incorporar un tipo particular de tecnología de acuerdo a sus requerimientos de incorporación T_c y adicionalmente se obtiene un indicador de cumplimiento de las capacidades del sistema por parte de cada alternativa tecnológica T_r. T_f, T_c, y T_r muestran la relación entre el impacto que puede tener la tecnología sobre el sistema sin tener en cuenta los requerimientos de

incorporación, que tan bien preparado está el marco operativo del sistema para la incorporación de la tecnología, y como sería el comportamiento de las alternativas tecnológicas si se incorporaran en el marco operativo diseñado para su incorporación. Las relaciones (T_f, T_c) y (T_f, T_r) , ver Figura 50, las cuales muestran una relación entre el impacto de las tecnologías y que tan bien preparado está el sistema para adoptarlas (T_f, T_c) , y la relación entre el impacto de las tecnologías y que tan bien se adaptan dichas tecnologías al marco operativo que el sistema tiene estipulado para su incorporación (T_f, T_r) .

Se observa que la mejor alternativa tecnológica a incorporar para el sistema BioCAD es la herramienta MIMICS, la razón es que esta herramienta tiene las mejores puntuaciones en términos del impacto en el sistema, las capacidades en el sistema fueron desarrolladas acorde a los requerimientos estipulados, además en relación a los requerimientos de incorporación es la que mejor se adapta al marco operativo general expresado en los escenarios arquitecturales. En el caso de AMIRA, se encuentra en el primer cuadrante del gráfico, lo cual indica que es un hallazgo positivo. Sin embargo en comparación con MIMICS, esta tiene un nivel de apropiación menor, esto se puede observar en la relación (T_f, T_r) en la cual se refleja que no cumple del todo los requerimientos de incorporación, aun así el impacto esperado en las capacidades que se espera la tecnología ofrezca al sistema es bueno. En el caso de GEOMA GIC, se presenta un escenario en el que la tecnología parece ofrecer las capacidades que se espera aporte al sistema, lo que se puede observar en la relación (T_f, T_c) la cual se encuentra en el primer cuadrante, sin embargo al analizar la relación (T_f, T_r) para GEOMA GIC se observa que no es la opción tecnológica adecuada. No porque no haga lo que el sistema requiere, sino porque al no cumplir con los requerimientos de incorporación no se podría adaptar fácilmente al sistema. Sin embargo, si se realiza un cambio en marco operativo general (un escenario diferente productos de diferentes requerimientos) estaría entre los hallazgos positivos. Para la última opción, OSIRIX, se observa que es una opción poco

recomendable pues, su impacto sobre las capacidades del sistema se espera sea deficiente y su adaptación al marco operativo tampoco es favorable, por tanto, sería una opción tecnológica facialmente rechazable.

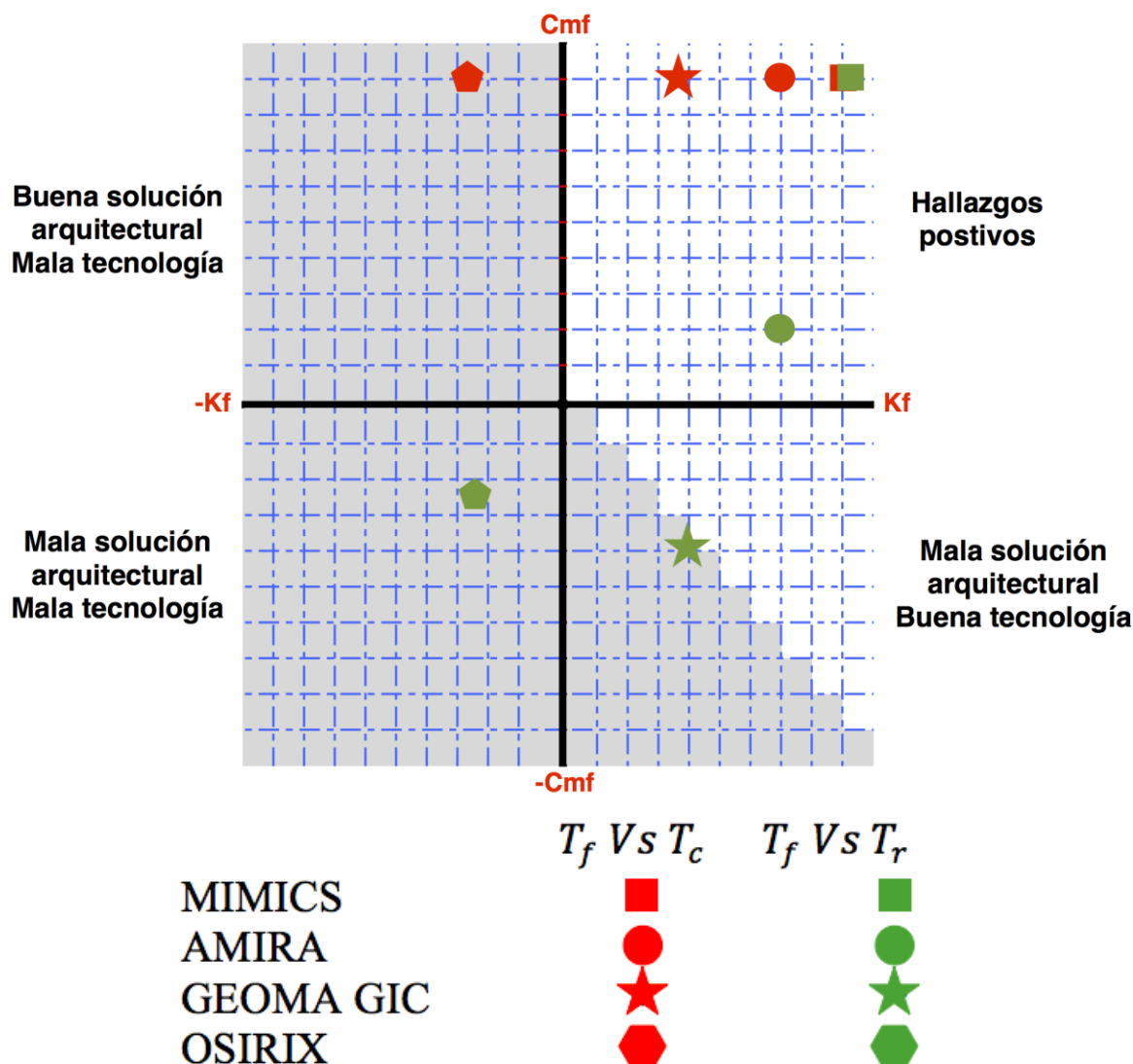


Figura 50. Cuadro de análisis para el análisis comparativo entre opciones tecnológicas

6.2. Discusión y análisis de los resultados

Tomando como punto de referencia el caso de aplicación SIMM 1 y el trabajo realizado por (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013), se analizarán algunos de los resultados obtenidos por el enfoque de evaluación propuesto y los resultados obtenidos por el trabajo de referencia. Algunas de las conclusiones relacionadas

con los datos utilizados para el caso de aplicación utilizado en este trabajo y que se muestran como hallazgos positivos y potenciales configuraciones a incorporar en el trabajo de referencia se listan en la Tabla 34.

Tabla 34. Posibles configuraciones exitosas para la integración de tecnologías obtenidas en (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013)

Caso	Configuración
Caso 1	AMIRA + SOLIDWORKS + ANSYS + (Herramienta RP) - (AEI*)
Caso 2	MIMICS + RHINOSEROS + ANSYS + (Herramienta RP) - (AFI*)
Caso 3	MIMICS + SOLIDWORKS + ABAQUS + (Herramienta RP) - (AEJ*)
Caso 4	MIMICS + SOLIDEDGE + ABAQUS + (Herramienta RP) - (AHJ*)

Los resultados obtenidos en el trabajo de referencia se basan en criterios relacionados a la madurez de las tecnologías, costos y recomendaciones de expertos y literatura. En contraste con los resultados obtenidos con el enfoque presentado en este trabajo, los cuales se centran en el impacto que puedan tener en el sistema. Las cuatro configuraciones presentadas en la Tabla 34, corresponden a configuraciones evaluadas en el enfoque propuesto en este trabajo.

En la Figura 51, se muestran los cuatro casos a estudiar. El primer caso a analizar es el caso 1, la configuración de tecnologías AMIRA + SOLIDWORKS + ANSYS (en el trabajo de referencia se analiza de forma independiente la herramienta de prototipado rápido (RP)).

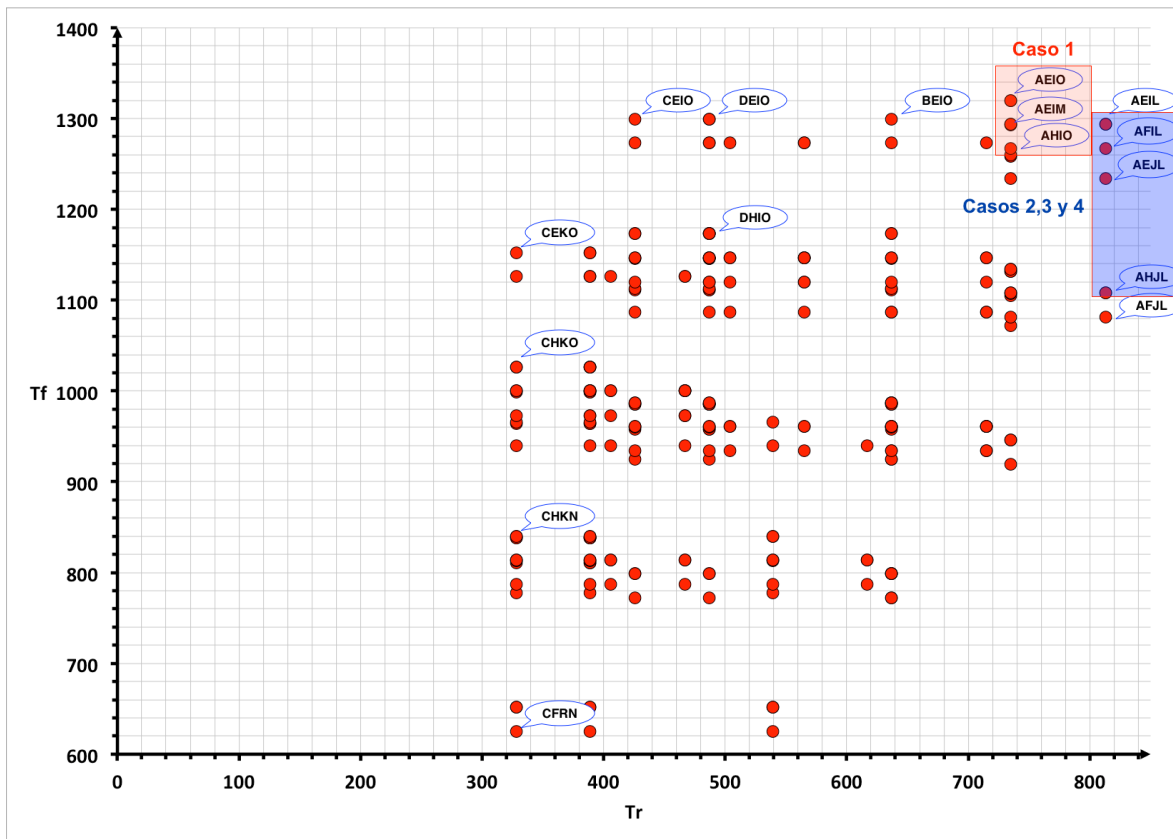


Figura 51. Visualización de los casos 1,2,3 y 4 en los resultados obtenidos por el enfoque abordado en este trabajo.

La configuración (AEI*) es una de las más recomendadas por los expertos de acuerdo a (Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, 2013), esto se ve reflejado en la Figura 51 al ubicar dicha configuración en lo más alto del eje T_f (impacto de la tecnología). Sin embargo, se puede observar que respecto al eje T_r (adaptación al marco operativo) no presenta la mejor adaptación posible al marco operativo propuesto para el sistema. En contraste, las configuraciones MIMICS + RHINOSEROS + ANSYS, MIMICS + SOLIDWORKS + ABAQUS, MIMICS + SOLIDEDGE + ABAQUS, (casos 2,3 y 4), las cuales son configuraciones propuestas por la literatura especializada y también posibles candidatas a incorporar. Cumplen con los requerimientos estipulados por los interesados y por ende se adaptan muy bien al marco operativo general del sistema. Sin embargo, en términos de impacto sobre las capacidades pueden verse en desventaja con la configuración recomendada por los expertos (Caso 1).

7. Discusión, conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presenta una retrospectiva del enfoque de evaluación de impacto de tecnología presentado en este trabajo y su posible aplicación en entornos de sistemas complejos y organizacionales, así como las posibles restricciones para su aplicabilidad. El capítulo se organiza de la siguiente manera, primero se presenta la ficha técnica y de navegación en el documento en donde se muestran los resultados obtenidos con el desarrollo de este trabajo y su relación con la hipótesis, luego se presenta la discusión y conclusiones relacionadas directamente con el enfoque desarrollado, luego se presentan las posibles restricciones que deben ser tenidas en cuenta para la aplicabilidad del modelo, finalmente se presentan las oportunidades y potencialidades que podría tener el modelo en la industria.

7.1. Ficha de navegación de resultados

Con el desarrollo de este trabajo se plantea un enfoque para la evaluación de impacto de tecnología basado en capacidades con el cual se intenta satisfacer la hipótesis planteada en el Capítulo 5. En la Tabla 35 se muestra una guía de navegación sobre el documento la cual contiene la ubicación de los diferentes resultados obtenidos en este trabajo y sobre los cuales se describen las diferentes conclusiones y recomendaciones.

Tabla 35. Ficha técnica de los resultados obtenidos en el trabajo

Resultado	Descripción	Ubicación
Aportes	Modelo de evaluación de impacto de tecnología basado en capacidades asequible y rápido.	Capítulo 6
	Modelo de verificación de modelos basado en capacidades	Capítulo 6.6
Uso de arquitecturas ejecutables para la evaluación de tecnología	Uso de <i>Model-checking</i> como técnica para verificar el comportamiento dinámico de los modelos arquitecturales.	Capítulo 6.6.1
Despliegue de la	Modelo de evaluación de impacto	Capítulo 6

hipótesis	de tecnología basado en capacidades asequible y rápido.	
	Aplicabilidad y verificación del modelo	Capítulo 7
Verificación de aplicabilidad del modelo	Caso de aplicación 1 (SIMM 1)	Capítulo 7.1.1
	Caso de aplicación 2 (SIMM 2)	Capítulo 7.1.2

Una vez ubicados en el documento los diferentes aportes y productos realizados en este trabajo se procede a continuación a realizar una discusión de las diferentes conclusiones y posibles trabajos futuros propuestos.

7.2. Acerca del enfoque de evaluación de impacto desarrollado

Las arquitecturas de sistemas o arquitecturas empresariales desde sus orígenes fueron desarrolladas para gestionar el cambio en organizaciones o sistemas, así como para lidiar con su complejidad y la integración de capacidades (Mo Jamshidi, 2008) (Origins et al., 2007)(J. A. Zachman, 1996). Desarrollar un enfoque de evaluación de impacto de tecnología basado en un marco arquitectural para la integración de capacidades como lo puede ser DoDAF (AFT, 2004) permite asegurar que la fuente de información utilizada para el modelo contiene la información tanto estructural, como funcional que permite describir integralmente un sistema complejo (como por ejemplo un sistema de sistemas o un sistema empresarial).

Un modelo de evaluación de tecnología aplicable a sistemas complejos, por ejemplo, los sistemas de sistemas o sistemas empresariales, se espera cumpla con ciertas propiedades particulares asociadas con su aplicabilidad. En la Tabla 36 se hace una descripción de cada una de las propiedades antes mencionadas y como el modelo propuesto en este trabajo se relaciona en cada una de ellas.

Tabla 36. Enfoque de evaluación desarrollado y los aspectos a tener en cuenta en la evaluación de tecnología en SoS

	<i>Discusión</i>
Cuantitativo	El modelo de evaluación propuesto a pesar de no ser completamente cuantitativo, pues utiliza información cualitativa que es cuantificada para su análisis, si permite analizar numéricamente resultados particulares de evaluación (generar MoEs), permitiendo discriminar entre opciones y valorar en detalle diferentes aspectos relacionados con los niveles de confianza asociados a las soluciones propuestas.
Tangible	El enfoque propuesto permite identificar las capacidades concretas que una tecnología puede impactar al ser incorporada en un sistema u organización, además determina niveles de impacto que dicha tecnología puede tener sobre una capacidad en particular, así como determinar el impacto sobre otras capacidades y permite también conocer el impacto sobre el sistema en general.
Flexible	Al describir una tecnología en términos de k-factores (valores relativos asociados al impacto de las tecnologías sobre las diferentes capacidades del sistema), se hace una descripción de la tecnología en términos de las capacidades que esta puede aportar y no en términos de su madurez y características técnicas. Por tanto, el modelo no está desarrollado para un tipo particular de tecnología, sino para un tipo particular de contexto de aplicación en el cual el modelado de los sistemas se realice orientado a capacidades. Por tanto, el modelo puede ser aplicado en diferentes contextos dependiendo más del enfoque de modelado de los sistemas que del tipo de tecnología en particular a incorporar.
Reusable	El enfoque desarrollado en este trabajo, además de permitir analizar opciones tecnológicas, también permite analizar escenarios arquitecturales y el buen planteamiento de los requerimientos estipulados para procesos de incorporación de tecnología.
Rápido	El modelo planteado depende de la existencia de una arquitectura orientada a la integración de capacidades, en dicha arquitectura se encuentra buena parte de la información necesaria para el desarrollo del enfoque de evaluación y para la construcción de los modelos ejecutables utilizados en este, dichos modelos solo utilizan la información contenida en los artefactos arquitecturales y su construcción se lleva a cabo mediante un proceso semiautomático. Lo cual permite tener los insumos para la utilización del modelo de evaluación rápidamente.
Paramétrico	Al evaluar el impacto de una tecnología sobre escenarios arquitecturales se cuenta con la posibilidad de tener tantos

	Discusión
	escenarios como posibilidades de integración se diseñen, desde este punto de vista se puede analizar los procesos de incorporación desde múltiples perspectivas operacionales.
Escalable	La integración de sistemas se da desde una perspectiva de integración de capacidades, las cuales se ven reflejadas sobre las vistas de negocios u operacionales de la arquitectura, la escalabilidad del modelo se da a la par de la escalabilidad de la arquitectura, siempre y cuando la arquitectura del sistema sobre el cual se aplica sea fácilmente escalable, la aplicabilidad del modelo no se verá afectada.
Asequible	Desde el punto de vista de la evaluación cuantitativa de tecnología, cuyo potencial se centra en los modelos matemáticos de simulación, los cuales dependen de la existencia de departamentos de investigación y desarrollo al interior de las organizaciones, y cuya construcción implica esfuerzo en tiempo y dinero. El desarrollo de modelos ejecutables basados en arquitecturas ejecutables no implica necesariamente departamentos de investigación y desarrollo pues el desarrollo de estos modelos depende por completo de los modelos presentes en la arquitectura del sistema, la cual es más un proceso de ingeniería que de investigación. Por tanto, es más fácil que una organización tenga un departamento de ingeniería al interior de su organización que un departamento de investigación y desarrollo.
Simple	La utilización y aplicación del modelo implica conocimiento en arquitecturas empresariales y validación de modelos (<i>model-checking</i>) lo cual implica conocimiento especializado en ciertas áreas de ingeniería y gestión.

El enfoque propuesto, el cual se basa en el uso de información arquitectural. Busca evaluar el impacto de una tecnología en fases previas o tempranas en el diseño de sistemas o de posibles modificaciones en el marco operativo general de una organización. No pretende informar acerca de cuál es la mejor tecnología a incorporar, sino, proveer información que permita soportar los procesos de toma de decisiones a la hora de incorporar capacidades tecnológicas, reduciendo las tecnologías encontradas en una fase de vigilancia tecnológica previa, informado acerca de cuáles opciones tienen un potencial impacto positivo, así como una capacidad de adaptación tolerable a un marco operativo general. Para los casos en los que se facilite la evaluación directa por los usuarios de las tecnologías (en las fases de implementación y pruebas e integración en el ciclo de vida de los

sistemas) a incorporar, permitiría tomar decisiones acerca de que tecnologías utilizar para realizar en dichas pruebas (por ejemplo, en el caso del software, que versiones de prueba de diferentes herramientas disponibles para la misma problemática se recomendaría probar) permitiendo desechar opciones que pueden no ser recomendables para el problema en concreto que se busque resolver.

7.3. Acerca del enfoque de evaluación y las restricciones para su aplicación

La aplicabilidad del enfoque propuesto depende básicamente de dos condiciones primordiales, se debe contar con una arquitectura del sistema o la organización sobre la cual se desee evaluar el impacto de una o varias tecnologías a incorporar. Sin embargo, la existencia de la arquitectura no es una condición suficiente, la arquitectura debe tener un enfoque de diseño particular, esta debe tener un enfoque basado en capacidades. No todos los marcos arquitecturales definen su diseño a partir de las capacidades del sistema, el marco arquitectural utilizado en este trabajo, DoDAF 2.0 basa el diseño de la arquitectura en la integración de capacidades. Sin embargo, DoDAF no es un marco arquitectural muy conocido en ambientes empresariales, pero ofrece un marco definido para el desarrollo de modelos particulares a implementar en cualquier tipo de arquitectura. Aprovechando esta potencialidad y en la búsqueda de potencializar el uso del enfoque se utilizan simultáneamente DoDAF y TOGAF (Blevins, T., Dandashi, F., & Tolbert, 2010), en donde TOGAF provee el modelo de implementación y desarrollo de la arquitectura mientras que DoDAF provee el enfoque orientado a capacidades y la descripción de los modelos a implementar.

7.3.1. Limitaciones

Si bien el modelo planteado permite evaluar tecnologías en términos de las capacidades que le puede proveer a un sistema u organización, para tecnologías o para productos tecnológicos con un bajo nivel de madurez y poco conocidas,

así como para tecnologías disruptivas, para los casos en que los expertos no puedan dar una apreciación de impacto en contextos diferentes para las cuales fueron desarrolladas. El cálculo de los valores asociados a los factores de impacto de la tecnología (T_f) asumirían valores nulos, lo cual limitaría la evaluación a el análisis de la adaptación que tienen los procesos internos del sistema u organización a la nueva tecnología (T_r) y a que tan bien diseñados se encuentran los procesos para dicha incorporación (T_c). Ante la limitante de los factores de impacto T_f , se dificultaría el análisis asociado al correcto planteamiento de los requerimientos de incorporación puesto que los factores de impacto T_f se utilizan como referente para el análisis de los mismos.

Teniendo en cuenta que el modelo desarrollado permite determinar, en términos de capacidades, la posible buena adaptación e impacto positivo o negativo sobre las capacidades que se busca proveer, así como el posible impacto sobre las demás capacidades de un sistema u organización. El modelo no permite capturar y recopilar información relacionada con otros tipos de riesgos (financieros, de transferencia, soporte, etc...) que permitan hacer una adecuada gestión de estos.

En términos de los modelos arquitecturales, si bien estos se pueden realizar utilizando diferentes lenguajes de modelado, o notaciones de modelado diferentes (SysML, UML, BPM, UML4ODP, M3, etc ...) se exploró solo aquellas notaciones estándar recomendadas por el TOG (The Open Group) y empleadas por el marco arquitectural DoDAF, se utilizó por tanto UML y SysML, guiando el diseño de los modelos arquitecturales mediante las recomendaciones en cuanto al tipo de modelos para cada vista arquitectural aportado por DoDAF. El uso de UML y SysML facilita la estandarización en cuanto al tipo de modelos utilizados y la semántica empleada para cada modelo. Sin embargo, limita la aplicabilidad del modelo planteado a su semántica y potencial aplicabilidad en los diferentes marcos arquitecturales.

7.4. Acerca de la potencial aplicabilidad

Como se mencionó anteriormente, la aplicabilidad del modelo depende directamente de la existencia de una arquitectura empresarial, más concretamente una arquitectura con un diseño orientado a capacidades. Desde el punto de vista de la existencia de una arquitectura, en un ámbito internacional, el uso de arquitecturas empresariales se ha masificado principalmente desde el ámbito gubernamental, en donde su aplicabilidad en la gestión estratégica y gestión del cambio, así como en la adquisición de tecnología se ha convertido en una práctica obligatoria, como lo es el caso del gobierno federal y el departamento de defensa de los Estados Unidos de América (Joint, 2008)(Council, 1999). En el contexto nacional, el uso y apropiación de arquitecturas empresariales no tiene una difusión tan amplia, sin embargo existe la normativa en la cual se perfila a las arquitecturas empresariales como una herramienta estratégica en la gestión pública; en el Decreto No 2473 de 2014 (MinTIC, 2014) y en el Decreto 1078 de 2015 (MinTIC, 2015) del Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de la república de Colombia (MinTIC) establece la estrategia de gobierno en línea (GEL) en la cual establece entre otras políticas la importancia de la gestión de la tecnología y el alineamiento de esta con la misión visión institucional, y para llevar a cabo este alineamiento, mediante el Decreto 415 de 2016 (FunciónPública, 2016) del Departamento Administrativo de la Función Pública, Indica que la gestión de tecnología y su alineamiento con la misión visión institucional, así como la gestión de la adquisición de tecnología se debe realizar en todas las instituciones públicas de carácter nacional, departamental y regional mediante la utilización de arquitecturas empresariales o de sistemas.

Ante el panorama nacional, se puede especular acerca de las posibilidades de aplicación del enfoque de evaluación descrito en este trabajo. Ya que como se menciona en el Decreto 415, se espera que la gestión y adquisición de tecnología se realice mediante un enfoque arquitectural. Si bien lo que los decretos 2473, 1078 y 415 se refieren es a la gestión de Tecnologías de la Información y las

comunicaciones, el enfoque propuesto está en capacidad de abordar este tipo de problemas.

7.5. Recomendaciones y trabajo futuro

A partir del análisis del enfoque de evaluación implementado, y teniendo en cuenta sus falencias y sus potenciales mejoras, se muestra a continuación el listado de recomendaciones las cuales pueden convertirse en futuras líneas o proyectos de investigación, desarrollo e innovación:

El caso de aplicación utilizado, en el cual se buscaba integrar múltiples capacidades provenientes de diferentes sistemas a partir de un enfoque arquitectural aplicable a un sistema de sistemas, no es lo suficientemente complejo para mostrar la utilidad del modelo. Se recomienda aumentar la complejidad del caso de aplicación para analizar sus resultados y rendimiento.

Sí bien el modelo ejecutable utilizado para el estudio del comportamiento dinámico de los artefactos arquitecturales, Sistemas de transición etiquetados (LTS), permite analizar la ejecución del sistema en términos de los requerimientos, los LTS brindan la posibilidad de añadir información probabilística y temporal a los modelos (Baier, C., Katoen, J. P., & Larsen, 2008), lo cual brindaría información adicional que permitiría brindar información mucho más precisa a la hora de evaluar el impacto de una tecnología.

En el trabajo se describe un enfoque para la verificación de modelos basado en capacidades el cual podría ser desplegado en la verificación y análisis de arquitecturas, así como en la verificación de modelos de software. Se espera este modelo pueda ser aplicado en este tipo de problemas pues se enfoca directamente en las metas que se espera los modelos cumplan y no solamente en los requerimientos estipulados para el desarrollo de los modelos.

Los modelos arquitecturales utilizados en este trabajo se centran en las vistas de operaciones o de negocios, a partir de estos modelos se pueden describir las capacidades del sistema. Sin embargo, cada una de las vistas de la arquitectura; por ejemplo, servicios, aplicaciones, y sistemas tienen relación con la consecución de capacidades. Así como la vista de negocios u operaciones, las demás vistas tienen una estructura y un comportamiento que puede ser utilizado para evaluar aspectos relacionados con dicha capa en un eventual proceso de evaluación de tecnología.

En este trabajo se presentó como el modelo podía ser utilizado para seleccionar entre posibles opciones de tecnología, sin embargo, puede ser utilizado también para determinar cuáles pueden ser las mejores opciones en términos de los posibles escenarios relacionados con el marco operativo general de un sistema en relación a una tecnología en particular, por lo cual se recomienda explorar el modelo como herramienta de evaluación de escenarios arquitecturales.

7.5.1. Plan de mejora

Finalmente, con la intención de mostrar un panorama futuro del trabajo realizado y para continuar con la línea de trabajo en evaluación de impacto de tecnología se recomienda seguir profundizando en áreas concretas de conocimiento, las cuales se presentan estructuradas a continuación, ver Tabla 37. Con esta categorización se busca proyectar este trabajo en diferentes líneas de investigación que puedan mejorar el enfoque propuesto.

Tabla 37. Estructuración de las líneas de investigación a seguir para mejorar el enfoque de evaluación propuesto en el trabajo.

Líneas	Programas
Model-checking	LTS con información temporal
	LTS con información probabilística
	Transformación automática de modelos arquitecturales a LTS
	Herramientas para la verificación de modelos
Arquitecturas de sistemas	Marcos arquitecturales

	Patrones de arquitectura para sistemas de sistemas
	Enfoques de modelado arquitecturas
	Modelos de gestión e integración de capacidades
	Modelos de evaluación de arquitecturas
Análisis de capacidades	Enfoques para la verificación de capacidades en arquitecturas
	Técnicas para el análisis cuantitativo de capacidades en arquitecturas
Evaluación de impacto de tecnología	Evaluación cuantitativa de tecnología con información temporal
	Evaluación cuantitativa de tecnología con información probabilística
	Enfoques de evaluación de tecnología empleando información arquitectural

Bibliografía

- Abel, A. (2006). The Coordination of Multiple Autonomous Systems using Information, (April), 149–154.
- AFT, D. (2004). Department of Defense Architecture Framework (DoDAF).
- Autodesk Ink. (2016). AUTOCAD. Retrieved September 5, 2016, from <http://latinoamerica.autodesk.com/>
- Azarnoush, H., Sridhar, P., Madni, M., Jamshidi, M., Antonio, S., & Systems, I. (2006). Towards optimization of a real-world Robotic-Sensor System of Systems.
- Bachmann, F., Bass, L., Chastek, G., Donohoe, P., & Peruzzi, F. (2000). *The architecture based design method*.
- Baier, C., Katoen, J. P., & Larsen, K. G. (2008). *Principles of model checking*. Cambridge, USA: MIT press.
- Baumgarten, E., & Silverman, S. J. (2007). Dynamic DoDAF and Executable Architectures. *MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference*, 1–5. <http://doi.org/10.1109/MILCOM.2007.4455237>
- Betz, F. (1998). *Managing Technological Innovation: Competitive Advantage from Change*. New York: Wiley and Sons, Inc.
- Bienvenu, M. P., Shin, I., & Levis, A. H. (2000). C4ISR architectures: III. An object-oriented approach for architecture design. *Systems Engineering*, 3(4), 288–312.
- Biggs, B. (2005). Ministry of defence architectural framework (modaf). *IET*.
- Biltgen, P. T. (2007). Capability-Based Quantitative Technology Evaluation for.
- Biltgen, P. T., & Brown, D. (2007). A Methodology for Capability-Based Technology Evaluation for Systems-of-Systems A Methodology for Capability-Based Technology Evaluation for Systems-of-Systems, (May).
- Biltgen, P. T., & Mavris, D. N. (1970). A METHODOLOGY FOR TECHNOLOGY EVALUATION AND CAPABILITY TRADEOFF FOR COMPLEX SYSTEM ARCHITECTURES, 1–11.
- Björkander, M., & Kobryn, C. (2003). Architecting Systems with UML 2.0, 57–61.
- Blevins, T., Dandashi, F., & Tolbert, M. (2010). The Open Group Architecture Framework (TOGAF 9) and the US Department of Defense Architecture Framework 2.0 (DoDAF 2.0). The Open Group 4.
- Bocanegra, J., Pena, J., & Ruiz, A. (2011). Interorganizational Business Modeling: an Approach for Traceability of Goals, Organizational Models and Business Processes. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 9(1), 847–854. <http://doi.org/10.1109/TLA.2011.5876430>
- Bredemeyer, D., Malan, R., Krishnan, R., & Lafrenz, A. (2003). Enterprise architecture as business capabilities architecture. Bredemeyer Consulting.
- Brown, D. A. (2006). Quantitative Technology Assessment in AFRL. In *Department of Defense M&S Conference*.
- Bueno, A., Carreño, L. T., Delgado, D. J., & Llamosa-Villalba, R. (2014). Executable Architecture based on System Dynamics: An Integrated Methodology Composed by Standard System Dynamics Modelling and DoDAF Operational View Models. *Procedia Computer Science*, 36, 87–92.

- <http://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.042>
- Carlock, P., & Lane, J. A. (2006). *System of Systems Enterprise Systems Engineering , the Enterprise Architecture Management Framework , and System of Systems Cost Estimation. Management.*
- Castro Ginna P, BRAVO I. EDNA, G. L. C. (2013). *EVALUACIÓN DE UN MODELO DE INTEGRACIÓN DE HERRAMIENTAS SOFTWARE DIRIGIDO AL SECTOR BIOMÉDICO-ORTOPÉDICO.* Universidad Industrial de Santander - Bucaramanga Colombia.
- Checkland. (1999). Systems thinking. *Rethinking Management Information Systems*, 45–56.
- Cimatti, A., Clarke, E., Giunchiglia, E., Giunchiglia, F., Pistore, M., Roveri, M., ... & Tacchella, A. (2002). Nusmv 2: An opensource tool for symbolic model checking. In *International Conference on Computer Aided Verification* (pp. 359–354).
- Clarke, E. M., & Emerson, E. A. (1981). Synthesis of Synchronization Skeletons for Branching Time Temporal Logic. Logic of Programs: Workshop, Yorktown Heights, NY, May 1981, volume 131 of Lecture Notes in Computer Science. In *Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg* (Vol. 131).
- Council, C. (1999). Federal enterprise architecture framework version 1.1. Retrieved from, 80.
- Council, C. (2001). A Practical Guide to Federal Enterprise Architecture.
- Crossley, W. A. (2003). SYSTEM OF SYSTEMS: AN INTRODUCTION OF PURDUE UNIVERSITY SCHOOLS OF ENGINEERING ' S SIGNATURE AREA.
- Dardenne, A. (1993). *On the Use of Scenarios in Requirements Acquisition.* University of Oregon.
- DeLaurentis, Dan and Callaway, R. K. and others. (2004). A system-of-systems perspective for public policy decisions. *Review of Policy Research*, 21, 829--837.
- Delgado, D. J., Torres-Sáez, R., & Llamosa-Villalba, R. (2014). Develop an Executable Architecture for a System of Systems: A Teaching Management Model. *Procedia Computer Science*, 36, 80–86. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.041>
- Despotou, G., Alexander, R., & Hall-may, M. (2003). *Key Concepts and Characteristics of Systems of Systems.* Science.
- DoDAFT. (2007). *DoD architecture framework.*
- Duret-Lutz, A., & Poitrenaud, D. (2004). SPOT: an extensible model checking library using transition-based generalized Büchi automata. In *Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, 2004.(mascots 2004). Proceedings. the IEEE Computer Society's 12th Annual International Symposium on* (pp. 76–83). IEEE.
- Engineering, A. (2016). HyperWorks. Retrieved September 5, 2016, from <http://www.altairhyperworks.com/>
- Engineering, S., & Committee, S. (2000). IEEE Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems.
- Faculty, T. A., Iacobucci, J. V, & Fulfillment, I. P. (2012). RAPID ARCHITECTURE ALTERNATIVE MODELING (RAAM): A FRAMEWORK FOR CAPABILITY-

- BASED ANALYSIS OF SYSTEM OF SYSTEMS ARCHITECTURES by RAPID ARCHITECTURE ALTERNATIVE MODELING (RAAM): A FRAMEWORK FOR CAPABILITY-BASED ANALYSIS OF, (May).
- FEI. (2016). Amira 3D Software for Life Sciences.
- Ferràs Hernández, X. (2011). INNOVACIÓN 6.0: LA TECNOLOGIA COMO VENTAJA COMPETITIVA. Retrieved May 6, 2016, from <http://xavierferras.blogspot.com.co/2011/12/la-tecnologia-como-ventaja-competitiva.html>
- Forsberg, K., & Mooz, H. (2001). Visual explanation of development methods and strategies including the Waterfall, Spiral, Vee, Vee+, and Vee++ models. In *INCOSE 2001 International Symposium*.
- FP Jr, B. (1987). No Silver Bullet Essence and Accidents of Software Engineering. *Computer IEEE*, 4, 10–19.
- Frappier, M., Fraikin, B., Chossart, R., Chane-Yack-Fa, R., & Ouenzar, M. (2010). Comparison of model checking tools for information systems. In *International Conference on Formal Engineering Methods* (pp. 581–596). Springer Berlin Heidelberg.
- FunciónPublica. (2016). Decreto No 415 de 2016 del departamento administrativo de la función publica. Republica de Colombia.
- Ge, B., Hipel, K. W., Li, L., & Chen, Y. (2012). A data-centric executable modeling approach for system-of-systems architecture. *2012 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, 368–373. <http://doi.org/10.1109/SYSoSE.2012.6384149>
- GeomaGic. (2016). GeomaGic. Retrieved June 21, 2016, from <http://www.geomagic.com/es>
- Giachetti, R. . (2010). *Design of Enterprise Systems: Theory, Architecture, and Methods*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Giannakopoulou, D. (1999). *Model checking for concurrent software architectures*. Tesis Doctoral. Imperial College.
- Gorod, A., Sauser, B., & Boardman, J. (2008). System-of-systems engineering management: A review of modern history and a path forward. *IEEE Systems Journal*, 2(4), 484–499.
- Gorod, a., Sauser, B., & Boardman, J. (2008). System-of-Systems Engineering Management: A Review of Modern History and a Path Forward. *IEEE Systems Journal*, 2(4), 484–499. <http://doi.org/10.1109/JSYST.2008.2007163>
- Griendling, K. A. (2011). ARCHITECT: THE ARCHITECTURE-BASED TECHNOLOGY EVALUATION AND CAPABILITY TRADEOFF METHOD ARCHITECT: THE ARCHITECTURE-BASED TECHNOLOGY EVALUATION AND CAPABILITY, (December).
- Griendling, K. A. (2011). *Architect: the architecture-based technology evaluation and capability tradeoff method*. Doctoral thesis: Georgia Institute of Technology.
- Griendling, K., & Mavris, D. N. (2011). Development of a dodaf-based executable architecting approach to analyze system-of-systems alternatives. In *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. <http://doi.org/10.1109/AERO.2011.5747654>
- Hale, C. R. (2012). *Technology Trade Space Development in Crew-Systems for*

- Long-Range Strike*. Air Force Research Laboratory Science Applications International (OH 45433). Inc. Dayton.
- Handley, Holly AH and Smillie, R. J. (2008). Architecture framework human view: The NATO approach. *Systems Engineering - Wiley Online Library*, 11(2), 156-164.
- Holzmann, G. J. (1997). The model checker SPIN. *EEE Transactions on Software Engineering*, 23(5), 279.
- IEEE/std/12207-2008. (2008). 12207-2008 - Systems and software engineering -- Software life cycle processes.
- Inc, A. (2016). ANSYS. Retrieved September 5, 2016, from <http://www.ansys.com/>
- ISO/IEC/IEEE. (2011). INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC/IEEE 24465, System and software engineering-vocabulary. Switzerland: ISO.
- Jamshidi, M. (2008). *Systems of Systems Engineering: Principles and Applications*. CRC Press.
- Jamshidi, M. (2008). *Systems of Systems Engineering Principles and Applications*. (C. Press, Ed.). CRC press.
- Jamshidi, M. (2009a). Control of system of systems. *2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 1–16. <http://doi.org/10.1109/INDIN.2009.5195772>
- Jamshidi, M. (Ed.). (2009b). *System of Systems Engineering Innovations for the 21st Century*. New Jersey: Wiley A John Wiley & Sons, Inc. Publications.
- Janssen, M., & Hjort-Madsen, K. (2007). Analyzing enterprise architecture in national governments: The cases of Denmark and the Netherlands. In *System Sciences, 2007. HICSS 2007. 40th Annual Hawaii International Conference on* (p. 218a-218a).
- Jian, X., Bing-feng, G., Xiao-ke, Z., Ke-wei, Y., & Ying-wu, C. (2010). Evaluation method of system-of-systems architecture using knowledge-based executable model. *2010 International Conference on Management Science & Engineering 17th Annual Conference Proceedings*, 141–147. <http://doi.org/10.1109/ICMSE.2010.5719797>
- Johnson, P., Lagerström, R., Närman, P., & Simonsson, M. (2007). Enterprise architecture analysis with extended influence diagrams. *Information Systems Frontiers*, 9(2–3), 163–180.
- Joint, P. (2008). DEFENSE ACQUISITIONS DOD's Requirements Determination Process Has Not Been.
- Kazman, R., Abowd, G., Bass, L., & Clements, P. (1996). Scenario-based analysis of software architecture. *IEEE Software*, 13(6), 47–55.
- Keating, C., Rogers, R., Unal, R., Dryer, D., Sousa-Poza, A., Safford, R., ... & Rabadi, G. (2003). System of systems engineering. *Engineering Management Journal*, 15(3), 36–45.
- Keating, C. B. (2005). Research Foundations for System of Systems Engineering. *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2720–2725. <http://doi.org/10.1109/ICSMC.2005.1571561>
- Khan, I. (2010). Methodology for the development of executable system architecture. *Proceedings of the 8th International Conference on Frontiers of Information Technology - FIT '10*, 1–4. Retrieved from <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1943628.1943677>

- Kilicay-Ergin, N., & Dagli, C. (2008). Executable Modeling for System of Systems Architecting: An Artificial Life Framework. *2008 2nd Annual IEEE Systems Conference*, 1–5. <http://doi.org/10.1109/SYSTEMS.2008.4518983>
- Kilicay, N., & Dagli, C. H. (2007). Methodologies for Understanding Behavior of System of Systems. In *Conf. on Systems Engineering Research* (pp. 1–10).
- Kirby, M. R. (2001). A METHODOLOGY FOR TECHNOLOGY IDENTIFICATION , EVALUATION , AND SELECTION IN CONCEPTUAL AND PRELIMINARY AIRCRAFT DESIGN A METHODOLOGY FOR TECHNOLOGY IDENTIFICATION , EVALUATION , AND SELECTION IN CONCEPTUAL AND, (March).
- Kruchten, P. B. (1995). No TitThe 4+ 1 view model of architecturele. *IEEE Software*, 12(6), 42--50.
- Larsen, K. G., Pettersson, P., & Yi, W. (1997). UPPAAL in a nutshell. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)*, 1(1), 134–152.
- Leuschel, M., & Butler, M. (2003). ProB: A model checker for B. In *International Symposium of Formal Methods Europe* (pp. 855–874). Springer Berlin Heidelberg.
- Levis, A. H. (2000). Architecting Information System (lecture notes). George Mason University.
- Linnington, P. F. (1995). *RM-ODP: the architecture. Open Distributed Processing*. SPRINGER.
- Lopez, D. (2006). Lessons Learned From The Front Lines of the Aerospace Industry - Balancing Complexity and Risk, (April), 11–15.
- Magee, J. L., Kramer, J., & Uchitel, S. (2004). Labelled Transition System Analyzer (LTSA) Home Page. Retrieved January 1, 2016, from see: <http://www.doc.ic.ac.uk/~jnm/book/ltsa/LTSA.html>
- Mahafza, S., Componation, P., and Tippet, D. (2005). A Performance-Based Tech- nology Assessment Methodology to Support DoD Acquisition. *Defense Acquisition Review Journal*, 269–283.
- Manning, H., Bodine, K., & Bernoff, J. (2012). *Outside in: the power of putting customers at the center of your business*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Materialise. (2016). Medical Image Segmentation for Engineering on AnatomyTM. Retrieved June 21, 2016, from <http://biomedical.materialise.com/mimics>
- MinTIC. (2014). Decreto No 2573 de 2016 del ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones. Republica de Colombia.
- MinTIC. (2015). Decreto No 1078 de 2015 del ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones. Republica de Colombia.
- Mirakhorli, M., Azim Sharifloo, A., & Shams, F. (2008). Architectural challenges of ultra large scale systems. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Ultra-Large-Scale Software-Intensive Systems - ULSSIS '08*, 45–48. <http://doi.org/10.1145/1370700.1370713>
- Mortara, L., & Ford, S. J. (2012). Technology Acquisitions. A guided approach to technology acquisition and protection decisions. University of Cambridge.
- Naslavsky, L., Alspaugh, T. A., Richardson, D. J., & Ziv, H. (2005). Using scenarios to support traceability. In *Proceedings of the 3rd international workshop on Traceability in emerging forms of software engineering* (pp. 25–30).
- Nogera Jormary, Flores Jerson, Lopez Clara, Delgado Dario, L. R. (2016). *Análisis*

- de las capacidades de un sistema empleando artefactos arquitecturales: un caso de un sistema de diseño de productos ortopédicos hechos a la medida. Universidad Industrial de Santander.
- Oden, J. T., Belytschko, T., Fish, J., Hughes, T. J. R., Johnson, C., Keyes, D., & Yip, S. (2006). *Simulation-Based Engineering Science: Revolutionizing Engineering Science through Simulation—Report of the National Science Foundation Blue Ribbon Panel on Simulation-Based Engineering Science*.
- Omg. (2010). OMG Systems Modeling Language (OMG SysML TM) v.1.2. OMG, (June), 260. Retrieved from <http://www.omg.org/spec/SysML/1.2/PDF/>
- Origins, T., Zachman, J., Open, T., & Architecture, G. (2007). The Zachman Enterprise Framework, 1–7.
- OsiriX. (2016). OsiriX image processing software. Retrieved June 21, 2016, from <http://www.osirix-viewer.com/index.html>
- Petrella, R. (1992). Le printemps du technology assessment en Europe: faits et questionnements. *Technologies de l'Information et Soci{é}t{é}*, 4(4), 425–434.
- Plenge, B. T. (2007). Air Force Research Laboratory Area Dominance Munition Technology. Information Sheet. AAC/PA, 10(13), 406.
- Queille, J.-P., & Sifakis, J. (1982). Specification and verification of concurrent systems in CESAR. In *International Symposium on Programming, Springer Berlin Heidelberg* (pp. 337–351).
- Rebovich, G., and B. E. W. (2011). *Enterprise Systems Engineering: Advances in the Theory and Practice*. Boca Raton. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, Auerbach.
- Rhodes, D. H., Ross, A. M., & Nightingale, D. J. (2009). Architecting the system of systems enterprise: Enabling constructs and methods from the field of engineering systems. *2009 3rd Annual IEEE Systems Conference*, 190–195. <http://doi.org/10.1109/SYSTEMS.2009.4815796>
- Ring, S. J., Nicholson, D., Thilenius, J., & Harris, S. (2007). *An activity-based methodology for development and analysis of integrated DoD architectures*. (Handbook o).
- Robbins, W. (2009). Achieving DoDAF-Driven Simulations Through Executable Architectures. In S. for C. S. International. (Ed.), *Proceedings of the 2009 Spring Simulation Multiconference* (p. 57). Society for Computer Simulation International.
- Robert McNeel & Associates. (2014). Rhinoceros. Retrieved September 5, 2016, from <https://www.rhino3d.com/es/>
- Ross, D. T. (1977). Structured Analysis (SA): A Language for - Communicating Ideas, (1), 16–34.
- Ross, J. W., Weill, P., & Robertson, D. (2006). *Enterprise architecture as strategy: Creating a foundation for business execution*. Harvard Business Press.
- Rui, P. L., Wang, R., & Yu, H. (2012). A Capability-Based Method for System of Systems Architecting in the Net-Centric Environment, 1(4).
- Saha, P. (2013). *A Systemic Perspective to Managing Complexity with Enterprise Architecture*. IGI Global.
- Sausser, B., Boardman, J., & Verma, D. (2010). Systemics: Toward a Biology of System of Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 40(4), 803–814.

- <http://doi.org/10.1109/TSMCA.2010.2048024>
- SeBook. (2014). Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge. Retrieved August 19, 2016, from http://sebokwiki.org/wiki/Enterprise_Systems_Engineering
- Shah, H., & El Kourdi, M. (2007). Frameworks for enterprise architecture. *It Professional*, 9(5), 36–41.
- SIEMENS. (2016). SolidEdge. Retrieved September 5, 2016, from https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/solid-edge/
- SIMON, H. A. (1960). *The new science of management decision*.
- Smits, R. (1990). *State of the Art of Technology Assessment in Europe: A Report to the 2nd European Congress on Technology Assessment*. Commission of the European Communities, Italian Ministry for University and Scientific and Technical Research.
- Systems, D. (2016a). ABAQUS. Retrieved September 5, 2016, from <http://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>
- Systems, D. (2016b). SolidWorks. Retrieved September 5, 2016, from <http://www.solidworks.es/>
- Systems, D. (2016c). SOLIDWORKS Simulation. Retrieved September 5, 2016, from <http://www.solidworks.es/sw/products/simulation/simulation.htm>
- Tan, Y.H., Yeoh, et al. (2006). Systems Architecting for 3G SAF Transformation. *DSTA Horizons*.
- Tang, A. (2004). A Comparative Analysis of Architecture Frameworks Technical Report: CeCSES Centre Report: In IEEE (Ed.), *In Software Engineering Conference, 2004. 11th Asia-Pacific*.
- Tao, Z.-G., Luo, Y.-F., Chen, C.-X., Wang, M.-Z., & Ni, F. (2015). Enterprise application architecture development based on DoDAF and TOGAF. *Enterprise Information Systems*, 1–25.
- Tejtel, D., Zeune, C. H., Revels, A. R., Held, T. W., & Braisted, W. R. (2005). Breathing New Life into Old Processes: An Updated Approach to Vehicle Analysis and Technology Assessment. *AIAA, Paper, 7304*.
- Tian, X., Tang, Q., & Wang, R. (2009). Generic Technology Evaluation Method Based on Multi-objective Fuzzy Optimization. *2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 121–125. <http://doi.org/10.1109/ICIII.2009.339>
- ToG. (2009). 9, the open group architecture framework (togaf). *The Open Group*, 1.
- TOG. (2016). The Open Group. Retrieved January 1, 2016, from <http://www.opengroup.org>
- UE-AF. (2011). Air Force Instruction 36-110, Air Force Scientific Advisory Board, Report on Operating Next-Generation Remotely Piloted Aircraft for Irregular Warfare SAB-TR-10-03.
- Ulrich, William, N. M. (2010). Business Architecture Scenarios. Retrieved June 23, 2016, from http://www.omg.org/bawg/Business_Architecture_Sceanrios-V0.3.1.3.pdf
- Urbaczewski, L., & Mrdalj, S. (2006). A comparison of enterprise architecture frameworks, *VII(2)*, 18–23.
- Valerdi, R., Axelband, E., Baehren, T., Boehm, B., Dorenbos, D., Jackson, S., ...

- Settles, S. (2008). A research agenda for systems of systems architecting. *International Journal of System of Systems Engineering*, 1(1/2), 171. <http://doi.org/10.1504/IJSSE.2008.018137>
- Vardi, M. Y., & Wolper, P. (1986). An automata-theoretic approach to automatic program verification. In *Proceedings of the First Symposium on Logic in Computer Science* (pp. 322–331). IEEE Computer Society.
- Wang, R., & Dagli, C. H. (2008). An Executable System Architecture Approach to Discrete Events System Modeling Using SysML in Conjunction with Colored Petri Net. *2008 2nd Annual IEEE Systems Conference*, 1–8. <http://doi.org/10.1109/SYSTEMS.2008.4518997>
- White, M. A., & Bruton, G. D. (2010). *The management of technology and innovation: A strategic approach*. (Cengage Learning., Ed.).
- Wojcik, L. A., & Hoffman, K. C. (2006). Systems of Systems Engineering in the Enterprise Context : A Unifying Framework for Dynamics, (April).
- Zachman, J. a. (1987). A framework for information systems architecture. *IBM Systems Journal*, 26(3), 276–292. <http://doi.org/10.1147/sj.263.0276>
- Zachman, J. A. (1996). Enterprise Architecture : The Issue of the Century.
- Zelkowitz, M. V, Park, C., & Wallace, D. (1998). EXPERIMENTAL MODELS FOR VALIDATING COMPUTER TECHNOLOGY *, 1–19.

Anexo A. Glosario de términos

Arquitectura empresarial:	Se puede definir AE (Arquitectura Empresarial) como la representación de todos los componentes, procesos y políticas de mi empresa. Según Gartner, Arquitectura Empresarial es el proceso de trasladar una visión y estrategia de negocio en un cambio efectivo, comunicando las capacidades actuales y repensando los principios y los modelos que describen el estado futuro de la empresa y facilitan su evolución.
Capacidad:	Se define capacidad (del inglés capability) en un contexto de un sistemas como la habilidad que tiene este para ejecutar un curso de acciones en pro alcanzar un efecto deseado, bajo un conjunto específico de condiciones.
Empresa:	Unidad económico-social dedicada a actividades industriales, mercantiles o de prestación de servicios con fines lucrativos.
Evaluación de tecnología:	La evaluación de tecnología (ET) se define como la medición del beneficio relativo de una o más tecnologías propuestas para un propósito en particular con respecto a una o más métricas.
Impacto tecnológico:	Cambio en el comportamiento de un sistema, capacidad, o la operación en el medio ligado a la consecución de una meta o estado final, el logro de un objetivo, o la creación de un efecto producto de la inserción de una tecnología.
Implantes médicos:	Un implante es un dispositivo médico creado para reemplazar, ayudar o mejorar alguna estructura biológica faltante.
Innovación:	linnovación es un cambio que introduce novedades. Además, en el uso coloquial y general, el concepto se utiliza de manera específica en el sentido de nuevas propuestas, inventos y su implementación económica. En el sentido estricto, en cambio, se dice que de las ideas solo pueden resultar innovaciones luego de que ellas se implementan como nuevos productos, servicios o procedimientos, que realmente encuentran una aplicación exitosa, imponiéndose en el mercado a través de la difusión.
Investigación:	La investigación es considerada una actividad orientada a la obtención de nuevos conocimientos y su aplicación para la solución a problemas o interrogantes de carácter científico así

mismo la Investigación científica es el nombre general que obtiene el complejo proceso en el cual los avances científicos son el resultado de la aplicación del método científico para resolver problemas o tratar de explicar determinadas observaciones.

Marco arquitectural:	Un marco arquitectural define como crear y utilizar una arquitectura, provee los principios y las prácticas para crear y utilizar las vistas y modelos arquitecturales, y organiza la arquitectura dividiéndola en dominios o vistas y proveyendo modelos, típicamente matrices y diagramas, que documentan las vistas.
Organización:	Organización se entiende como un ente social de personas que interactúan juntas con el propósito de alcanzar unos objetivos comunes.
Proceso:	Proceso está definido como la sucesión de actos o acciones realizados con cierto orden, que se dirigen a un punto o finalidad, así como también al conjunto de fenómenos activos y organizados en el tiempo.
Producto tecnológico:	Los productos tecnológicos son el resultado de la actividad tecnológica. La Tecnología se concreta en los productos tecnológicos que responden a demandas de la sociedad. Todo procedimiento tecnológico tiende a producir un producto para satisfacer alguna necesidad.
Propiedad emergente:	La emergencia o el surgimiento hace referencia a aquellas propiedades o procesos de un sistema no reducibles a las propiedades o procesos de sus partes constituyentes. El concepto de emergencia se relaciona estrechamente con los conceptos de autoorganización y superveniencia, y se define en oposición a los conceptos de reduccionismo y dualismo, y considera que "el todo, es más que la suma de las partes".
Prototipado rápido:	El prototipado rápido es un proceso utilizado para fabricar artículos de plástico, metal o cerámica. También conocido por su nombre en inglés como "additive technology", ya que su proceso de fabricación es ir añadiendo material capa a capa. En algunos casos con propiedades físicas que son similares a lo que se producirían por métodos convencionales, como moldeo por inyección y extrusión, o moldeo por soplado, de esta manera se evita el fabricar los costosos moldes para realizar un prototipo que podría cambiar su forma.
Reconstrucción	La reconstrucción 3D es el proceso mediante el cual, objetos

3D:	reales, son reproducidos en la memoria de una computadora, manteniendo sus características físicas (dimensiones, volumen y forma).
Requerimientos:	Una condición o capacidad necesitada por un usuario para resolver un problema o alcanzar un objetivo. Una condición o capacidad que debe cumplir o poseer un sistema, o componente de un sistema, producto o servicio para satisfacer un acuerdo, estándar, especificación, u otras formalidades impuestas.
Sistema de sistemas:	Se habla de la existencia de los sistemas de sistemas cuando se cumplen la mayoría de las siguientes características: administración y operación independiente, presencia de una distribución geográfica de los sistemas independientes, Ambientes emergentes, y desarrollo evolutivo del sistema general. La ingeniería de sistemas de sistemas empresariales se centra en el acoplamiento de las actividades tradicionales de la ingeniería de sistemas asociadas a la planificación estratégica y el análisis de inversiones. Un sistema de sistemas se puede entender como sistemas a gran escala concurrentes y distribuidos compuestos por sistemas complejos a su vez.
Sistema empresarial:	La ingeniería de sistemas empresariales (ESE) es la aplicación de los principios, conceptos y métodos de la IS a la planeación, diseño, mejora y operación de una organización.
Sistema:	Conjunto ordenado de normas y procedimientos que regulan el funcionamiento de un grupo o colectividad. Conjunto de reglas, principios o medidas que tienen relación entre sí.
Tecnología:	El conocimiento de cómo manipular la naturaleza para los propósitos humanos, El proceso utilizado para cambiar las entradas en salidas, La aplicación de conocimiento para desarrollar un trabajo, El conocimiento teórico y práctico, habilidades y artefactos que pueden ser utilizados para desarrollar productos, así como su producción y los sistemas de entrega, Los medios técnicos que las personas usan para mejorar su entorno, La aplicación de ciencia, especialmente para objetivos industriales o comerciales, el cuerpo completo de materiales y métodos usados para alcanzar un objetivo.
Tomografías:	Técnica exploratoria radiográfica que permite obtener

imágenes radiológicas de una sección o un plano de un órgano.

Transferencia de tecnología:

La transferencia de tecnología es el proceso en el que se transfieren habilidades, conocimiento, tecnologías, métodos de fabricación, muestras de fabricación e instalaciones entre los gobiernos o las universidades y otras instituciones para asegurar que los avances científicos y tecnológicos sean accesibles a un mayor número de usuarios que puedan desarrollar y explotar aún más esas tecnologías en nuevos productos, procesos, aplicaciones, materiales o servicios.

Vigilancia tecnológica:

La vigilancia tecnológica es un proceso organizado, selectivo y permanente, de captar información del exterior y de la propia organización sobre ciencia y tecnología, seleccionarla, analizarla, difundirla y comunicarla, para convertirla en conocimiento para tomar decisiones con menor riesgo y poder anticiparse a los cambios.

Vistas arquitecturales:

Un punto de vista de una arquitectura es un subconjunto de componentes y relaciones, provenientes de una o varias estructuras, con un significado o interés particular dentro del sistema. Una vista es el conjunto de documentos concretos de un punto de vista sobre una arquitectura específica. Los puntos de vista describen la visión arquitectural de acuerdo al interesado (stakeholder).

Anexo B. Definición de los factores de impacto para las tecnologías a incorporar en el caso de aplicación SIMM 1

1 Factores de impacto para las herramientas BioCAD

Tabla 1. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete MIMICS respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12							X	36
C7	49							X	147
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75							X	225
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							408
K _f = T _i × 3									813

Tabla 2. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete AMIRA respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12				X				0
C7	49							X	147
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75					X			75
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							222
K _f = T _i × 3									813

Tabla 3. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete GEOMA GIC respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12							X	36
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75							X	225
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							261
K _f = T _i × 3									813

Tabla 4. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete OSIRIX respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12				X				0
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75					X			75
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							75
K _f = T _i × 3									813

2 Factores de impacto para las herramientas CAD

Tabla 5. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete SOLIDWORKS respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12							X	36
C7	49				X				0
C8	38						X		76
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75						X		150
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							262
K _f = T _i × 3									813

Tabla 6. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete RHINOSEROS respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							χ _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12							X	36
C7	49				X				0
C8	38						X		76
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75						X		150
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							262
K _f = T _i × 3									813

Tabla 7. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete AUTOCAD respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12			X					-12
C7	49				X				0
C8	38			X					-38
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75						X		150
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							100
K _f = T _i × 3									813

Tabla 8. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete SOLIDEDGE respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				
C2	0				X				
C3	0				X				
C4	0				X				
C5	9				X				
C6	12						X		24
C7	49				X				
C8	38							X	114
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75						X		150
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							288
K _f = T _i × 3									813

3 Factores de impacto para las herramientas CAE

Tabla 9. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete ANSYS respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12				X				0
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49							X	147
C10	0				X				0
C11	75							X	225
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							372
K _f = T _i × 3									813

Tabla 10. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete ABAQUS respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12				X				0
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75							X	225
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							225
K _f = T _i × 3									813

Tabla 11. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete Altair Hyperworks respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12				X				0
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75							X	225
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							225
K _f = T _i × 3									813

Tabla 12. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete SOLIDWORKS SIMULATION respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12				X				0
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75							X	225
C12	39				X				0
T _i	271	T _f							225
K _f = T _i × 3									813

4 Factores de impacto para las herramientas RP

Tabla 13. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete BIG CREATOR II XL DUO respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12							X	36
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75							X	225
C12	39							X	117
T _i	271	T _f							378
K _f = T _i × 3									813

Tabla 14. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete Dimension elite respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							χ _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12						X		24
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75						X		150
C12	39						X		78
T _i	271	T _f							252
K _f = T _i × 3									813

Tabla 15. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete A4 respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							χ _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12						X		24
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75						X		150
C12	39						X		78
T _i	271	T _f							252
K _f = T _i × 3									813

Tabla 16. Definición del factor de impacto (*k-factor*) para el paquete ACCULAS BA-30 respecto a las capacidades del sistema SIMM

Capacidad	C _w	k-factor							X _{t,i}
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
C1	0				X				0
C2	0				X				0
C3	0				X				0
C4	0				X				0
C5	9				X				0
C6	12						X		24
C7	49				X				0
C8	38				X				0
C9	49				X				0
C10	0				X				0
C11	75						X		150
C12	39						X		78
T _i	271	T _f							252
K _f = T _i × 3									813

Anexo C. Determinación de un escenario de incorporación para un conjunto de tecnologías en particular

Tabla 1. Escenario de cumplimiento de requerimientos para la configuración de tecnologías AMIRA + RHINOSEROS + ANSYS + ACCULAS BA-30

CAPACIDAD	SUBCONJUNTO	PROPIEDAD (φ)	SALIDA
C5	$O_{s,5}$	RCe1^{4*}	☐
	$O_{a,5}$		
	$O_{l,5}$		
C6	$O_{s,6}$		
	$O_{a,6}$	RBc1*	☐
		RCd1*	☐
		RCe1*	☐
		RPt1*	☐
	$O_{l,6}$		
C7	$O_{s,7}$	RBc1*	☐
		RBc1.3 = <> (importTomography -> boneRegion)	☐
		RBc1.4 = <> (boneRegion -> reconstructSurface)	☐
		RBc1.5 = <> (reconstructSurface -> errorDetection)	X
		RBc1.6 = <> (errorDetection -> smooth)	X
	$O_{a,7}$	RBc1.1 = <> importTomography	☐
	$O_{l,7}$	RBc1.2 = <>((smooth)->(exportSTL exportSTEP exportGES))	☐
C8	$O_{s,8}$	RCd1*	☐
		RCd1.3 = <>((importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP) -> (reconstruirVolumen))	☐
		RCd1.4 = <>(reconstruirVolumen -> ((diseñarModelo W rechazarDiseño))-> diseñarModelo)	☐
		RCd1.5 = <>((reconstruirVolumen) -> (diseñarModelo))	☐
	$O_{a,8}$		
	$O_{l,8}$	RCd1.1= <>((generarAlternativa)-> (importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP))	☐
		RCd1.2= <>((valorarPrecisionModelo)-> ((exportarArchivoSTL exportarArchivoSTEP exportarArchivoIGES) W (importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP)))	☐
C9	$O_{s,9}$	RCe1*	☐
		RCe1.3 = <>((consultarMateriales crearMateriales) -> (ejecucionProceso))	☐
		RCe1.4 = <>((ejecucionProceso) -> (analizarResultados))	☐
		RCe1.5**5	X

⁴ * Las propiedades que tienen una numeración única son propiedades que se cumplen cuando sus propiedades dependientes se cumplen.

		RCe1.6**	X
	$O_{a,9}$	RCe1.2 = <>((mallarElementoFinitos) -> (consultarMateriales crearMateriales))	□
	$O_{l,9}$	RCE1.1 = <>((exportarArchivoSTL exportarArchivoSTEP exportarArchivoIGES) -> (importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP))	□
C11	$O_{s,11}$	RBc1.1 = <> importTomography	□
		RBc1.2 = <>((smooth)->(exportSTL exportSTEP exportGES))	□
		RCd1.1= <>((generarAlternativa)->(importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP))	□
		RCd1.2= <>((valorarPrecisionModelo)->((exportarArchivoSTL exportarArchivoSTEP exportarArchivoIGES) W (importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP)))	□
		RCd1.3 = <>((importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP) -> (reconstruirVolumen))	□
		RCE1.1 = <>((exportarArchivoSTL exportarArchivoSTEP exportarArchivoIGES) -> (importarArchivoSTL importarArchivoIGES importarArchivoSTEP))	□
		RCE1.2 = <> importTomography	□
		RPt1.2 = <>(importarArchivoSTL)	□
	$O_{a,11}$		
	$O_{l,11}$	RBc1*	□
		RCd1*	□
		RCE1*	□
C12	$O_{s,12}$	RPt1* = <>((imprimirModelo)W(imprimirVol0seo))	□
		RPt1.1**	Indefinido
		RPt1.3**	Indefinido
		RPt1.4**	Indefinido
	$O_{a,12}$	RPt1.2 = <>(importarArchivoSTL)	□
	$O_{l,12}$		

5 ** Requerimiento no verificable mediante *model-checking*

Anexo D. Cuantificación del indicador de cumplimiento T_r para todos los escenarios de incorporación

Tabla 1. Valores asociados al indicador de cumplimiento T_r , asociado al cumplimiento de los requerimientos de las diferentes tecnologías a incorporar y las capacidades del sistema

813	735	735	735	813	735	735	735	565	487	487	487	715	637	637	637
813	735	735	735	813	735	735	735	565	487	487	487	715	637	637	637
813	735	735	735	813	735	735	735	565	487	487	487	715	637	637	637
813	735	735	735	813	735	735	735	565	487	487	487	715	637	637	637
715	637	637	637	715	637	637	637	467	389	389	389	617	539	539	539
715	637	637	637	715	637	637	637	467	389	389	389	617	539	539	539
715	637	637	637	715	637	637	637	467	389	389	389	617	539	539	539
715	637	637	637	715	637	637	637	467	389	389	389	617	539	539	539
504	426	426	426	504	426	426	426	406	328	328	328	406	328	328	328
504	426	426	426	504	426	426	426	406	328	328	328	406	328	328	328
504	426	426	426	504	426	426	426	406	328	328	328	406	328	328	328
504	426	426	426	504	426	426	426	406	328	328	328	406	328	328	328
565	487	487	487	565	487	487	487	467	389	389	389	467	389	389	389
565	487	487	487	565	487	487	487	467	389	389	389	467	389	389	389
565	487	487	487	565	487	487	487	467	389	389	389	467	389	389	389
565	487	487	487	565	487	487	487	467	389	389	389	467	389	389	389