UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN

Modelo teórico del proceso de desarrollo de ingeniería electrónica

Rubén Darío Sánchez Dams

Facultad de Minas

Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia 2019

Página intencionalmente en blanco

Modelo teórico del proceso de desarrollo de ingeniería electrónica

Rubén Darío Sánchez Dams

Tesis presentada para optar al título de

Doctor en Ingeniería—Sistemas e Informática

Director

Carlos Mario Zapata Jaramillo, Ph.D.

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia 2019

Página intencionalmente en blanco

Theoretical model of electronic engineering development processes

Rubén Darío Sánchez Dams

A thesis for the degree of

Doctor in Engineering—Systems and Informatics

Advisor

Carlos Mario Zapata Jaramillo, Ph.D.

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Department of Computer and Decision Sciences

Medellín, Colombia 2019

Página intencionalmente en blanco

Agradecimientos

La presente Tesis de Doctorado se realizó con el apoyo de Colciencias, mediante el programa de Becas de Doctorado Nacional.

El autor expresa sinceros agradecimientos a:

El Doctor Carlos Mario director de la Tesis Doctoral, por la orientación, el apoyo y los invaluables consejos durante todo el proceso. Sus lineamientos, paciencia y confianza depositada fueron elementos claves en la consecución de la meta propuesta.

A mis compañeros de Doctorado y del grupo de investigación María Clara, Alexander y Antony, por el ambiente de trabajo, sus aportes a la investigación, las experiencias y lo aprendido en conjunto en este proceso.

A las personas cuya contribución configuró aspectos primordiales de la investigación y a quienes en general revisaron la propuesta, estuvieron dispuestos y participaron en espacios de discusión, donde surgieron ideas y mejoras aplicadas a la Tesis Doctoral. A los profesores de la Universidad Tecnológica de Panamá Clifton, Nicolas, Jeannette, Vieria, Dilsa, Jacqueline, Inmaculada y Gisela; por su apoyo y aportes a la Tesis. A Mónica, Yael, Víctor y Julián, matemáticos y físicos de la Universidad Nacional Autónoma de México, quienes me acogieron y ayudaron a formalizar la propuesta. A mis amigos y compañeros de trabajo Heyder, José, Farid y Nazhir, quienes estuvieron dándome sus opiniones y aportes a lo largo de toda mi formación doctoral. Al grupo de profesores del programa de ingeniería electrónica de la Universidad de la Costa, por el apoyo y los consejos entregados. A Ricardo, Sandra y Franklin, por destinar un espacio en su agenda y compartir el esfuerzo aplicado en sus investigaciones como casos de estudio para validar la propuesta. A las personas de la comunidad de *Semat* y en particular a Hanna, Guadalupe, Ilda, Paul, Shihong e Ivar, por sus aportes, por enriquecer la discusión y ser fuente de inspiración de la Tesis.

De manera especial, a mi familia, en particular a Alexandra, mi madre, padrinos y hermanos, por su amor, compresión, motivación y apoyo en momentos difíciles y de alegría. A quienes partieron antes de lo esperado y aunque no están a mi lado viven en mis recuerdos, mi Padre, Mimi, mi tío Adalberto y Abuelos. Gracias por los buenos consejos y momentos excepcionales. Con todo el cariño puedo decirles que son un regalo, el estímulo de mis días, parte de lo que soy y la motivación de mis acciones.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Página intencionalmente en blanco

Resumen

Una teoría es un marco conceptual común para estructurar y organizar fenómenos y conocimiento de manera concisa y precisa. El esfuerzo de ingeniería electrónica (EIE) es el fenómeno en el que un equipo soluciona un sistema electrónico (SE) de acuerdo con una oportunidad. Este fenómeno se sustenta en teorías de interés para el esfuerzo, que se describen principalmente de forma textual y con cobertura parcial. Tales descripciones se abordan en el enfoque del EIE actual, el enfoque general de gestión y el enfoque de sectores análogos al EIE como la ingeniería de software. A pesar de la disponibilidad de estas teorías, en la literatura se evidencian problemas en los esfuerzos y EIE. En estudios relacionados con este sector se revela que la mayoría de los proyectos evaluados se retrasan o se cancelan. Tales dificultades se relacionan con cambios o incumplimientos del alcance, sobrecostos, retrasos y cancelaciones del esfuerzo. Algunos autores analizan las causas de las dificultades y las atribuyen a una comprensión inmadura del EIE y a la carencia de un mecanismo de representación general del conocimiento del EIE. Estos autores declaran la necesidad de mejorar la teorización relacionada con el fenómeno y de disponer de mejores herramientas para abordarlo. En esta Tesis Doctoral se propone una Conceptualización del EIE, una Teoría del Esfuerzo y su aplicación al EIE para producir el Modelo teórico del proceso de desarrollo de ingeniería electrónica, identificando sus premisas, constructos y proposiciones. El método que se utiliza se basa en una revisión de literatura, la Conceptualización del EIE, verificaciones conceptuales, verificaciones por juicio de expertos y síntesis de teorías. Esta Tesis Doctoral se valida con un caso de estudio del EIE en un centro de investigación y desarrollo. Como resultado de esta Tesis Doctoral se propone una primera aproximación a un lenguaje común para mejorar la comunicación entre profesionales, abarcando los enfoques antes mencionados e incluyendo mejoras unificadas en una descripción formal con coherencia terminológica. La descripción tiene una interpretación intrínseca cuantitativa y una cualitativa para facilitar su adopción, compatible con lo que se expresa en la literatura. La Tesis Doctoral es un marco de pensamiento y un mecanismo de representación general del conocimiento del EIE, extensible a otros dominios y en particular a la ingeniería de software y al estándar de la Esencia, contribuyendo a una mejor comprensión y desempeño del esfuerzo y del EIE.

Palabras claves: Teoría, Esfuerzo, Ingeniería Electrónica, Proceso, Proyecto, Estándar de la Esencia, *Semat*.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Abstract

A theory is a common conceptual framework for structuring and organizing phenomena and knowledge in a concise and precise way. Electronic engineering endeavor (EEE) is the phenomenon in which a team solves an electronic system according an opportunity. Practitioner support such phenomenon by interest theories of endeavor mainly describing it in textual form and with partial coverage. Such descriptions address EEE approach, general management approach, and EEE analogous field approach like software engineering. Despite the availability of such theories, people report problems related to the endeavors and EEE in the state of the art. In studies of this field, authors reveal that most of the projects evaluated are delayed or canceled. Such difficulties are related to changes or breaches in scope, cost overruns, delays and endeavor cancellation. Some authors analyze causes of challenges and they attribute them to an EEE immature understanding and a lack of a general knowledge representation mechanism of EEE. Such authors declare the need for improving the theory related to such phenomenon and having better tools to deal with it. In this PhD Thesis we propose an EEE Conceptualization, an Endeavor Theory, and its application to EEE to produce the theoretical model of electronic engineering development processes, identifying their premises, constructs, and propositions. We use a method consisting of a literature review, EEE conceptualization, conceptual verifications, expert judgment, and synthesis of theories. We validate this PhD Thesis with one case study carried out in research and development center. This PhD Thesis is a first common language approximation improving communication between professionals, covering the aforementioned approaches, including improvement and unification in a formal description with terminological coherence. Description has a quantitative intrinsic interpretation and a qualitative facilitating its adoption, compatible with the state of the art. This PhD Thesis is a thinking framework and a general knowledge representation mechanism of EEE, scalable to other domains particularly to software engineering and Essence standard, and a contribution to a better understanding and performance of endeavor and EEE.

Keywords: Theory, Endeavor, Electronic Engineering, Process, Project. Essence standard, Semat.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla de contenido

Agradecimientos i
Resumen iii
Abstract iv
Tabla de contenido v
Tabla de figuras vii
Tabla de tablas ix
Introducción 1
1. Marco teórico 5
    1.1. Teoría y conceptualización 5
    1.2. Ingeniería electrónica 8
2. Antecedentes 15
    2.1. Enfoque del EIE actual 15
    2.2. Enfoque general de gestión 19
    2.3. Enfoque de sectores análogos al EIE 20
    2.4. Análisis crítico de antecedentes 28
    2.5. Problemas en los esfuerzos y el EIE 32
    2.6. Análisis de la problemática del EIE 33
3. Planteamiento de la investigación 37
    3.1. Premisas de investigación 37
    3.2. Objetivos 38
    3.3. Método de investigación 39
4. Propuesta de solución 53
    4.1. Conceptualización 53
    4.2. Teoría del Esfuerzo 65
    4.3. Teoría del Esfuerzo de ingeniería electrónica 88
5. Validación 105
    5.1. EIE de un sistema IoT de supervisión de variables para la agricultura 105
6. Conclusiones 119
    6.1. Resultados 119
    6.2. Conclusiones 121
    6.3. Discusión y trabajo futuro 122
Anexos 125
    A.1. Listas de verificación de los alfas del EIE 127
    A.2. Conceptualización del esfuerzo (ingenierías y calidad) 141
Referencias 143

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Página intencionalmente en blanco

Tabla de figuras

Figura 1-1. Representación gráfica del proceso de creación de teorías (1/2) 6
Figura 1-2. Notación del esquema preconceptual (presentes en la Tesis) 8
Figura 1-3 Definición de ingeniería electrónica en un esquema preconceptual (1/2) 9
Figura 1-4 Relación de la ingeniería eléctrica con la electrónica y sus fundamentos 10
Figura 1-5. Fenómeno del EIE como parte de la disciplina de ingeniería electrónica 13
Figura 1-6. Industria electrónica y su relación con la industria de software 14
Figura 2-1. Enfoque del esfuerzo de ingeniería electrónica actual 18
Figura 2-2. El núcleo de la Esencia de *Semat* 24
Figura 2-3. Elementos principales del lenguaje de la Esencia 25
Figura 2-4. Enfoques: general de gestión y de sectores análogos al EIE 27
Figura 2-5. Ejemplo de fortalezas y debilidades de la aproximación gestión de proyectos 30
Figura 2-6. Desempeño de los proyectos de la industria electrónica a lo largo de los años 33
Figura 4-1. Conceptualización preliminar del EIE descrita en el Apartado 1.2 y Capítulo 2 55
Figura 4-2. Conceptualización del EIE 56
Figura 4-3. Conceptualización del EIE: enfoque del EIE actual 57
Figura 4-4. Conceptualización del EIE: enfoque general de gestión (calidad del producto) 58
Figura 4-5. Conceptualización del EIE: enfoque general de gestión (calidad del proceso) 59
Figura 4-6. Conceptualización del EIE: enfoque general de gestión (proyectos) 60
Figura 4-7. Conceptualización del EIE: aproximación de ingeniería de sistemas 61
Figura 4-8. Interpretación sistémica del esfuerzo 62
Figura 4-9. Conceptualización del EIE: enfoques análogos al EIE (la Esencia) 63
Figura 4-10. Alcance de la Teoría (limite) 65
Figura 4-11. Ámbito del esfuerzo 66
Figura 4-12. Espacio del esfuerzo (1er constructo) 67
Figura 4-13. Perspectivas esenciales del esfuerzo (2do constructo) 68
Figura 4-14. Perspectiva en el espacio del esfuerzo 69
Figura 4-15. Esfuerzo como manifestación de perspectivas 71
Figura 4-16. Vistas del espacio del esfuerzo (canónicas) 73
Figura 4-17. Graficas de progreso de requisitos y pendientes (*Burn-up* y *Burn–down*) 74
Figura 4-18. Regiones como interpretación cuantitativa de los estados de la Esencia 75
Figura 4-19. Tarjetas de estados y de listas de verificación de la Teoría del Esfuerzo 76
Figura 4-20. Correspondencia entre estados del modelo de Tuckman y estados del alfa equipo. 78
Figura 4-21. Acciones en el esfuerzo (EIE) 78
Figura 4-22. Vector acción como generador del progreso 79
Figura 4-23. Carga semántica del vector acción 80
Figura 4-24. Proyecciones del progreso de perspectivas sobre el eje alcance para un t_n 82
Figura 4-25. Salud como dispersión del progreso de las perspectivas 83
Figura 4-26. Lenguaje cualitativo del esfuerzo 85
Figura 4-27. Tarjeta de síntesis de la Teoría del Esfuerzo (frontal y reverso) 86

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Figura 4-28. Teoría del EIE como una parametrización de la Teoría del Esfuerzo 88
Figura 4-29. Selección de alfas del EIE 89
Figura 4-30. Tarjetas de alfas y estados del EIE 90
Figura 4-31. Tarjetas de listas de verificación de alcance del alfa sistema electrónico 92
Figura 4-32. Acciones en el EIE relacionada con los alfas 98
Figura 4-33. Espacios de trabajo del EIE 98
Figura 4-34. Selección de espacios de trabajo y competencias del EIE 99
Figura 4-35. Espacios de trabajo versus estados del área de interés personalización 101
Figura 4-36. Espacios de trabajo versus estados del área de interés solución 102
Figura 4-37. Espacios de trabajo versus estados del área de interés gestión 103
Figura 4-38. Competencias del EIE 104
Figura 5-1. Participante en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad de Dallas 106
Figura 5-2. Casos de uso del sistema IoT de supervisión de variables para la agricultura 107
Figura 5-3. Uso de tarjetas para reconstrucción del caso de estudio 109
Figura 5-4. Vistas del espacio del esfuerzo (canónicas) del caso de estudio 111
Figura 5-5. Función perspectiva del esfuerzo resultante del caso de estudio 116
Figura A.2-1. Conceptualización del esfuerzo (ingenierías y calidad) 142

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla de tablas

Tabla 2.1. Análisis crítico de antecedentes representativos 31
Tabla 2.2. Desempeño de los proyectos de TI a lo largo de los años 32
Tabla 3.1. Correspondencia de objetivos con pasos y prácticas 39
Tabla 3.2. Criterios de inclusión y exclusión de revisión sistemática de literatura 42
Tabla 4.1. Convención de colores para los elementos de la Teoría 54
Tabla 4.2. Definición de los elementos del lenguaje cualitativo del esfuerzo (1/2) 85
Tabla 4.3. Lista de verificación de estados genéricos del costo 93
Tabla 4.4. Lista de verificación de estados genéricos del tiempo 94
Tabla 4.5. Lista de verificación del alfa sistema electrónico (alcance; 1/2) 95
Tabla 4.6. Lista de verificación del alfa riesgos (alcance) 97
Tabla 5.1. Colores de las funciones perspectivas de los alfas del caso de estudio 111
Tabla 5.2. Ponderación de la función perspectiva del esfuerzo 116
Tabla A.1.1. Lista de verificación de estados genéricos del costo 127
Tabla A.1.2. Lista de verificación de estados genéricos del tiempo 128
Tabla A.1.3. Lista de verificación del alfa oportunidad (alcance) 129
Tabla A.1.4. Lista de verificación del alfa interesados (alcance) 130
Tabla A.1.5. Lista de verificación del alfa requisitos (alcance; 1/2) 131
Tabla A.1.6. Lista de verificación del alfa sistema electrónico (alcance; 1/2) 133
Tabla A.1.7. Lista de verificación del alfa equipo (alcance; 1/2) 135
Tabla A.1.8. Lista de verificación del alfa trabajo (alcance; 1/2) 137
Tabla A.1.9. Lista de verificación del alfa forma de trabajo (alcance) 139
Tabla A.1.10. Lista de verificación del alfa riesgos (alcance) 140

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Página intencionalmente en blanco

Introducción

Una *teoría* es un marco conceptual común para estructurar y organizar fenómenos y conocimiento de manera concisa y precisa (Sjøberg *et al.*, 2008). La humanidad logra evolucionar las teorías con el tiempo. Al inicio se configuran *teorías de alcance medio*; luego, a medida que avanza el entendimiento y la profundidad de éstas, se proponen *teorías unificadas* (Merton, 1968). Las *teorías de alcance medio* son aquellas con las que se explican los fenómenos, mientras que con las *unificadas* adicionalmente se predicen resultados y tienen mayor ámbito sobre el fenómeno. Las teorías incluyen *proposiciones* para relacionar los *constructos* del fenómeno. Los *constructos* son abstracciones teóricas de conceptos esenciales y significativos. La construcción de una teoría se liga íntimamente con la *conceptualización*, pues por medio de esta es posible identificar los elementos más representativos de un fenómeno de estudio (Reynolds, 1971). La conceptualización de un fenómeno se puede lograr con el uso de *esquemas preconceptuales*, dado que estos permiten representar y definir conceptos, sus operaciones y relaciones más relevantes de un dominio, conservando afinidad con el lenguaje natural y la lógica formal (Zapata *et al.*, 2006).

La ingeniería electrónica es la profesión que se relaciona con los sistemas electrónicos (SE) (Bureau of Labor Statistics, 2015). Esta abarca al fenómeno del *esfuerzo de ingeniería electrónica* (EIE) y al fenómeno electrónico de señales y sistemas (Braha *et al.*, 1998). El EIE es la forma escogida para denominar al proceso de desarrollo de ingeniería electrónica, que es el fenómeno en el que un equipo soluciona un SE de acuerdo con una oportunidad, bajo restricciones de recursos, tiempo o costo. Las teorías del fenómeno electrónico de señales y sistemas se usan para solucionar un SE mediante la caracterización del comportamiento del SE y sus reacciones ante estímulos. El fenómeno del EIE se sustenta en teorías de interés de alcance medio del esfuerzo, mientras el fenómeno electrónico de señales y sistemas se sustenta en teorías unificadas. Además, el EIE hace parte de un sector económico más amplio denominado industria electrónica que a su vez se relaciona con la industria del software (Ordóñez, 2012; Sarkar *et al.*, 2010; Tatnall, 2009).

Las teorías de interés del esfuerzo disponibles se orientan al *EIE actual*, la *gestión en general* y *sectores análogos al EIE*, que constituyen los enfoques abordados en la Tesis Doctoral y son descripciones en las que se contribuye teóricamente al EIE. El enfoque del EIE actual abarca formas de trabajo que se clasifican en las siguientes categorías: síntesis de hardware, sistema embebido, modelos en *V*, métodos formales del EIE y desarrollo y gestión del ciclo de vida del producto (Clark, 2009; Díaz González *et al.*, 2013; Henzinger *et al.*, 2007; Kundert, 2003; Sifakis, 2013). El enfoque general de gestión incluye la gestión de la calidad y la gestión de proyectos (Mukherjee, 2006; PMI, 2010a). Por otra parte, el enfoque de sectores análogos al EIE lo comprenden la ingeniería de sistemas y la ingeniería de software (OMG, 2008, 2013; INCOSE, 2004). Entre las descripciones del enfoque de sectores análogos se destaca la comunidad *Semat* y el estándar de la Esencia. En la *Esencia* se define un núcleo con constructos y proposiciones esenciales del esfuerzo de ingeniería de software y un lenguaje con constructos y proposiciones generales del esfuerzo y mecanismos de extensión de la Esencia (OMG, 2018).

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

A pesar de la disponibilidad de teorías de interés del esfuerzo, con un análisis crítico de antecedentes se identifican sus fortalezas y debilidades y se advierten problemas en los esfuerzos y el EIE. En el informe del *Embedded Markets Study*, se revela que en el 2017 el 59% de los proyectos evaluados terminan tarde o se cancelan (*EE Times* y *Embedded.com*, 2017). Por lo tanto, se evidencia que la implementación de proyectos en el área de estudio presenta problemas por cambios o incumplimientos del alcance, sobrecostos, retrasos o cancelaciones del esfuerzo. Autores que analizan la problemática del EIE establecen que los equipos necesitan teorías y métodos, puesto que los esfuerzos son inmaduros y acarrean errores e identifican dificultades para combinar, reutilizar, enseñar o comparar prácticas (Sifakis, 2011, 2013; Johnson *et al.*, 2012b). En síntesis, a partir de la literatura se identifica que la problemática se puede agrupar alrededor de dos desafíos: la compresión del EIE es inmadura y la carencia de un mecanismo de representación general del conocimiento del EIE. Con base en lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación. ¿Cuáles son los fundamentos que permiten una mejor comprensión y aplicación del EIE?

La Tesis Doctoral se inicia con dos premisas: es posible encontrar constructos y proposiciones del EIE y estos se pueden descubrir en descripciones del fenómeno. Así, el objetivo general es *establecer un Modelo teórico para el proceso de desarrollo de ingeniería electrónica que permita su representación y especificación*. El alcance de la investigación abarca el EIE, con diferentes niveles de escalado y en cualquier parte de su ciclo de vida. Para el método de investigación, se siguen los *pasos de creación de teorías* propuestos por Sjøberg *et al.* (2008), que se implementan con un conjunto de *prácticas* extraídas principalmente del método *teoría fundamentada* (Stol *et al.*, 2016). En el primer paso se definen los constructos de la teoría, que se implementa con una revisión de literatura y conceptualización del EIE (Kitchenham, 2004). En el segundo paso se definen las proposiciones de la teoría mediante la adición de las prácticas de síntesis de teoría y verificación conceptual para contrastar las fuentes contra la solución emergente (Stol *et al.*, 2016; Zapata *et al.*, 2006). En los pasos tercero y cuarto se proporcionan explicaciones para justificar la teoría y se determina el alcance de la teoría, que se implementan agregando la práctica juicio de expertos (PMI, 2017). En el último paso se prueba la teoría mediante investigación empírica que corresponde a la validación de la Tesis Doctoral y se realiza principalmente con un caso de estudio (Martínez Carazo, 2011; Yin, 2017) del EIE en un centro de investigación y desarrollo. Los pasos y prácticas se aplican solapados entre sí, de forma iterativa, incremental y retrospectiva (Stol *et al.*, 2016), de acuerdo con criterios de teorización (Gregor, 2006; Reynols, 1971).

La Tesis Doctoral consta de tres partes: la Conceptualización del EIE, la Teoría del Esfuerzo y el Modelo teórico del proceso de desarrollo de ingeniería electrónica. En la *Conceptualización* se sintetizan las características esenciales, complementarias y las fortalezas de los tres enfoques abordados que se representan en un esquema preconceptual. Además, con la Conceptualización se define el alcance de la Teoría mediante la identificación de los límites del contexto de aplicación. La *Teoría del Esfuerzo* tiene un nivel de abstracción superior a la Conceptualización. La premisa de la formulación teórica es que el esfuerzo se puede representar en un espacio euclidiano, que se denomina *espacio del esfuerzo* y es el primer constructo. Las dimensiones que conforma el espacio son: costo, tiempo y alcance (c,t,a). El fenómeno se puede analizar desde diferentes *perspectivas* interrelacionadas del esfuerzo que se identifica como el segundo constructo. Las *perspectivas* son puntos de vistas diferentes de un único fenómeno y no se pueden interpretar como particiones físicas. Una perspectiva se manifiesta en el espacio euclidiano

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

como una *función del esfuerzo* determinada con las dimensiones del espacio, siendo la primera proposición de la Teoría. A su vez, las perspectivas se combinan para conformar el *vector esfuerzo* que es la segunda proposición. Por otro lado, la manifestación tangible de las perspectivas con el que se evidencia su progreso se denomina *producto de trabajo* y es el tercer constructo. El progreso de una función del esfuerzo se debe a la *proposición de dinámica* que se relaciona con el constructo *vector acción*. Estos son los elementos básicos de la Teoría. Adicionalmente, sobre estos constructos y proposiciones de la Teoría se derivan otros para completar la representación del esfuerzo en lenguaje matemático. Por otro lado, el *Modelo* es la Teoría del Esfuerzo parametrizada con la Conceptualización. El Modelo se constituye en un nivel superior de abstracción teórica, por lo que, además, se denomina de forma alternativa como *Teoría del EIE*. Así, se identifica un conjunto esencial de perspectivas (los *alfas*), un conjunto esencial de vectores acción (*espacios de trabajo* como meta-actividades genéricas) y *competencias* genéricas necesarias para las actividades realizadas en el EIE.

La Tesis Doctoral se valida con un caso de estudio en un centro de investigación y desarrollo. Así, la Conceptualización se utiliza para explicar la Tesis y tener un marco conceptual común con los participantes. Por su parte, se utiliza un paquete de tarjetas para resumir la Tesis, entablar discusiones y capturar la información de los esfuerzos en estudio. Al final de la validación, los alfas se representan en el espacio del esfuerzo y se describen con un conjunto de ecuaciones, sintetizando el esfuerzo en estudio.

En la Tesis Doctoral se aprovecha el conocimiento acumulado en descripciones relacionadas con el fenómeno del EIE, que se desarrollan en discusiones de diferentes comunidades y que se evolucionan en una sinergia entre teoría y práctica (Sjøberg *et al.*, 2008). Así, en la Tesis Doctoral se plantea una Conceptualización del fenómeno del EIE con conceptos, agentes, acciones, relaciones de concurrencia, de causalidad y de retroalimentaciones. Por su parte, la Teoría es un medio de representación general para el EIE, que es extensible a otros dominios y en particular a la ingeniería de software y la Esencia. Se propone la Tesis como una aproximación a un lenguaje común para mejorar la comunicación entre profesionales y como medio para representar, comparar y transferir formas de trabajo. En la Tesis se sintetizan los enfoques pertinentes, incluyendo mejoras unificadas en una descripción formal y compatible con lo que se expresa en la literatura, que tiene una interpretación cuantitativa y cualitativa (para facilitar su adopción). Además, la Teoría se describe en tarjetas con lo cual la propuesta es accionable y práctica (Jacobson *et al.*, 2012b). En contraste con las actuales teorías de alcance medio, se propone una Teoría unificada que abarca a las micro teorías disponibles del EIE y se propone una explicación y una capacidad de predicción para el fenómeno. Así, la Tesis Doctoral es un marco de pensamiento para el EIE que sirve para que los practicantes tomen decisiones, realicen análisis de sus esfuerzos, comprendan los fundamentos del fenómeno o mejoren los desempeños de sus esfuerzos.

La estructura del documento se detalla a continuación. En el Capítulo 1 se describe el marco teórico en el que se fundamenta esta investigación abarcando los temas de teoría, procesos de construcción de teorías y la ingeniería electrónica. En el Capítulo 2 se presentan los antecedentes, describiendo los enfoques relacionados con el EIE, un análisis crítico de ellos y el problema de investigación. En el Capítulo 3 se describe el planteamiento de la investigación, enunciando los objetivos y describiendo el método de investigación. En el Capítulo 4 se desarrolla la propuesta de solución presentando los detalles de la Conceptualización, de la Teoría del Esfuerzo y de la Teoría del EIE. En el Capítulo 5 se

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

describe la validación de la propuesta de solución. Por último, en el Capítulo 6 se presentan los resultados generados durante la investigación, las conclusiones y el trabajo futuro que se derivan de la presente Tesis Doctoral.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

1. Marco teórico

En este Capítulo se describen los principales términos o conceptos en los que se fundamenta la Tesis y que se resaltan en *cursiva*. Aquí se aborda la definición de teoría y su relación con la conceptualización, los esquemas preconceptuales como herramienta para la conceptualización, el proceso de construcción de teorías y los diferentes tipos de teorías. Adicionalmente, se describe la ingeniería electrónica, su industria y su relación con la industria del software.

1.1. Teoría y conceptualización

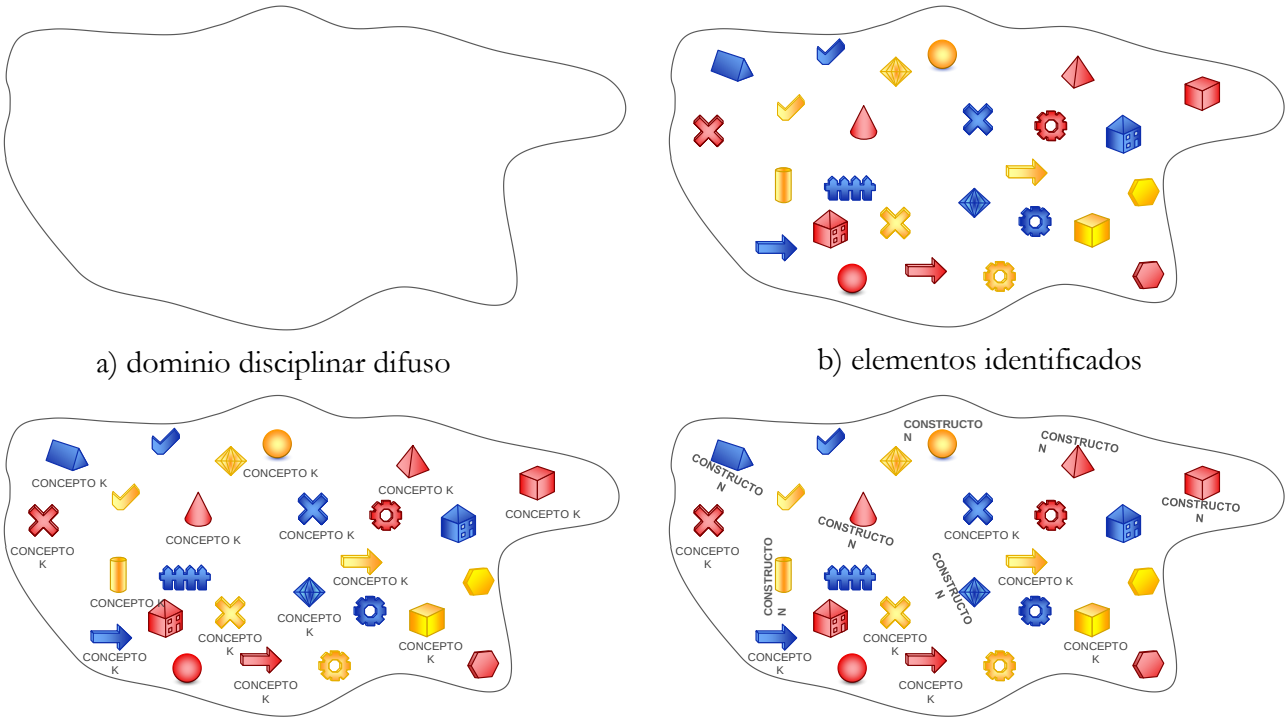
Una *teoría* es un marco conceptual común que facilita la comunicación y el intercambio de conocimientos entre investigadores, profesionales y practicantes (Sjøberg *et al*., 2008). Así, las *teorías* son mecanismos para organizar y expresar el entendimiento de un dominio o fenómeno. La *abstracción* es el proceso de identificar sólo los elementos necesarios y suficientes para describir un fenómeno. Por su parte, la *conceptualización* es una abstracción donde los elementos necesarios y suficientes son conceptos y sus relaciones. Guarino *et al*. (2009) definen la *conceptualización* como "una visión abstracta y simplificada del mundo que se desea representar con algún propósito". Las teorías se encuentran íntimamente ligadas con la conceptualización, pues por medio de esta se pueden identificar los elementos más representativos de un fenómeno de estudio (Reynolds, 1971). En formulación de teorías, los conceptos esenciales dentro de un dominio se denominan *constructos*. Los *constructos* son las piezas fundamentales con las que se estructuran los demás conceptos que permiten comprender un fenómeno. La *teorización* o formulación de una teoría se hace de forma concisa y precisa mediante un conjunto de sentencias estructuradas denominadas proposiciones, que sintetizan el conocimiento acerca de un fenómeno. Las *proposiciones* son las interacciones o relaciones esenciales entre constructos. Por lo tanto, las teorías se definen mediante constructos y proposiciones que se expresan con ecuaciones, afirmaciones, suposiciones o leyes (Sjøberg *et al*., 2008; Ekstedt, 2013).

Merton (1968) y Gregor (2006) proponen *clasificaciones de teorías* que categorizan su evolución o el entendimiento sobre un fenómeno. Gregor (2006) clasifica (con posibilidad de tipificación múltiple) las teorías relacionadas con sistemas de información: análisis, diseño-acción, explicación, predicción y explicación-predicción. En el *tipo análisis*, en una teoría se establece *qué es* y se usa para describir y analizar fenómenos. En el *tipo diseño-acción*, en una teoría se determina *cómo hacer algo*. En el *tipo explicación*, en una teoría se establece *qué es*, *cómo*, *por qué*, *cuándo* y *dónde*. Con una teoría de *tipo predicción* se define *qué es* y *qué será*, pero sin explicaciones causales. Finalmente, en el *tipo explicación-predicción* en una teoría se combinan los tipos explicativos y predictivos. Por su parte, Merton (1968) divide la clasificación en dos categorías equiparables a las de Gregor (2006): teorías de alcance medio y teorías unificadas. Las *teorías de alcance medio* son aquellas con las que se explican o definen fenómenos, sin alcanzar tipologías predictivas. Por otro lado, una *teoría unificada* corresponde a los dos últimos tipos. Merton (1968) resalta la importancia de las teorías unificadas en el sentido que permiten unificar micro teorías (correspondiente a las tipologías inferiores de Gregor, 2006) que conviven para explicar fenómenos con cobertura parcial de un dominio. Un *dominio* es el conjunto de fenómenos que determinan una disciplina o un objeto de estudio.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

1.1.1. Proceso de construcción de teorías

Merton (1968), Reynolds (1971), Sjøberg *et al.* (2008) y Gregor (2016) describen el *proceso de construcción de teorías*. Para la humanidad, los fenómenos y conceptos de un dominio son difusos y confusos antes de la creación de teorías. Así, los investigadores hacen abstracciones sobre un dominio disciplinario para describir una disciplina. Primero, se observa un fenómeno difuso para identificar sus elementos. Los elementos se caracterizan estableciendo clases de elementos que se denominan *conceptos*. Este nivel de la teorización corresponde a las *teorías de análisis*. En la evolución de la teorización, algunos de los conceptos se identifican como constructos y se definen sentencias textuales (proposiciones) que describen la dinámica, interacciones y la estructura del fenómeno. Este nivel de entendimiento corresponde a las *teorías de diseño-acción*. Los investigadores avanzan en el nivel de entendimiento y llegan a *teorías de tipo explicativo*. Así, las proposiciones se expresan como un conjunto coherente de sentencias que describen el fenómeno. Además, cuando las proporciones se expresan formalmente, es posible que los investigadores hagan inferencias y determinen relaciones de causalidad en el fenómeno, correspondiendo a *teorías predictivas*. Por último, los investigadores llegan a una *teoría explicativa-predictiva,* cuando el entendimiento acerca de fenómenos relacionados se sintetiza en un conjunto de proposiciones que cubre las micro teorías existentes y se abarca por completo un dominio disciplinar. Así se explica y establecen las relaciones de causalidad; como la teoría electromagnética de la física (Maxwell, 1873). En la Figura 1-1 se representa gráficamente el proceso de creación de teorías.



a) dominio disciplinar difuso

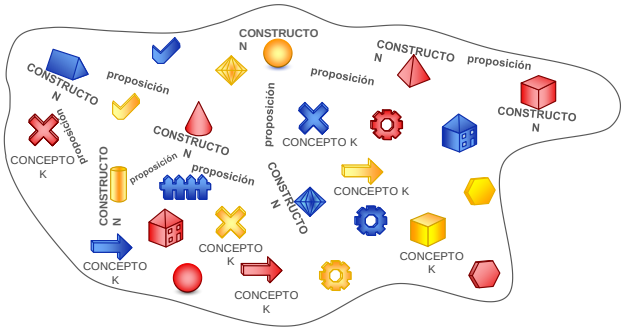
b) elementos identificados

c) conceptos identificados

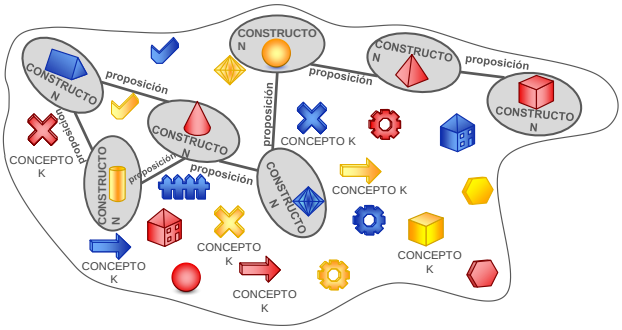
d) constructos identificados

Figura 1-1. Representación gráfica del proceso de creación de teorías (1/2)
Fuente: elaboración propia

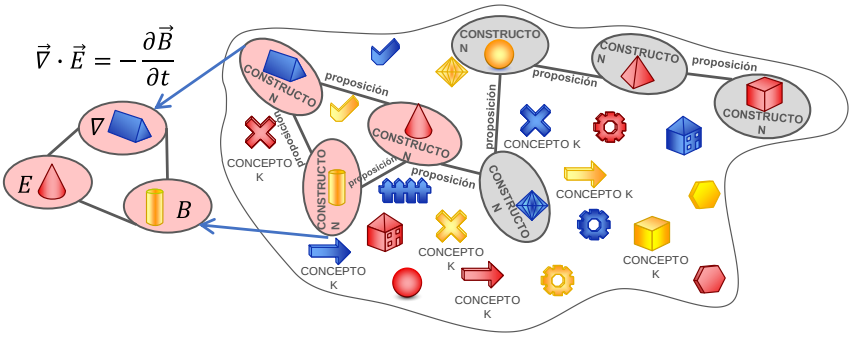
© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados



e) proposiciones descritas



f) conjunto de proposiciones coherente



g) proposiciones expresadas formalmente (predictiva)

$$\vec{f} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \mu_0\left(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

h) conjunto coherente de proposiciones formales, explicativas-predictivas

Figura 1-1. Representación gráfica del proceso de creación de teorías (2/2)
Fuente: elaboración propia

1.1.2. Esquema preconceptual

El *esquema preconceptual* es un mecanismo visual y estructurado que sirve para describir discursos de cualquier dominio (Zapata *et al.*, 2006). Las representaciones con esquemas preconceptuales tienen una interpretación que es próxima tanto al lenguaje natural como a la lógica formal y contienen las interacciones u operaciones entre conceptos. Los esquemas preconceptuales cuentan con un lenguaje gráfico controlado que permite representar información de forma clara, concisa y precisa, con una única interpretación (unívoca). Por otra parte, un *esquema preconceptual ejecutable* es una variante que permite crear instancias de un modelo conceptual (Zapata *et al.*, 2011; Castro y Zapata, 2013). En dicho esquema, a los conceptos se les asignan valores. De esta manera, es posible representar una o varias situaciones de un fenómeno o dominio disciplinar. Estas características permiten desarrollar una conceptualización para identificar conceptos, constructos y sentencias propositivas.

Los elementos básicos de un esquema preconceptual son: concepto, relación estructural, relación dinámica, evento, marco, referencia, valor, conexión, implicación y línea; estos se presentan en la Figura 1-2. El *concepto* es una idea, objeto o representación de la realidad y se expresa como un sustantivo o frase nominal del dominio disciplinar. La *relación estructural* permite asignar correspondencia entre conceptos mediante los verbos ser y tener. La *relación dinámica* permite denotar operaciones por medio de verbos de acción. El *evento* es una acción que permite afectar un concepto enfatizando en el estímulo

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

y sin especificar su causa. La *conexión* permite unir elementos (conceptos, relaciones estructurales, relaciones dinámicas o eventos) para determinar oraciones unívocas del discurso del dominio en estudio. La *implicación* es una relación necesaria de causa-efecto o precedencia entre dos relaciones dinámicas. El *valor* contiene un listado de valores que puede tomar un concepto y se usa en los esquemas preconceptuales ejecutables. La *línea* permite unir un concepto y la lista de valores en que se puede instanciar el concepto. La *referencia* representa la continuidad de una conexión, una implicación o una línea. Por último, el *marco* permite agrupar elementos de un esquema preconceptual pertenecientes a una tipología y simplificar la representación de conexiones, implicaciones y líneas.

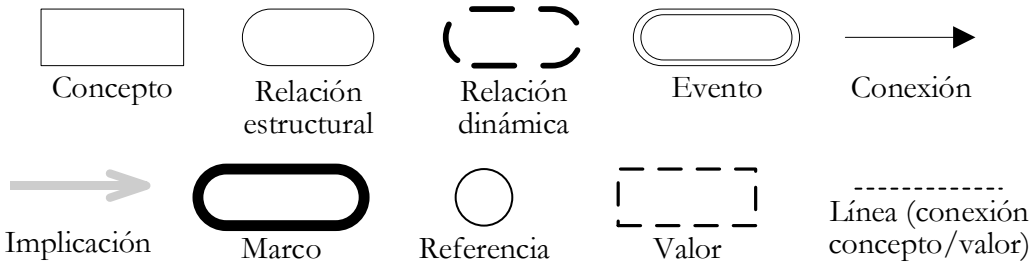


Figura 1-2. Notación del esquema preconceptual (presentes en la Tesis)
Fuente: (Zapata *et al.*, 2006; Castro y Zapata, 2013).

1.2. Ingeniería electrónica

De acuerdo con *Engineers Australia* (2001), *Bureau of Labor Statistics* (2015) e *International Labour Organization* (2004b) la *ingeniería electrónica* es la disciplina concerniente al estudio, diseño, implementación, producción, despliegue, operación, mantenimiento y gestión de dispositivos, plantas y sistemas en las áreas de sistemas eléctricos, electrónicos, de comunicación e informática. La ingeniería electrónica se relaciona estrechamente con la ingeniería eléctrica. De hecho, la *ingeniería eléctrica* es más amplia que la ingeniería electrónica (*International Labour Organization*, 2004a), debido a que un *sistema electrónico* (SE) es un tipo de *sistema eléctrico*.

La definición anterior de ingeniería electrónica se representa en el esquema preconceptual de la Figura 1-3 en los subíndices del (a) al (d), el cual es además un ejemplo del uso del esquema preconceptual y una representación inicial y parcial de la Conceptualización del EIE. Así, en las partes (a) y (b) se describe la frase: "*diseño*, *implementación*, *producción*, *despliegue*, *operación* y *mantenimiento* de dispositivos, plantas y sistemas en las áreas de sistemas eléctricos, electrónicos, de comunicación e informática", es decir el fin del quehacer del ingeniero electrónico. En la parte (a) se presenta el concepto tácito *equipo*, el cual ejecuta la acción *diseña* (verbo correspondiente al sustantivo *diseño*). Por su parte en el concepto general *sistema electrónico* (SE) se abstraen los términos: "dispositivos, plantas y sistemas en las áreas de sistemas eléctricos, electrónicos, de comunicación e informática" u otras denominaciones como hardware o aparato electrónico. La parte (a) se lee en el sentido de las flechas así: *equipo diseña sistema electrónico*. En la parte (b) se representa el conjunto de acciones que el *equipo* realiza sobre el *sistema electrónico*, en el que se abarca con el verbo *controla* los verbos operara y mantiene (correspondiente a los sustantivos *operación* y *mantenimiento*).

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Para ejercer su quehacer, el *equipo estudia* la profesión de *ingeniería electrónica*. (véase la parte c de la Figura 1-3). Esta profesión abarca el estudio del *fenómeno electrónico de señales y sistemas* con el que se determina el comportamiento de un *sistema electrónico*. El conocimiento y el comportamiento de este fenómeno se estructuran y organizan en un conjunto de *teorías del fenómeno electrónico de señales y sistemas* que se encuentran en los currículos de las universidades (MIT EECS, 2012a, 2012b, 2012c). Ejemplos de estas teorías se presentan en el recuadro *valor* de la Figura 1-3. El *estudio* de la profesión es necesario para *usar* tales *teorías explicativas y predictivas* cuando el *equipo soluciona* un *sistema electrónico*. Estas relaciones de precedencia y causalidad se representan con las *implicaciones* y se muestran en la parte (d). En esta imagen también se presenta el marco *soluciona* que agrupa las acciones sobre el *sistema electrónico* y simplifica el trazado de las *conexiones* e *implicaciones*. Además, en la parte (d) de la Figura 1-3 se muestra que el *sistema electrónico* es un tipo de *sistema eléctrico*. Por su parte, en la Figura 1-4 se presenta la relación de la ingeniería eléctrica con la electrónica y sus fundamentos comunes. La ingeniería eléctrica y electrónica tienen principios y *teorías explicativas y predictivas* bien definidas. Algunos ejemplos de tales teorías son la electromagnética, el análisis de circuitos, la lógica digital, la de autómata y la teoría de sistemas de control (Maxwell, 1873; Boylestad, 2004; Floyd, 2015; Hopcroft *et al.*, 2007; Smith *et al.*, 2006).

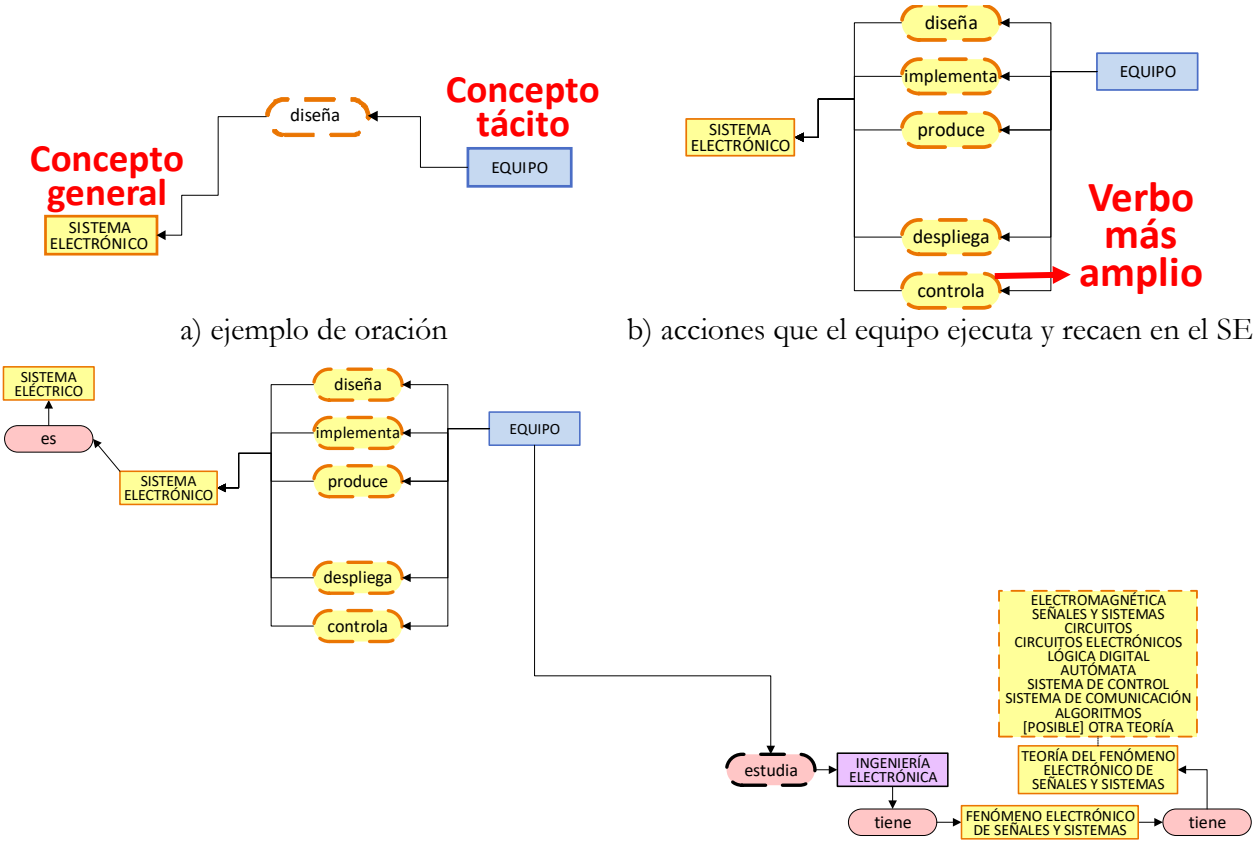
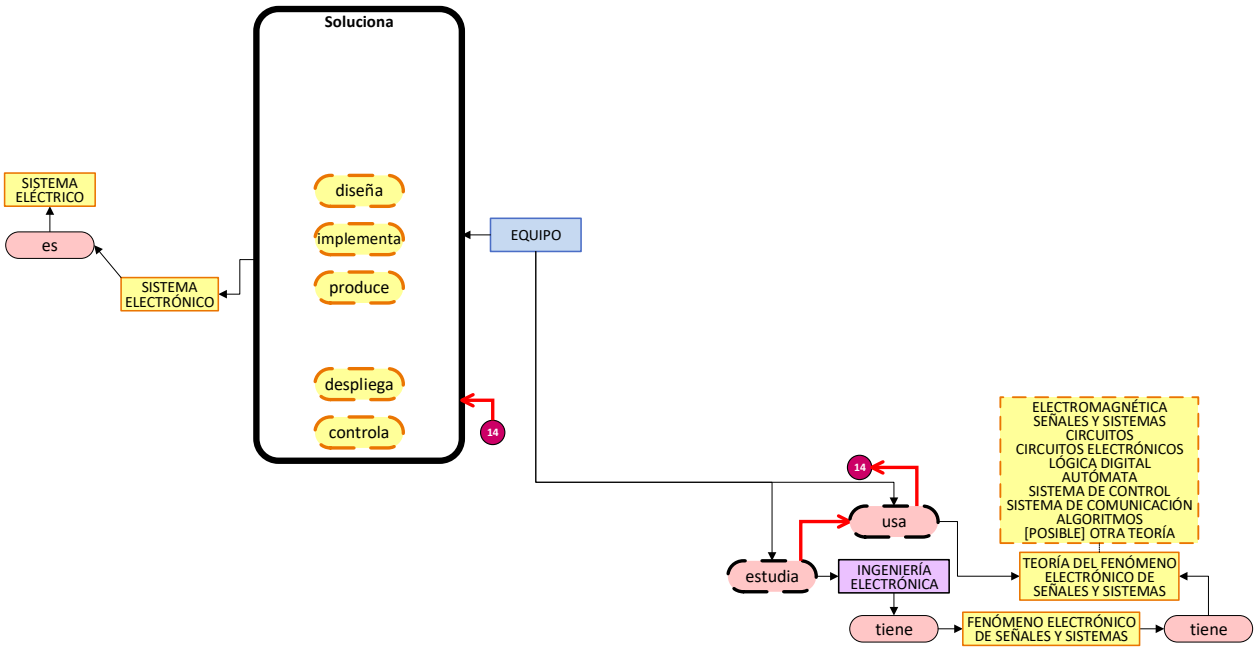


Figura 1-3 Definición de ingeniería electrónica en un esquema preconceptual (1/2)
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados



d) relaciones de causalidad para solucionar un SE

Figura 1-3 Definición de ingeniería electrónica en un esquema preconceptual (2/2)
Fuente: elaboración propia[1]

Figura 1-4 Relación de la ingeniería eléctrica con la electrónica y sus fundamentos
Fuente: elaboración propia

[1] En el resto de la Tesis se presentan ampliaciones del mismo esquema preconceptual como un hilo conductor de los temas que se tratan, como explicación parcial del producto Conceptualización de esta Tesis Doctoral y para mostrar las relaciones de los Capítulos y sus Apartados. En cada ampliación se resaltan los elementos nuevos. Además, las frases o términos de la redacción que aparecen en el esquema preconceptual de la Conceptualización o son parte de la Teoría del Esfuerzo o EIE también se destacan con *cursiva*; colocando entre paréntesis los términos controlados alternativos cuando haya lugar. En general, la *cursiva* se utiliza para destacar o introducir los términos controlados de la Tesis Doctoral.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Así, el *fenómeno electrónico de señales y sistemas* concierne a la caracterización y estudio del comportamiento del *sistema electrónico* (SE), sus partes y sus reacciones ante estímulos. Además, dentro de la ingeniería electrónica se identifica otro fenómeno que abarca esta disciplina, al cual denominamos EIE. Este fenómeno se aborda en el siguiente Apartado.

1.2.1. Esfuerzo de ingeniería electrónica

El dominio disciplinar de la *ingeniería electrónica* abarca dos fenómenos (Braha *et al*., 1998; Hubka *et al*., 1996). En este Apartado se aborda el que trata la solución de un SE. En la literatura se encuentran diferentes denominaciones para este fenómeno, tales como: diseño electrónico, diseño de SE, diseño de sistemas embebidos o co-diseño (Heath, 2002; Henzinger *et al*., 2007; Lienig *et al*., 2017; Marwedel, 2018; Vanderperren *et al*., 2008), proyectos de sistemas electrónicos (Esposito *et al*., 2015), desarrollo de hardware, de SE o de sistemas embebidos (Bunse *et al*., 2007; Kaisti *et al*., 2013; Lienig *et al*., 2017; Pearce, 2015; Perez *et al*., 2006). De acuerdo con la definición de ingeniería electrónica y la descripción que se encuentra en la literatura del fenómeno, los autores prefieren denominarlo de forma alternativa como proceso de desarrollo de ingeniería electrónica o *esfuerzo de ingeniería electrónica* (EIE). Además, de acuerdo con las definiciones de los diccionarios de la Lengua Española (RAE; 2014) y de *Merriam-Webster* (2001) y a su uso en la gestión de proyectos (PMI, 2013), *esfuerzo* es un término que abarca denominaciones como *proceso de desarrollo*, *diseño*, *implementación*, *desarrollo* y *proyecto*, entre otras. De esta manera, EIE es la forma escogida para denominar el fenómeno y la que se utiliza en el resto de esta Tesis Doctoral.

El *esfuerzo de ingeniería electrónica* (EIE) es el fenómeno en el que un *equipo soluciona* un *sistema electrónico* (SE) acorde con una *oportunidad*, bajo *restricciones* de *recursos*, *tiempo* o *costo*. Así, el EIE se identifica como el objeto de estudio de la presente Tesis Doctoral. Este fenómeno se sustenta (*tiene*) en *teorías de interés del esfuerzo* de alcance medio. En el siguiente Apartado se presenta el contexto en el que se da el EIE, mientras que en el Capítulo de antecedentes se describen las teorías de interés del esfuerzo como acercamiento actual a la definición teórica del EIE. En la Figura 1-5 se muestran elementos importantes para el EIE como: *ingeniería electrónica tiene fenómeno del esfuerzo de ingeniería electrónica* (EIE) y *tiene fenómeno electrónico de señales y sistemas*; o el *fenómeno del esfuerzo de ingeniería electrónica tiene equipo*, *tiene sistema electrónico*, *tiene recurso*, *tiene restricción*, *tiene tiempo* y *tiene costo*.

1.2.2. Industria electrónica y su relación con la industria de software

Actualmente los SE soportan procesos industriales, comerciales y organizacionales. Estos sistemas se pueden encontrar en productos como electrodomésticos, vehículos y equipos electrónicos (Ordóñez, 2005, 2012, 2017). La *industria electrónica* es más amplia que el EIE, debido a que, además, involucra la fabricación de los *componentes electrónicos* y el *producto* comercial que contienen (*tiene*) a los SE (véase la Figura 1-6). Además, en la fabricación de componentes electrónicos se incluyen otras disciplinas diferentes a la ingeniería electrónica. Una vez *producidos* tales componentes, se *integran* en el SE dentro del EIE. La industria electrónica está en constante evolución y en ella se *desarrollan nuevos productos* para el mercado, de modo que sea más competitiva e innovadora (Chesbrough *et al*., 2010, 2017, 2018). La comercialización del desarrollo de equipos electrónicos es un gran negocio mundial (Chesbrough *et al*.,

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

2010; Millward Brown, 2014, 2018). El sector de la industria electrónica y de computación es el articulador y dinamizador del desarrollo mundial, permeando a los demás sectores de la economía. Por esto, los desafíos de la industria se abordan creando procesos de producción y mejorando la calidad (Ordóñez, 2005, 2012, 2017).

Por otro lado, la industria electrónica se relaciona con la industria del software. Board (2004) da argumentos sobre una estrecha relación entre las ciencias de la computación y la ingeniería eléctrica/electrónica, ya que el *sistema de software* se ejecuta en el SE. Un SE (como una solución de soporte físico) es esencial en el desarrollo de un *sistema de software* y ambos sistemas se incluyen en un *sistema de cómputo*. Los sistemas embebidos o los computadores personales son ejemplos de *sistemas de cómputo*. Asimismo, la arquitectura de un SE incluye componentes digitales y analógicos que constituyen el medio de interacción con el *entorno* de los sistemas de cómputo. En este contexto, en algunas universidades se ofrecen programas de pregrado en ingeniería en computación, evidenciando la relación antes mencionada. El plan de estudios de tal ingeniería combina aspectos claves de la ingeniería eléctrica/electrónica y la ingeniería de software. Los estudiantes desarrollan *competencias* tanto en SE como en sistemas de software (*Columbia University*, 2001; MIT EECS, 2012b, 2012c; Virginia *Tech* ECE, 2003). Así, los esfuerzos de ingeniería electrónica y de software tienen un terreno común. En la literatura se encuentran varios ejemplos:

- Comparten una historia y fundamentos comunes. Ambas disciplinas derivan y evolucionan a partir de la ingeniería eléctrica (Sarkar *et al.*, 2010; Tatnall, 2009).
- "Las técnicas de desarrollo de software se pueden utilizar para complementar y mejorar significativamente los métodos de hardware" (Nacif *et al.*, 2011). En el Apartado 2.1 del marco teórico de esta Tesis Doctoral se presentan varios ejemplos.
- Es común que las técnicas y métodos del desarrollo de software se migren o usen en los EIE (De Micheli *et al.*, 2002).
- El desarrollo basado en objetos se aplica al diseño lógico de SE para generar una síntesis en lenguajes de descripción de hardware. Ejemplos del uso de esta técnica se logran con herramientas que permiten las notaciones y síntesis de UML, UML-RT o SysML (Sadler *et al.*, 1996; Juan *et al.*, 2005).
- Los profesionales utilizan técnicas orientadas a objetos en el EIE, sintetizando modelos de objetos con las herramientas *Simulink* o *Labview* (Kundert *et al.*, 2000).
- La comunidad de desarrolladores utiliza paradigmas algorítmicos para la síntesis y descripción de hardware o para configurar y programar sistemas embebidos (Kundert *et al.*, 2000).
- "El software y el hardware (SE) son lógicamente equivalentes" (Tanenbaum *et al.*, 2012).
- Se conocen bases de conocimiento que comparten la industria eléctrica/electrónica y la industria de software pertenecientes a la *Association for Computing Machinery* (ACM, 2006), *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE, 2010, 2015a, 2015b) y propuestas conjuntas de *International Council on Systems Engineering* (INCOSE), *Systems Engineering Research Center* (SERC) e IEEE *Computer Society* (2013).

En la Figura 1-6 se pueden ver frases de la relación entre estas industrias, como: *equipo integra componente electrónico* o *sistema de cómputo tiene sistema de software* y *tiene sistema electrónico.*

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

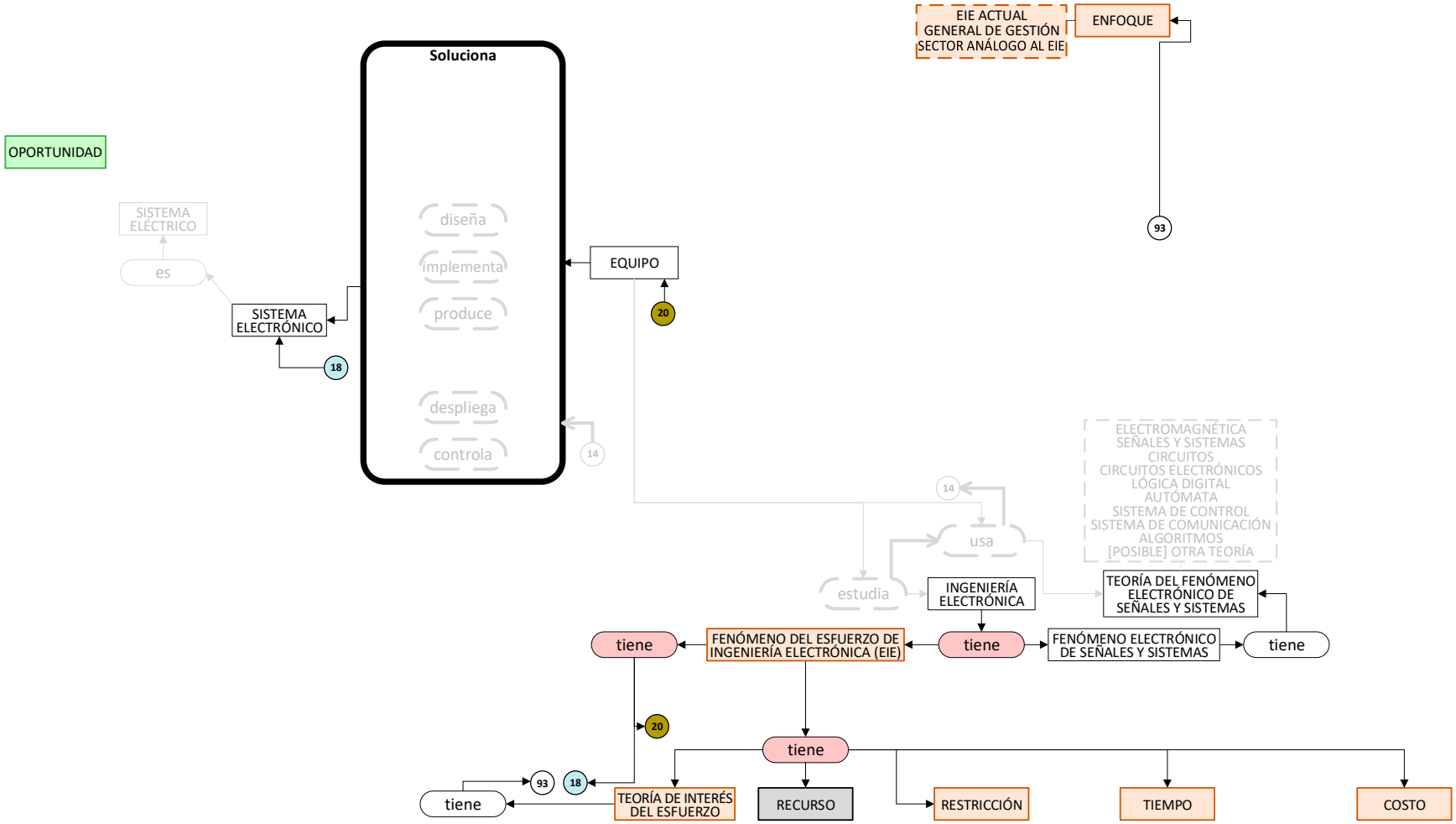


Figura 1-5. Fenómeno del EIE como parte de la disciplina de ingeniería electrónica
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

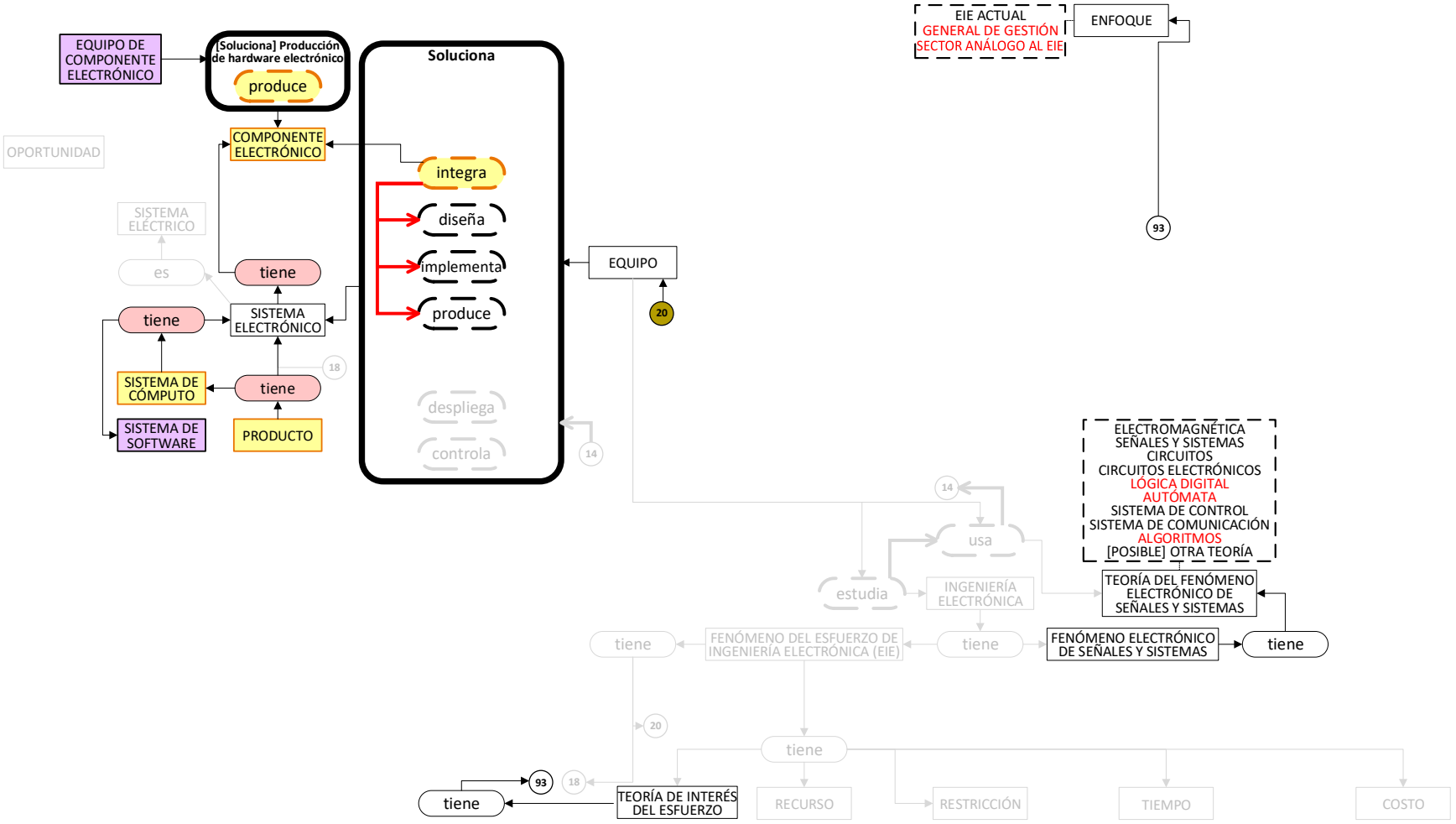


Figura 1-6. Industria electrónica y su relación con la industria de software
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

2. Antecedentes

La presente Tesis Doctoral se orienta a la formulación de una Teoría del Esfuerzo de Ingeniería Electrónica (EIE), por lo cual en este Capítulo se abordan las siguientes actividades:

- Identificar el trabajo previo relacionado con las representaciones y el ejercicio del EIE.
- Analizar el trabajo previo relacionado con el EIE desde el punto de vista de teorización.
- Describir las consideraciones pertinentes a la teorización del trabajo previo y sintetizarlo en un preconceptual.

Las descripciones sobre el dominio de estudio encontradas en la literatura son parciales. Así, en este Capítulo los antecedentes se abordan desde tres *enfoques*: el del EIE actual, el general de gestión y el de sectores análogos al EIE. Cada enfoque incluye consideraciones importantes que tratan el dominio disciplinar de la Tesis Doctoral u objeto de estudio (el *fenómeno del EIE*). Los antecedentes constituyen la descripción del nivel de teorización actual del fenómeno (véase el Apartado 1.1).

2.1. Enfoque del EIE actual

El sector de la industria electrónica y de computación es el articulador y dinamizador del desarrollo mundial, permeando a los demás sectores de la economía (Drucker, 1999). Los *equipos* abordan los desafíos de la industria *definiendo* y *aplicando formas de trabajo* para *mejorar* (*aplicar*) los procesos de producción y la calidad, lo que implica que los *equipos usan representaciones del conocimiento* como mecanismos de transferencia y asimilación que faciliten el desarrollo tecnológico (Ordóñez, 2005, 2012, 2017). Por lo tanto, en la literatura se encuentran diversas descripciones del EIE. Los autores consultados presentan sus *métodos* para abordar problemas del EIE, dar recomendaciones, identificar características esenciales del EIE o contar sus experiencias acerca del EIE.

Este *enfoque* trata sobre el fenómeno en estudio y esfuerzos relacionados con sistemas embebidos que incluyen al SE. El enfoque se desglosa en categorías de *formas de trabajo*, dependiendo de la tecnología del SE, arquitectura o del énfasis de los autores en describir alguna faceta del EIE. Estas categorías se presentan a continuación y se relacionan con la síntesis de hardware, el sistema embebido, el modelo en *V*, métodos formales del EIE y con el desarrollo y gestión del ciclo de vida del producto.

2.1.1. Métodos basados en síntesis de hardware (lógico o analógico)

La finalidad de los *métodos basados en síntesis de hardware* es la consecución de un SE que, desde el punto de vista de señales y sistemas, se usan para mantener la relación adecuada de señales de entrada y salida. La filosofía de componentes se utiliza para encapsular, integrar bloques o manejo de la complejidad con *prácticas* descendentes (*top-down*) y ascendentes (*bottom-up*) (Kundert, 2003). En tales *métodos* se utilizan principalmente técnicas de descripción del hardware, esquemáticos, simuladores y software

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

de diseño asistido por computador (Carloni *et al.*, 2006; Casamayor, 2011; Chen *et al.*, 2006; Fummi *et al.*, 2017; Gray *et al.*, 2009; Reddy *et al.*, 2016; Taubin *et al.*, 2007; Teodorov *et al.*, 2011).

2.1.2. EIE relacionados con sistemas embebidos

La segunda categoría incluye los *EIE relacionados con sistemas embebidos*. Estos esfuerzos se orientan principalmente a la consecución de funcionalidades lógicas, las cuales se pueden usar para interactuar con circuitos analógicos preestablecidos del SE. El alcance se limita al SE del *sistema embebido*, a su configuración lógica y al software que accede directamente a los recursos del SE. El esfuerzo relacionado con software más allá de este planteamiento esta fuera del alcance de este enfoque.

En esta categoría se encuentran los *métodos* y *prácticas* con base en lenguajes de programación de microcontroladores, incluyendo el uso de diagramas de flujo detallados y los *recursos* disponibles de hardware, como memoria y registros (Henzinger *et al.*, 2007). En la actualidad hay sistemas embebidos de gran complejidad (Dahmen *et al.*, 2018). Según Rompaey *et al.*, (1996), los problemas de los sistemas embebidos surgen cuando los ingenieros desarrollan sistemas de software y SE por separado. Tales autores proponen un *método* para dirigir un desarrollo articulado y proporcionando un análisis heterogéneo del sistema. El *co-diseño* se crea para el desarrollo de sistemas embebidos en los años 90. Los *métodos* de desarrollo de *co-diseño* incluyen la ingeniería de software y la ingeniería electrónica. Existen varios ejemplos de *co-diseño* (Abdelhalim *et al.*, 2011; Chong *et al.*, 2011; Daigneault *et al.*, 2012; De Micheli *et al.*, 2002; Osborn *et al.*, 2011; Pedre *et al*, 2012). Así, los ingenieros rediseñan los procesos de desarrollo, combinando desde etapas tempranas del proyecto el EIE y el esfuerzo de ingeniería de software (Franke *et al.*, 1991). Estas técnicas logran mejoras como reducciones en el trabajo invertido o en el número de iteraciones de un proyecto (De Micheli *et al.*, 2002).

2.1.3. EIE basados en el modelo en *V*

Otra categoría incluye los EIE basados en el *modelo en V*. Este modelo corresponde a un *método* con etapas en secuencia (cascada) e incluye *prácticas* descendentes (*top-down*) y ascendentes (*bottom-up*; Christie, 2008); también, se utiliza en ingeniería de software. Allí se describen actividades y resultados generados en el ciclo de vida de un producto, derivando su nombre de su representación gráfica. En la literatura se definen varias formas del *modelo en V*, algunas más detalladas que otras (Christie, 2008). En el lado izquierdo de la *V* se establecen las etapas del esfuerzo. Estas etapas se asocian con las pruebas que están en el lado derecho de la *V*, que se suelen abordar con *prácticas* de prueba. En la literatura se encuentran ejemplos de aplicaciones de desarrollo de hardware basados en el *modelo en V* (Clark, 2009; Müller-Glaser *et al.*, 2004; Porter *et al.*, 2008; Shuping *et al.*, 2008; Takahira *et al.*, 2014). El *modelo en V* tiene la desventaja del efecto bola de nieve, que acumula errores al final de la implementación si el esfuerzo incluye solo un recorrido de las etapas (Marick, 1999).

2.1.4. Métodos formales del EIE

Algunas industrias necesitan *métodos formales* que sean rigurosos y repetibles para soportar la innovación continua y los sistemas críticos. Los siguientes son ejemplos de estos *métodos*: técnicas de diseño para sistemas físicos de tiempo real y técnicas de integración a gran escala que soporten un riguroso

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

diseño electrónico para el desarrollo de circuitos integrados (Sifakis, 2013, 2018). Estos métodos se usan en industrias críticas como la aviación, la militar, la espacial y la automatización. Estas técnicas se aplican en los EIE relacionados con la Industria 4.0 y a los sistemas ciber-físicos (Jäger *et al.*, 2016).

2.1.5. EIE relacionados con el desarrollo y gestión del ciclo de vida del producto

Por último, algunos *métodos*, *prácticas* o marcos de trabajo abarcan la *solución* y *gestión* del *ciclo de vida* del *producto* (Díaz González *et al.*, 2013). Dicha cobertura abarca en algunos casos el ciclo completo desde los *requisitos* hasta la entrega que aceptan los *interesados* (Kasse, 2008). CMMI-DEV (*Software Engineering Institute*, 2010) y el método RUP con perfil específico para sistemas embebidos (*IBM*, 2013) son ejemplos de esta categoría. El primero especifica el *qué* y el segundo el *cómo* (junto al *que* en la v2.0). Las organizaciones siguen estos *métodos* con el fin de satisfacer estándares de calidad. CMMI es un modelo para la mejora y evaluación comparativa de capacidades y procesos alrededor de los sistemas de software y sistemas en general, incluyendo al SE (*Software Engineering Institute*, 2010). Tal modelo incluye áreas de proceso que contienen *prácticas* y elementos esenciales para la efectividad en el desarrollo, mantenimiento y operación de un sistema. Con CMMI-DEV v1.3 como marco de evaluación de capacidades, Sánchez-Dams *et al.* (2012, 2014) realizan un estudio a seis organizaciones para caracterizar el EIE orientado a sistemas embebidos, que sirve como estudio primario para esta Tesis Doctoral.

Las técnicas del EIE de esta categoría se basan en la gestión de proyectos y la ingeniería de software en los aspectos técnicos del desarrollo. Otros ejemplos de esta categoría son los *métodos y prácticas* ágiles orientados al desarrollo electrónico o de hardware (Carlson *et al.*, 2013), que se basan en los mismos principios descritos para el desarrollo de software, generando buenos resultados. Las *necesidades* de los *interesados* se satisfacen mediante *prácticas* ágiles como el trabajo incremental o colaborativo, en el que los diseños y las pruebas se implementan continuamente (Bertoze Lima *et al.*, 2015; Carlson *et al.*, 2013; Figueroa-Vázquez, 2017; Gustavsson *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2012a, 2012b; Kaisti *et al.*, 2013; Mosher *et al.*, 2018; Nguyen-Duc *et al.*, 2018; Punkka, 2012; Schmidt *et al.*, 2018; Wagner, 2014; Zapater *et al.*, 2013).

En la Figura 2-1 se presenta una síntesis de la *forma de trabajo* descrita en el enfoque del esfuerzo de ingeniería electrónica actual. En la Figura se pueden ver frases como: *equipo define forma de trabajo* que implica *equipo usa representación de conocimiento*. Además, se destacan las *formas de representación del conocimiento como tácito, de cobertura parcial y representación particular* que tienen las descripciones (principalmente textuales) de este enfoque. También se ajusta la relación *forma de trabajo tiene recurso*. La descripción que se encuentra en la literatura sobre el EIE no es suficiente para comprender el fenómeno, pues esta descripción se concentra principalmente en las características técnicas del EIE o de forma tácita y superficial en el enfoque relacionado con la gestión del EIE. Por lo anterior, en el siguiente Apartado se aborda por separado el enfoque general de gestión.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

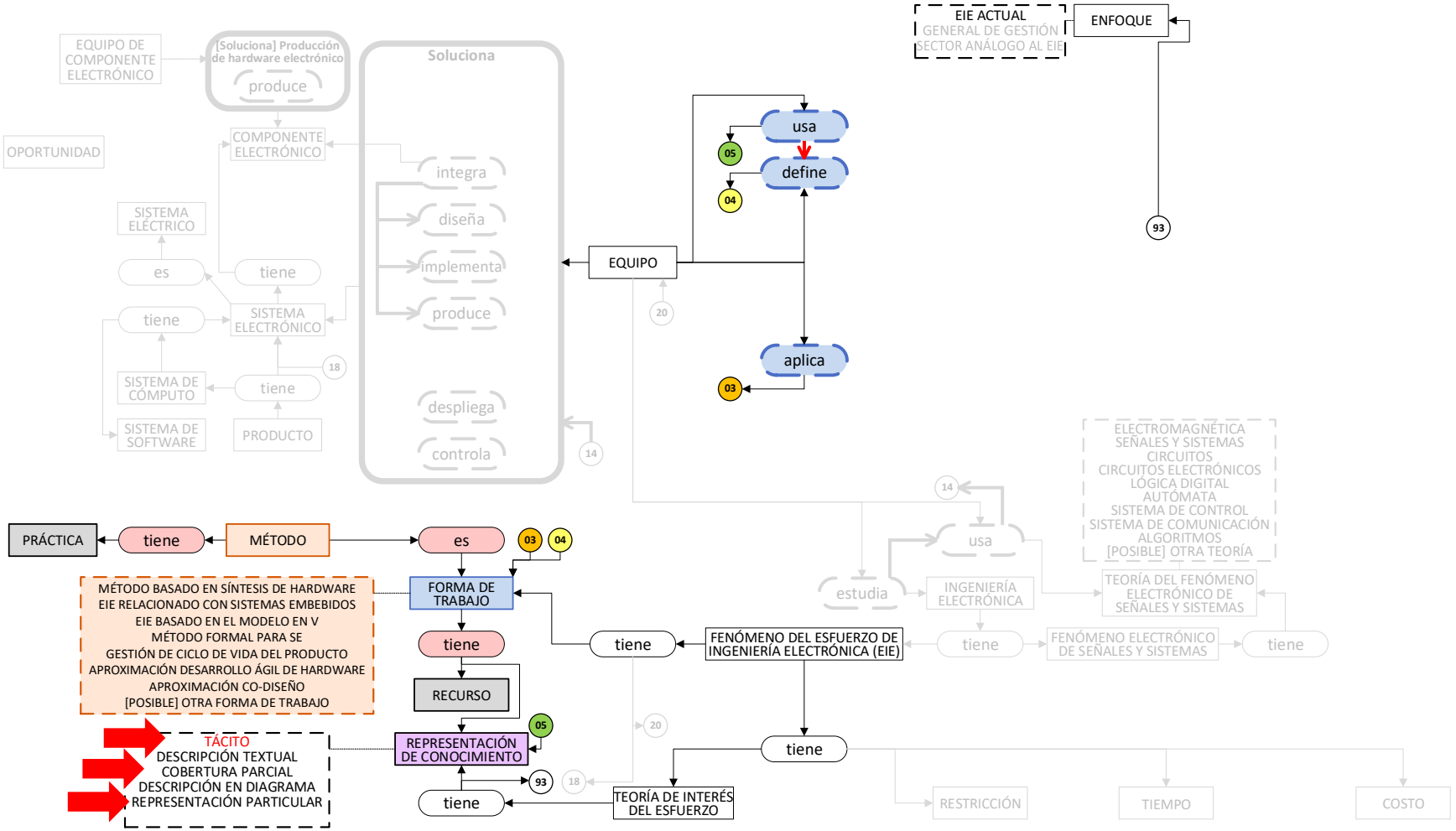


Figura 2-1. Enfoque del esfuerzo de ingeniería electrónica actual
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

2.2. Enfoque general de gestión

Profesionales de varias disciplinas utilizan estrategias para gestionar la *calidad* y los *proyectos* de sus *productos* y *procesos*. Dos disciplinas surgen a partir de estas estrategias: *gestión de proyectos y gestión de la calidad*. Estas disciplinas son generales y aplicables a cualquier ejercicio profesional o esfuerzo relacionados con calidad y proyectos, pero sin incluir las consideraciones técnicas de la profesión. En este Apartado se abordan estas disciplinas como un aporte al entendimiento del EIE.

2.2.1. Gestión de la calidad

Las organizaciones se esfuerzan por mejorar sus procesos y productos. Los profesionales (*equipos*) *usan las teorías de gestión de la calidad* para mejorar (*aplicar*) los procesos de producción (*forma de trabajo*) de una organización (Mukherjee, 2006). Según Juran (2000), la calidad tiene dos significados en el contexto de gestión. Calidad significa el conjunto de "características de los *productos* que cubren las *necesidades* del *cliente* y, por lo tanto, proporcionan *satisfacción* al *cliente*". La calidad también significa "carencia de deficiencias" en los *procesos* y productos. La *American Society for Quality* (2002) define la gestión de calidad total (TQM) como "un *enfoque de gestión* para el éxito a largo plazo mediante de la *satisfacción* del *cliente*. La TQM se basa en la participación de todos los miembros de una organización en la *mejora* de los procesos (*forma de trabajo*), los *productos*, los servicios (*forma de trabajo o recurso*) y la cultura en la que trabajan (*comportamiento*)".

Las teorías de gestión de calidad se describen en la literatura. Entre estas descripciones se encuentran la trilogía de calidad (Juran, 1986), sistema de conocimiento profundo (Deming, 1994), programa de cero defectos (Crosby, 1979), círculos de calidad (Ishikawa, 1980), las *5s* (Kaizen *Institute*, 2011) y manufactura esbelta o *lean* (*Lean Enterprise Institute*, 2009). Profesionales de la ingeniería eléctrica se benefician de estos enfoques. La guía de gestión de calidad total (TQM) para organizaciones con aprobación CECC es un ejemplo de una norma de gestión de calidad electrónica (*British Standards Institution*, 1997).

En este contexto surgen dos marcos de trabajo para la gestión de la calidad: el grupo de normas ISO 9000 y el método *Lean Six Sigma*. Estos marcos se utilizan para orientar el *trabajo* constituido *(tiene)* por *actividades* aplicables a etapas o áreas específicas del esfuerzo. ISO 9000 es un conjunto de estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO) que trata la calidad y la gestión de calidad (ISO, 2012a). En este grupo de normas se describen guías, procedimientos, *recursos*, infraestructura y herramientas para estandarizar el control de calidad de una organización o una actividad orientada a la producción de un producto o proceso. Además, en ellos se consideran las teorías de la calidad mencionadas y se tratan los requisitos para los sistemas de gestión de calidad. Por su parte *Lean Six Sigma* es un método aplicable a procesos y productos, con el cual se busca maximizar la productividad y eliminar residuos (defectos, superproducción, esperas, personal ocioso, transporte, inventario, movimientos y procesamiento extra, entre otros; Wheat *et al.*, 2003). Tal método es un marco de trabajo cuantitativo y predictivo resultado de la combinación de métodos de manufactura *lean* y *Six Sigma*, que se fundamenta en el trabajo colaborativo y el control estadístico de procesos (Motorola *University*, 2004). *Lean Six Sigma* incluye un conjunto de herramientas de la ingeniería industrial y las teorías de la

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

calidad que se organizan y son aplicables en unas etapas predefinidas (definir, medir, analizar, mejorar y controlar).

2.2.2. Gestión de proyectos

La *gestión de proyectos* "es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para satisfacer los *requisitos* del proyecto" (PMI, 2010b), que surge a mediados del siglo XX (PMI, 2010a). El *Project Management Institute* (PMI) es la organización que promueve el cuerpo de conocimiento de gestión de proyectos (PMBoK) para *gestionar proyectos* de cualquier profesión (PMI, 2010c, 2017b). En el PMBoK se recopilan los principios y las principales herramientas y prácticas para la gestión de proyectos, incluyendo las técnicas agiles de gestión. En este cuerpo de conocimiento se diferencian los *tipos de esfuerzos: proyecto y continuo* (PMI, 2013) y se tratan las generalidades de cualquier proyecto, dejando el *cómo* de los aspectos técnicos de cada profesión. Además de los proyectos, el PMI abarca un área concerniente a gestión de una organización orientada a proyectos y otras dos áreas concernientes a *sistemas de sistemas* (SdS): los *programas* como conjuntos de proyectos relacionados y los *portafolios* como conjunto de programas (PMI, 2014). El PMI también abarca otros documentos como: descripciones de prácticas, marcos de referencia o extensiones a sus estándares (PMI, 2010a). Autores como Xue *et al.* (2015) analizan y comparan planteamientos acerca de la gestión de proyectos y concluyen que el PMBoK *es* completa y extensa. En la literatura se encuentran otras propuestas como el marco de trabajo *Scrum* (Schwaber *et al.*, 2017) o los estándares PRINCE2 e ISO 21500 (Bennett *et al.*, 2017; ISO, 2012b). En tales propuestas se identifican constructos y proposiciones similares a los del PMI, pero en algunos casos variando algunas denominaciones (Henao, 2018).

2.3. Enfoque de sectores análogos al EIE

En los Apartados 1.2.2, 2.1.2 y 2.1.5 del marco teórico y antecedentes se presenta una descripción de la relación entre la industria electrónica y la industria de software. Además, desde *la ingeniería de software y de sistemas* se vienen desarrollando propuestas análogas que son importantes desde el punto de vista de contribuciones teóricas al entendimiento del EIE. Así en este Apartado se presentan aportes adicionales de estas dos disciplinas.

La *ingeniería de sistemas* es la profesión multidisciplinar concerniente a la creación de soluciones complejas (*sistema*), siendo usual que el *sistema de interés* (SdI) sea un *sistema de sistemas* (SdS; INCOSE *et al.*, 2002, 2004, 2013; Jaradat *et al.*, 2011; NCSOSE, 2017). En el contexto de la ingeniería, un *sistema* se define como la combinación de *componentes* que interactúan para realizar colectivamente una función útil (*oportunidad*), que es mayor que la suma de la utilidad independiente de sus componentes. En el sentido tradicional, los *componentes* se trazan a las ingenieras tradicionales y en sentido amplio, además, se incluye a las personas. En esta profesión el entendimiento del *fenómeno del sistema* se sustenta en *teorías de sistemas* de alcance medio (Merton, 1968) y en un conjunto de proposiciones sobre la *estructura y dinámica de sistemas* (Adams *et al.*, 2014). En este contexto, el EIE o el *esfuerzo* en general cumplen con las características de un *sistema*, por lo que son susceptibles de análisis con esta teoría. En la literatura se encuentran documentos en los que se describen desafíos y soluciones de la profesión, como los relacionados con el manejo de la complejidad, los *requisitos*, modelos, lenguajes de representación del

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

esfuerzo y de modelado (Adams *et al.*, 2011a, 2011b; INCOSE, 2014; Keating *et al.*, 2011a, 2011b; Li *et al.*, 2011; Riccobene *et al.*, 2005; Sifakis, 2014). Además, existen estándares internacionales que incluyen recomendaciones sobre el abordaje de los esfuerzos de sistemas (ISO *et al.*, 2010, 2015). Para el caso particular de la industria de *tecnologías de la información* (TI); que agrupa a las de software y electrónica, surgen marcos de trabajo como *Scaled Agile Framework* (SAFe), *Large Scale Scrum* (LeSS), *Scrum@Scale* y *Disciplined Agile* (Ambler *et al.*, 2011, 2016; Leffingwell *et al.*, 2018; LeSS *Company B.V.*, 2014; SAFe, 2011; Sutherland *et al.*, 2001, 2019). Por otro lado, para organizaciones de TI con pocas personas (de alrededor de veinticinco o menos participantes) se plantea el estándar Moprosoft y otros relacionados para abordar los proyectos, el escalado a programas y la gestión del negocio (ISO, 2016; Laporte, 2013; Oktaba *et al.*, 2005, 2009). Estas propuestas dan aportes similares y compatibles a los que se describen en Apartados anteriores. Los aportes nuevos se refieren principalmente a la interpretación de *esfuerzos* de mayor *ámbito*, con una escala mayor del SdI (en particular el SE) o del esfuerzo.

Hay esfuerzos de diferentes tamaños. Por un lado, se conciben esfuerzos de *equipos* unipersonales de corto *costo*, *tiempo* y *alcance* y por el otro se abarcan SdS (portafolios y programas). Los esfuerzos de SdS comprenden varios equipos de trabajos o personas que trabajan en subsistemas. Estos marcos de trabajo se manejan en varios ámbitos del *esfuerzo*. El ámbito cambia de acuerdo con el proceso que se esté analizando y con el nivel al que pertenezca dentro de la estructura de la *organización* o al *sistema de interés* (SdI). Así, por ejemplo, en el ámbito de un esfuerzo a nivel de programa, el *equipo soluciona* el SdI a un nivel de *integración de subsistemas*. Los marcos de trabajo y estándares relacionados con SdS se orientan a la gestión de la complejidad subyacente y la integración vertical de personas, recursos y procesos en la *organización del equipo* que *soluciona* un SdI. Además, en este enfoque se hace énfasis en el *entorno al sistema*, lo que implica incluir las *perturbaciones* que se producen en el contexto del *esfuerzo*. También, se considera la *organización del equipo* que *tiene* al *equipo*, para la coordinación de los esfuerzos concurrentes de subsistemas y el alineamiento con las directrices organizacionales. En general, por su naturaleza de escalado, los marcos de trabajo de SdS contienen descripciones que se refieren a fenómenos más allá del *esfuerzo* de un SdI. Estas descripciones quedan fuera del alcance de esta Tesis Doctoral y se limitan a su relación con el EIE.

En esta Tesis Doctoral, la *ciencia del diseño*, de acuerdo con su definición, se considera una aproximación independiente de la *ingeniería de sistemas*. En esta aproximación se aborda el ciclo de vida de un producto (SdI), desde su concepción hasta su disposición final, aplicable a cualquier disciplina y centrada en la parte creativa del esfuerzo (Braha *et al.*, 1998; Fuller, 1957; Gregory, 1966; Hatchuel *et al.*, 2008; Hubka *et al.*, 1996; Jonassen, 2000; Suh, 1998; Walls *et al.*, 1992). La *ciencia del diseño* incluye el diseño sistemático, el estudio científico del diseño, la innovación y el desarrollo de nuevos productos, que dependiendo de la vertiente o autor se cambia su denominación.

Otro aporte adicional se relaciona con la representación de conocimiento del esfuerzo de ingeniería de software o de sistema. El *Object Management Group* (OMG) propone el estándar Software and Systems Process Engineering Meta-Model 2.0 (SPEM 2.0; OMG, 2008), que sirve para definir métodos, prácticas o procesos (formas de trabajo) de software y sistemas en general. SPEM 2.0 está cerca del objetivo de esta Tesis Doctoral, debido a que los métodos de desarrollo de ingeniería de software y sistemas se pueden modelar con él. Este estándar se puede utilizar para describir esfuerzos de otras profesiones (Ellner *et al.*, 2010; Fernandes *et al.*, 2012; Gallina *et al.*, 2014). En el estándar se especifica un lenguaje

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

para procesos, métodos y prácticas, se identifican elementos de representación, se establecen jerarquías y se definen conceptos y relaciones. Los metodólogos pueden usar el estándar para representar aspectos técnicos del esfuerzo. Otro estándar relacionado es el ISO 24744, que tiene una finalidad similar a SPEM 2.0 (ISO, 2014). BPMN es otro estándar que se propone en el OMG para la descripción de procesos (esfuerzos) de negocios, por lo que tiene una cobertura menor que SPEM 2.0 o ISO 24744 (OMG, 2013).

2.3.1. Comunidad *Semat* y el estándar de la Esencia

El estándar de la Esencia surge como una evolución a las descripciones de métodos para ingeniería de software y a las normas para describir procesos (Jacobson *et al.*, 2019). Una comunidad denominada *Semat*, conformada por personalidades de la industria, practicantes y académicos, y soportado por universidades y empresas propone este estándar (*Semat*, 2014). *Semat* es el acrónimo en inglés de *Métodos y teoría de la ingeniería de software* que describe la finalidad de la organización y que busca la reformulación y un consenso mundial de los fundamentos de la ingeniería de software (Jacobson *et al.*, 2012b). La Esencia es un estándar del OMG (OMG, 2014, 2018). En este estándar se abarca la finalidad de SPEM 2.0 e ISO 24744. El estándar consta de un núcleo (constructos y proporciones específicos de la ingeniería de software) y un lenguaje para definir tipologías, relaciones, extensiones y una notación (constructos y proporciones genéricos del esfuerzo). En el estándar, además, se describe la manera de representar los *métodos* que son *composiciones de prácticas* y que se definen en términos de elementos del núcleo y el lenguaje. El lenguaje propuesto es genérico porque se puede utilizar para representar otros tipos de esfuerzos (OMG, 2018). En esta Tesis Doctoral se considera la Esencia, puesto que, es un punto de partida para la *Teoría del EIE* o del *esfuerzo* de otras disciplinas (Levenchuk *et al.*, 2013, 2015).

2.3.1.1. El núcleo de la Esencia de *Semat*

El núcleo es un conjunto de conceptos y sus relaciones, que son esenciales y siempre están presentes en cualquier esfuerzo de ingeniería de software, por lo que desde el punto de vista teórico son constructos y proposiciones. El núcleo se muestra en la Figura 2-2 y se describe usando un subconjunto de elementos del lenguaje.

Los constructos del núcleo se organizan en tres *áreas de interés*: *cliente*, *solución* y *esfuerzo*. Las áreas de interés cliente y *solución* se relacionan con el dominio del problema y la solución que se aborda, respectivamente. El área de interés esfuerzo se refiere a los elementos involucrados en la *gestión de la solución* y el cliente. Las tipologías de los constructos del núcleo son: *alfa*, *espacio de actividad* y *competencia*. Cada área de interés contiene un pequeño número de este tipo de constructos. Los *alfas* son las cosas esenciales con que siempre trabajan los ingenieros de software. Hay siete alfas con los que se mide el progreso y la salud del *esfuerzo* de ingeniería de software y que se muestran en la parte (a) de la Figura 2-2. El *progreso* y *salud* del esfuerzo se define mediante *estados* cualitativos con los que se determina el avance al cumplir las *listas de verificación* de cada estado (véase la parte (b) de la Figura 2-2). En la parte (b), además, se ejemplifican las características accionable y práctico del estándar, mediante el uso de *tarjetas* con descripciones sucintas para la representación de constructos y proposiciones (Jacobson *et al.*, 2012b). Los *espacios de actividad* son meta-actividades genéricas que representan las cosas esenciales para hacer y se presentan en la parte (c) de la Figura 2-2. Los espacios de actividad incluyen descripciones

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

de los desafíos que enfrentan los equipos o interesados durante el *esfuerzo* de ingeniería de software. Por otro lado, una *competencia tiene* las *aptitudes*, *comportamientos*, *actitudes* y *conocimientos*, que una *persona requiere* para que *realice* un tipo de *trabajo*. Las competencias incluidas en el núcleo son las esenciales requeridas para llevar a cabo un *esfuerzo* de ingeniería de software y se muestran en la parte (e) de la Figura 2-2.

2.3.1.2. Elementos principales del lenguaje de la Esencia

En la Figura 2-3 se ilustra una descripción conceptual del lenguaje de la Esencia, se representan los elementos principales del lenguaje y sus asociaciones más importantes. Los elementos centrados en la Figura se utilizan para describir un núcleo disciplinar, que en el caso del Apartado anterior corresponden al *esfuerzo*[2] de ingeniería de software. El resto de los elementos que se muestran son el símbolo del lenguaje, el producto de trabajo, la actividad, el patrón, el recurso, la práctica y el método.

El *producto de trabajo* es un elemento concreto con el que se debe trabajar y una evidencia para los estados de un alfa. Por su parte, las *actividades* asociadas con los espacios de actividad son una guía explícita sobre cómo producir o actualizar productos de trabajo. Con una actividad una *persona competente realiza* una contribución o satisface por completo el cumplimiento de uno o varios estados. Los estados de un alfa y las actividades incluyen la semántica dinámica del lenguaje. Así, un equipo puede orientar su *trabajo* (como resultado del *conjunto de actividades*) a la consecución de las metas que quiere alcanzar. Por otro lado, los *patrones* y los *recursos* son conceptos genéricos que se pueden asociar con cualquier elemento del lenguaje. Los patrones se utilizan para organizar un conjunto de elementos del lenguaje que conformen una estructura arbitraria significativa. A su vez, un recurso es un insumo relacionado con algún elemento del lenguaje que no necesita traducción a la notación de la Esencia. En la Figura 2-3 se muestran un ejemplo de un patrón y otro de un recurso.

Los elementos de la Esencia adicionales al núcleo constituyen un *mecanismo de extensión*, con el cual las personas pueden representar las peculiaridades de sus esfuerzos. Por ejemplo, un usuario puede seleccionar competencias del núcleo y proponer *sub-alfas* subordinados a alfas o actividades relacionadas con espacios de actividad para describir una *práctica* de un esfuerzo particular. En la Esencia, una *práctica* se define como "un enfoque repetible para hacer algo, con un *propósito* en mente" (OMG, 2018). A su vez, un *método* es la descripción de una *forma de trabajo* que *tiene* "un *núcleo* y un conjunto de *prácticas* (explícitas y claramente diferenciables) para cumplir un *propósito* específico" (OMG, 2018).

[2] En el estándar de la Esencia el termino *esfuerzo* se utiliza con dos significados diferentes. El primero se refiere al fenómeno en el que un equipo soluciona un *sistema de interés* (*sistema software* para el caso de la Esencia), siendo éste el sentido utilizado en esta Tesis Doctoral. El segundo se refiere al nombre del área de interés *esfuerzo*, la cual agrupa a los elementos relacionados con la *gestión*. Además, la palabra *esfuerzo* se utiliza ocasionalmente en remplazo de EIE, debido a que es una palabra más general que EIE y por lo tanto lo que se describe en relación con ella aplica también para el EIE.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

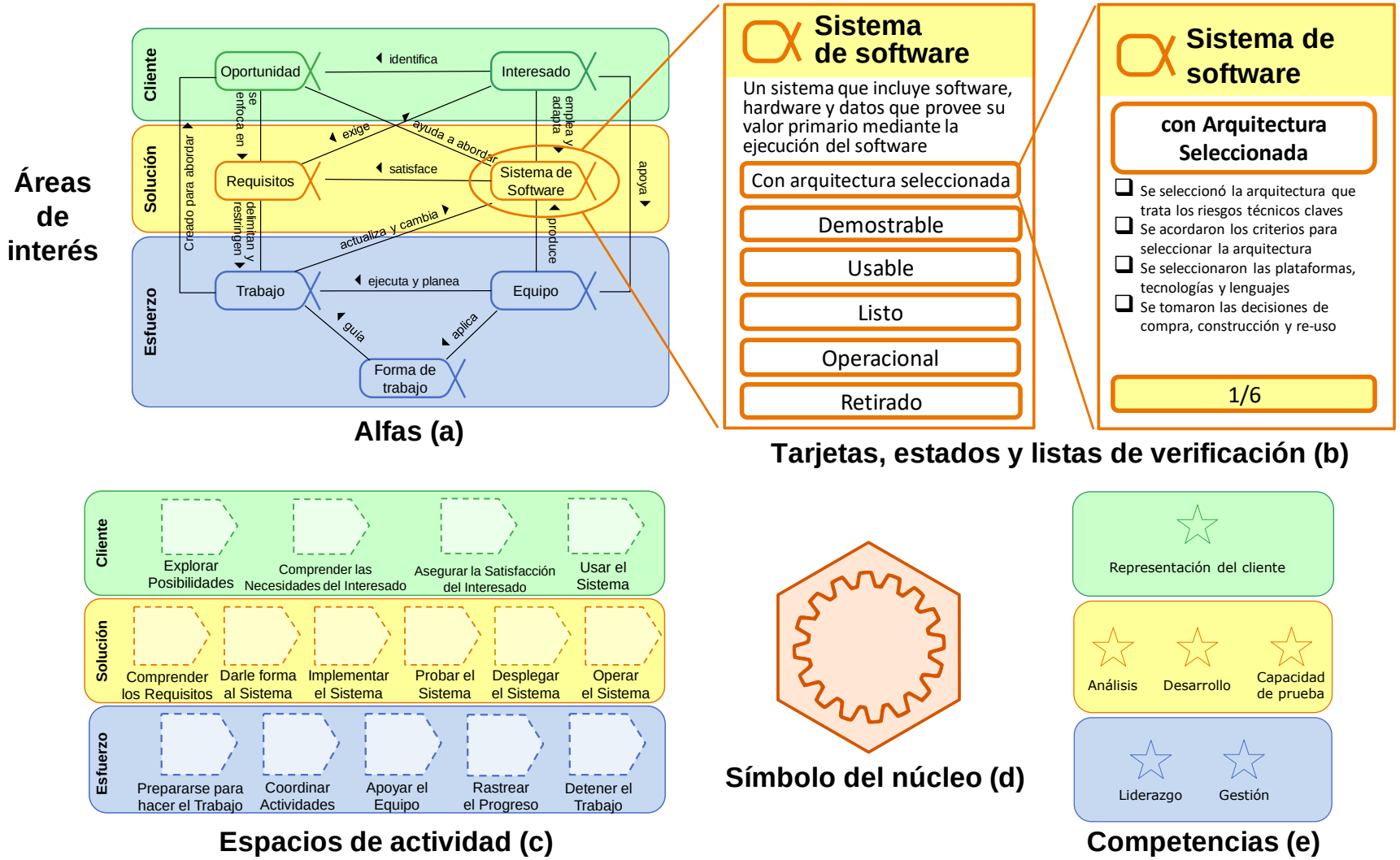


Figura 2-2. El núcleo de la Esencia de *Semat*
Fuente: adaptación de figuras de la Esencia (OMG, 2018)

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

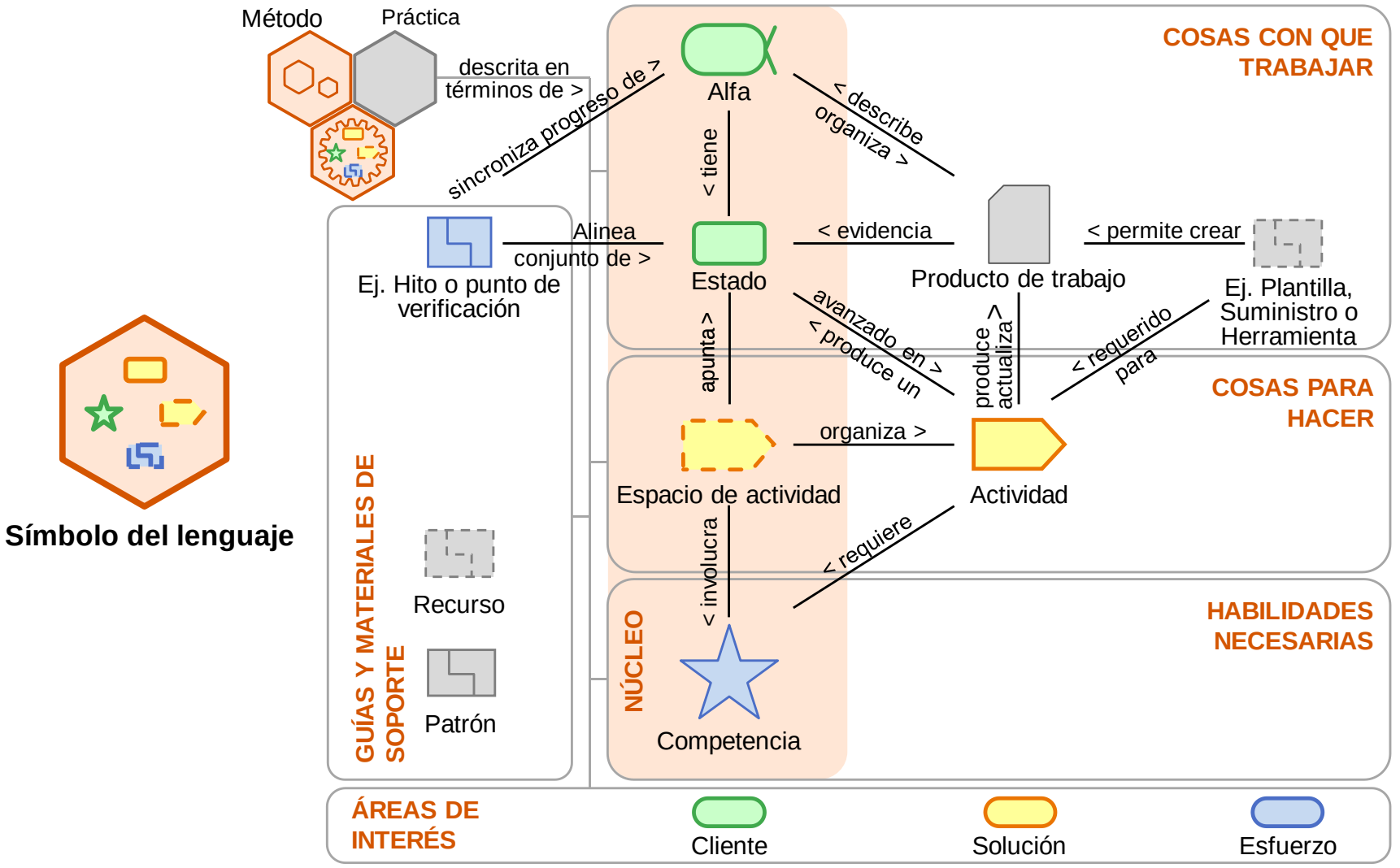


Figura 2-3. Elementos principales del lenguaje de la Esencia
Fuente: elaboración propia en adaptación de figuras de la Esencia (OMG, 2018)

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

2.3.2. Extensión de la Esencia

Es posible realizar varios tipos de *extensiones* a la Esencia. En el estándar (OMG, 2018) se presentan los mecanismos y Jacobson *et al.* (2019) da una explicación de su uso. En la literatura se encuentran ejemplos de extensiones (Liu, 2018). Por pertinencia con la presente Tesis Doctoral se propone una clasificación de dos categorías de *extensiones*: en la que se respeta el núcleo y en la que se propone modificarlo. La primera, se describe en el Apartado anterior como *mecanismo de extensión*.

Las extensiones que no respetan el núcleo tienen el inconveniente de perder el terreno común y el consenso respecto del esfuerzo de ingeniería de software (Jacobson *et al.*, 2015a). Por lo tanto, el segundo tipo de extensión tiene aplicación con dominios disciplinares diferentes. A continuación, se mencionan extensiones que son de interés para esta Tesis Doctoral.

En el anexo B de la Esencia se describe *Kuali-Beh*; Allí se proporcionan cuatro sub-alfas adicionales para que los equipos expresen su *forma de trabajo* y el progreso de su *trabajo* (OMG, 2018). Desde el punto de vista teórico *Kuali-Beh* se destaca por el tratamiento que se le da a los métodos y prácticas. En este sentido Barón-Salazar (2019) extiende la caracterización de las *propiedades* de los métodos a las prácticas. Así, la práctica y el método *son* manifestaciones de la *forma de trabajo* que *tiene propósito y tiene propiedades* (*coherencia*, *consistencia* y *suficiencia*). Además, Barón-Salazar (2019) propone una caracterización que considera el *propósito* de una práctica (*acción*, *destino* y *aproximación*) para nombrarla adecuadamente.

Por su lado, Berre *et al.* (2015) presenta un ejemplo de extensión de la Esencia para ingeniería de negocios. Dicha propuesta tiene la misma organización y jerarquía del estándar de la Esencia, con la adición o reemplazo de nuevos constructos del dominio disciplinar particular (núcleo). Berre *et al.* (2015), además, sugiere la idea de aplicar la Esencia a disciplinas como la *ingeniería electrónica* (hardware) e ingeniería de sistemas. De forma similar en los capítulos rusos de *Semat* y e INCOSE se propone en conjunto una adaptación de la Esencia para la ingeniería de sistemas, mediante el análisis de estándares internacionales de SdS (Levenchuk *et al.*, 2013, 2015). En este sentido, Jacobson *et al.* (2015b) presentan una discusión sobre la aplicación de la Esencia a SdI y SdS. Para el caso del marco de trabajo de TI de SdS *Disciplined Agile* (DA), Ambler (2019) presenta dos prácticas con el lenguaje de la Esencia, mostrando la intención de acoger el estándar para DA. Por otro lado, Simonette *et al.* (2016, 2017) analizan la correlación de la Esencia con el PMBoK y concluyen que son compatibles y que la Esencia es un terreno común que permite la *extensión* de prácticas de *esfuerzos tipo proyecto* en el contexto del PMBoK. Por su parte, Zapata y Henao (2016, 2017) sugieren la necesidad de incluir un alfa adicional de riesgo. Ellos justifican esta inclusión debido a que el riesgo cumple con la definición de alfa como un elemento siempre presente en los esfuerzos de ingeniería de software. De forma similar Henao (2018) y Santiago *et al.* (2016) para acortar la distancia entre estándares relacionados con gestión de proyectos y la Esencia, proponen hacer explícitos los conceptos: calidad, *costo* y *tiempo*. Al hacer uso de la Esencia como marco de trabajo, tales autores proponen representar estos conceptos como alfas adicionales de un nuevo núcleo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

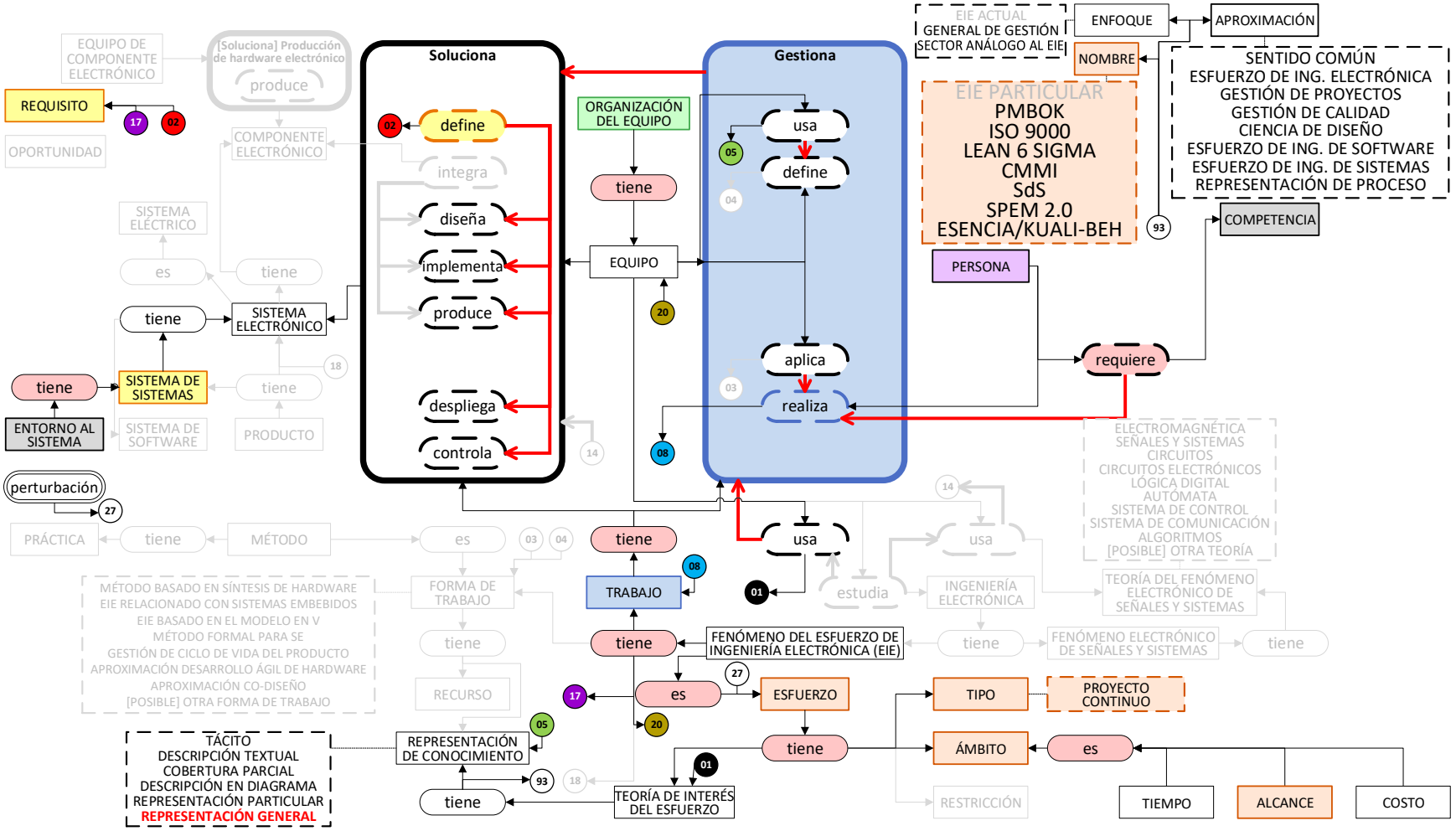


Figura 2-4. Enfoques: general de gestión y de sectores análogos al EIE
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

En la Figura 2-4 se presenta la síntesis de los enfoques relacionados con el EIE. Se listan algunos nombres representativos de tales *enfoques* y las *aproximaciones* que se abordan. Estas descripciones conforman las *teorías de interés del esfuerzo* de alcance medio del EIE, que de acuerdo con Merton (1968), tienen una *representación del conocimiento* principalmente *textual* y en algunos casos con *diagramas*. Sin embargo, la Esencia y SPEM 2.0 tienen una *representación general*. El s*istema de cómputo* se remplaza con su generalidad *sistema de sistema* y se explicita que el *equipo define* los *requisitos*, lo que *les permite dirigir* el *trabajo de solución* de un SE. También se identifica que el *esfuerzo tiene ámbito*. A su vez el *costo, tiempo y alcance* conforman (*son*) el *ámbito* del *esfuerzo*. Esto quiere decir que el resto de los elementos identificados dentro del *esfuerzo* se delimitan en *costo*, *tiempo* y *alcance*.

2.4. Análisis crítico de antecedentes

En este Apartado, con base en el esquema preconceptual como representación gráfica de los antecedentes, se presenta un análisis comparativo de las debilidades y fortalezas de estas propuestas (véase la Figura 2-5). En la Figura se resaltan los conceptos que representan diferencias entre las aproximaciones y como ejemplo se caracteriza PMBoK. El análisis comparativo de los enfoques evaluados se presenta en la Tabla 2.1. En la parte superior de la Tabla se ilustran los enfoques y nombres representativos de las aproximaciones que se analizan, en la parte izquierda se muestran los conceptos organizados jerárquicamente y entre ellas la valoración correspondiente. Se utiliza el código de colores del semáforo con la siguiente interpretación: verde como fortaleza, naranja como regular y rojo como debilidad. Se aclara la doble valoración del concepto tácito. La primera valoración se refiere a sí en la aproximación se describe explícitamente los conceptos que incluye (explicito ✗) o no (representación tácita ✔). La segunda valoración se refiere a si en la aproximación se cubren todos los casos del esfuerzo (✔) o solo casos particulares (✗).

En relación con el enfoque del EIE actual, algunas partes de las descripciones son tácitas y subjetivas. Como resultado, surgen discrepancias terminológicas entre personas, equipos u organizaciones (Appleyard *et al.*, 2001). Los autores consultados representan el EIE con descripciones textuales y diagramas, sin utilizar un mecanismo general de representación. Así, los esfuerzos se proponen con sus propios criterios, con un carácter particular y parcial, abordando principalmente las consideraciones técnicas del EIE y dejando por fuera otras circunstancias del esfuerzo. Por ejemplo, algunos autores que tratan sistemas embebidos dejan de describir la gestión de tareas o requisitos de personal. Otros de co-diseño excluyen de su propuesta la interacción con entornos físicos y la interdependencia entre el EIE y el software. Los autores de la aproximación ágil abordan parcialmente el EIE, por lo tanto, su implementación se debe articular con el trabajo de otras aproximaciones.

Para el caso del enfoque general de gestión, la descripción en la literatura se hace principalmente textual, sin un lenguaje formal sintético. Las descripciones se complementan con diagramas, figuras, cálculos y tablas. Sin embargo, la identificación nuclear de conceptos, constructos y proposiciones está inmersa en la descripción de los estándares o marcos de trabajo que se incluye en este enfoque. Otra característica de las descripciones de este enfoque es que se dejan a cada profesión las consideraciones técnicas del sistema de interés (en particular el SE). Así por ejemplo en el PMBoK se indica que el

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

"*equipo* se compone de individuos procedentes de diferentes grupos, con *conocimientos* en una materia específica o con un conjunto de *habilidades* específicas para *realizar* el *trabajo* del *proyecto*" (PMI, 2013), sin indagar en tales *conocimientos* o *habilidades* técnicas específicas (*competencias*).

En la aproximación de SdS, la descripción tiene características similares al del enfoque de gestión, salvo la propuesta de Levenchuk (2015) que se extiende desde la Esencia. En esta aproximación, además, se abarca el aspecto técnico de un sistema de interés desde las generalidades u orientándolo a la integración de SdS y al escalado, sin llegar a las particularidades del SE. Sin embargo, en este aporte se incluye poco el *ámbito*, por lo que se complementa con el enfoque general de gestión.

En cuanto a las aproximaciones relacionadas con la representación del esfuerzo como SPEM, ISO 24744 y BPMN, existe un planteamiento genérico sin definiciones particulares del fenómeno del EIE o de otra profesión. En este sentido, Bendraou *et al.* (2007) identifican algunos desafíos de SPEM que se pueden resumir de la siguiente manera. En el estándar se pasan por alto algunos constructos y proposiciones esenciales del esfuerzo de ingeniería de software y de sistemas. A su vez, los profesionales sólo pueden usar el metamodelo del estándar como una forma de instanciar procesos. También, es difícil comparar la forma de trabajo de los equipos; además, con el estándar es difícil establecer las diferencias y similitudes entre procesos y métodos.

De acuerdo con los conceptos y relaciones identificadas y entre las aproximaciones analizadas, la Esencia es la propuesta más completa para abordar el esfuerzo (en analogía con el EIE). A pesar de esto, el EIE tiene sus propias características que difieren de otros enfoques teóricos, relacionados principalmente con el *sistema de interés* particular. La esencia se concibe para la ingeniería de software y sus características (Jacobson, 2010), por lo que la implementación en el EIE sería parcial. Un aporte significativo de la Esencia respecto de las otras descripciones es la diferenciación entre la abstracción (idealizada) de elementos siempre presentes (constructos teóricos del dominio como alfas y espacios de actividad) y las manifestaciones (instancia) y evidencias concretas (productos de trabajo y actividades) de un esfuerzo particular. A pesar de los beneficios de la Esencia, en el estándar se aborda indirectamente el riesgo y las consideraciones de ámbito del tiempo y del costo son tácitas. Estos conceptos y sus relaciones se identifican y cubren en otras aproximaciones.

En el resto del Capítulo se presenta la problemática actual y los cuestionamientos sobre cómo abordar el *fenómeno del EIE* con una propuesta coherente con la literatura.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

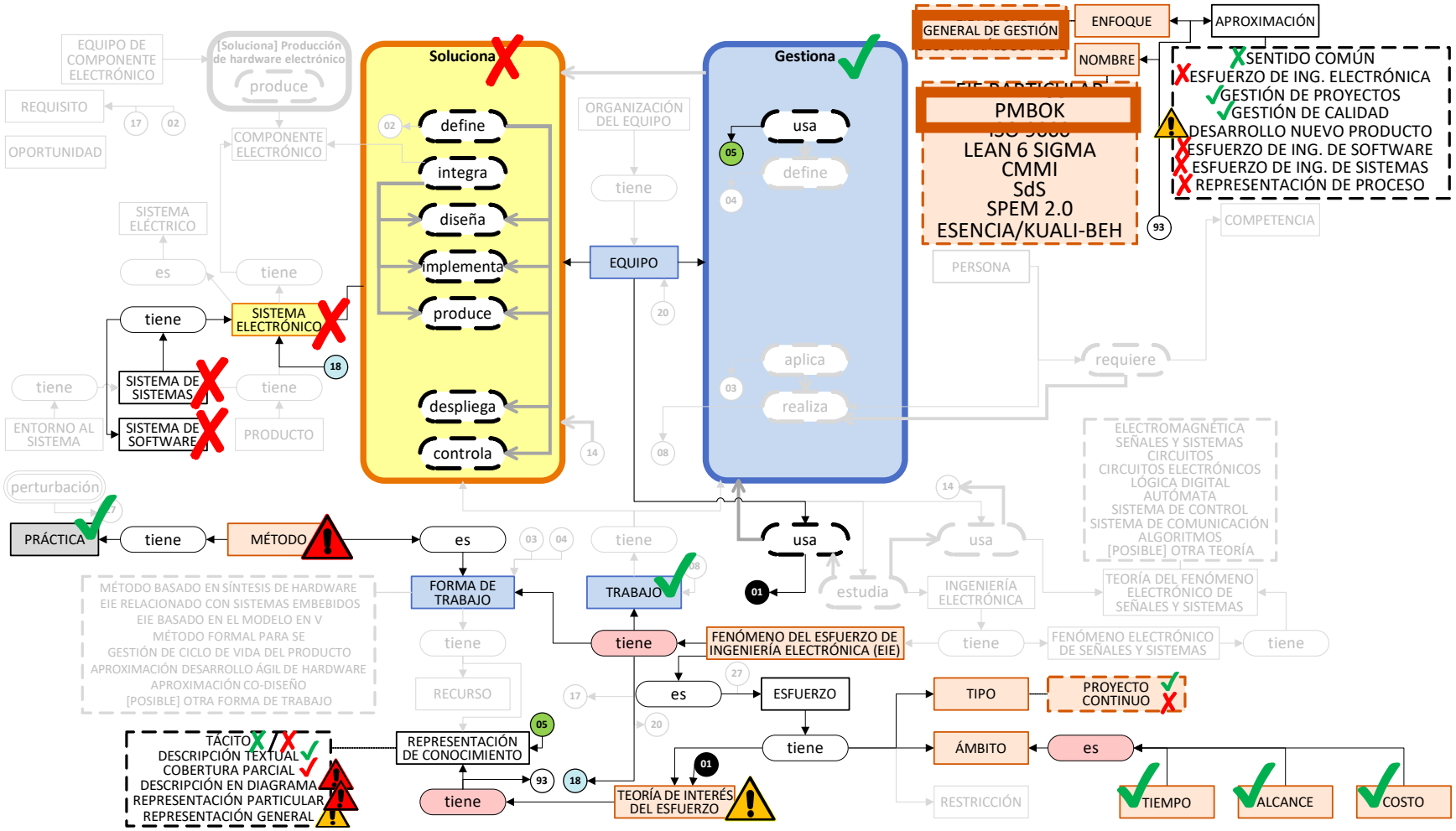


Figura 2-5. Ejemplo de fortalezas y debilidades de la aproximación gestión de proyectos
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla 2.1. Análisis crítico de antecedentes representativos
Fuente: elaboración propia

ESFUERZO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	TEORÍAS DE INTERÉS DEL ESFUERZO (ALCANCE MEDIO)	ENFOQUE	GENERAL DE GESTIÓN			EIE ACTUAL	SECT. ANÁLOGOS AL EIE				?
		NOMBRE	PMBOK	ISO 9001	6 SIGMA	OTROS EIE	CMMI	SdS	SPEM 2.0	ESENCIA	
	APROXIMACIÓN	SENTIDO COMÚN	✗	✗	✗	⚠	✗	✗	✗	✗	✗
		GESTIÓN DE PROYECTOS	✓	✗	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	✓	✓
		GESTIÓN DE CALIDAD	✓	✓	✓	⚠	✓	⚠	⚠	⚠	✓
		CIENCIA DE DISEÑO	⚠	✓	✓	⚠	⚠	⚠	⚠	✓	✓
		INGENIERÍA ELECTRÓNICA	✗	✗	✗	✓	⚠	⚠	⚠	⚠	✓
		INGENIERÍA DE SOFTWARE	✗	✗	✗	⚠	✓	✓	✓	✓	✓
		INGENIERÍA DE SISTEMAS	✗	✗	✗	⚠	✓	✓	✓	⚠	✓
		REPRESENTACIÓN DE PROCESO	✗	⚠	⚠	⚠	✗	✗	✓	✓	✓
	TEORÍAS DE INTERÉS DEL ESFUERZO (completitud)		⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	✓
	REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO	TÁCITO (representación/cobertura)	✗/✗	✗/✓	✗/✓	✓/✗	✗/✓	✗/✓	✗/✓	✗/✓	✗/✓
		DESCRIPCIÓN TEXTUAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		COBERTURA PARCIAL DEL EIE	✓	✓	✓	✓	⚠	⚠	⚠	⚠	✗
		DESCRIPCIÓN EN DIAGRAMA	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	✓	✓	✓
		REPRESENTACIÓN PARTICULAR	⚠	⚠	⚠	✓	✓	⚠	✗	✗	✗
		REPRESENTACIÓN GENERAL	⚠	⚠	⚠	✗	✗	⚠	✓	✓	✓
	ÁREAS DE INTERÉS	SOLUCIÓN	✗	✗	✗	✓	⚠	⚠	⚠	✗	✓
		GESTIÓN	✓	✓	⚠	⚠	✓	⚠	⚠	✓	✓
		PERSONALIZACIÓN	✓	⚠	✓	✓	✓	⚠	⚠	✓	✓
	TRABAJO (Qué)		✓	✓	✓	✓	✓	✓	⚠	✓	✓
	FORMA DE TRABAJO (Cómo)	PRÁCTICA	✓	✗	✓	⚠	⚠	⚠	✓	✓	✓
		MÉTODO	⚠	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
	TIPO	PROYECTO	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
		CONTINUO	✗	✓	✗	✓	✓	⚠	✓	✓	✓
	ÁMBITO	TIEMPO	✓	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	✓
		ALCANCE	✓	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	✓	✓
		COSTO	✓	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	⚠	✓

Símbolo	Significado
✗	Sin característica indeseable
✗	Sin característica deseable
✓	Incluye característica deseable
✓	Incluye característica indeseable
⚠	Incluye caracteristica de forma incompleta
⚠	Incluye caracteristica con falencias significativas
	Fortaleza
	Regular
	Debilidad

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

2.5. Problemas en los esfuerzos y el EIE

En todas las disciplinas se invierte en investigación como una forma de mejorar procesos y productos. Los proyectos en todo el mundo en algún momento tienen desafíos de gestión. En la literatura se reportan proyectos de diversas disciplinas con problemas de sobrecostos, cambios en el alcance, retrasos o cancelación del esfuerzo (Cantarelli *et al.*, 2012a, 2012b; Flyvbjerg *et al.*, 2002, 2018; Flyvbjerg, 2013, 2018). Esta situación de la gestión de proyectos parece ser un problema global de varias disciplinas (Blomquist *et al.*, 2010; Gauthier *et al.*, 2012; Flyvbjerg, 2018; Koskela *et al.*, 2002). Flyvbjerg (2018) en el contexto de tecnologías de la información (TI) menciona que: para gobiernos y organizaciones "entre los proyectos de mayor importancia se encuentran que los del tipo de TI son los más difíciles de realizar. Estos tienen el peor desempeño medido en sobrecostos, retrasos, beneficios y demás indicadores". Esta situación se refleja en el reporte *CHAOS*. Aproximadamente cada dos años en este reporte se presenta una encuesta acerca de los proyectos del sector que fallan, tienen desafíos o son exitosos (Standish *Group*, 1995, 2010, 2013, 2015, 2018).

El reporte *CHAOS* se considera una medida de referencia en la industria de TI (Jørgensen *et al.*, 2006). En este reporte se clasifica el nivel de exitoso de los proyectos de acuerdo con tres características generales: cumplimiento del alcance, del tiempo y del presupuesto. Un proyecto es exitoso si se cumplen estas características. Un proyecto se considera con desafíos si finaliza con retraso, con sobrecostos o con incumplimientos. Finalmente, un proyecto se considera fallido cuando se cancela o finaliza sin un producto útil. Además, en este informe se muestran las pérdidas que se producen en los proyectos fallidos o con desafíos de la industria de TI. En la Tabla 2.2. se incluye un resumen del reporte desde 1994. Por ejemplo, se observa que para el año 2015 la mayoría de los proyectos se clasifican como fallidos o con desafíos con un 71 % (52+19) y un 29 % correspondiente a los éxitos. Respecto de los porcentajes mostrados en este informe, se aclara que a partir de 2013 se realiza un ajuste a los criterios de evaluación incluyendo la satisfacción del cliente. Esto conlleva a que los datos publicados desde el año 2012 se valoran con dos criterios diferentes.

Tabla 2.2. Desempeño de los proyectos de TI a lo largo de los años
Fuente: (Standish *Group*, 1995, 2010, 2013, 2015, 2018)

Año	Exitoso (%)		Con desafío (%)		Cancelado (%)	
1994	16		53		31	
1996	27		22		40	
1998	26		33		40	
2000	28		49		23	
2002	34		51		15	
2004	29		53		18	
2006	35		46		19	
2008	32		44		24	
2010	37		42		21	
2012	37	27	46	56	17	17
2013	41	31	40	50	19	19
2014	36	28	47	55	17	17
2015	36	29	45	52	19	19
2018	30	23	51	58	19	19

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Otro estudio relacionado con el EIE es el informe del *Embedded Markets Study* (EMS; *Embedded.com*, 2013). En el *EMS* desde los 90s se analizan las tendencias a lo largo de los años sobre la industria electrónica, abarcando varias empresas del sector y todo el ciclo de vida de manufactura. Entre los elementos que se monitorean en el estudio del 2017 se encuentran "los tipos de tecnología utilizada, todos los aspectos del proceso de desarrollo de embebidos, el surgimiento de internet de las cosas y de tecnologías innovadoras, las herramientas utilizadas, entornos de trabajo, aplicaciones, método/procesos, sistemas operativos utilizados y las marcas y chips que están utilizando los desarrolladores" (*EE Times* y *Embedded.com*, 2017). En lo que se refiere al desempeño de los proyectos en el informe se presenta la Figura 2-6; allí se puede apreciar que para el 2017 el 59% de los proyectos evaluados terminan tarde o se cancelan. Situación similar a la del reporte *CHAOS*.

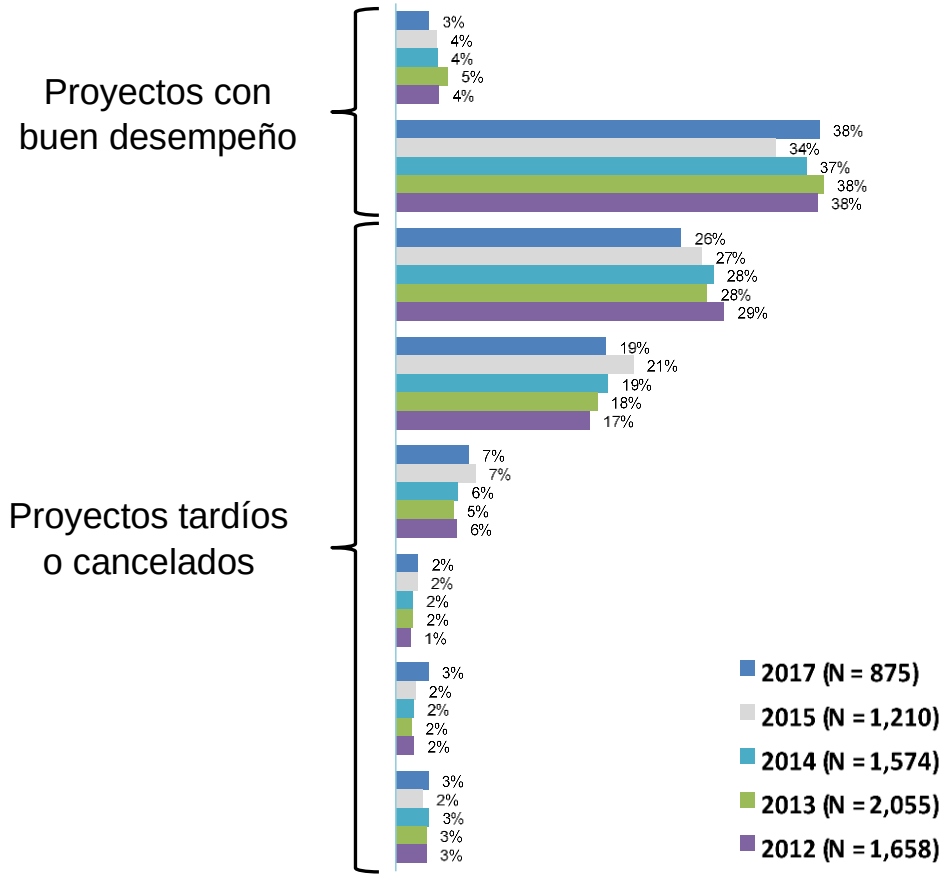


Figura 2-6. Desempeño de los proyectos de la industria electrónica a lo largo de los años
Fuente: (*EE Times* y *Embedded.com*, 2017)

2.6. Análisis de la problemática del EIE

Sifakis (2018) analiza las últimas décadas del desarrollo de sistemas complejos que abarcan al EIE y concluye que existen desafíos respecto de estos esfuerzos. Kundert *et al.* (2000; 2003; 2010), Sifakis *et al.* (2011, 2013) y Flyvbjerg (2018), entre otros autores, identifican algunos de estos desafíos del sector, analizan la problemática y proponen soluciones. Este análisis se describe a continuación.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Según Kundert *et al.* (2000; 2003; 2010), los procesos de verificación incompleto y la complejidad de los SE hacen que aumente la cantidad de errores funcionales. Los diseñadores se enfrentan a diseños cada vez más grandes y complejos (Dahmen *et al.*, 2018). Los ingenieros necesitan mecanismos de capacitación y métodos (con mejores desempeños) para abordar los errores y la complejidad. Del mismo modo, es necesario tener la propiedad intelectual de los métodos y del desarrollo de componentes para mejorar el trabajo colaborativo, así como la productividad del equipo.

Muchos problemas de los sistemas complejos se originan en las plataformas computacionales (Flyvbjerg, 2018; Kopec *et al.*, 2007; Northrop *et al.*, 2006). En este contexto, Sifakis (2011, 2013) escribe: "se necesitan teorías, modelos y herramientas para la construcción rentable de sistemas complejos mediante el ensamblaje de componentes heterogéneos". La formalización del diseño plantea problemas teóricos relacionados con el esfuerzo de un equipo que materializa una oportunidad en un SE. Estas cuestiones atraen poca atención en la comunidad científica. Según Sifakis (2011, 2013), el diseño de sistemas se debe estudiar como un proceso formal sistemático, soportado con un método. Los diseñadores carecen de un marco de trabajo para el desarrollo disciplinado basado en componentes, que se evidencia en la existencia y utilización de una gran variedad de lenguajes. Así, de acuerdo con la infraestructura computacional los diseñadores necesitan una teoría y métodos para elegir entre diferentes diseños igualmente confiables. Sin embargo, Sifakis (2018) reflexiona que los métodos formales (Henzinger y Sifakis, 2007; Sifakis, 2009, 2011) no cumplieron la expectativa de llevar estos esfuerzos a una disciplina madura de ingeniería.

Appleyard *et al.* (2001) y Kundert *et al.* (2010) establecen que el EIE tiene desafíos y problemas; la electrónica y la informática son inmaduras y necesitan investigación y teorización. Un marco de representación teórica para el EIE contribuirá a abordar tales desafíos. Las contribuciones de la comunidad académica para la comprensión y la mejora de los procesos de desarrollo pueden ayudar a consolidar la disciplina. En la industria electrónica se debería usar este marco de representación teórica para mejorar el rendimiento de los proyectos y reducir los costos y la tasa de fallos. De forma similar Sifakis *et al.* (2007, 2011, 2018) mencionan que el estado actual de las ciencias de computación y electrónica y los principios fundamentales del EIE son inmaduros; para abordar los desafíos relacionados es necesario realizar investigación. También afirman que "existe una necesidad crítica de teorías, métodos y herramientas que apoyen el desarrollo robusto de sistemas embebidos". Por otro lado, Freeman *et al.* (1997) manifiestan que la industria electrónica carece de un consenso sobre el EIE y que sus procesos de innovación son intensivos y complejos. Así mismo, Appleyard *et al.* (2001) declaran que muchos de los EIE de la industria son tácitos y subjetivos. Además, Johnson *et al.* (2012b) determinan que el EIE tiene lenguajes de modelado que compiten entre sí.

Jacobson (2011) y Johnson *et al.* (2012a) describen un razonamiento para el esfuerzo de ingeniería de software que también se aplican al EIE. El problema es mayor que la gran variedad de métodos; "el número abundante en sí mismo no es el problema, sino el hecho de que es prácticamente imposible comparar la forma en que funcionan los diferentes equipos" (Jacobson, 2011). También, afirman que los equipos tienen problemas para aprender métodos de desarrollo. Hoy en día, la industria electrónica carece de una forma común de representar a los EIE. Los ingenieros carecen de un marco de comparación de prácticas y procesos y requieren una forma de representación del conocimiento que permita

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

incorporar los diferentes enfoques. Los ingenieros (*equipos*) también carecen de una forma de componer y reutilizar las mejores prácticas, para conformar métodos apropiados para equipos particulares. De manera similar, según Sifakis (2013) "un tema importante es cómo combinar soluciones existentes y sus propiedades para abordar partes de un problema y resolver desafíos de diseño. Por lo anterior, se necesitan teorías y reglas para construir diseños complejos que cumplan los requisitos, mediante la composición de propiedades de diseños más simples".

Sifakis (2018) describe que estos desafíos persisten en la actualidad y explica la situación con tres corrientes de opinión sobre el tema. La primera se refiere a que la sociedad acepta los riesgos de tener sistemas embebidos sin una fiabilidad completa porque los beneficios resultantes de la creciente automatización de los servicios y sistemas son mayores. "Una segunda posición consiste en mostrar un exceso de optimismo no justificado que afirma que las cosas mejorarán por arte de magia sin cambiar drásticamente la forma en que diseñamos los sistemas" (Sifakis, 2018). Una tercera opinión cuestiona abiertamente el interés en fundamentos teóricos para la construcción de sistemas, privilegiando los enfoques puramente empíricos. También, menciona que existe un contraste sorprendente entre la ambición de sistemas autónomos cada vez más grandes y la falta de métodos de diseño rigurosos adecuados y con el apoyo de herramientas. Sifakis (2018) mantiene su visión de profundizar el estudio del fenómeno (Henzinger y Sifakis, 2007; Sifakis, 2009, 2011). "Se deben reevaluar los métodos existentes a la luz de las necesidades, ya que cambian en las últimas décadas. (…) Se debe investigar en métodos alternativos para lograr la corrección sin sufrir limitaciones de complejidad" (Sifakis, 2018). Además, reconoce el enfoque que incluye la ingeniería de software al proponer marcos de trabajo sin las pretensiones de formalismo y menciona que el empirismo está ganando terreno y se convierte en la doctrina dominante en el desarrollo de grandes sistemas. En contraste, también concluye que teorizaciones sobre el esfuerzo de ingeniería de sistemas computacionales formulados matemáticamente que no reflejen la práctica carecen de cabida en la industria (Sifakis, 2018).

2.6.1. Pregunta de investigación

En síntesis, de la literatura se identifica que la problemática se puede agrupar alrededor de dos desafíos.

- una compresión inmadura del EIE y
- la carencia de un mecanismo de representación general del conocimiento del EIE

En consecuencia, respecto de la problemática planteada se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿cuáles son los fundamentos que permiten una mejor comprensión y aplicación del EIE? Otras preguntas de investigación son: ¿qué relación se puede identificar entre instancias de EIE? ¿cuáles son los constructos de la representación del EIE? ¿cuáles son las relaciones entre constructos? ¿cuáles son las características del marco de representación del EIE? Así, de acuerdo con los Apartados 2.5 y 2.6 en los siguientes Capítulos, se describe una propuesta de solución para abordar esta problemática y responder a estos interrogantes.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Página intencionalmente en blanco

3. Planteamiento de la investigación

En este Capítulo se describe el proceso de investigación con el que se logra esta Tesis Doctoral. Se formula un conjunto de premisas con el que se inicia la investigación y se sustenta la definición de los objetivos. A su vez, para la consecución de los objetivos, se plantea un método con dos aproximaciones: la primera se basa en pasos para formular teorías y la segunda se basa en prácticas del método científico. En esta investigación se asume una postura epistemológica positivista, con un método de investigación empírico (Sjøberg *et al.*, 2008) y un enfoque mixto (teoría fundamentada; Glaser *et al.*, 1967), principalmente cualitativo, que se conduce hacia una teoría cuantitativa como resultado.

3.1. Premisas de investigación

Para el planteamiento de la investigación se parte de dos premisas con postura epistemológica positivista:

- Es posible encontrar un conjunto de constructos y proposiciones esenciales del EIE.
- Estos constructos y proposiciones se pueden descubrir en un subconjunto relevante y finito de descripciones del fenómeno existente en la literatura.

La primera premisa se plantea como una expectativa y en analogía a la propuesta de la Esencia para el esfuerzo de ingeniería de software, la cual tiene un alcance similar a esta Tesis Doctoral. La comunidad de *Semat* propone el estándar de la Esencia a través de un consenso global de expertos, al analizar cientos de prácticas y métodos de la ingeniería de software y de su propia experiencia en la industria y academia (Jacobson *et al.*, 2012a; 2019). En esta Tesis Doctoral se utiliza una estrategia diferente, debido a la dificultad de reunir una muestra significativa de expertos internacionales del dominio en estudio y a la dificultad de realizar un número significativo de estudios primarios en organizaciones representativas que apliquen EIE. Por otra parte, en la segunda premisa se escoge una estrategia diferente para buscar y analizar constructos y proposiciones. En este sentido, Martinson (1983) establece que la "finalidad esencial de un artículo científico es comunicar los resultados de investigaciones, ideas y debates de una manera clara, concisa y fidedigna" y Artiles-Visbal (1995) menciona que en los artículos se describen los dominios disciplinares y se constituyen en el medio de divulgación de la comunidad científica. Además, se consideran estándares y marcos de trabajo con amplia difusión dentro de los enfoques que se abordan (véanse el Apartado 1.2 y el Capítulo 2). Por lo anterior, se concibe la revisión de literatura como un mecanismo alternativo. Así, en esta Tesis Doctoral se sigue una postura epistemológica positivista acorde con la corriente de teoría fundamentada de Glaser *et al.* (1967); allí se considera que existe una descripción correcta de la realidad (fenómeno) que se puede descubrir.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo general

Establecer un Modelo teórico para el proceso de desarrollo de ingeniería electrónica que permita su representación y especificación.

3.2.2. Objetivos específicos

- Identificar constructos teóricos del esfuerzo de ingeniería electrónica a partir de un corpus.
- Determinar las relaciones entre los constructos del esfuerzo de ingeniería electrónica y su alcance.
- Sintetizar una representación teórica del esfuerzo de ingeniería electrónica incluyendo constructos, relaciones y reglas de notación.
- Validar el Modelo teórico propuesto del esfuerzo de ingeniería electrónica con un caso de estudio, realizado en un centro de investigación o desarrollo.

3.2.3. Alcance de la investigación

Con el alcance de la investigación se abarca el estudio de lo que en la Tesis se denomina *esfuerzo de ingeniería electrónica* (EIE), concerniente a esfuerzos que involucra a un sistema electrónico, con diferentes niveles de escalado (*ámbito*) y en cualquier parte de su ciclo de vida, desde el punto de vista de la ingeniería electrónica. Los constructos y proposiciones se identifican a partir de la revisión de literatura pertinente. En la revisión se incluye el enfoque del EIE actual donde se integran o sintetizan sistemas electrónicos como tarjetas basadas en FPGAs o *componentes electrónicos discretos*[3] como resistencias y microprocesadores (véase los Apartados 1.2.2 y 2.1). Sin embargo, los procesos de fabricación de estos *componentes electrónicos discretos* se dejan fuera del alcance de esta investigación. También se abarcan los esfuerzos que tienen como sistema de interés a los sistemas embebidos, limitando el alcance al SE del *sistema embebido*, a su configuración lógica y al software si con este se accede directamente a los recursos del SE. El esfuerzo relacionado con software más allá de este planteamiento esta fuera del alcance de este enfoque. Para ampliar la comprensión del fenómeno además se consideran disciplinas con aproximaciones generales sobre el *esfuerzo* que incluyen al SE como *sistemas de interés*. Así, de manera genérica, se identifican elementos en estas aproximaciones con los que también se caracterice el EIE (véase el enfoque general de gestión en el Apartado 2.2). Por último, se considera el enfoque de sectores análogos al EIE con aproximaciones relacionadas al dominio de estudio (véase el Apartado 2.3). En este enfoque se analizan sus aproximaciones y por analogía se identifican en el EIE elementos que tengan relevancia teórica.

[3] Los *componentes electrónicos discretos* se conciben como aquellos que hacen parte de un sistema electrónico y que se gobiernan por las *teorías del fenómeno electrónico de señales y sistemas*, pero que en su creación intervienen profesiones diferentes a la ingeniería electrónica, como químicos y físicos. Ejemplos de estos son los chips, capacitores o transistores.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Por otro lado, se hace explícito que en esta Tesis Doctoral no se pretende generar contribuciones a las *teorías del fenómeno electrónico de señales y sistemas*, ya que estas son de tipo teoría unificada. Así, con este alcance de la investigación se aborda el objetivo general que se propone para buscar un Modelo teórico con el que se representen y especifiquen los diferentes estilos de EIE.

3.3. Método de investigación

Para lograr los objetivos, en el método de investigación se incluyen dos aproximaciones. La primera proviene del método de investigación científica. La segunda aproximación se origina principalmente de la propuesta de construcción de teorías de Sjøberg *et al.* (2008), allí se plantea una serie de pasos para teorizar (*qué*; véase además el Apartado 1.1.1). Con el método científico se caracteriza el tipo de investigación para establecer el *cómo*, mediante prácticas que se extraen principalmente del método de investigación *teoría fundamentada* (Glaser *et al.*, 1967; Stol *et al.*, 2016). Como resumen en la Tabla 3.1 se presenta la correspondencia de los objetivos específicos con los pasos de construcción de teoría y prácticas (aplicadas de forma recursiva e iterativa); que se describen a continuación.

Tabla 3.1. Correspondencia de objetivos con pasos y prácticas
Fuente: elaboración propia

Objetivos específicos	Pasos de construcción de teoría	Prácticas del método científico
Identificar constructos teóricos.	Definir los constructos de la teoría.	Revisión de literatura y conceptualización del EIE.
Determinar las relaciones entre los constructos.	Definir las proposiciones de la teoría.	Revisión de literatura, conceptualización del EIE, síntesis de teoría y verificación conceptual.
Sintetizar una representación teórica.	Proporcionar explicaciones para justificar la teoría.	Revisión de literatura, conceptualización del EIE, síntesis de teoría y verificación por juicio de expertos.
	Determinar el alcance de la teoría.	Revisión de literatura, conceptualización del EIE, síntesis de teoría, verificación conceptual y verificación por juicio de expertos.
Validar el Modelo teórico.	Probar la teoría mediante investigación empírica.	Verificación conceptual y validación por caso de estudio

3.3.1. Pasos de construcción de teorías en contexto

Según Sjøberg *et al.* (2007), el método empírico busca explorar, describir, predecir y explicar los fenómenos naturales, sociales o cognitivos. Los investigadores obtienen e interpretan evidencias utilizando la experimentación, entrevistas, encuestas y revisión de documentos. Además, ellos utilizan evidencias basadas en la observación, medición y prueba, e incorporan métodos cualitativos o cuantitativos. En este contexto que es similar al de la Tesis Doctoral, Sjøberg *et al.* (2008) proponen una guía para teorizar en ingeniería de software, la cual se utiliza como modelo para el presente método de

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

investigación. La guía consta de cinco pasos: definir los constructos de la teoría, definir las proposiciones de la teoría, proporcionar explicaciones para justificar la teoría, determinar el alcance de la teoría y probar la teoría con investigación empírica; que se describen a continuación.

1. Definir los constructos de la teoría. En este punto, se analizan contribuciones previas para descubrir o definir nuevos constructos con el fin de introducirlos en la teoría emergente y caracterizar el fenómeno. Para ello, se utilizan, ajustan o conceptualizan constructos sobre descripciones previas para proporcionar una mejor explicación del fenómeno en estudio.
2. Definir las proposiciones de la teoría. En este proceso se identifican, especifican, eliminan o ajustan relaciones con las que se describe el dominio. Estas relaciones se analizan y se consideran como proposiciones candidatas de la teoría emergente.
3. Proporcionar explicaciones para justificar la teoría. Sjøberg *et al.* (2008) consideran este paso como el de mayor desafío, ya que se destina a proporcionar suposiciones explícitas y justificaciones lógicas para los constructos y proposiciones de la teoría emergente.
4. Determinar el alcance de la teoría. En este paso se determina la inclusión o exclusión de constructos y proposiciones de la teoría y se definen en qué contexto son válidos (alcance).
5. Probar la teoría con investigación empírica. Con este paso se valida la teoría mediante un estudio empírico. Aquí, se usan o aplican los constructos y proposiciones teóricos en una instancia del fenómeno en estudio. Así, las proposiciones se convierten en hipótesis refutables (comprobables) empíricamente y se refina el alcance de la teoría.

En teorización estos pasos se aplican de forma iterativa, incremental y solapados (Sjøberg *et al.*, 2008). Así, en esta Tesis Doctoral los pasos se aplican mediante prácticas sustentadas en el método científico, las cuales se presentan en el siguiente Apartado. Con este planteamiento se organiza el esfuerzo de teorización, por lo que los pasos se corresponden con los objetivos de la Tesis y las prácticas, como se presenta en la Tabla 3.1.

3.3.2. Prácticas del método de investigación

Las prácticas que se utilizan en la investigación parten principalmente del método de investigación *teoría fundamentada*, el cual se utiliza en la investigación de sistemas de información y en la ingeniería de software. Este es un método inductivo con el que se crean teorías a partir de datos de fuentes diversas (documentos, videos, entrevistas, cuantitativos, etc.), que originalmente lo plantean Glaser *et al.* (1967). En la teoría fundamentada se asume un enfoque metodológico mixto por lo que el proceso de investigación se complementa con el positivismo y antipositivismo (interpretivismo) (Stol *et al.*, 2016). Así, los datos cualitativos se pueden codificar cuantitativamente (categorías de valor) y por su parte los investigadores interpretan los datos cuantitativos en su contexto. Las prácticas de comprobación tienen el enfoque mixto y el resto el cualitativo. Luego, en esta Tesis Doctoral se sigue la guía de *teoría fundamentada* planteada por Stol *et al.* (2016), quienes realizan una revisión de literatura en este campo y una síntesis del método, sus variantes y las principales fuentes de consulta. Además, para esta investigación se usan prácticas propuestas por otros autores, ajustándolas al contexto de la teoría fundamentada.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

3.3.2.1. Revisión de literatura

La necesidad de una revisión de literatura surge de la exigencia de los investigadores para resumir la información existente sobre algún fenómeno (Kitchenham *et al.*, 2004). La práctica se basa en el proceso de revisión sistemática de literatura de Kitchenham *et al.* (2004) y en las siguientes actividades de teoría fundamentada: limitar la exposición a la literatura, muestreo y saturación teórica (Stol *et al.*, 2016). La revisión sistemática de literatura (RSL) es un mecanismo con el que se persigue reducir el sesgo en las búsquedas subjetivas de información mediante la definición de un procedimiento documentado, repetible y con formalismo académico. Este mecanismo es un estudio secundario de un fenómeno de interés que consta de cinco actividades: formular pregunta de investigación, seleccionar fuentes de información, seleccionar estudios primarios, extraer información y analizar resultados.

Así, al inicio de la RSL se *formulan las preguntas de investigación*, que se describen en el Apartado 2.6.1. Con base en las preguntas de investigación se *seleccionan las fuentes de información* y se especifican las cadenas de búsqueda. Para esta Tesis Doctoral las fuentes son: ACM, Google *Scholar*, IEEE, *ScienceDirect*, Scopus y Springer. La cadena de búsqueda se aplica en marzo de 2015 como se presenta a continuación:

- *"hardware development process" OR "hardware design methodology" OR "electronic design methodology" OR "hardware design method" OR "system-level hardware design" OR "Embedded system design" OR "Embedded systems methodology" OR "Embedded system methodology" OR "Embedded systems method" OR "Embedded system method" OR "embedded system development process" OR "embedded systems development process" -course -curriculum*

De acuerdo con lo anterior, se obtiene un universo de estudios candidatos (19.093 documentos) para incluir en la investigación. Estos estudios se someten a los criterios de inclusión y exclusión (véase la Tabla 3.2) para *seleccionar estudios primarios* relevantes para la investigación. Una muestra de estudios relevantes se somete a un proceso de *extracción de información* para describir casos de EIE correspondientes a una o varias aproximaciones de un enfoque. A partir de la información extraída se *analizan los resultados* para identificar los elementos relevantes del fenómeno de interés. Las consideraciones de la RSL se describen a continuación.

La cadena de búsqueda de la RSL se propone a partir de un trabajo previo primario donde se caracterizan seis organizaciones que ejecutan EIE (Sánchez-Dams *et al.*, 2012, 2014). El alcance de una RSL es la síntesis de información con respecto a un tema o fenómeno, no el de llegar a una teorización como el de esta Tesis Doctoral. En un sentido similar, los autores que plantean el método de teoría fundamentada establecen que la RSL por si sola es inapropiada para una teorización (Stol *et al.*, 2016). Así, para facilitar el análisis a partir del artículo octavo analizado, se remplazan los dos últimos pasos (*extraer información* y *analizar resultados*) de la RSL por las prácticas de conceptualización del EIE y síntesis de teoría (del EIE) respectivamente (véase los Apartados 3.3.2.2 y 3.3.2.3). A su vez, los criterios de búsqueda se escogen con un ámbito amplio para cubrir el dominio en estudio, lo que implica que la selección de documentos se aplique manualmente. En consecuencia, la cantidad de artículos candidatos se limita además con la actividad de *saturación teórica*. Así, la RSL se suspende con esta actividad después

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

de analizar el documento trigésimo segundo. La actividad de *saturación teórica* consiste en que el investigador monitorea la *extracción de información* y el *análisis de resultados* y suspende el análisis de nuevos datos cuando los componentes de una teoría se respaldan adecuadamente y los nuevos datos ya no provocan que se revise o reinterprete la teoría (Stol *et al.*, 2016). Así, la RLS se constituye en la primera búsqueda de la revisión de literatura.

Tabla 3.2. Criterios de inclusión y exclusión de revisión sistemática de literatura
Fuente: elaboración propia

Criterios de inclusión de RSL	Criterios de exclusión de RSL
• Artículos en los que se describe el *fenómeno del EIE*. • Documentos en inglés o español. • Artículos del EIE actual y que se relacionen con los enfoques general de gestión y de sectores análogos al EIE. • Descripciones de EIE que se apliquen a industrias como la electrónica, espacial/aeronáutica, vehículos, tecnologías de información, telecomunicaciones, química, alimentos, bioingeniería y computación.	• Artículos en los que se describe principalmente el *fenómeno electrónico de señales y sistemas*. • Artículos en los que se describe principalmente la fabricación de *componentes electrónicos discretos*. • Artículos en los que se aborde principalmente profesiones diferentes a la *ingeniería electrónica*. • Artículos que se orienten a esfuerzos con sistemas embebidos en los que se aborde principalmente la ingeniería de software. • Descripciones de EIE de un único proyecto. • Libros, estándares y bases de conocimiento.

En la literatura, el fenómeno del EIE se denomina y describe sin una coherencia terminológica. Debido a esta situación, una revisión sistemática de literatura con la cadena de búsqueda descrita se limita al sesgo de los términos seleccionados. Según Kitchenham *et al.* (2004) es importante incluir otros estudios que la comunidad reconoce, aunque no se reporten en las fuentes digitales de la RSL. Además, los autores de teoría fundamentada recomiendan la actividad de *limitar la exposición a la literatura* donde el investigador "*restringe su exposición a la literatura y a las teorías existentes para que se promueva una mentalidad abierta [sin el límite de una cadena de búsqueda fija] y para evitar el sesgo de confirmación*" (Stol *et al.*, 2016). Así, en esta Tesis se posterga el análisis de teorías que se formulan para el *esfuerzo* (como las de *ciencias de diseño* o la *Esencia*) hasta el momento en el que se han madurado los productos de la Tesis. A su vez, se usa la actividad de *saturación teórica* durante el resto de la revisión de literatura, para cambiar a otra aproximación o enfoque una vez se saturen los términos de un tema y para continuar el análisis desde otro punto de vista. Además, para continuar con el análisis del *enfoque EIE actual* a partir del trigésimo tercer documento, se utiliza la actividad de *muestreo teórico* para remplazar el tercer paso de la RSL (*seleccionar estudios primarios*).

Con la actividad de muestreo teórico "el investigador identifica otras fuentes de datos basadas en lagunas en la teoría emergente o para explorar más los conceptos no saturados" (Stol *et al.*, 2016). La escogencia de fuentes adicionales se hace mediante una revisión escalonada de documentos; cuando se analizan datos se descubren nuevos términos o referencias a otros autores que sirven para refinar la

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

búsqueda y análisis de los siguientes datos. Así, se ajustan los criterios de búsqueda para permitir descripciones pertinentes diferentes a artículos (libros, estándares, monografías, reportes, entre otros) y se consideran documentos o técnicas recomendados por colaboradores de la Tesis o que se mencionen en informes o reportes afines a la industria electrónica como el *CHAOS*, *Embedded Markets Study* o *State of Agile Survey* (*Embedded.com*, 2013; Standish *Group*, 1995; *Version One*, 2014).

Una vez se llega a la saturación teórica del *enfoque EIE actual* se ajustan los criterios de búsqueda para incluir el *enfoque general de gestión* y el de *sectores análogos al EIE*. La revisión de literatura se sintetiza en los Antecedentes que se describen en el Capítulo 2 y Apartado 1.2; allí se presentan las referencias que se consideran y que incluyen aportes teóricos al EIE. La última aproximación que se analiza es la *ciencia del diseño*. Para ese momento los análisis que se hacen no provocan revisiones o reinterpretaciones a la Tesis Doctoral, por lo que los nuevos datos se utilizan para realizar una verificación conceptual; véase el Apartado 3.3.2.4.

Los documentos son el principal insumo de la Tesis. Sin embargo, se consideran otras fuentes de acuerdo con la actividad de *tratar todo como datos* de la teoría fundamentada, como los criterios que los expertos consultados expresan, páginas webs o conferencias relacionadas con el tema (Stol *et al.*, 2016).

3.3.2.2. Conceptualización del EIE

Con esta práctica se integran y resumen los resultados de los estudios relevantes en la Conceptualización del EIE, como una alternativa a la síntesis descriptiva o cuantitativa que propone Kitchenham *et al.* (2004) en la RSL. Para esta práctica se necesita la competencia del pensamiento sistémico que involucra la habilidad de creatividad. Así, desde la teoría fundamentada se propone la actividad de *sensibilidad teórica*, que "*se refiere a la capacidad del investigador para conceptualizar y establecer relaciones entre conceptos*" (Stol *et al.*, 2016) de forma creativa y pertinente. Luego, las fuentes relevantes (principalmente de la revisión de literatura) se someten a un proceso de extracción de información para sintetizarlas en la Conceptualización con el que se describe el EIE.

La conceptualización se consigue mediante el uso de actividades y herramientas. Así, para capturar la información se utiliza la actividad de *registrar memorias*, donde "*el investigador escribe memorias (por ejemplo, notas, diagramas, bocetos) para elaborar categorías a medida que se encuentran, describiendo propiedades preliminares y relaciones entre categorías e identificando brechas*" (Stol *et al.*, 2016). Las herramientas que se utilizan para registrar las memorias son: resaltado de texto de estudios primarios, tablas de captura de la RSL, software de análisis textual, bitácora de ideas y comentarios, audio-notas y control de versiones de archivos de memorias. El software se utiliza solo con los primeros documentos. Debido a la experiencia, los nuevos documentos se analizan en menor tiempo y con resultados similares al que se obtiene con el uso adicional de esta herramienta. Además, en esta práctica se caracteriza el EIE mediante esquemas preconceptuales.

Así, a partir del análisis de los estudios primarios revisados se obtienen los conceptos y relaciones relevantes del EIE (como candidatos a constructos y proposiciones de la teoría) que se codifican en frases con la estructura concepto–relación–concepto. Las debilidades de unas descripciones se complementan con las fortalezas de otras. Las características, notación y reglas (restrictivas) de codificación

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

del esquema preconceptual permite que se realice una representación del EIE depurada de ambigüedades. Así, la notación del esquema preconceptual es el lenguaje que se utiliza en la conceptualización; véase el Apartado 1.1 Teoría y conceptualización y la definición de ingeniería electrónica del Apartado 1.2.

Los autores de las *teorías de interés del esfuerzo* describen el fenómeno con una *cobertura parcial* y con las características que se resumen y comparan en la Tabla 2.1. Además, falta una coherencia terminológica entre las fuentes, debido a que las descripciones relacionadas con el EIE en la literatura se hacen de forma independiente y que se carece de una unificación teórica (hay micro teorías). Por lo anterior es necesario que se realicen homologaciones y unificaciones terminológicas en los esquemas preconceptuales.

La *homologación terminológica* implica que se remplaza un término (concepto, relación o denominación en la conceptualización) por otro de mayor ámbito (generalidad) o con un significado más apropiado. Los ajustes de denominación se hacen de acuerdo con una revisión de significados en el diccionario de la Lengua Española y de sus traducciones al inglés en *Merriam-Webster* y *Oxford* en sus versiones en línea. Por su parte con la *unificación terminológica* se escoge una denominación para un término que se describe de forma diferente entre las fuentes que hacen parte de la investigación. El término que se unifica debe representar una abstracción siempre presente o esencial del dominio y puede ser una denominación nueva o una existente en la literatura, de acuerdo con la *homologación terminológica*. La unificación se hace a partir de la codificación del discurso en esquemas preconceptuales. Para realizar la unificación se compara un término y sus enlaces con su descripción en las fuentes o con su codificación en otro esquema preconceptual. Entonces, si dos términos son sinónimos y se asocian con otros términos de manera similar se pueden unificar. Por ejemplo, los términos proceso de desarrollo, implementación, diseño o proyecto se unifican terminológicamente en *esfuerzo*; véase el Apartado 1.2.1.

La conceptualización se inicia con el insumo de la RSL. Primero, se extrae y analiza de forma independiente la información de siete artículos acerca del EIE con la actividad de registrar *memorias* y sus herramientas. Esto implica que las memorias de cada artículo se codifiquen en un esquema preconceptual que representa su contenido. A continuación, con las actividades de *sensibilidad teórica*, *homologación y unificación terminológica* se realiza una síntesis conceptual de estos siete artículos en una primera versión de la Conceptualización que representa la generalidad de estos casos evaluados. La síntesis conceptual de estos siete artículos al tiempo genera el inconveniente de un bloqueo mental. Debido a la carencia en la literatura de una coherencia terminológica, se generan términos y enlaces con significados redundantes produciendo una complejidad innecesaria en la representación. Entonces, el proceso mental de síntesis se vuelve complejo al involucrar al tiempo todos estos elementos y sus asociaciones. Por lo tanto, la primera síntesis se resuelve realizando unificaciones parciales entre dos esquemas preconceptuales y unificando el resultado con la siguiente representación. Como consecuencia a este inconveniente y justificado en actividades de teoría fundamentada (Stol *et al*., 2016), se modifica la aplicación de esta práctica. A partir de aquí, por cada nueva fuente se registran memorias, se contrasta con la Conceptualización emergente, se homologa y se unifica. Así, la conceptualización se aplica incrementalmente en conjunto con las prácticas de revisión de literatura, síntesis de teoría (considerando los criterios de teorización) y verificación conceptual.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

La Conceptualización que se consigue con esta práctica no es la Teoría, en cambio hace parte de la Teoría como su marco conceptual y a su vez es el medio con el que se llega a ella. Por esto, es necesario la práctica de *síntesis de teoría* que se presenta en el siguiente Apartado.

3.3.2.3. Síntesis de teoría (del EIE)

Esta práctica se utiliza para realizar abstracciones del dominio que se constituyen en constructos y proposiciones, buscando sintetizar una teoría con la que se pueda describir y explicar el EIE. La síntesis teórica se logra con la aplicación de actividades de teoría fundamentada y criterios de teorización que se establecen en la literatura, utilizando la conceptualización como principal herramienta de codificación.

La codificación es una actividad en dónde "el investigador utiliza la lógica inductiva y abductiva para construir códigos analíticos e inferir categorías teóricas a partir de los datos al etiquetar incidentes y sus propiedades. El investigador no clasifica los datos en un esquema de codificación preconcebido, ni infiere categorías a partir de hipótesis deducidas lógicamente" (Stol *et al.*, 2016). Además, en la teoría fundamentada se utiliza la deducción para reinterpretar los datos analizados con la teoría emergente. La codificación se utiliza en conjunto con la actividad de clasificación teórica, que consiste en "el proceso continuo de balance entre las memorias y la codificación de la teoría emergente para encontrar un ajuste adecuado para todas las categorías que se encuentran" (Stol *et al.*, 2016). Además, durante la aplicación de esta práctica se considera la actividad de teorización cohesiva donde "el investigador intenta ir más allá de las categorías superficiales y desarrollar una teoría coherente del fenómeno en estudio" (Stol *et al.*, 2016). Para esta Tesis Doctoral los medios de codificación que se utilizan son: para la Conceptualización el esquema preconceptual, para la Teoría del Esfuerzo y del EIE el lenguaje matemático y para la interpretación cualitativa de la Tesis el lenguaje cualitativo de la Teoría del Esfuerzo (lenguaje de la Esencia ajustado). En cuanto a la teorización cohesiva, se mantiene una coherencia terminológica en la síntesis de la Tesis Doctoral, combinándola con las actividades de unificación y homologación terminológica de la práctica de conceptualización (véase Apartado 3.3.2.2).

Por otro lado, se consideran *criterios de evaluación o características de una buena teoría* que se describen en la literatura (Gregor, 2006; Popper, 2005; Ralph, 2019; Reynolds, 1971; Sjøberg *et al.*, 2008). Los criterios que se utilizan de ante mano en esta práctica son: falsabilidad, sustento empírico, capacidad explicativa, parsimonia, generalidad, utilidad y causalidad. La *falsabilidad* se refiere al grado de disposición del planteamiento teórico para que se utilice en la deducción de hipótesis refutables (o comprobables) empíricamente. La *parsimonia* es el grado de economía (síntesis) que se consigue con el planteamiento del mínimo número de constructos y proposiciones. Con el criterio *sustento empírico* se determina el grado en que una teoría se soporta en la observación empírica. La *capacidad explicativa* es el grado de capacidad de una teoría para que se utilice como medio de explicación de un dominio. La *generalidad* es el criterio con el que se determina el alcance de la teoría y el grado en que es independiente de ajustes específicos (posibilidad de instanciarla). Con la *utilidad* se considera el grado de aplicación de una teoría en su dominio de interés. Finalmente, con el criterio de *causalidad* se determina el grado de predicción o identificación de relaciones numéricas, causa-efecto o precedencia que se logran con los elementos de la teoría. Adicionalmente se tienen en cuenta las siguientes características para los elementos constitutivos de la teoría: universalidad, ortogonalidad y granularidad. La *universalidad* se refiere al grado de

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

generalidad de las tipologías o clases abstraídas del dominio acorde al nivel de teorización. Con la *ortogonalidad* se considera el grado de diferenciación intrínseca entre elementos sin redundancia; en una representación matemática el caso extremo implica elementos linealmente independientes. Por último, con la *granularidad* se considera la diferenciación jerárquica de elementos donde unos pueden contener a otros; considerando la ortogonalidad entre elementos del mismo nivel.

De acuerdo con el marco que se describe anteriormente, la síntesis se realiza como sigue. Primero se inicia con la conceptualización del Apartado anterior. Así, se identifican conceptos y relaciones (términos) esenciales del EIE, que se verifican contra el universo en estudio (véase el Apartado 3.3.2.4). En la codificación con esquemas preconceptuales se consideran las relaciones estructurales para definir la tipología o ámbito de un concepto, determinando jerarquías con las relaciones *es* y *tiene*. También se analizan las frases de la codificación para eliminar redundancias. Así, entre las frases es posible que se encuentren casos de responsabilidades compartidas o relaciones transitivas que hay que resolver. Las responsabilidades compartidas se resuelven identificando un concepto intermedio adecuado. Por ejemplo, el equipo (o el interesado) se relaciona correctamente con el trabajo o la competencia mediante el concepto (intermedio) persona. Las relaciones transitivas se resuelven dejando una sola relación que incluye al concepto más general, así, se eliminan la relaciones que estén cubiertas por otras más generales. Por ejemplo, la frase *equipo define forma de trabajo* implica además que el *equipo define métodos o prácticas*, porque el concepto *forma de trabajo* es más general. Para ambos ejemplos, véase la Figura 4-2. Además, los esfuerzos disciplinares son fenómenos complejos que se pueden analizar desde la aproximación de ingeniería de sistemas. Así, cada concepto se relaciona con todos los demás conceptos pertinentes para representar la complejidad subyacente que se describe en la literatura.

Posteriormente con una Conceptualización emergente estable, se analiza el estándar de la Esencia y se encuentra que su lenguaje y núcleo son compatibles con la síntesis que se realiza. Entonces, se revisa y reinterpreta la Conceptualización agregando nuevos elementos y ajustando otros. Así, sobre la Conceptualización se abstrae la Teoría del EIE homologándola con el núcleo de la Esencia y usando su lenguaje (*interpretación cualitativa* que posteriormente se ajusta a la codificación matemática cuantitativa; véanse los Apartados 4.2, 4.2.5, 4.2.8 y 4.3). A continuación, se analiza la aproximación general de gestión. Entonces, se encuentra un inconveniente para sintetizar los elementos del ámbito del esfuerzo (costo, tiempo y alcance) con la Teoría del EIE (*interpretación cualitativa*) y con otras formas de representar el esfuerzo (SPEM 2.0, BPMN, etc.). Así, de la aplicación continua de esta práctica de síntesis surge la inspiración creativa (*sensibilidad teórica*) con la que se resuelve tal inconveniente mediante una abstracción teórica sobre la Conceptualización, que se concibe como la Teoría del Esfuerzo (*cuantitativa*). Una vez se formula la Teoría del Esfuerzo se mantiene estable su descripción, realizándole solo ajustes de notación. Con esta Teoría se reinterpretan el contexto del EIE, así, la Esencia se concibe como una interpretación *cualitativa* de la Teoría del Esfuerzo. Después, se sintetiza la Teoría del EIE (*cuantitativa*), como una parametrización de la Teoría del Esfuerzo con la Conceptualización del EIE. Con una versión emergente de los tres productos, la práctica se ejecuta de forma iterativa y retrospectiva para depurar la Tesis Doctoral con los *criterios de evaluación o características de una buena teoría* y en contexto con la actividad de *clasificación teórica* contrastando las memorias y la codificación; véase el Apartado 3.3.3.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

3.3.2.4. Verificación conceptual

Para esta práctica se consideran varias estrategias en las que se usa una conceptualización para contrastar o verificar el discurso de un dominio (Arellano *et al.*, 2009; Darder *et al.*, 2012; Castro y Zapata, 2013; Zapata *et al.*, 2011). Con esta práctica se busca comprobar la pertinencia y exactitud de la codificación, contrastando la conceptualización con las fuentes y la conceptualización con las otras codificaciones. La verificación se hace con dos categorías valorativas: existencia o inexistencia en conceptualización. Los criterios valorativos se aplican a términos (concepto o relación) o frases del discurso del EIE. Así, se contrasta la conceptualización contra las fuentes y las otras codificaciones, buscando pertinencia con el discurso del dominio y exactitud en su codificación. Además, para el momento en el que se satura un tema, se hacen verificaciones adicionales con esquemas preconceptuales ejecutables, verificando la adecuada correspondencia de la representación.

Debido al inconveniente que se logra cuando se sintetiza la conceptualización con varias fuentes al tiempo, se opta por la implementación de una verificación conceptual en conjunto con las prácticas que se describen en los Apartados anteriores. Así, las fuentes de información se analizan para identificar conceptos y relaciones y se codifican en un esquema preconceptual en el que se sintetiza la conceptualización. En este punto la Conceptualización se usa como un mapa para seguir conceptos a través de las relaciones en el discurso del EIE. También se usa para hacerle seguimiento a las otras codificaciones, esto debido a que la Teoría del Esfuerzo y del EIE se logran como abstracciones de la Conceptualización. Ante una verificación se pueden encontrar dos posibles resultados. Por una parte, en la Conceptualización se representa de forma completa y satisfactoria todos los elementos identificados, por lo que se pasa al siguiente análisis. Por otro lado, cuando uno o varios elementos de la fuente o codificación no se corresponden con la conceptualización se hace necesario retroalimentar las codificaciones mediante las prácticas de conceptualización y síntesis (véanse los Apartados 3.3.2.2 y 3.3.2.3).

Con el procedimiento que se explica anteriormente se obtiene un modelo de comprobación iterativo interno para el análisis del EIE, con el que se depura la Tesis Doctoral. En el siguiente Apartado se explica otra práctica con una finalidad similar.

3.3.2.5. Verificación por juicio de expertos

Según Robles *et al.* (2015) el juicio de expertos es una práctica "útil para verificar la fiabilidad de una investigación", que se define como una opinión informada de personas con trayectoria en el tema, que son reconocidas por otros como expertos cualificados en éste, y que pueden dar información, evidencia, juicios y valoraciones (PMI, 2017b; Robles *et al.*, 2015). En lo que respecta a esta Tesis Doctoral, se utiliza el juicio de expertos como retroalimentación permanente por parte de profesionales especialistas en los enfoques considerados (EIE actual, general de gestión, sectores análogos al EIE), para obtener reflexiones valorativas sobre los productos intermedios de la Tesis y su metodología. Además, con esta práctica se compensa la decisión de abstenerse de realizar estudios primarios del EIE, ya que por medio de ella se obtiene acceso a practicantes del dominio en estudio que describen y contrastan su experiencia personal contra la Tesis Doctoral.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Durante la investigación, en exposiciones, talleres o reuniones se presenta a expertos avances de la Conceptualización, la Teoría del Esfuerzo y del EIE, así como su interpretación y representación. Cada crítica constructiva y aporte dado se tomaron en consideración y se analizaron a detalle para contribuir al producto final que se presenta y alude en los resultados, la discusión y conclusiones. Dentro del perfil del experto, se contempló que fuesen personas con experiencia en el ámbito profesional, académico o científico en el dominio de estudio. Las pasantías doctorales que se desarrollan en el marco de esta Tesis, la participación en eventos, así como las redes académicas y profesionales, se constituyen en escenarios propicios para que se reciban aportes de la teorización. Las reuniones con expertos que se consideran más exitosas son las que tienen una crítica más profunda con solidez de argumentos científicos y de la experiencia profesional. En las reuniones se toman notas o se graban y posteriormente se analizan para integrar las mejoras en el esfuerzo investigativo, y de esta manera ser presentadas nuevamente a expertos hasta su depuración final.

A continuación, se presentan algunos de los escenarios y profesionales que se tienen en cuenta en esta práctica. El primer escenario lo constituyen cuatro miembros del grupo de investigación de lenguajes computacionales de la Universidad Nacional de Colombia de la sede Medellín (tutor y estudiantes doctorales) y dos miembros del grupo de investigación en electrónica (Giacuc) de la Universidad de la Costa, quienes participan durante todo el desarrollo de la Tesis, unos como parte de la comunidad de *Semat* y los otros como expertos en el EIE. El segundo escenario es la pasantía en la Universidad Tecnológica de Panamá. Allí, se presenta una versión de la Conceptualización cercana a la final y la primera versión de la Teoría del EIE (solo lo cualitativo) a pares evaluadores constituidos por docentes de la Facultad de Computación, Facultad de Eléctrica y Electrónica, docentes de varias ingenieras de dos sedes regionales, así como a profesionales en ejercicio estudiantes de maestría y estudiantes de últimos semestres en la Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales. El tercero es en la Universidad Autónoma de México. Duran la pasantía se intercambiaron opiniones y las valoraciones de expertos de la Facultad de Ciencias que participaron en la elaboración del estándar de la Esencia y con estudiantes de maestría y doctorado. Igualmente, la experiencia de la pasantía permitió el intercambio con doctores y magísteres en matemáticas y física, quienes brindaran sus conocimientos y aportes en la construcción de la representación matemática de la Tesis. El cuarto escenario es en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Costa, Barranquilla. Allí se presenta en varias oportunidades versiones preliminares de la Tesis a investigadores de los grupos de investigación de productividad y competitividad (Producom), Giacuc e ingeniería de software y redes. Además, participaron miembros del comité central de *Semat* y otros miembros de la comunidad mediante reuniones o eventos y miembros de empresas relacionados con el EIE.

3.3.2.6. Validación por caso de estudio

En un método de investigación empírico el resultado se contrasta con su aplicación en la práctica. El caso de estudio es una práctica que se describe y utiliza en la teorización relacionada con el *esfuerzo* (Easterbrook *et al.*, 2008; Sjøberg *et al.*, 2007). Yin (2017) presenta los casos de estudio y lo define como "una investigación empírica en la que se estudia un fenómeno dentro de su contexto de la vida real", por lo que se escoge como medio de validación empírico para la Tesis. Un caso de estudio exploratorio se puede utilizar como investigación inicial de algunos fenómenos para derivar nuevas hipótesis o construir teorías, a su vez un caso de estudio confirmatorio se puede utilizar para probar una teoría.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

La investigación de caso estudio utiliza un muestreo intencional, lo que implica la escogencia de un fenómeno pertinente. El número de casos es un criterio que depende de la intención del estudio; para exploratorios o confirmatorios un caso o unos pocos son aceptados. El objetivo de abordar varios casos es la replicación de la comprobación o refutación de características de interés de un fenómeno. Para aplicar esta práctica es necesario determinar un procedimiento para el seguimiento del caso y que características son de interés para el fenómeno, que pueden variar y dependen del estudio particular. En la literatura se encuentran diferentes recomendaciones de procedimientos. Así, con esta práctica se valida la Tesis propuesta en el contexto de su uso, para comprobar empíricamente la aplicación de la Teoría y si con ella se pueden representar instancias del EIE (Martínez Carazo, 2011; Yin, 2017). Para ello, en el planteamiento del caso de estudio se formulan las siguientes preguntas: ¿cómo es la aplicación de la Teoría en un caso particular del EIE?, ¿qué tan adecuada es la representación del EIE con la Teoría propuesta? y ¿la utilización de la Teoría permite la representación y especificación de un EIE particular? El procedimiento que se sigue y la descripción del caso se presentan en el Capítulo 5 de Validación.

3.3.3. Estrategia de investigación iterativa, incremental y retrospectiva

Desde el punto de vista de los pasos propuestos por Sjøberg *et al.* (2008) y la metodología fundamentada (Glaser *et al.*, 1967), la teorización se plantea como un proceso continuo. En este sentido se propone la actividad de *recopilación y análisis de datos simultáneos*, en el que el investigador realiza el análisis junto con la recopilación de los datos, sin esperar a recogerlos todos (Stol *et al.*, 2016). Esta actividad se combina con la de c*omparación constante* donde "desde el comienzo del estudio, el investigador compara constantemente datos, memorias, codificaciones y categorías. Tanto las categorías como las interpretaciones de datos evolucionan y se saturan hasta que se adecúan con los datos" (Stol *et al.*, 2016). Así, se aborda esta aproximación durante el desarrollo de la Tesis mediante la aplicación de las prácticas de forma iterativa, incremental y retrospectiva, como se describe a continuación.

La aplicación de los pasos y prácticas se hacen de forma iterativa (en ciclos), retrospectiva y con incrementos graduales en la Tesis; con una validación al final. De los casos particulares se plantea una primera generalidad en un esquema preconceptual (razonamiento inductivo). A partir de la primera generalidad se analizan nuevas fuentes de descripción del esfuerzo y se emerge una nueva generalidad con tres codificaciones (Conceptualización, Teoría del Esfuerzo y del EIE). La actividad de *clasificación teórica* y la práctica de verificación conceptual se realizan contrastando las memorias y la conceptualización (codificación) y luego las codificaciones entre sí, utilizando la Conceptualización como mapa (razonamiento abductivo con la generalidad). Así, se aplican de forma *iterativa* las prácticas del método de investigación. Si en un razonamiento abductivo (verificación conceptual) se encuentra que con la generalidad no se explica una fuente particular, entonces se vuelve a realizar un razonamiento inductivo incluyendo la fuente problemática junto a las anteriores (*retrospectiva*), para encontrar una nueva generalidad. Esto implica que se revise o reinterprete la Conceptualización, la Teoría del Esfuerzo o la Teoría del EIE produciendo un *incremento* (mejora gradual) en la Tesis. Después de analizar todos los enfoques y sus aproximaciones se tiene una s*aturación teórica* de los tres productos de la Tesis Doctoral. Entonces, la Tesis se valida aplicando un razonamiento deductivo con un caso de estudio en una instancia nueva del EIE (fuente primaria). Como resultado de la validación surgen sugerencias y ajustes menores sobre los productos, como correcciones en las tarjetas con las que se representa la Tesis,

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

ajuste de denominación de términos o símbolos. Finalmente, durante la redacción de la Tesis se contrastan nuevamente los productos con las fuentes consultadas (razonamiento abductivo), refinando la presentación de los productos y realizando ajustes menores (razonamiento inductivo).

3.3.4. Consideraciones de teorización para el EIE

A pesar de que se plantea la necesidad de teorías para el EIE (véase el Apartado 2.6), la discusión de sus consideraciones en la literatura es incipiente. Sin embargo, desde la epistemología y diciplinas afines al EIE se aborda a profundidad el tema de teorización de tipologías relacionadas a lo que denominamos *esfuerzo*. La teorización del esfuerzo se aborda desde el punto de vista genérico en las *ciencias del diseño* (véase el Apartado 2.3), abarcando la epistemología, las ciencias sociales y el estudio primario de su disciplina (Braha *et al*., 1998; Cross, 2001; Gregory, 1966; Venable, 2006). Aquí, las ciencias sociales se consideran pertinentes debido a que son *personas* las que *realizan* el *trabajo* de un *esfuerzo*. Partiendo de la aproximación anterior en un sentido similar, desde las *ciencias del diseño de sistemas de información* se propone una discusión sobre las consideraciones de teorización; brindando alternativas para abordarla y enfocada en su SdI que abarca a los SE (Baskerville *et al*., 2010; Fischer, *et al*. 2010; Gregor *et al*., 2006, 2007; Walls *et al*., 1992). Contiguo a los sistemas de información, una discusión más reciente se ha dado dentro de la comunidad de ingeniería de software. En esta discusión se consideran las características que debe tener una teoría pertinente, sus métodos de desarrollo o expectativas de teorización (Easterbrook *et al*., 2008; Sjøberg et al., 2007, 2008; Stol *et al*., 2015, 2016). Así para abordar este tema, dentro de la comunidad de *Semat* se encuentra el área de teoría en el que se organiza el evento *General Theory of Software Engineering* (GTSE; *Semat*, 2013, 2015). Con base en esta discusión se establecen los criterios y el procedimiento de la formulación teórica de esta Tesis Doctoral. En particular en los que se refieren a la ingeniería de software se aplican en analogía a la teorización del EIE, siguiendo como modelo el trabajo de Sjøberg (2008).

Markus *et al*. (1988) proponen una clasificación de teorías sobre tres dimensiones: naturaleza del agente causal (Gregor en 2006 la descarta porque se define una postura teórica sin tipificación); nivel de análisis de un fenómeno (compatible con el planteamiento presentado en el Apartado 1.1) y estructura lógica de las teorías, tipificándolas como de *varianza* o de *proceso*. Las *teorías de varianza* se centran en la explicación de un fenómeno mediante el uso de variables y sus relaciones, mientras que con las *teorías de procesos* se explica una secuencia de eventos o actividades que dan un resultado determinado. Las de *varianza* se utilizan para entender un fenómeno o la realidad, mientras que las de *proceso* se orientan a la creación o modificación de cosas (SdI). En la literatura se identifica una discusión respecto de la aplicación de esta tipificación y la relación que tienen entre si (Fischer *et al*., 2010; Gregor, 2006; Ralph, 2019; Van de Ven, 2007). Hay un consenso en asociar la tipología de *proceso* con teorías relacionadas al esfuerzo, ciencias del diseño, prescriptivas o de *diseño-acción*; sin limitar el que puedan llegar a ser teorías de tipo *unificadas* (véase el Apartado 1.1; Braha *et al*., 1998). Por su parte las de *varianza* se asocian a teorías que incluyen causalidad, como las de ciencias naturales o algunas de ciencias sociales. En la literatura la relación entre las tipificaciones se refiere a que ambas son compatibles o aplicables en conjunto, pero en situaciones diferentes. Por ejemplo, para la creación de una radio (SE) se ejecuta un *esfuerzo* (teoría tipo *proceso*), pero a la vez se necesita considerar las teorías de circuitos y electromagnética (tipo *varianza*). A su vez los artefactos (SdI o SE) creados se convierten en *recursos* que sirven

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

para *esfuerzos* de comprensión de la *realidad* o de un *fenómeno*. Así, un radiotelescopio se utiliza en la teorización astrofísica (tipo *varianza*).

En la literatura, tales autores opinan que las tipificaciones de *varianza* y *proceso* son excluyentes entre sí. Esto se sustenta en que las personas que participan en un esfuerzo son agentes con decisión, lo que imposibilita que se representen con variables. Así, Ralph (2019) argumenta que "el comportamiento humano en general y el *esfuerzo* en particular no son predecibles y secuenciales. Las personas pueden cambiar sus objetivos, cambiar la secuencia de sus actividades, inventar nuevas actividades, renunciar en parte a un proceso y, en general, tomar acciones inesperadas". Sin embargo, en esta Tesis Doctoral se toma un punto de vista alternativo, al considerar que una teoría de *proceso* puede ser a la vez de tipo *varianza*, sin contradecir la discusión presentada en la literatura. El punto de vista alternativo es una postura positivista (como en las ciencias naturales), en la que se analizan los efectos de las acciones de los agentes sin sus motivaciones o consideraciones subjetivas en el dominio de estudio. En otras palabras, si se excluyen los agentes de la abstracción teórica se puede abordar el esfuerzo con la tipología de proceso y varianza al tiempo. El reto consiste en que, a pesar de que se excluyan los agentes como motor del fenómeno, se mantenga la utilidad de la teoría con la cual se explique la secuencia de eventos o actividades del esfuerzo y se pueda interpretar de ella los aspectos humanos de acuerdo con su contexto. Además, esta argumentación justifica porque la teoría de tipo *diseño-acción* se asocia a un nivel bajo en el entendimiento de un dominio (véase el Apartado 1.1.1). Entonces, una teoría de tipo *proceso* se puede evolucionar a la tipificación de *varianza* o un nivel de entendimiento para considerarla *unificada* o de *explicación-predicción*.

Así, de acuerdo con lo que se describe en este Capítulo, con el planteamiento de la investigación que se sigue se consigue la Conceptualización del EIE, la Teoría del Esfuerzo y la Teoría del EIE. Esta propuesta de solución se describe en el siguiente Capítulo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Página intencionalmente en blanco

4. Propuesta de solución

En este Capítulo se presenta la Tesis Doctoral como propuesta de solución a la situación que se plantea en los Apartados 2.4, 2.5 y 2.6. Este Capítulo consta de tres partes: la Conceptualización del EIE, la Teoría del Esfuerzo y la Teoría del EIE. Se hace una explicación de la Conceptualización mediante los aportes que se extraen de los enfoques que se abordan. Asimismo, con la Conceptualización se define el alcance de la Teoría. A partir de la Conceptualización, se describe y explica la premisa, los constructos y las proposiciones de la Teoría del Esfuerzo con ejemplos de aplicación y analogías. Además, sobre la Teoría del Esfuerzo se hace una interpretación cualitativa en analogía con el estándar de la Esencia. Finalmente se parametriza la Teoría del Esfuerzo con la Conceptualización del EIE para formar el Modelo teórico del proceso de desarrollo de ingeniería electrónica, que se constituye en la Teoría del EIE como un nivel superior de abstracción teórica.

En la solución que se describe se integran los ajustes que resultan del proceso de verificación y validación que se presentan en los Apartados 3.3.2.4, 3.3.2.5 y 3.3.2.6 y el Capítulo 5 de esta Tesis Doctoral.

4.1. Conceptualización

La Conceptualización es una representación del dominio del EIE en la que se consideran los enfoques que se abordan. La representación es compleja y a primera vista se ve como un número considerable de elementos y relaciones. Sin embargo, es una síntesis (simplificación/abstracción) de todas las fuentes que se referencian en el Capítulo 2 de Antecedentes y en el Apartado 1.2 y en la que también se consideran los juicios de expertos que evalúan la representación (véase el Apartado 3.3.2.5). La Conceptualización se considera una descripción general del EIE en la que se representa las fuentes consideradas y al dominio en su conjunto. Es una descripción general debido a que las palabras que se usan para denominar los términos (conceptos o relaciones) representan tipologías o clases con un ámbito amplio y pertinente al EIE y porque en la Conceptualización se unifican e integran la visión de diferentes enfoques relacionados con el EIE. Así, la Conceptualización se convierte en una síntesis del EIE, en parte de la Teoría del EIE y en un insumo esencial del proceso de teorización.

La Conceptualización se formula de forma agnóstica a las aproximaciones del esfuerzo, a una instancia concreta o a las decisiones que se pueden tomar en su ejecución. Con la Conceptualización se abarca todo el EIE, por lo que no se prescribe que parte o momento del ciclo de vida del esfuerzo se escoge como instancia de ejecución concreta. Con la Conceptualización tampoco se prescribe la forma de trabajo o el cómo se ejecuta un esfuerzo. En cambio, se caracteriza que cosas se hacen y que elementos esenciales se involucran, sin especificar como se combinan, en qué orden o secuencia (salvo las relaciones explícitas de causalidad), que cosas se ejecutan en paralelo o con que herramientas y recursos. Los practicantes ejecutan sus esfuerzos con la forma de trabajo que consideran apropiada.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Así, en la Conceptualización se identifican los conceptos y relaciones esenciales con el que se caracteriza un esfuerzo, pero estos elementos se conciben como piezas básicas que un practicante puede configurar de acuerdo con su forma de trabajo y sin limitaciones creativas.[4]

En la Figura 4-1, se presenta la Conceptualización preliminar que se desarrolla a través del Apartado 1.2 del Marco teórico y del Capítulo 2. de Antecedentes. Como complemento a esta descripción, en este Apartado se presenta la Conceptualización completa que se muestra en la Figura 4-2. En ambas Figuras se utiliza el código de colores que se describe en la Tabla 4.1, el cual además se utiliza en el resto de la Teoría. La selección de colores es compatible con el significado que se le da en la comunidad de *Semat* y con el estándar de la Esencia (Jacobson *et al.*, 2019). Se aclara que dos áreas de interés correspondientes a los colores verde y azul se nombran diferente, de acuerdo con lo que se explica en el Apartado 3.3.2.2.

Tabla 4.1. Convención de colores para los elementos de la Teoría
Fuente: elaboración propia

Color	Descripción
Verde	Representa el *área de interés* del esfuerzo *personalización*. Con este color se caracterizan los elementos de la Teoría que se relacionan principalmente con el interesado y la finalidad que se persigue con el SdI y el esfuerzo.
Amarillo / Naranja	Representa el *área de interés* del esfuerzo *solución*. Con este color se caracterizan los elementos de la Teoría que se relacionan principalmente con el SdI, que para el caso de la Tesis corresponde al sistema electrónico.
Azul	Representa el *área de interés* del esfuerzo *gestión*. Con este color se caracterizan los elementos de la Teoría que se relacionan principalmente con el equipo, el trabajo y el sustento del esfuerzo.
Gris	Representa un elemento de la Teoría que al instanciarse se debe clasificar en alguna de las áreas de interés.
Salmon claro/oscuro	Representa a un elemento de la Teoría que tiene un ámbito general en el esfuerzo, por lo que no se caracteriza con alguna de las áreas de interés.

[4] En caso de que se encuentre un contra ejemplo en el que se incumpla la generalidad propuesta, se deberá explorar la situación hasta llegar a una nueva generalidad que incluya al caso problemático; véase el Apartado 3.3 Método de investigación. En la eventualidad de no encontrar una nueva generalidad se tendría un nuevo límite de aplicación de la teoría; véase el Apartado 4.1.6. Alcance de la Teoría (limite).

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

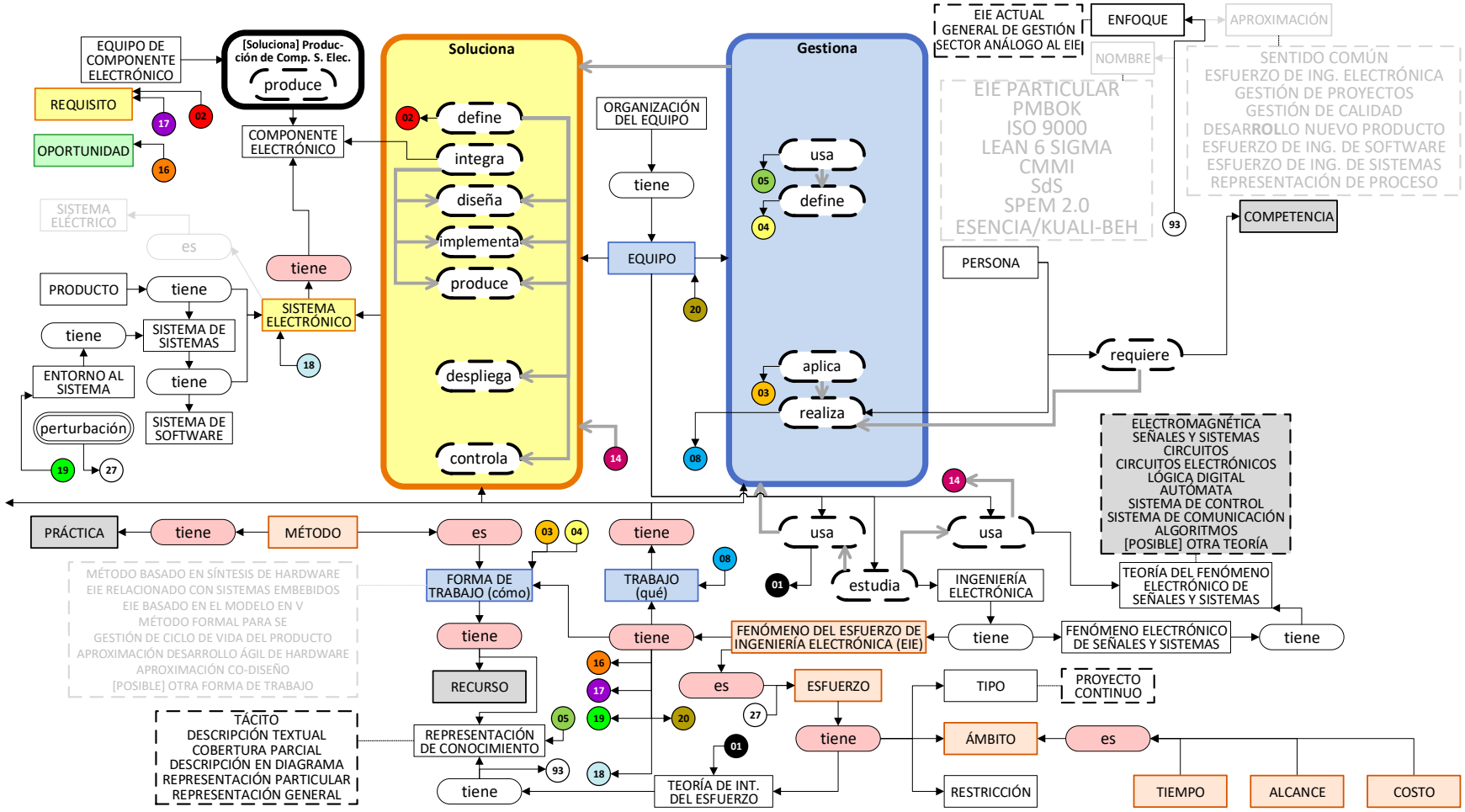


Figura 4-1. Conceptualización preliminar del EIE descrita en el Apartado 1.2 y Capítulo 2
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

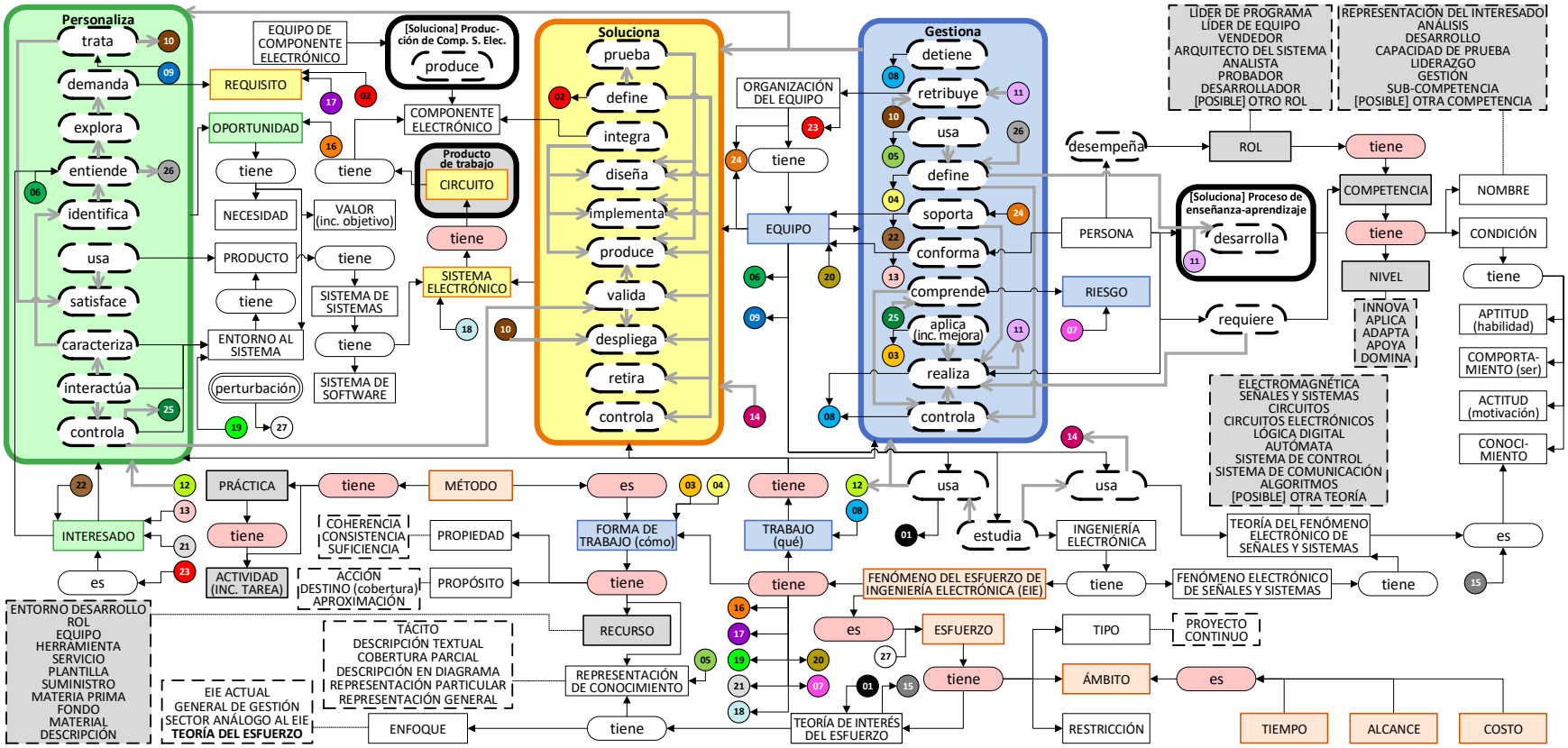


Figura 4-2. Conceptualización del EIE[5]
Fuente: elaboración propia

[5] A partir de este punto, la Figura 4-2 se utiliza como referencia para las representaciones de la Conceptualización. El resto de las figuras se presentan en el sentido vertical de la hoja, para que se identifiquen los elementos resaltados pertinentes a la redacción.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.1.1. Enfoque del EIE actual

A partir de las fuentes analizadas en torno al *enfoque del EIE actual*, se encuentra la mayor cantidad de elementos que se representan en el esquema preconceptual, que se presentan y resaltan en la Figura 4-3. Los elementos que se identifican mediante este enfoque se relacionan principalmente con el SE. Así, se identifican el área de interés del esfuerzo de *solución*. También, se identifican la mayoría de las acciones que se relacionan con esta área, representándolas con relaciones dinámicas y agrupándolas con el marco *soluciona*.

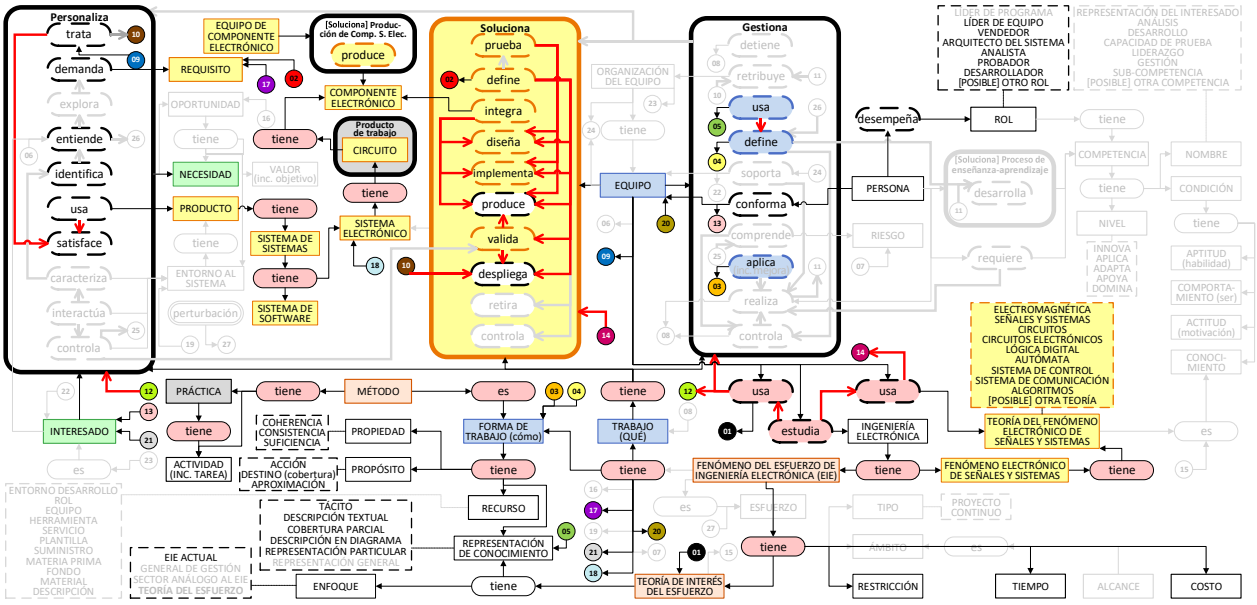


Figura 4-3. Conceptualización del EIE: enfoque del EIE actual
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

De la descripción que se hace sobre la interacción de otros elementos del esfuerzo con los elementos de la solución, se identifican otras dos áreas de interés. Estas áreas de interés se denominan en la Tesis Doctoral como *personalización* y *gestión*, utilizando una denominación similar para agrupar el conjunto de acciones correspondientes a estas áreas. La razón de la divergencia de nombres con los de la Esencia (*cliente* y *esfuerzo* respectivamente) se debe a que en la Tesis la denominación se hace en función a la finalidad del conjunto de actividades de cada área de interés y a la homologación y unificación terminológica que se describe en el Apartado 3.3.2.2.

Los conceptos y relaciones identificados en torno al área de interés *personalización* se identifican como contrapartes de los conceptos y relaciones de la *solución*. En cuanto a los elementos que se identifican en torno al área de interés *gestión* se relacionan principalmente con que el *equipo aplica* una *forma de trabajo*. Así, se identifica el *trabajo* como una abstracción conceptual de la *acción qué* una *persona realiza* en el *esfuerzo* y su resultado (*progreso*). En esta Tesis doctoral el *trabajo se define como la actividad que una persona realiza, que implica riesgos y una acción mental o física, logrando un progreso en el esfuerzo*. Por su parte, la *forma de trabajo* es la abstracción conceptual de *cómo* se ejecuta (concepto *propósito*) y *cómo* se estructura (concepto *propiedad*) la *acción* en el *esfuerzo* y los *recursos* utilizados. Así, en esta Tesis la *forma de trabajo se define como el conjunto adaptado de prácticas (o actividades) y recursos que un equipo utiliza para guiar y soportar su*

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

trabajo. Los conceptos de *trabajo* y *forma de trabajo* están estrechamente relacionados por lo que se consideran dos puntos de vistas y la nominalización de la *acción* en el esfuerzo (*qué* y *cómo*).

Adicionalmente, en la Conceptualización se identifican dos fenómenos de estudio o dominios: el estudio del SdI y el estudio del esfuerzo para crear el SdI (*fenómeno electrónico de señales y sistemas* y *EIE* respectivamente en esta Tesis Doctoral). Esta diferenciación es compatible con lo que se propone para las ingenierías desde las *ciencias del diseño* (Braha *et al.*, 1998; Hubka *et al.*, 1996). La diferenciación de dominios permite que se identifiquen teorías de naturaleza y tipologías diferentes con las que se sustenta uno y otro dominio. Por el lado del *esfuerzo* se identifican *teorías de interés del esfuerzo* con la tipología necesaria de tipo *proceso* y con una caracterización actual de *alcance medio*. Por el lado del SdI se identifican *teorías del fenómeno electrónico de señales y sistemas* sustentadas en las ciencias naturales y las matemáticas, con tipología de *varianza* y nivel de *teorización unificada*. Con esta diferenciación se identifica el resto de los enfoques que se abordan en la Tesis, que se describen como aportes a la Conceptualización en los siguientes Apartados.

4.1.2. Conceptualización del EIE: enfoque general de gestión (calidad)

Desde la *aproximación de calidad del enfoque general de gestión* se identifican la mayoría de los elementos relacionados con el área de interés de personalización. El aporte respectivo se representa en la Figura 4-4 y Figura 4-5, en las cuales se puede observar un equivalente al ciclo de Deming para el producto y proceso con los elementos de la Conceptualización.

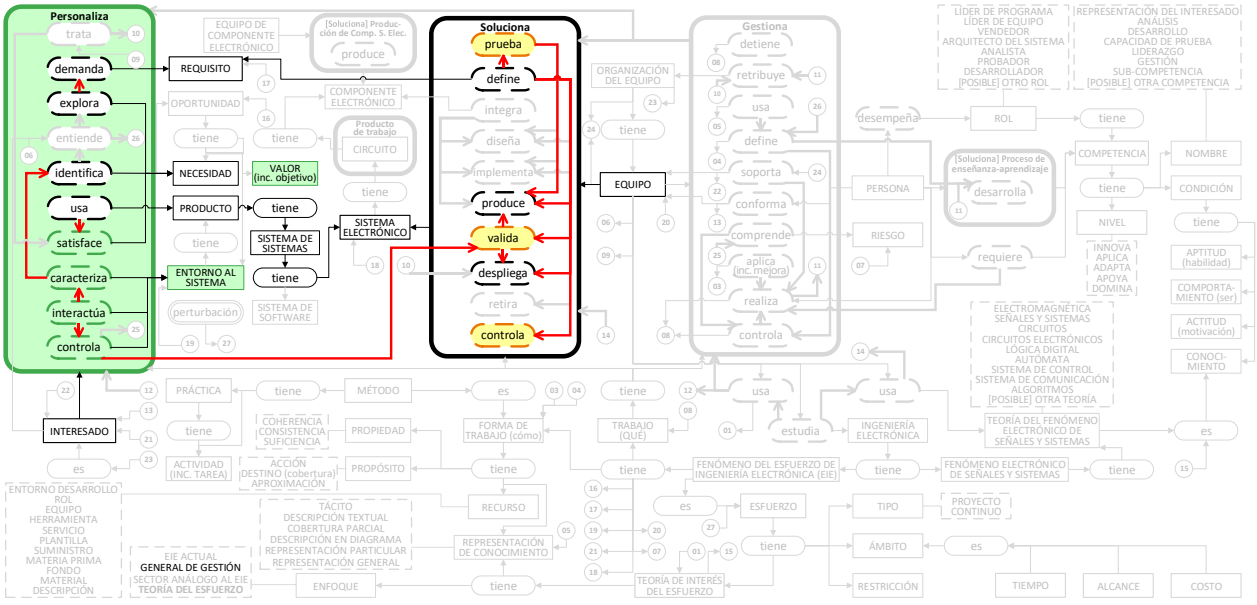


Figura 4-4. Conceptualización del EIE: enfoque general de gestión (calidad del producto)
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

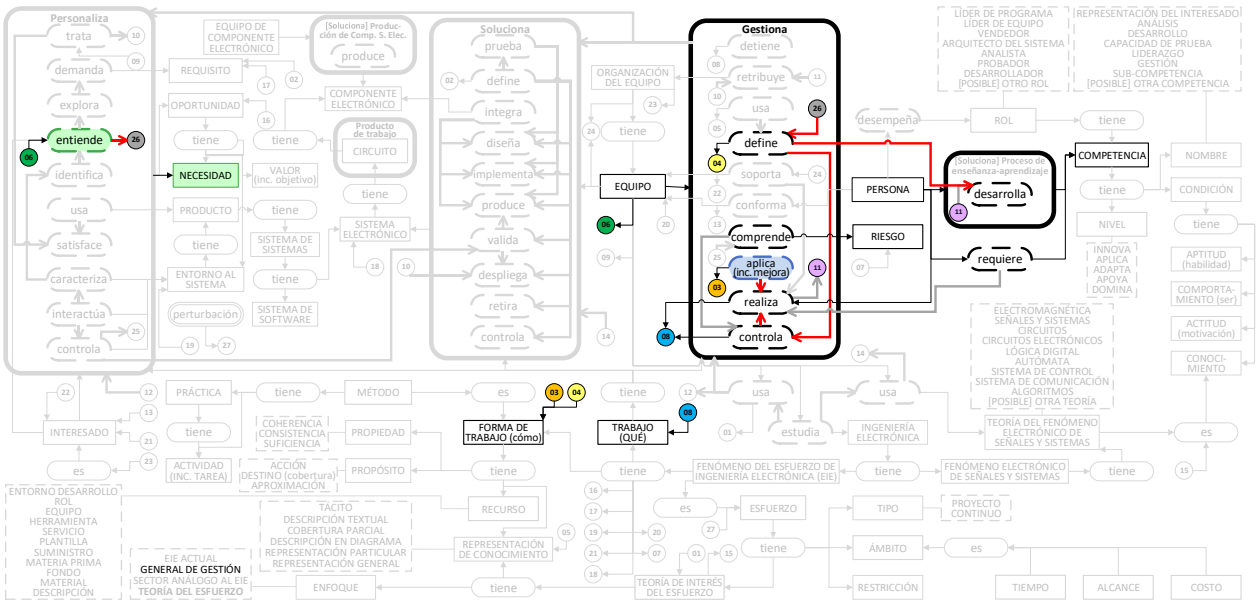


Figura 4-5. Conceptualización del EIE: enfoque general de gestión (calidad del proceso)
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

Es necesario señalar que, desde la aproximación de *Lean Six Sigma*, se extrae la idea inicial de cuantificar el progreso del esfuerzo que se describe en el Apartado 4.2 y las actividades de control que se ejercen en el esfuerzo. Se aclara, además, que la palabra *control* se utiliza en la Conceptualización con el significado que se le da en la *teoría de control*, por lo que con ella se abarcan las actividades de: medir, decidir y actuar en un ciclo continuo.

Cabe resaltar que el concepto *calidad*, no aparece explícito en la Conceptualización, debido a que en la literatura este se describe en función de otros conceptos que si están presentes en la representación. Por tanto, en el esquema preconceptual, el término *calidad* se define con respecto al producto y con respecto al proceso (véase el Apartado 2.2.1). En lo que atañe a la *calidad del producto*, esta se representa con el conjunto de relaciones entre el *equipo*, los *interesados* y los *requisitos* para cumplir con un *producto* (al que se le corresponde un *valor*) y con el que *se satisfacen* las *necesidades*; véase la Figura 4-4. Por su parte, la *calidad del proceso* se representa como las relaciones entre el *equipo*, sus *competencias* y el *riesgo*, para mejorar (*aplicar*) la *forma de trabajo* y *controlar* el *trabajo*; véase la Figura 4-5.

Así, mediante esta aproximación de *calidad* se extiende la concepción del esfuerzo a las etapas iniciales y finales del ciclo de vida, previas a la solución del SdI y hacia el final del ciclo del esfuerzo cuando se libera el SdI. Entonces, se incluyen en la Conceptualización la *interacción* y *control* que se ejerce sobre el *entorno al sistema* y la retroalimentación que se hace para validar el SdI contra los *requisitos*, las *necesidades* y el *valor* que se provee con un *producto*. En la Conceptualización también se identifican los *elementos del ciclo de Deming de la calidad de proceso*. Sin embargo, la calidad del proceso se desarrolla con el análisis de otras aproximaciones y enfoques, por lo que en la Figura 4-5 solo se sombrean tres elementos. En cambio, mientras se analiza la calidad del proceso se depuran las *relaciones de implicación* relacionados con *riesgo*, *trabajo*, *forma de trabajo* y *competencia*. La *competencia* es el concepto con el que se cierra el ciclo y con el que se retroalimenta la calidad del proceso (mediante la *forma de trabajo*).

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.1.3. Conceptualización del EIE: enfoque general de gestión (proyectos)

Con la *aproximación de proyectos del enfoque general de gestión* se brinda principalmente aportes a la Conceptualización de elementos entorno al *área de interés de gestión*, que se presentan y resaltan en la Figura 4-6.

El aporte que se consigue con este Apartado consiste en la determinación de responsabilidades entre el interesado y el equipo (incluso cuando el equipo es un tipo de interesado). Con esta aproximación se clarifica la función de *equipo* e *interesado*, así como los diferentes roles que asumen en el esfuerzo. Debido a que la responsabilidad principal de solucionar y gestionar el esfuerzo recae sobre el *equipo*, se separan los conceptos para identificar explícitamente las responsabilidades diferenciadas de este. Las responsabilidades del interesado se orientan principalmente hacia el *entorno al sistema* en el que se usa el SdI y al contraste que se hace entre los resultados del esfuerzo y las necesidades, como se describe en el Apartado anterior. La separación de responsabilidades se observa en las relaciones dinámicas que se asocian a cada uno de los agentes en la Figura 4-6.

En cuanto al área de interés de gestión, con esta aproximación se identifica el concepto esencial *riesgo* y se explicita el *ámbito* (*costo*, *tiempo* y *alcance*) en el que se ejecuta cualquier esfuerzo. También se aclara la asociación y ubicación del concepto *recurso*, el cual se relaciona directamente a la *forma de trabajo*.

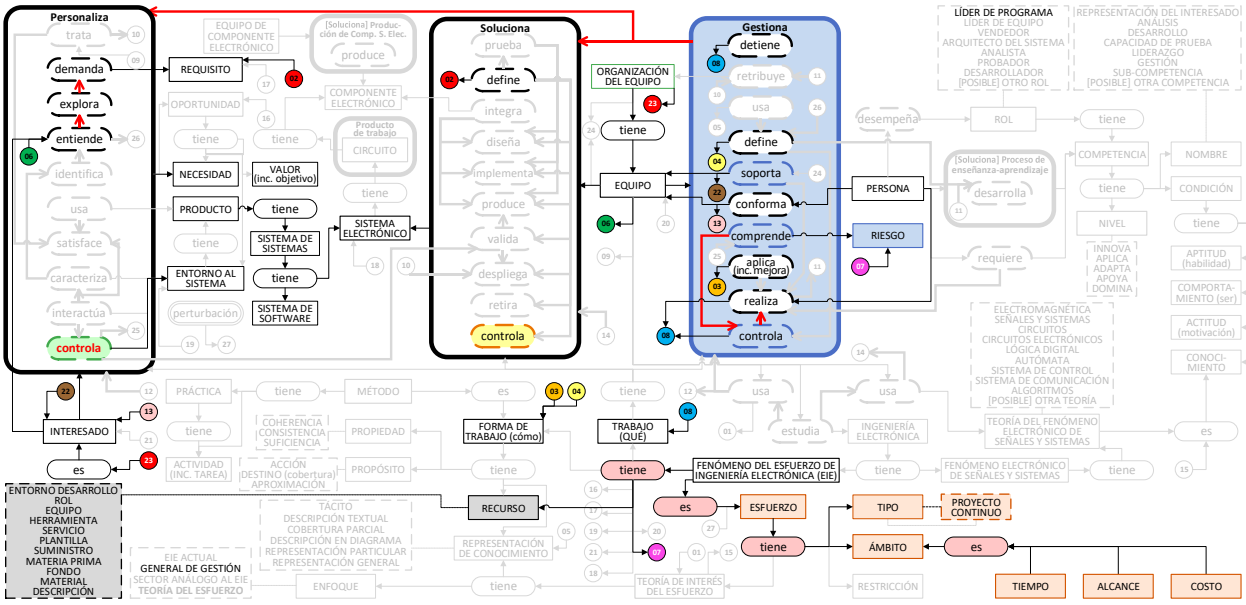


Figura 4-6. Conceptualización del EIE: enfoque general de gestión (proyectos)
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

4.1.4. Conceptualización del EIE: enfoque de sectores análogos al EIE (ingeniería de sistema)

Desde este enfoque se aporta a la Conceptualización con el escalado del esfuerzo, la consideración de diferentes ámbitos y con la *interpretación del fenómeno desde la ingeniería de sistemas*. Los elementos de la Conceptualización pertinentes se resaltan en la Figura 4-7.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

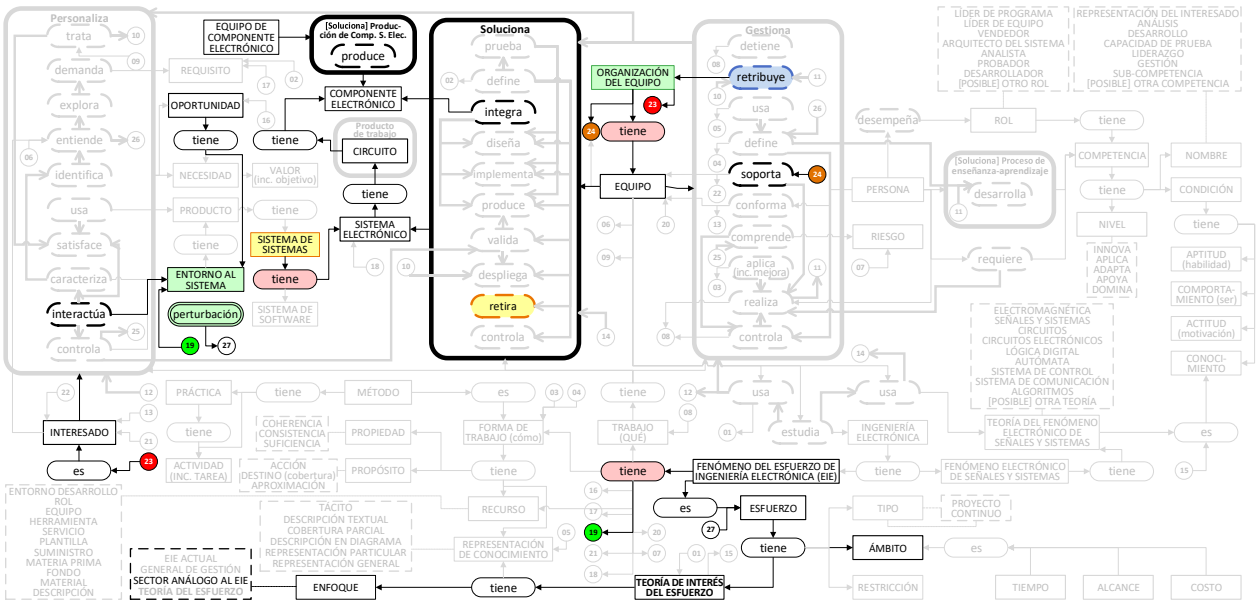


Figura 4-7. Conceptualización del EIE: aproximación de ingeniería de sistemas
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

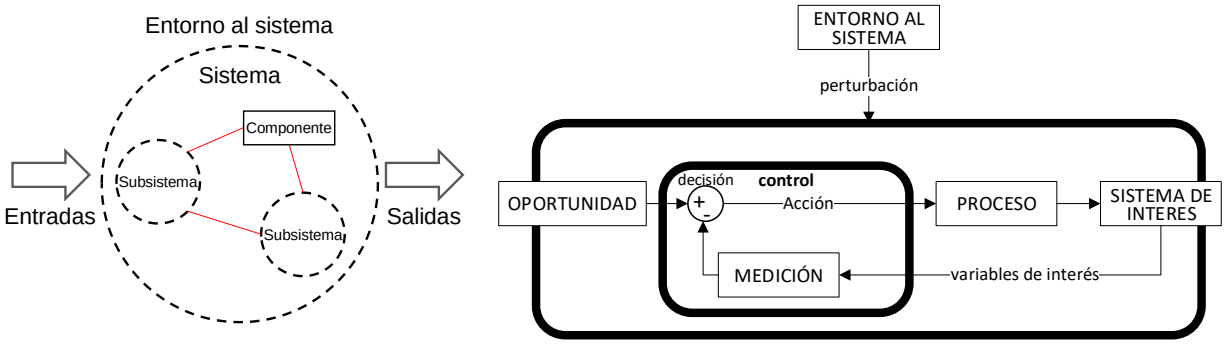
Al analizar esta aproximación se identifica el concepto *organización del equipo*. Con este concepto se soporta el escalado de esfuerzos y se le da un contexto al equipo que los ejecuta. Estas consideraciones se desarrollan en los Apartados 2.3 y 4.1.6.

Por otro lado, la frase en la Conceptualización: *oportunidad tiene entorno al sistema*, se entiende en el sentido que la oportunidad se concibe en un contexto (*entorno al sistema*), con el que se determinan las *restricciones* del *esfuerzo* y se acota el ámbito de la *oportunidad* y las (*tiene*) *necesidades* asociadas que se cubren. De forma similar la frase: *esfuerzo tiene* un *entorno al sistema*, se interpreta como una correspondencia, no como composición. A cada *esfuerzo* le corresponde (*tiene*) un *entorno al sistema*. Esta asociación se aborda y se explica desde la *teoría de sistemas* (véase el Apartado 2.3); allí el *entorno al sistema* por definición esta fuera del sistema (*esfuerzo*), pero lo afecta y está asociado a él; véase la parte (a) de la Figura 4-8. Las implicaciones de esta consideración se discuten a continuación.

Cuando se analiza la Conceptualización desde la aproximación sistémica de la ingeniería de sistemas, el *esfuerzo* (en particular el EIE) se puede considerar como un *sistema* (SdS); véase la Figura 4-8. Consecuentemente algunos conceptos son concebidos como subsistemas que se relacionan con otros y que a su vez están constituidos por otros elementos. Esta aproximación ayuda a entender los límites del fenómeno de estudio, debido a que se identifica el *sistema* (*esfuerzo* o EIE), el contexto en el que se desarrolla (*entorno al sistema*), las *perturbaciones* que afectan al fenómeno y la acción continua que se realiza (dinámica del esfuerzo o *trabajo*) para corregir las desviaciones del *proceso* (esfuerzo) y obtener el SdI deseado (SE). Así, las perturbaciones en el sistema (*esfuerzo*) se manifiestan como *riesgos* o *ruido* que causan que se desvíe el *progreso* (variable de interés) de su *valor deseado* (término de la aproximación sistémica). El *riesgo* se identifica de forma explícita en la Conceptualización en la que se abstraen los eventos o condiciones inciertas significativas del esfuerzo (véase el alfa riesgo en el Apartado 4.3.1). El *ruido* (término de la aproximación sistémica) es el conjunto de eventos o circunstancias que de forma permanente afectan al *esfuerzo* (sistema) pero que por sí solos son intrascendentes o despreciables para

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

el esfuerzo. Por ejemplo, el evento en el que un miembro del equipo suspende temporalmente su trabajo para ir al baño hace parte del ruido. En la parte (b) de la Figura 4-8, se muestra un diagrama de bloques (típico de la ingeniería de sistemas) como una abstracción simplificada del fenómeno.



a) Representación de un sistema b) diagrama de bloques simplificado del esfuerzo

Figura 4-8. Interpretación sistémica del esfuerzo
Fuente: elaboración propia

La Conceptualización se puede usar de forma recursiva para representar esfuerzos de diferente ámbito; véase la parte superior izquierda de la Figura 4-7. El *equipo soluciona* un SE mediante la *integración* de *componentes*. A su vez, estos componentes pueden ser otros SE que se solucionan en otras instancias del EIE. Así, por ejemplo, se puede analizar una *organización* que ejecuta un EIE de un ámbito amplio. Para esta organización la Conceptualización en el nivel de abstracción más amplio representa al esfuerzo en al ámbito de un *programa* y el SdI es un SE que integra componentes que a su vez son otros SE (subsistemas); véase la parte (a) de la Figura 4-8. Tales subsistemas se solucionan dentro de la misma organización en instancias diferentes de EIE acotados a su ámbito específico. Entonces, en los esfuerzos de menor ámbito la Conceptualización representa el EIE al nivel de *proyectos*. Así, la recursividad podría seguir varios niveles hasta llegar a un EIE en el que se integren *componentes electrónicos* como cajas negras y que se solucionan en esfuerzos fuera del interés de la organización.

4.1.5. Enfoques análogos al EIE (la Esencia)

Antes de analizar la *aproximación de la Esencia*, se identifican de forma independiente la mayoría de los constructos y proposiciones que la comunidad de *Semat* encuentra para el esfuerzo de ingeniería de software, con una metodología de trabajo diferente. Así, por un camino independiente se analiza otro dominio disciplinar y se llega a la Conceptualización que es compatible con la Esencia. Debido a esto con la Esencia se hace una excepción en la representación de la Figura 4-9 y por claridad solo se resaltan los elementos nuevos que se aportan a la Conceptualización.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

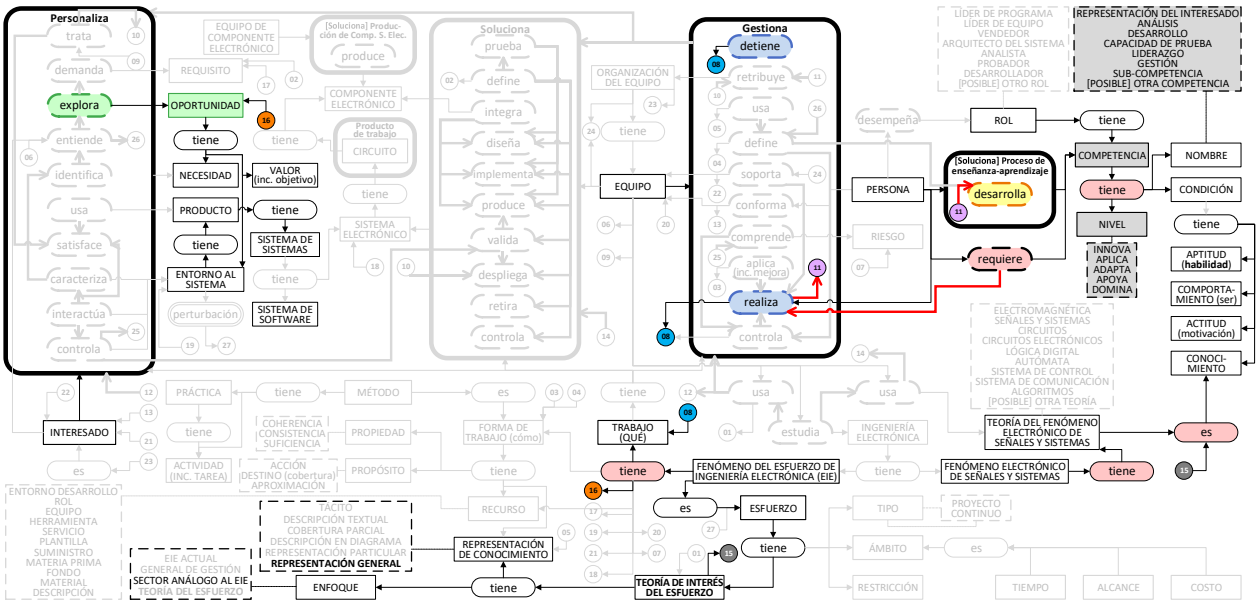


Figura 4-9. Conceptualización del EIE: enfoques análogos al EIE (la Esencia)
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

En esta aproximación se identifica el concepto *oportunidad* que a su vez es una abstracción en la que se agrupan otros conceptos (*necesidad*, *valor*, *objetivo*, *entorno* o sinónimos de estos). En esta Tesis doctoral la *oportunidad se define como el conjunto de circunstancias que, en contexto a un sistema, justifican el esfuerzo, afectan a los interesados y permiten enfocar los requisitos*. En la literatura en la que se describe el EIE no se menciona este concepto, en cambio se mencionan los elementos que se relacionan con él. En las fuentes de la Esencia y gestión de proyectos es donde se encuentra esta abstracción. En la gestión de proyectos esta abstracción se denomina de forma diferente como *caso del negocio*. Por esto en esta Tesis antes de la selección definitiva se consideran alternativas de denominaciones como los términos de *caso del interesado* o *caso del esfuerzo*. Se escoge la palabra oportunidad por su significado en el diccionario y en analogía y compatibilidad con la Esencia. Sin embargo, para evitar confusiones es pertinente que se aclare que a la palabra oportunidad se le da otro significado en las aproximaciones de gestión de la calidad y de proyectos. Con respecto a calidad se usa en el contexto del análisis de debilidades, amenazas, fortalezas y *oportunidades* de una situación. En el caso de proyectos se usa en contraposición a la connotación negativa que se le da al riesgo (amenazas versus *oportunidades*).

En la *oportunidad* se consideran las *necesidades*, las cuales se relacionan con las carencias, problemas o deseos que tienen los *interesados*. En la *oportunidad* se conciben todas las *necesidades* de interés, pero no siempre se consideran satisfacer en su totalidad mediante un esfuerzo. Con el *entorno al sistema* se determinan las *restricciones* de un esfuerzo; la relación de la *oportunidad* con el *entorno al sistema* se describe en el Apartado anterior (4.1.4) y en 2.3. Así, dependiendo de tales *restricciones* es posible que, para una *oportunidad*, se asuma satisfacer un subconjunto de *necesidades* y a pesar de ello se justifique la ejecución del esfuerzo. Por otro lado, desde el punto de vista del *interesado* que *identifica necesidades*, lo importante es que se *satisfagan* (o parte de ellas), no el SdI en sí. En este sentido el *producto* (en el que se encapsula al SdI) es lo que ve el *interesado* desde la perspectiva de la *necesidad* y la entrega de *valor*. Por ejemplo, un televidente usa un televisor a través de sus interfaces para ver contenido audiovisual y satisfacer sus

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

necesidades, no lo concibe como un sistema electrónico que contiene subsistemas, entre otras cosas que constituyen al producto. Si el *interesado* no satisface sus *necesidades* con el *producto*, no se provee el *valor* esperado, por lo que no cumple sus *objetivos*. Así, el *valor* se considera más general que los *objetivos*. Entonces como síntesis, dentro de la oportunidad se abstraen todas estas consideraciones y conceptos.

Por otro lado, a partir de esta aproximación se identifica el concepto *competencia* en el que se agrupan (*tiene*) un conjunto de condiciones: *aptitud* (*habilidad/capacidad*), *actitud* (*motivación/deseo*), *comportamiento* (*ser/pertinencia/ideología*) y *conocimiento* (*teorías de interés del esfuerzo* y *teorías del fenómeno electrónico de señales y sistemas* o teorías del SdI en general). En las fuentes que se analizan se encuentra una carencia de coherencia terminológica; se utilizan las condiciones como sinónimos de competencia. En esta Tesis doctoral la *competencia se define como el conjunto de condiciones necesarias para que una persona pueda ejecutar de forma efectiva una actividad* (conseguir un *progreso*). En la Esencia también se definen un conjunto de competencias genéricas, las cuales se aplican por analogía al EIE. En la Conceptualización además se concibe la definición de sub-competencias u otras específicas del EIE.

4.1.6. Alcance de la Teoría (limite)

El fenómeno de interés en la Conceptualización es el EIE, el cual se diferencia del *fenómeno electrónico de señales y sistemas*. Esto es un aporte importante porque en la literatura a menudo son tratados como partes de un mismo fenómeno, pero tienen naturalezas significativas que los diferencian. En ingeniería el fenómeno del sistema de interés se explica a través de las teorías fundamentales de la física y las matemáticas. A continuación, se describe el alcance de aplicación de la Conceptualización y la Teoría.

Hay cuatro *conceptos* que limitan el alcance de la Teoría del EIE y la Conceptualización y se interactúa con ellos mediante *relaciones dinámicas* que hacen las veces de interfaces; véase la Figura 4-10. *Entorno al sistema* es el *primer* concepto en el que se abstraen las circunstancias y demás elementos que el *interesado controla* y con las que *interactúa*; limitado al contexto del *sistema electrónico* o del *equipo* en el EIE. Por otra parte, en el caso de la ingeniería electrónica, el *equipo integra componentes electrónicos*, gracias a que otros *equipos de componentes electrónicos* (en algunos casos de otras disciplinas, que incluyen profesiones como físicos o químicos) *producen* los *componentes electrónicos*. Tales *componentes* son el *segundo* concepto y tienen un comportamiento perteneciente al *fenómeno electrónico de señales y sistemas*, pero se *producen* con otros EIE (instancias diferentes) o con *esfuerzos* de dominios diferentes al EIE. El *tercer* concepto es la *organización del equipo* que concierne a los elementos, circunstancias o procedimientos pertinentes al entorno y que *soportan* a un *equipo* que *realiza* un *trabajo*; es el conjunto de personas y el contexto que los define. Por ejemplo, en el caso de una organización tipo empresa, se refiere a las personas que ejecutan procesos como los contables, logísticos o legales, por lo que en general ejecutan esfuerzos de dominios diferentes al EIE (actividades de soporte). Una persona de la *organización del equipo* que trabaje en el EIE lo hace como un tipo de (*es*) *interesado* o como un *equipo* dentro de su correspondiente ámbito y de acuerdo con las relaciones identificadas en la Conceptualización. Por lo cual el tercer concepto se restringe con la relación: *organización del equipo soporta equipo*. Por otro lado, de acuerdo con la finalidad e intereses (*oportunidad*) organizacionales, el *equipo retribuye* a la *organización del equipo* con su *trabajo* y un *comportamiento* y *actitud* (*competencias*) afín a los *valores* organizacionales. El *ultimo* concepto que limita la Teoría del EIE es la *competencia*, pero a la vez es parte integral de ella. Una *persona requiere competencias* para *realizar* un *trabajo* (nominalización de la acción en el esfuerzo). A su vez, cuando el *equipo realiza* un

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

trabajo retroalimenta a sus miembros (*persona desarrolla competencia*). Sin embargo, queda fuera del ámbito del EIE, el resto de las consideraciones relacionadas con la competencia que pertenecen a fenómenos como el *proceso de enseñanza-aprendizaje*.

Así, lo concerniente a tales conceptos más allá de lo descrito en este Apartado, está fuera del alcance de la Conceptualización y de la Teoría del Esfuerzo y del EIE.

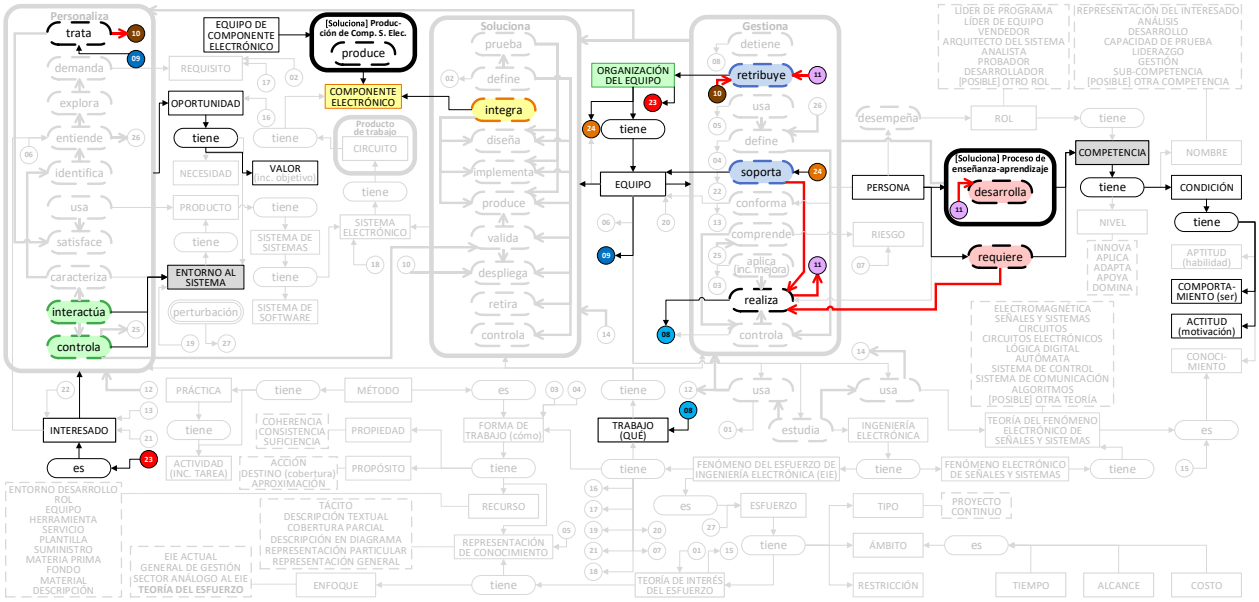


Figura 4-10. Alcance de la Teoría (limite)
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

4.2. Teoría del Esfuerzo

En la Conceptualización del Apartado 4.1, se identifican los conceptos y relaciones que caracterizan al EIE. La *Teoría* que se presenta en este Apartado se basa en tal caracterización, en analogías cualitativas a propuestas que se describen en el marco teórico y en analogías a teorías de fenómenos de las ciencias naturales. Así, sobre la Conceptualización se observan tipologías de conceptos y relaciones. Entonces se identifican patrones en los conceptos de mayor jerarquía que se enlazan directamente al EIE o esfuerzo (véanse la Figura 4-11 y la Figura 4-13) y con las acciones (*relaciones dinámicas*) que los agentes del dominio ejecutan sobre algunos conceptos (Figura 4-21). De acuerdo con esta observación, se presenta una abstracción sobre la Conceptualización, que se propone como Teoría unificada para el fenómeno del esfuerzo; según la clasificación de Merton (1968). Así, los conceptos y relaciones de la Conceptualización se abstraen en constructos y proposiciones, con una *representación* en lenguaje matemático para conformar la Teoría con la que se interpreta formalmente el fenómeno del esfuerzo de un SdI.

En este Apartado, el objeto de estudio es el fenómeno concerniente al *esfuerzo*, sin perder de vista que la Tesis se centra en el EIE. Así, por ejemplo, el EIE, el de sistema software o de sistema de sistemas son tipos particulares de *esfuerzo*.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.2.1. Espacio del esfuerzo (1er constructo)

Las premisas son las suposiciones iniciales de un planteamiento teórico, y en esta Tesis Doctoral se extraen de la Conceptualización, como se puede observar en la Figura 4-11. En la Figura se identifica que el *esfuerzo tiene ámbito*. A su vez el *costo, tiempo y alcance* conforman (*son*) el *ámbito* del *esfuerzo*. Esto se interpreta como que el resto de los elementos identificados dentro del *esfuerzo* se delimitan en *costo*, *tiempo* y *alcance*.

Entonces, la Teoría se fundamenta en la premisa de que el esfuerzo se puede representar como funciones en un espacio euclidiano constituido por las dimensiones de costo, tiempo y alcance. El *espacio del esfuerzo* se constituye además en el *primer constructo*. La representación del esfuerzo se limita a un solo octante conformado por los ejes positivos[6] de las dimensiones. Por convención el eje "x" corresponde a tiempo, "y" a costo y "z" a alcance; véase la Figura 4-12. Los elementos que se representan (constructos y proposiciones) en el espacio están determinados por las dimensiones (magnitud) de alcance, costo y tiempo, siendo una interpretación del fenómeno intrínsicamente cuantitativa. El espacio es de tipo euclidiano, por lo que los ejes son ortogonales.

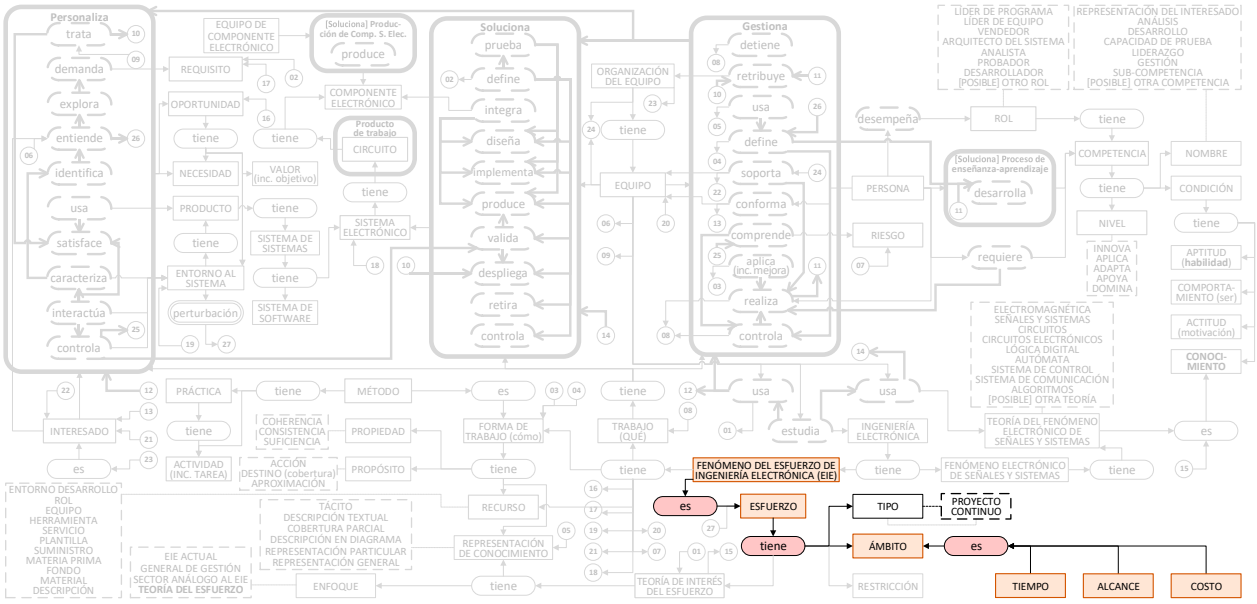


Figura 4-11. Ámbito del esfuerzo
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

Los elementos que se representan en el espacio del esfuerzo implican que se interpreten con las dimensiones costo, tiempo y alcance. Los elementos son abstracciones teóricas de la Conceptualización que se pueden representar con una notación matemática; por ejemplo, como puntos, vectores o funciones en el espacio. En el espacio del esfuerzo la dimensión tiempo se interpreta como la medida de

[6] Hay precedentes en la ciencia naturales de limitación a ejes positivos como la representación de la frecuencia que solo tiene una interpretación real en el eje positivo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

progreso temporal de un elemento del dominio con unidades de tiempo (hora, día, etc.). A su vez, el costo es la monetización que corresponde con un tiempo y alcance determinado de un elemento con unidades monetarias (peso, dólar, etc.). Finalmente, la dimensión de alcance se define como la interpretación del conjunto de objetivos que se desean y se asocian a un *tipo* de elemento del esfuerzo. La dimensión alcance no tiene una unidad predefinida para un determinado elemento en un esfuerzo. Así, tipos de elementos diferentes tienen en general unidades diferentes. Entonces, el eje alcance es un comodín que tiene un significado que depende del tipo de elemento que se represente. Así, se puede describir el esfuerzo como una abstracción teórica en el espacio.

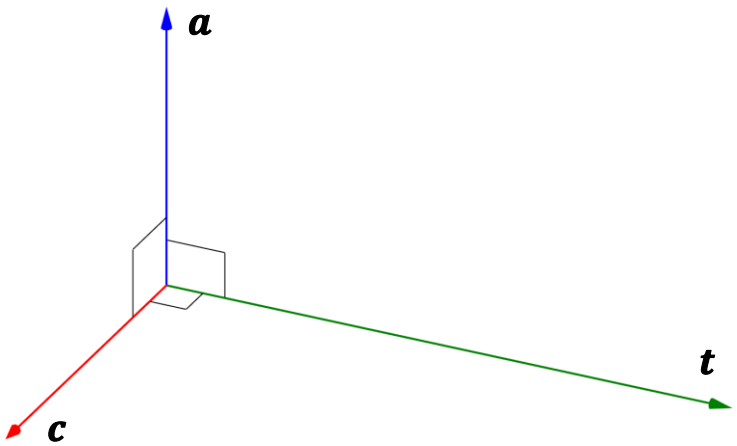


Figura 4-12. Espacio del esfuerzo (1er constructo)
Fuente: elaboración propia

4.2.2. Perspectivas del esfuerzo

En la Conceptualización hay conceptos con los que se definen el *ámbito* del *esfuerzo* y otros con los que se define la conformación del esfuerzo. En la Figura 4-13 se representa los conceptos con los que se determina el esfuerzo, que como constructo teórico se denominan perspectivas.

El *esfuerzo del sistema* es un fenómeno *complejo*. Para comprender este fenómeno se propone un conjunto de *perspectivas* con el que se trabaja en el esfuerzo. Las *perspectivas* se abstraen de los conceptos que se relacionan estructuralmente con el esfuerzo y se identifica como el *segundo constructo*. Con cada una de estas *perspectivas* se aborda una característica esencial del *esfuerzo* relacionado con un tipo de SdI. Así, en las perspectivas se abstraen los agentes y las cosas con las que estos agentes interactúan (usan producen, demandan, controlan, etc.) en la ejecución de un esfuerzo. El conjunto de perspectivas conforma el esfuerzo. Las perspectivas son conceptos interrelacionados que se solapan entre sí por lo que se interpretan como puntos de vistas diferentes del esfuerzo, mas no como particiones físicas de este fenómeno.

En el espacio del esfuerzo, el avance o retroceso (*progreso* con respecto a las dimensiones) de una perspectiva se representa como una trayectoria (hilo en el espacio); véase la parte (a) de la Figura 4-14. Además, el ciclo de vida de una perspectiva se referencia al origen del espacio del esfuerzo, lo que implica que para un momento dado el esfuerzo se considera que se inicia en la coordenada (0,0,0).

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Entonces, la trayectoria se constituye con un conjunto de puntos. Así, sea P_i un *punto de progreso* en la trayectoria que se define como:

$$P_i = \{(c_i, t_i, a_i); c_i, t_i, a_i \geq 0\}$$

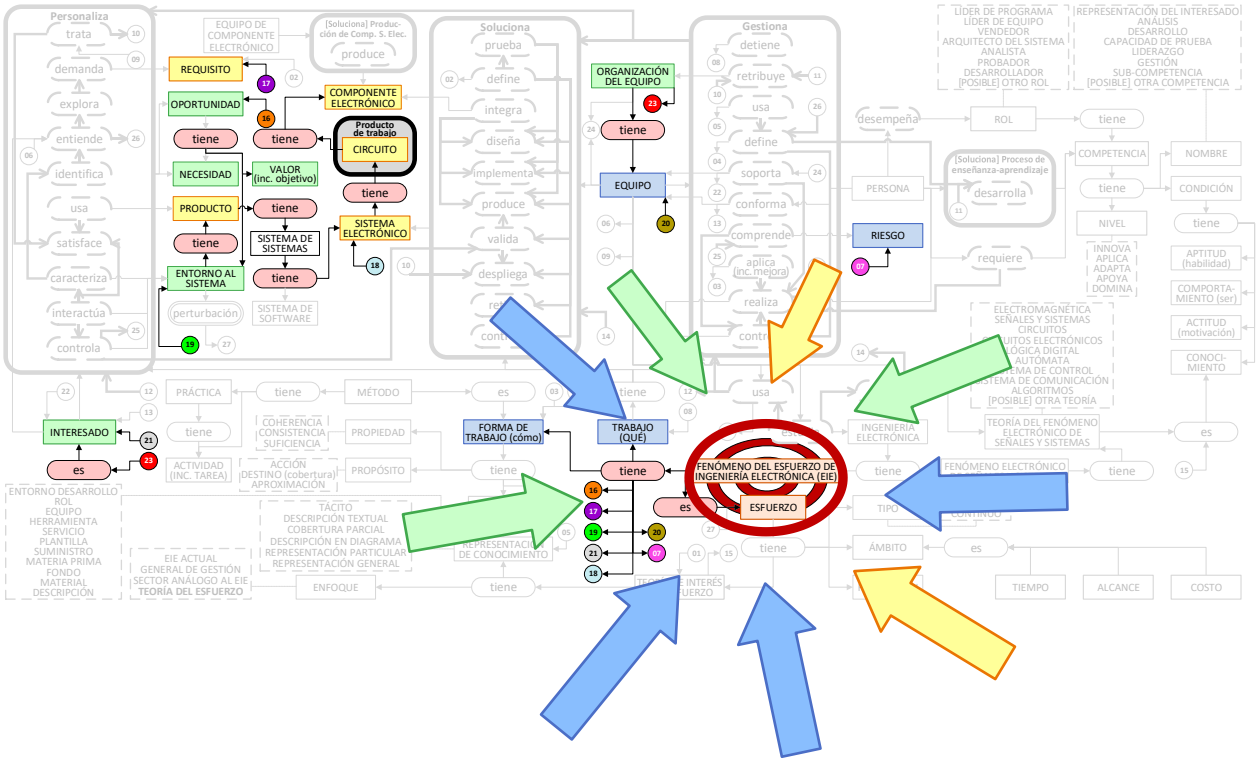


Figura 4-13. Perspectivas esenciales del esfuerzo (2do constructo)
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

Con base en un punto P_i sobre la trayectoria de una perspectiva, se define una interpretación vectorial (magnitud y sentido) del progreso que se denomina *vector progreso* (véase la parte c de la Figura 4-14); que se muestra en la siguiente expresión:

$$\vec{p}_i = c_i\overrightarrow{e_1} + t_i\overrightarrow{e_2} + a_i\overrightarrow{e_3}$$

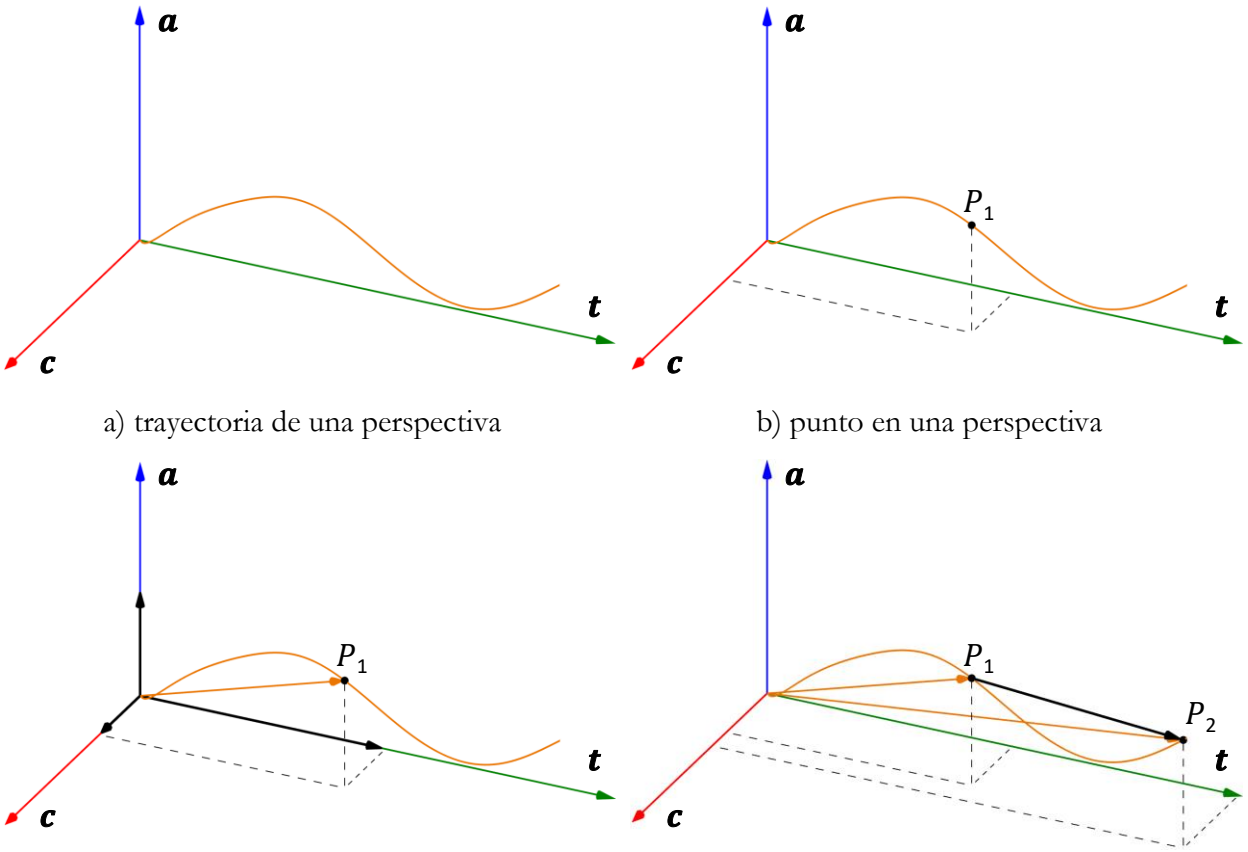
En donde $\overrightarrow{e_1}$, $\overrightarrow{e_1}$ y $\overrightarrow{e_1}$ son los vectores unitarios sobre los ejes de costo, tiempo y alcance respectivamente. Por otra parte, si se seleccionan dos puntos de progreso P_i y P_j de una trayectoria, se puede calcular el progreso entre esos dos puntos a partir de la diferencia de los vectores progreso $\vec{p}_j$ y $\vec{p}_i$, como se representa a continuación; véase la parte (d) de la Figura 4-14:

$$\vec{p}_{ij} = \vec{p}_j - \vec{p}_i = (c_j - c_i, t_j - t_i, a_j - a_i)$$

En la anterior expresión se representa un *vector progreso genérico* entre dos puntos cualesquiera de una trayectoria. Esta expresión es la abstracción teórica y la representación cuantitativa del progreso en un

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

esfuerzo, en analogía al vector desplazamiento de la física mecánica. El sentido positivo de una componente se interpreta como un *avance* en el *progreso* sobre esa dimensión. De forma similar el sentido negativo de una componente se interpreta como un *retroceso* en el *progreso* en la dimensión respectiva.



a) trayectoria de una perspectiva b) punto en una perspectiva

c) vector progreso de P_1 con respecto al origen d) vector progreso entre dos puntos

Figura 4-14. Perspectiva en el espacio del esfuerzo
Fuente: elaboración propia

4.2.2.1. Normalización del esfuerzo

De acuerdo con la interpretación de la dimensión alcance, el espacio del esfuerzo se debe normalizar para poder representar perspectivas de diferente tipo en un solo espacio. Con la normalización, los ejes se inician en el origen y se extienden hacia el infinito. Los ejes representan valores cuantitativos en porcentaje del progreso del esfuerzo o de sus perspectivas. Estos ejes se normalizan de 0% a 100% para estandarizar el espacio. Sin importar que los *practicantes* del esfuerzo utilicen unidades de medidas diferentes por cada perspectiva, la normalización les permite representar el esfuerzo y sus perspectivas en un único espacio. La normalización del alcance se hace con respecto al total esperado del esfuerzo o con respecto al total esperado de cada perspectiva. La normalización con respecto a las dimensiones tiempo y costo se hace con referencia al total estimado del tiempo o costo del esfuerzo o perspectiva.

Sin importar el tipo de esfuerzo (continuo o proyecto) las dimensiones son las mismas. Para el tipo continuo se justifica el que los ejes se extiendan indefinidamente. El esfuerzo y las perspectivas se

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

pueden extender más allá del 100%, hasta donde el esfuerzo particular lo requiera. Por ejemplo, durante un esfuerzo los participantes pueden concebir más requisitos, llegando a un 110% de los acordados inicialmente. Por otro lado, la normalización de un esfuerzo o una perspectiva se pueden ajustar. Así para el ejemplo anterior, si se renegocia el alcance la nueva totalidad de requisitos (el 110% con respecto a la planeación inicial) se considera el nuevo 100% de los requisitos. En el caso de esfuerzos continuos se escoge una dimensión contra la cual se normalizan las demás. Por ejemplo, si se considera de base el alcance se podría definir el 100% como un lote del SdI y se normaliza de acuerdo con este el porcentaje de tiempo y costo. De forma similar se pueden hacer normalizaciones de esfuerzos continuos a partir de periodos de tiempos o montos de presupuestos.

4.2.2.2. Función perspectiva

Una función se define como una relación entre dos conjuntos en el que para cada elemento del conjunto origen se le asigna un único elemento del conjunto destino. En términos prácticos (ingeniería) los conjuntos se conforman de números reales y la definición de función implica que para un punto evaluado sobre una variable independiente o parámetro (conjunto origen) se obtiene un único resultado (conjunto destino) que se genera mediante operaciones matemáticas.

Cuando el espacio del esfuerzo se normaliza se pueden representar simultáneamente varias perspectivas en él. La *función perspectiva* se define como una trayectoria en la que se representa una característica del esfuerzo en términos del costo, tiempo y alcance, que se postula como la *primera proposición*. Esta proposición se representa de forma cuantitativa con la siguiente función paramétrica (tipo de expresión matemática para trayectorias en un espacio euclidiano):

$$f_j(t) = \left\{ \left(c_j(t), t, a_j(t) \right); c_j(t), t, a_j(t) \geq 0 \right\}$$

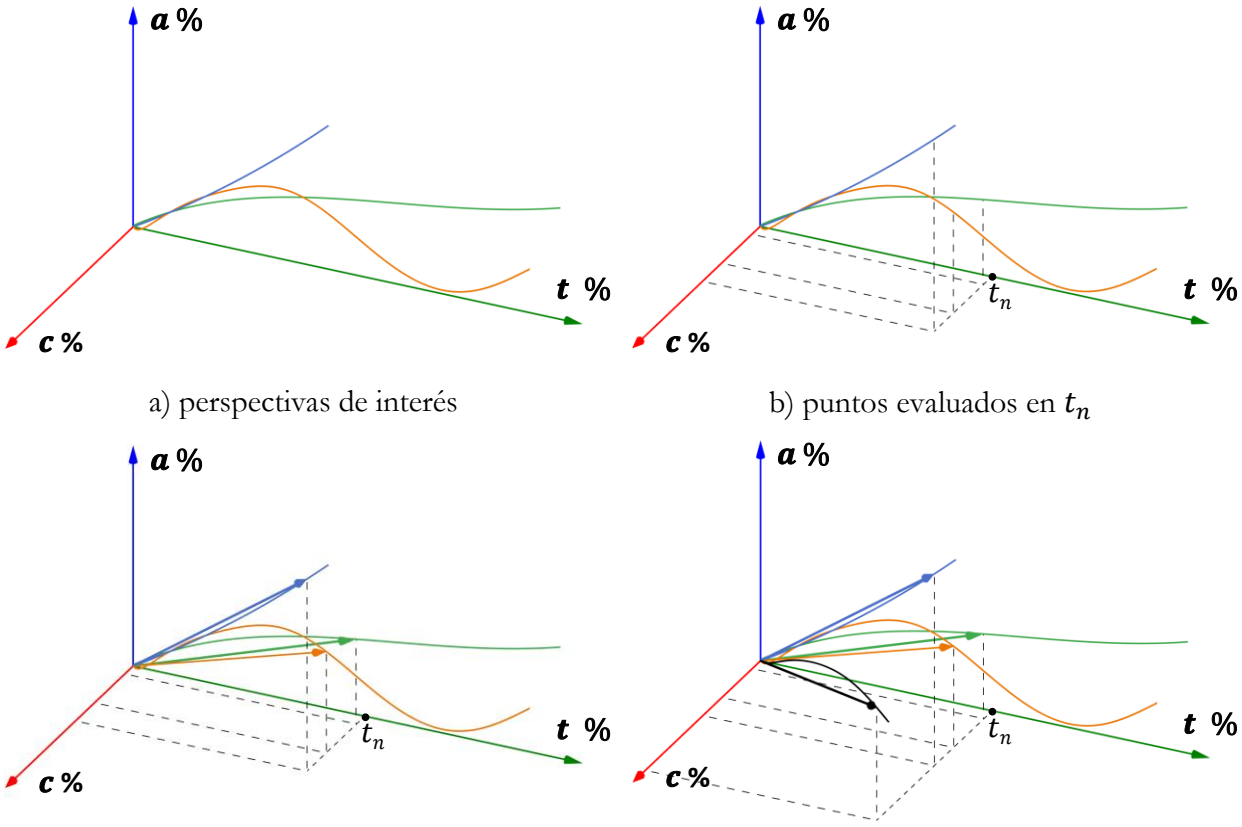
Para la *función perspectiva* la variable independiente o parámetro es el tiempo, lo que implica que las variables costo y alcance se representan (calculan) a partir del tiempo. Así, al eje del tiempo se le asigna el mismo valor del parámetro. El tiempo se escoge como parámetro debido a que en el espacio euclidiano seleccionado es la dimensión con la que se establecen relaciones de tipo función. En otras palabras, en una instancia de un esfuerzo para un valor determinado de costo (o alcance) en la trayectoria de una perspectiva, se puede encontrar más de una correspondencia a medidas del tiempo, con lo que se obtiene una ecuación como relación. La función tiene las ventajas que sobre ella se pueden aplicar más herramientas matemáticas de análisis como la operación de derivada o integral y que con ella se pueden representar procesos continuos.

4.2.2.3. Esfuerzo como manifestación de perspectivas

En la Figura 4-13 se observa que los conceptos que se resaltan y que se corresponden con la abstracción teórica *perspectiva* tienen una jerarquía mediante las relaciones estructurales (*es* y *tiene*) del preconceptual. Esta jerarquía se interpreta como que una perspectiva amplia puede contener a otras (subperspectivas) y en el sentido más general que el esfuerzo se conforma por un conjunto de perspectivas

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

esenciales (subordinadas). Así en la Figura 4-13 se observa que hay unos conceptos más amplios que se relacionan directamente con el esfuerzo.



a) perspectivas de interés

b) puntos evaluados en t_n

c) vectores progreso de perspectivas

d) vector progreso resultante del esfuerzo

Figura 4-15. Esfuerzo como manifestación de perspectivas
Fuente: elaboración propia

Entonces, para el planteamiento de la *función perspectiva del esfuerzo* se parte de un caso simplificado, en el que el esfuerzo se determina por tres perspectivas esenciales; véase la parte (a) de la Figura 4-15. Para el razonamiento se supone que las perspectivas esenciales son: necesidad $f_{Nec}(t)$ (trayectoria verde), equipo $f_{Eq}(t)$ (trayectoria azul) y sistema de interés $f_{Sdl}(t)$ (trayectoria naranja). Así, si se analiza el progreso para el parámetro t_n se obtienen vectores progreso para cada perspectiva; véase la parte (b) y (c) de la Figura 4-15. Los tres vectores progreso se pueden sumar de forma ponderada para encontrar un vector equivalente del progreso del esfuerzo; véase la parte (d) de la Figura 4-15. La ponderación aplica a las componentes de costo y alcance; la componente del tiempo es igual al parámetro. La ponderación del costo se debe a que cuando se normalizan las perspectivas, el costo de una de ellas corresponde a una parte del total del costo; por lo que el costo total se haya en proporción a la participación de cada perspectiva. En cuanto al alcance, los interesados del esfuerzo deben acordar qué peso tiene el alcance de cada perspectiva en el total del alcance del esfuerzo. Así, al generalizar este razonamiento se llega a la *proposición del vector esfuerzo* que se presenta a continuación:

$$\overrightarrow{\varepsilon_n} = \overrightarrow{e_1}\sum_{j=1}^{M}\left(k_j^{eje_c} * c_j(t_n)\right) + \overrightarrow{e_2}t_n + \overrightarrow{e_3}\sum_{i=1}^{M}\left(k_j^{eje_a} * a_j(t_n)\right)$$

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Esta expresión también se define como una relación de *subordinación* de las sub-perspectivas a la perspectiva más amplia (*esfuerzo*). Si se suman de forma pondera todos los vectores de progreso de las perspectivas de un esfuerzo se obtiene la *generalidad de la proposición función perspectiva*, como se muestra a continuación; véase la trayectoria negra de parte (d) de la Figura 4-15:

$$\varepsilon(t), f_j(t) = \left\{\left(c_j(t), t, a_j(t)\right); c_j(t), t, a_j(t) \geq 0\right\}$$

Así, $\varepsilon(t)$ es una *función perspectiva* en el que el punto de vista que se considera es el esfuerzo en su conjunto y se denomina *función perspectiva del esfuerzo* o simplemente *función del esfuerzo*. Esta función resultante es una representación de un punto de vista general del fenómeno. En ella se sintetiza el ámbito (costo, tiempo y alcance) del esfuerzo como un indicador general y ponderado del progreso del esfuerzo. La función del esfuerzo no es reversible, lo que implica que a partir de ella no se pueden deducir las *funciones perspectivas* originales.

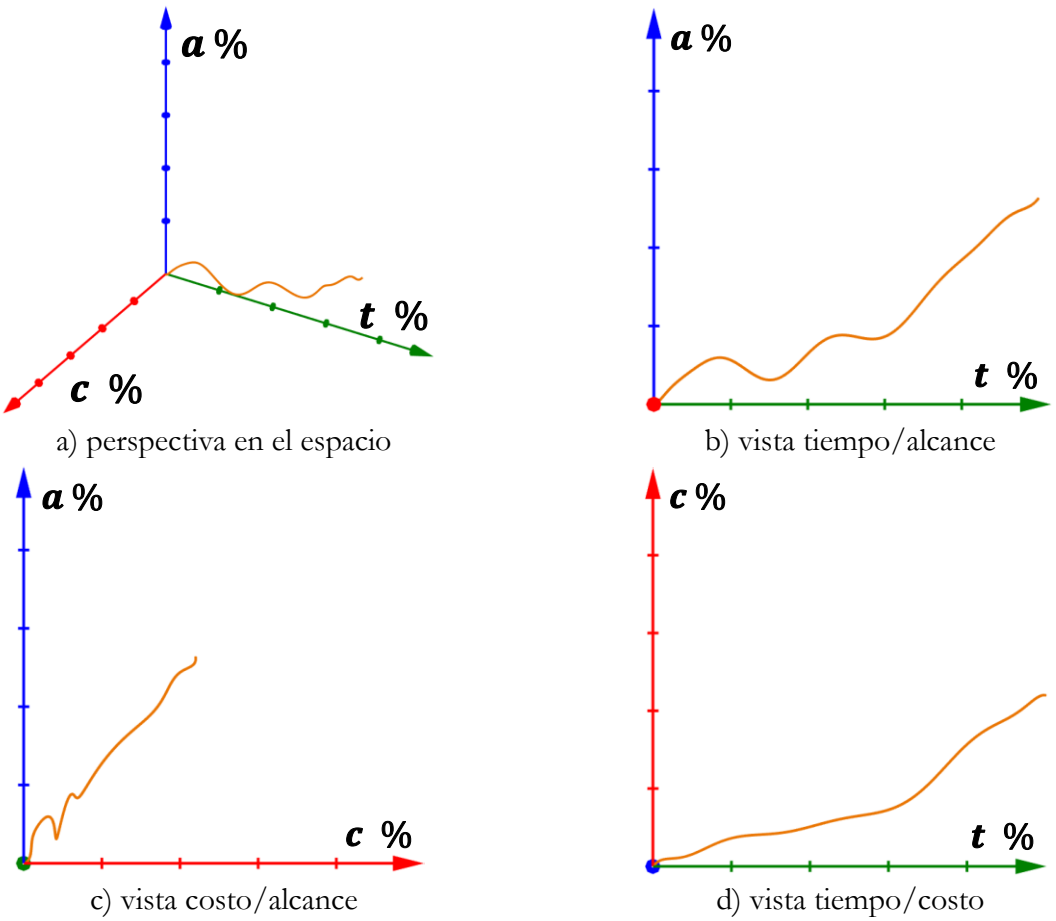
4.2.2.4. Alfas de un esfuerzo

El conjunto de perspectivas esenciales que están directamente relacionadas con el esfuerzo se denominan *alfas*. Así, en la *proposición del vector esfuerzo M* tiene el mínimo valor cuando el cálculo de $\vec{\varepsilon}$ o $\varepsilon(t)$ se hace con la combinación ponderada de los alfas. En otras palabras, los alfas son el conjunto de perspectivas mínimos con el que se caracteriza por completo un esfuerzo. Así, un *alfa se define como una perspectiva esencial a progresar con la que se trabaja y que en conjunto con otros alfas se determina un tipo de esfuerzo*. Las perspectivas subordinadas a un alfa también se denominan sub-alfas en analogía con la Esencia. Desde el punto de vista de la Teoría del Esfuerzo, las perspectivas no se prescriben. Se puede formular un conjunto arbitrario de perspectivas para un esfuerzo particular, que dependerá del dominio. Así por ejemplo para la Conceptualización del EIE se puede escoger a la *oportunidad* como perspectiva subordinada del esfuerzo, o escoger las *necesidades*, el *valor* y el *entorno al sistema* como perspectivas subordinadas en remplazo de la oportunidad. La escogencia de los alfas que conforman el esfuerzo es arbitraria. Sin embargo, es importante que se seleccionen en consenso alrededor de una comunidad y profesión; en el Apartado 4.3.1 se proponen los alfas del EIE en consenso con las fuentes analizadas.

4.2.3. Vistas del espacio del esfuerzo

Para facilitar el análisis y visualización del esfuerzo y de sus elementos teóricos, se proponen las vistas del espacio del esfuerzo. Las vistas son proyecciones del esfuerzo en planos. Las vistas más sencillas se forman con la proyección del espacio en cada uno de los planos cartesianos que se conforman con un par de ejes dimensionales, las cuales se denominan *vistas canónicas del esfuerzo*. En la Figura 4-16 se muestra un ejemplo, en la parte (a) se representa la función $f_{SdI}(t)$ (trayectoria naranja de los ejemplos presentados) en el *espacio del esfuerzo*, en la parte (b), (c) y (d) las proyecciones en los planos tiempo/alcance, costo/alcance y tiempo/costo respectivamente. Así, los planos de las partes (b), (c) y (d) de la Figura 4-16 son las *vistas canónicas* del *espacio del esfuerzo* representado en la parte (a).

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados



a) perspectiva en el espacio b) vista tiempo/alcance

c) vista costo/alcance d) vista tiempo/costo

Figura 4-16. Vistas del espacio del esfuerzo (canónicas)
Fuente: elaboración propia

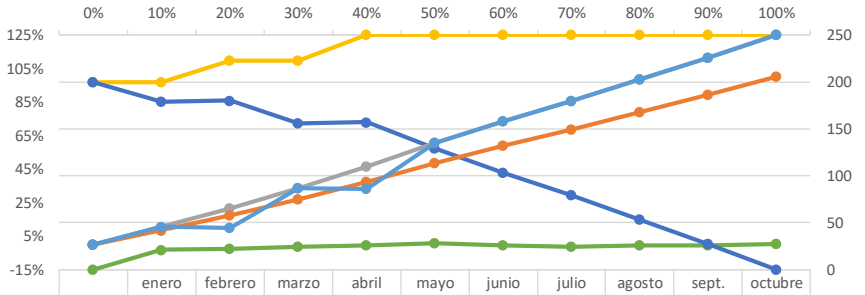
4.2.3.1. Transformaciones de ejes

Es posible que se cambie el espacio del esfuerzo con la trasformación de ejes a otros que sean de interés para algún análisis. Las transformaciones de ejes se realizan aplicando operaciones a los ejes para obtener otros (invertir los ejes mediante sumas o restas, expandir contraer mediante multiplicaciones y divisiones, etc.).

En la Figura 4-17, se representa la evolución del cumplimiento de requisitos contra el tiempo para un esfuerzo con una duración de diez meses, como ejemplo de transformaciones de ejes. Por lo tanto, se muestran vistas tiempo/alcance superpuestas, con el eje horizontal para tiempo y el vertical para alcance. Para las tres primeras trayectorias las unidades del alcance son números de ítems de requisitos (# ítems, lado derecho), para las tres últimas es porcentaje de requisitos (% ítems, lado izquierdo). Las dos primeras trayectorias (amarilla y verde) representan la información que se toma en el esfuerzo: total de requisitos del proyecto y cantidad de requisitos resueltos por el equipo en un mes, el resto de las trayectorias tienen la misma información con diferente representación. La tercera trayectoria (azul oscuro) es una gráfica de pendientes (*Burn–down*) que se utiliza en gestión ágil de esfuerzos. En la última trayectoria (azul claro) se le restan los incrementos de ítems al progreso del alcance, para que se vea la

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

correspondencia del progreso contra los requisitos adicionados. Las otras dos son trayectorias con vistas canónicas normalizadas a 200 y 250 requisitos respectivamente.



	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept.	octubre
# ítems de requisitos del esfuerzo	200	200	223	223	250	250	250	250	250	250
# ítems realizados por mes	0	21	22	24	26	28	26	24	26	26	27
# ítems de requisitos pendientes	200	179	180	156	157	129	103	79	53	27	0
% ítems completados normalizado a 200 ítems	0%	11%	22%	34%	47%	61%	74%	86%	99%	112%	125%
% ítems completados normalizado a 250 ítems	0%	8%	17%	27%	37%	48%	59%	68%	79%	89%	100%
% ítems normalizados a 200 restando % de adicionales	0%	11%	10%	34%	33%	61%	74%	86%	99%	112%	125%

Figura 4-17. Graficas de progreso de requisitos y pendientes (*Burn-up* y *Burn–down*)
Fuente: elaboración propia

Las vistas del esfuerzo mediante las trasformaciones de ejes se pueden utilizar en las disciplinas orientadas a esfuerzos como una herramienta para la representación cuantitativa de información. Así por ejemplo las siguientes figuras de la sexta edición del PMBoK (PMI, 2017b) se pueden instanciar a partir del espacio del esfuerzo y sus vistas: 1-1, 6-18, 6-21, 6-24, 7-9, 7-8, 7-12, 7-13 y 11-13 de la primera parte del documento, 1-3 y 1-5 de la segunda parte; junto a la información de la tabla 11-1 de la primera parte. De forma similar para la guía de prácticas agiles (PMI, 2017a) las siguientes figuras se pueden instanciar: 5-1, 5-2, 5-4, 5-6, 5-7, x3-1, x3-11, x3-12 y x3-13. Lo anterior implica que estas figuras se pueden explicar a partir de la Teoría propuesta.

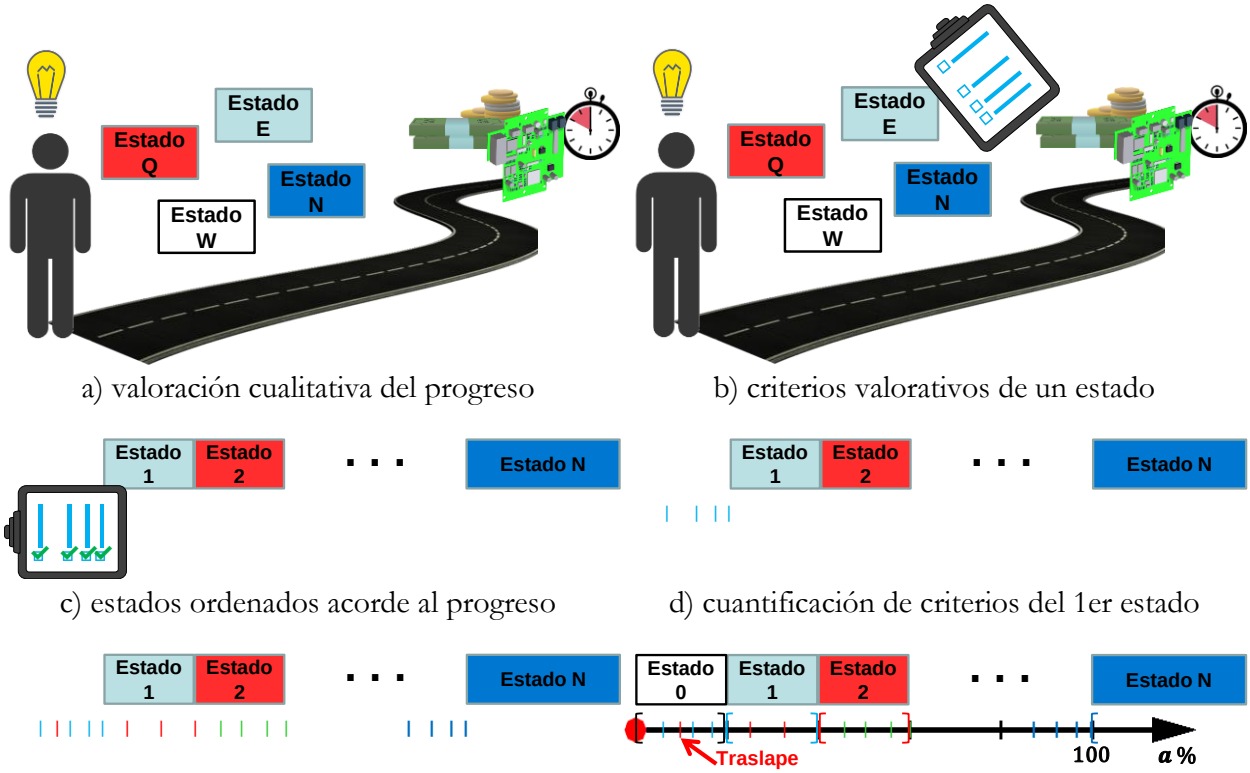
4.2.4. Producto de trabajo

Las perspectivas o alfas son abstracciones teóricas que representan puntos de vistas del esfuerzo. En el espacio del esfuerzo, estos se manifiestan como trayectorias que representan el progreso en las dimensiones de costo, tiempo y alcance. En este contexto el *producto de trabajo se define como la manifestación tangible de una o varias perspectivas y de su progreso* (o *estado* en la representación cualitativa; véase el Apartado 4.2.5). El producto de trabajo se define y se asume dentro de la Teoría en el mismo sentido que se hace en la comunidad de *Semat* (Jacobson *et al.*, 2019; OMG, 2018). Una perspectiva se evidencia mediante uno o varios productos de trabajo, a su vez, un producto de trabajo se puede asociar a una o más perspectivas. En el contexto del espacio del esfuerzo con los productos de trabajo se justifica el progreso del esfuerzo o perspectiva en costo, tiempo y alcance. El alcance es la abstracción del conjunto de objetivos de una perspectiva, por lo que con el producto de trabajo se evidencia el cumplimiento de esos objetivos y del costo y tiempo incurrido. Ejemplos de productos de trabajo como manifestaciones tangibles son el circuito electrónico, una especificación de requisitos, un organigrama o una lista de verificación de un procedimiento.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.2.5. Interpretación cualitativa del progreso del esfuerzo

En la descripción actual relacionada con el esfuerzo se hacen juicios de valor sobre el progreso que se tiene desde que se concibe la idea hasta que se finaliza o retira un SdI. Con los juicios valorativos se caracteriza en qué estado se encuentra el progreso de un esfuerzo; en la parte (a) de la Figura 4-18 se muestra una representación de esta interpretación cualitativa del esfuerzo.



a) valoración cualitativa del progreso
b) criterios valorativos de un estado
c) estados ordenados acorde al progreso
d) cuantificación de criterios del 1er estado
e) cuantificación de criterios de los estados
f) correspondencia de regiones y estados

Figura 4-18. Regiones como interpretación cuantitativa de los estados de la Esencia
Fuente: elaboración propia

En la Esencia (OMG, 2018) se organizan de forma sistemática estos juicios de valor en *estados* con respecto a los puntos de vistas esenciales del esfuerzo (alfas), como se describe a continuación. Un *estado* se caracteriza con una *lista de verificación* que contiene un conjunto de criterios valorativos denominados *criterios de verificación*, como se muestra en la parte (b) de la Figura 4-18. Allí al estado E se le asignan una lista de verificación con cuatro criterios; véase además el Apartado 2.3.1. En la Esencia además los estados se enumeran y organizan de tal forma que representan el progreso ascendente del alcance de un alfa. Así, el cumplimiento de un criterio de verificación denota un progreso en el alcance de un alfa y el cumplimiento de todos los criterios de una lista de verificación denota que se progresa hasta un estado, como se observa en la parte (c) de la Figura 4-18; allí se muestra el cumplimiento del estado 1 (E). En este ejemplo, el cumplimiento de un estado se simboliza dibujando todos los criterios de verificación correspondientes al lado izquierdo del estado; véase la parte (c) y (d) de la Figura 4-18 y la parte (e) para el cumplimento de todos los estados representados.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Al comparar el planteamiento de la Esencia con la Teoría del Esfuerzo se advierte que los estados y criterios de verificación cualitativos corresponden a progresos cuantitativos sobre el eje del alcance. Así para la instancia de un esfuerzo se puede hacer una correspondencia del cumplimiento de cada criterio de verificación de un alfa con una cuantificación sobre el eje alcance, con lo que cada criterio se corresponde o representa con un punto de progreso P_i^a; véase la parte (f) de la Figura 4-18. Además, según lo que se describe en la Esencia, se permanece en un estado hasta el momento en el que se cumple la lista de verificación del siguiente estado. Entonces, tales estados se representan como regiones (intervalos matemáticos) de progreso sobre el eje alcance, como se muestra en la parte (f). Así para el ejemplo, el estado 1 va del 20% al 40%, el estado 2 del 40% al 60%, el estado final N supera la planeación inicial del alcance por lo que va del 100% al 137.5% y se identifica un estado adicional (0) que va desde el 0% de progreso hasta alcanzar el primer estado en el 20% del alcance. Finalmente, en la parte (f) del ejemplo se observa que puede haber traslape de un criterio de verificación de un estado con otro.

4.2.5.1. Estados cualitativos de la Teoría del Esfuerzo

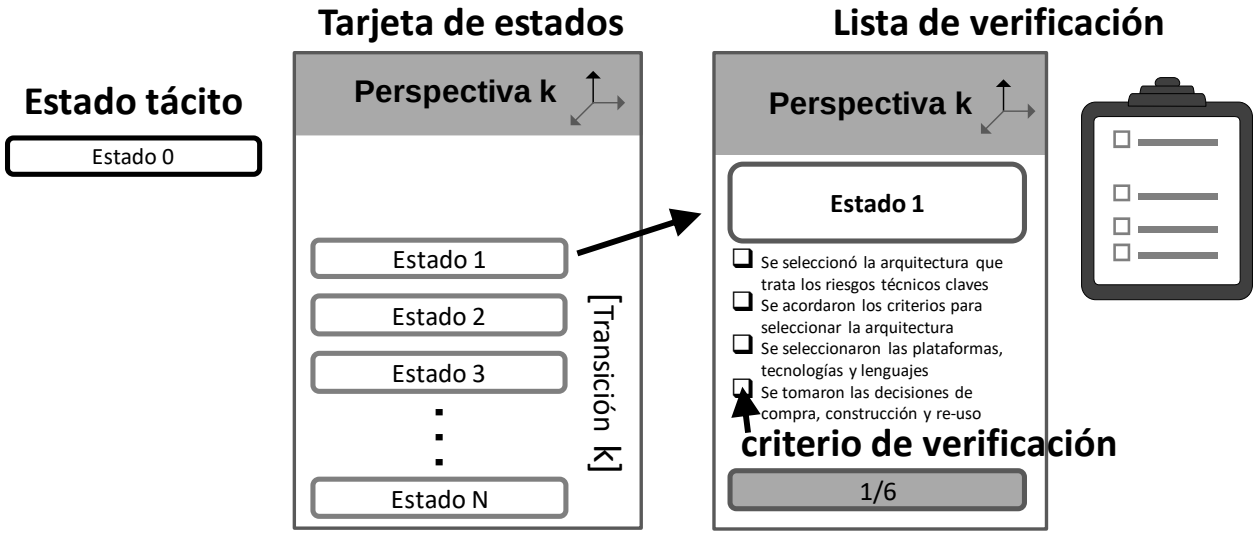


Figura 4-19. Tarjetas de estados y de listas de verificación de la Teoría del Esfuerzo
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el desarrollo del ejemplo que se presenta en la Figura 4-18, la *función perspectiva* se interpreta cualitativamente con una secuencia de criterios de verificación valorativos (agrupados en estados) por cada eje del esfuerzo. El cambio de un estado a otro se denomina *transición*, y cuando el cambio se hace a un estado no consecutivo se denomina *transición excepcional*. En la aplicación de la Teoría del Esfuerzo a un dominio, los estados y las transiciones se representan en tarjetas como se muestra en la Figura 4-19. Es importante aclarar que esta representación tiene algunas diferencias significativas con la que se propone en la Esencia como se describe a continuación:

- En la representación cualitativa del progreso las *transiciones excepcionales* se representan con una denominación entre corchetes. La denominación denota la condición del cambio excepcional.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

- Solo se representan en tarjetas las transiciones excepcionales.
- Debido a que la transición no es un estado, las listas de verificación de las transiciones se formulan como criterios a ser considerados en la transición, por lo que no tienen una correspondencia con el progreso en el espacio del esfuerzo.
- En el espacio del esfuerzo el progreso de una perspectiva se representa desde el 0% y se extiende más allá del 100%. Debido a esto los *estados de finalización* que se asignan a algunos alfas (sistema software, equipo, trabajo y forma de trabajo) del núcleo de la Esencia no se representan como *estados cualitativos* de la Teoría del Esfuerzo. Tal caracterización en la Esencia no se puede secuenciar como los estados de mayor progreso en el espacio del esfuerzo. En cambio, tales estados se representan como transiciones excepcionales con la que se finaliza un esfuerzo.

Además, por claridad en la Teoría del Esfuerzo se consideran las siguientes definiciones.

- El *criterio de verificación* se define como un criterio valorativo (cualitativo o estimación cuantitativa) del progreso de una perspectiva sobre una dimensión del espacio del esfuerzo.
- La *lista de verificación* es el conjunto de criterios de verificación que se deben cumplir para alcanzar un estado sobre una dimensión del esfuerzo.
- El *Punto de progreso* es la representación del progreso en la trayectoria de una perspectiva, al cual se le relaciona un *vector progreso* como interpretación *cuantitativa* y posiblemente como interpretación *cualitativa* un *criterio de verificación* por cada dimensión.
- El *estado* es un hito genérico cualitativo del progreso de una perspectiva (o alfa) sobre una de las dimensiones, que se le corresponde a un progreso cuantitativo (conjunto de *criterios de verificación*) en el espacio del esfuerzo al instanciar la representación de una perspectiva (o alfa).
- Una *región* es la representación cuantitativa de un estado de una perspectiva (o alfa) sobre una dimensión del espacio del esfuerzo.

Los estados además se utilizan para visualizar gráficamente la evolución cualitativa del progreso de una perspectiva. Consecuentemente, en la Figura 4-20, se representa como ejemplo un contraste entre los estados de un equipo según el modelo de Tuckman *et al.* (1977) y su correspondencia con un diagrama de estados de la Teoría del Esfuerzo. La comparación se hace con el alfa equipo del EIE, que se describe en el Apartado 4.3.1.

Así, con este planteamiento y mediante la Teoría del Esfuerzo se reinterpreta y explica la utilización de estados del progreso de los alfas que se presenta en el estándar de la Esencia. Además, desde el punto de vista de la Teoría del Esfuerzo, los estados no se prescriben. Al igual que con los alfas, la escogencia de estados y listas de verificación se formulan de acuerdo con el dominio de aplicación de la Teoría. Sin embargo, es importante que se seleccionen en consenso alrededor de una comunidad y profesión; en el Apartado 4.3.1 se proponen los estados de los alfas y listas de verificación del EIE, de acuerdo con las fuentes analizadas para la Conceptualización y en analogía a la Esencia.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

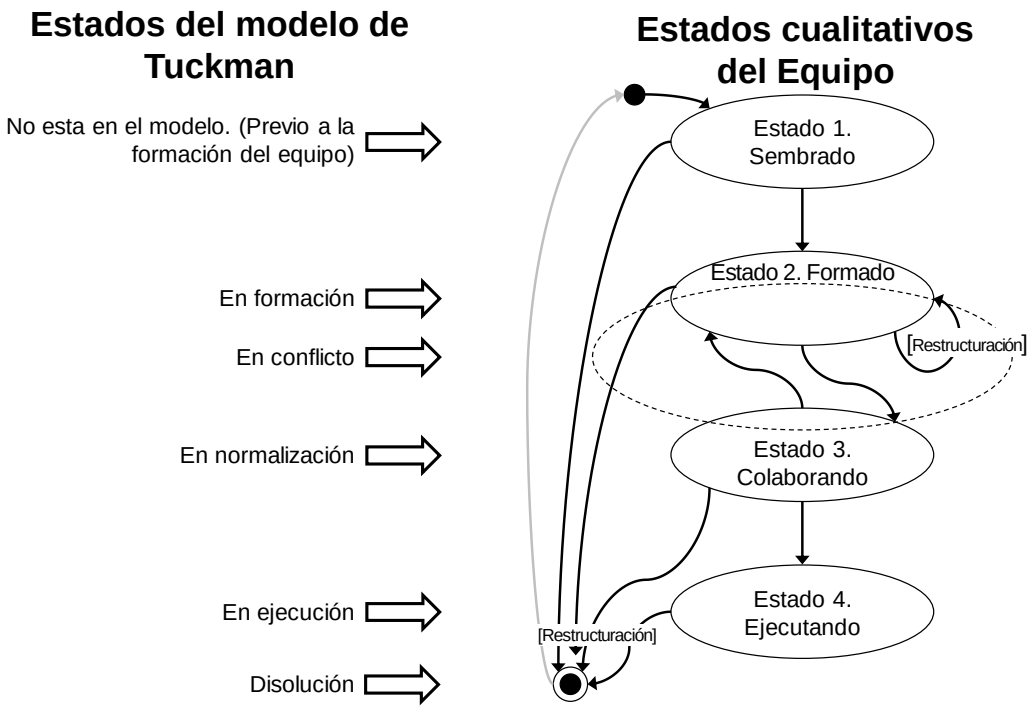


Figura 4-20. Correspondencia entre estados del modelo de Tuckman y estados del alfa equipo
Fuente: elaboración propia

4.2.6. Vector acción

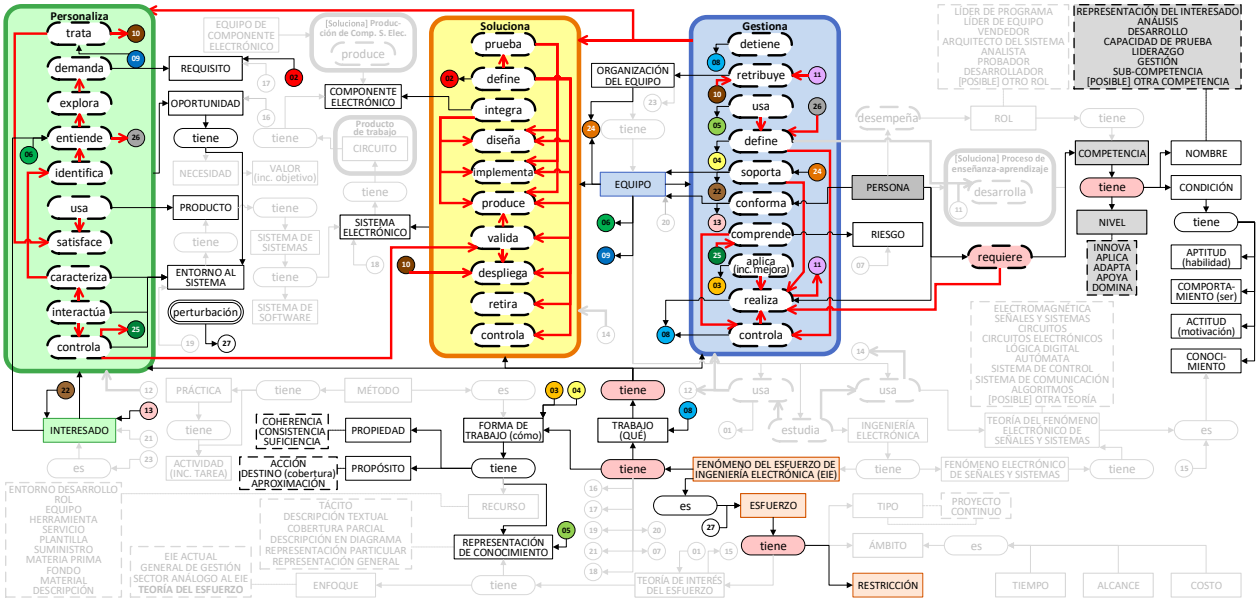
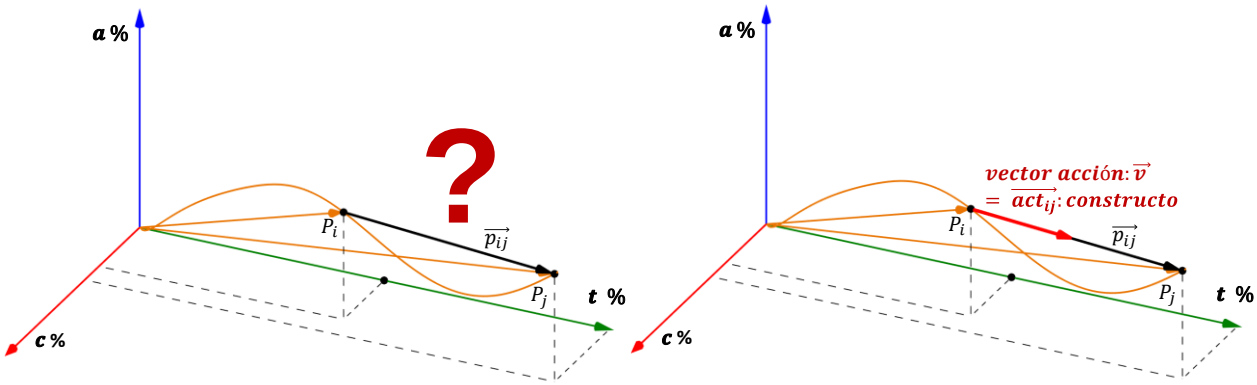


Figura 4-21. Acciones en el esfuerzo (EIE)
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2**.**

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

En el Apartado 4.2 se identifican las *perspectivas* a partir de conceptos esenciales de la Conceptualización con los que se caracteriza el esfuerzo. En la Conceptualización también se identifican un conjunto de *acciones* (relaciones dinámicas) esenciales que se ejecutan sobre tales conceptos. Tales *acciones* se agrupan en el esquema preconceptual en los marcos de *personaliza*, *soluciona* y *gestiona*, que corresponde a la clasificación de *áreas de interés*. Algunos de estos conceptos son los agentes que ejecutan las acciones y sobre los que se aplican algunas de ellas. Además, en la Conceptualización se identifican un conjunto de conceptos y relaciones adicionales con los que se caracteriza la acción (*competencia*, *trabajo* y *forma de trabajo*). En la Figura 4-21, se resaltan los elementos en la Conceptualización que están directamente relacionados con la dinámica o acción en el esfuerzo.



a) ¿Causalidad del progreso $\overrightarrow{p_{ij}}$? b) vector acción aplicado en P_i

Figura 4-22. Vector acción como generador del progreso
Fuente: elaboración propia

En el Apartado 4.2.2 se presenta la función perspectiva como una interpretación cuantitativa de la evolución de puntos de vistas del esfuerzo. Además, se identifica el *vector progreso* como una forma de medir la evolución entre dos puntos de progreso, independientemente de la trayectoria que se siga; véase la parte (a) de la Figura 4-22. Así, con estos elementos se caracteriza el esfuerzo en una vista estática del fenómeno. Pero ¿cuál es la causa del progreso $\overrightarrow{p_{ij}}$ de P_i a P_j? Como se puede ver en la Figura 4-21, las *personas* del *equipo* o de los *interesados* son los agentes del esfuerzo que participan ejecutando las acciones para progresar los diferentes puntos de vistas (*perspectivas*) del fenómeno. Entonces, una actividad se representa en el espacio del esfuerzo como un *vector acción*, haciendo énfasis en el efecto del agente, no en sus razones, justificaciones, motivaciones o consideraciones subjetivas. En la Teoría del Esfuerzo solo se representa la acción; véase el Apartado 3.3.4. Así, se identifica el *constructo vector acción* que se define como la abstracción de la intervención (*acción*) de una *persona* de interés (*equipo*, *interesado*) en el esfuerzo. El vector acción es la representación formal (matemática/cuantitativa) de la acción que produce el progreso en las perspectivas del esfuerzo; véase la parte (b) de la Figura 4-22. Entonces se propone la relación entre el *vector progreso* y *acción* como la *proposición de dinámica* del esfuerzo como sigue:

$$Vector\ acción: \overrightarrow{v} = \overrightarrow{act_{ij}}$$
$$= \ actividad\ equivalente\ que\ al\ ser\ aplicada\ en\ P_i\ produce\ el\ progreso\ \overrightarrow{p_{ij}}$$

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.2.6.1. Carga semántica del vector acción[7]

Debido a que la proposición de dinámica de la Teoría no se expresa en lenguaje matemático, a continuación, se enumeran las implicaciones que se deben considerar para la formulación matemática de la proposición.

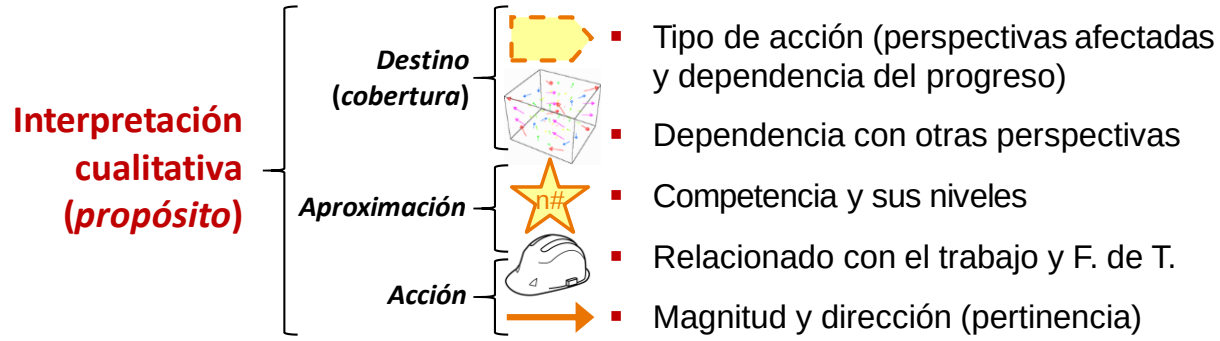


Figura 4-23. Carga semántica del vector acción
Fuente: elaboración propia

En las fuentes analizadas se evidencia que a la *acción* se le hace seguimiento, se describe, se controla, entre otras consideraciones. Por lo tanto, en la Tesis la acción se nominaliza en la Conceptualización con los conceptos de *trabajo* (*qué* se hace y *qué* progreso se produce) y *forma de trabajo* (cómo se estructura y aplican las acciones), que a su vez se interpretan como perspectivas en la Teoría del Esfuerzo. El *tipo de acción* se refiere a que en la Conceptualización se caracterizan acciones esenciales que afectan a un tipo de perspectiva y que se denominan en la Tesis como *espacio de trabajo*[8] (de acuerdo con la nominalización de la acción: *trabajo*). Adicionalmente en analogía con la Esencia y de acuerdo con el análisis del fenómeno se identifica que las acciones (*espacios de trabajo* como meta actividades) tienen efecto sobre una o varias perspectivas relacionadas y que tal efecto se da si se aplica en ellas en un rango de progreso determinado, que se puede caracterizar para dominios específicos del esfuerzo; véase el Apartado 4.3.2 para el EIE. Del análisis del fenómeno también se identifica una *dependencia con otras perspectivas*, por lo que el efecto de una acción sobre una perspectiva depende a su vez del progreso de otras. Por ejemplo, no es lo mismo ejecutar el trabajo con un equipo que tiene un alto nivel de progreso en

[7] El *vector acción* y la *proposición de dinámica* son propuestas que se deben desarrollar en trabajos futuros. Estos se deben modelar matemáticamente, con lo que se podría representar la caracterización de la dinámica del fenómeno. La *función perspectiva*, el *vector acción* y la *proporción de dinámica* se formulan en analogía con la física mecánica. El punto de partida es la trayectoria de una masa entre dos puntos del espacio, que se cuantifica con una función del movimiento o un vector desplazamiento ($\vec{r}$). Para la dinámica del *esfuerzo* de forma similar se puede hacer una analogía con la física mecánica, allí se establece la segunda ley de Newton ($\vec{F} = m * \vec{a}$), como una relación proporcional (m) del vector fuerza ($\vec{F}$) con la segunda derivada del vector desplazamiento (aceleración $\frac{d^2\vec{r}}{dt} = \vec{a}$:).

[8] En la Esencia a esta abstracción teórica se le denomina espacio de actividad, sin embargo, se prefiere cambiar la denominación por coherencia terminológica con todo el marco teórico propuesto en esta Tesis Doctoral.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

su alcance y con una adecuada y establecida forma de trabajo, que con un equipo recién formado e inexperto en su forma de trabajo. Asimismo, se identifica la *competencia* como el conjunto de *condiciones* habilitante de una *acción* que produce un *progreso* en una *perspectiva* y que depende de su *nivel* de desarrollo en la *persona* que la aplica. Las *competencias tienen* diferentes *niveles*. Entonces, con la competencia y su nivel se determina la aproximación de una acción y la efectividad de esta. Simultáneamente, desde el punto de vista de la Teoría del Esfuerzo la *competencia es un constructo que pertenece al vector acción* (tiene menor granularidad) y que, junto con él se utilizan para enmascarar a los agentes del esfuerzo. Además, al *vector acción se le asigna una magnitud y sentido* que depende de las consideraciones anteriores y de la duración (rango de tiempo), la cantidad de personas que realizan un trabajo y los recursos con los que se ejecute. La competencia y el *tipo de acción* (*espacio de trabajo* como tipología genéricas de vectores acción) se abordan además en el Apartado 4.3.2.

Por otro lado, de acuerdo con la descripción de Barón-Salazar (2019) y el anexo B de la Esencia (*Kuali-beh*) en esta Tesis Doctoral estas consideraciones se generalizan y aplican a la *acción* del esfuerzo (*forma de trabajo*); véanse la Figura 4-23 y la Figura 4-2. Así, se conceptualiza la *consecuencia de la acción* con el *propósito* (*destino*, *aproximación* y *acción*), que sirve además para que se establezca su denominación. Por otro lado, las *características* de la descripción de la *acción* (*forma de trabajo*) se abstraen en el concepto *propiedad* (*coherencia*, *consistencia* y *suficiencia*). Esta interpretación cualitativa tiene su contraparte cuantitativa representada con uno o varios *vector acción* (y su carga semántica).

4.2.7. Salud del esfuerzo

De acuerdo con el diccionario de la lengua española la salud se refiere al conjunto de las condiciones físicas en que se encuentra un organismo en un momento determinado, definición que se puede extender al esfuerzo como un sistema. Así, la *salud de un esfuerzo es una medida comparativa del progreso para determinar su condición en un momento determinado*. En el marco de la Teoría propuesta se proponen dos indicadores de la medida de salud: *relativa a dos dimensiones* y *dispersión media de las perspectivas*.

A partir de la representación de las perspectivas en el espacio del esfuerzo se puede hacer un análisis comparativo entre los progresos de las perspectivas. Para el planteamiento de la *salud como una dispersión media de las perspectivas* se parte del ejemplo que se muestra en la parte (a) de Figura 4-24, con las perspectivas de *equipo* (azul), SdI (naranja) y *necesidades* (verde). Para el análisis se consideran las componentes de alcance de los vectores progresos para un tiempo dado: $\overrightarrow{p}^{a}_{Eq}(t_n)$, $\overrightarrow{p}^{a}_{SdI}(t_n)$ y $\overrightarrow{p}^{a}_{Nec}(t_n)$; véase las pates (b) y (c) de la Figura 4-24. Asimismo, en la parte (d) de Figura 4-24 se muestran la proyección de los vectores sobre el eje alcance. Este procedimiento también se puede realizar para las componentes de las perspectivas correspondientes a costo y tiempo.

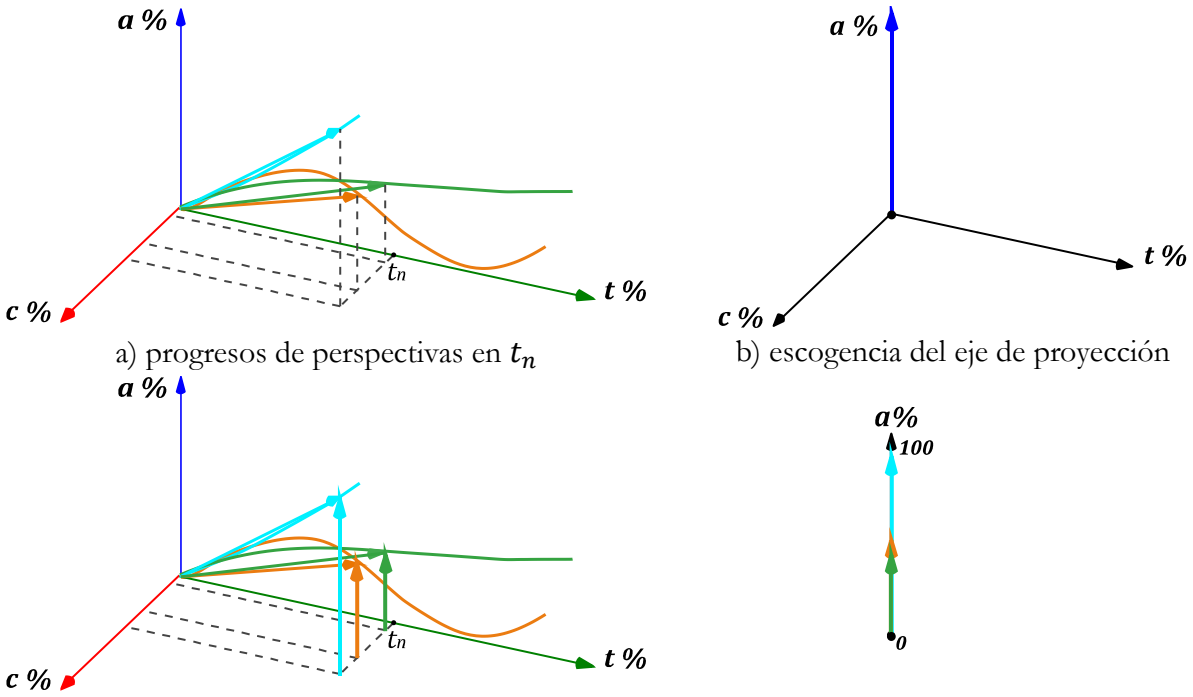
Una vez se tienen las proyecciones de las componentes sobre cada uno de los ejes, se rotan los ejes y se distribuyen angularmente las proyecciones de cada perspectiva, como se observa en las partes (a), (b), y (c) de la Figura 4-25. En esta representación el centro del circulo equivale a 0 % y la circunferencia externa equivale al 100 % del alcance, costo y tiempo respectivamente. Por lo tanto, en las partes (a), (b), y (c) de la Figura 4-25, se observa comparativamente el progreso de las perspectivas analizadas.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Para esta representación, en el trascurso de un esfuerzo saludable se espera que las perspectivas progresen como ondas de agua en un estanque, que se propagan a partir de una perturbación en el centro (coordenada del origen), con un crecimiento similar en las magnitudes del progreso de las perspectivas.

Entonces, se propone la *salud de dispersión media de las perspectivas* como un indicador de la salud del esfuerzo con la siguiente expresión:

$$Salud_d\colon salud_d\left(\varepsilon^{eje_k}(t_n)\right) = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\left|\left|\overrightarrow{p}_j^{eje_k}(t_n)\right| - \bar{p}\right|;\ media = \bar{p}$$
$$= \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\left|\overrightarrow{p}_j^{eje_k}(t_n)\right|$$



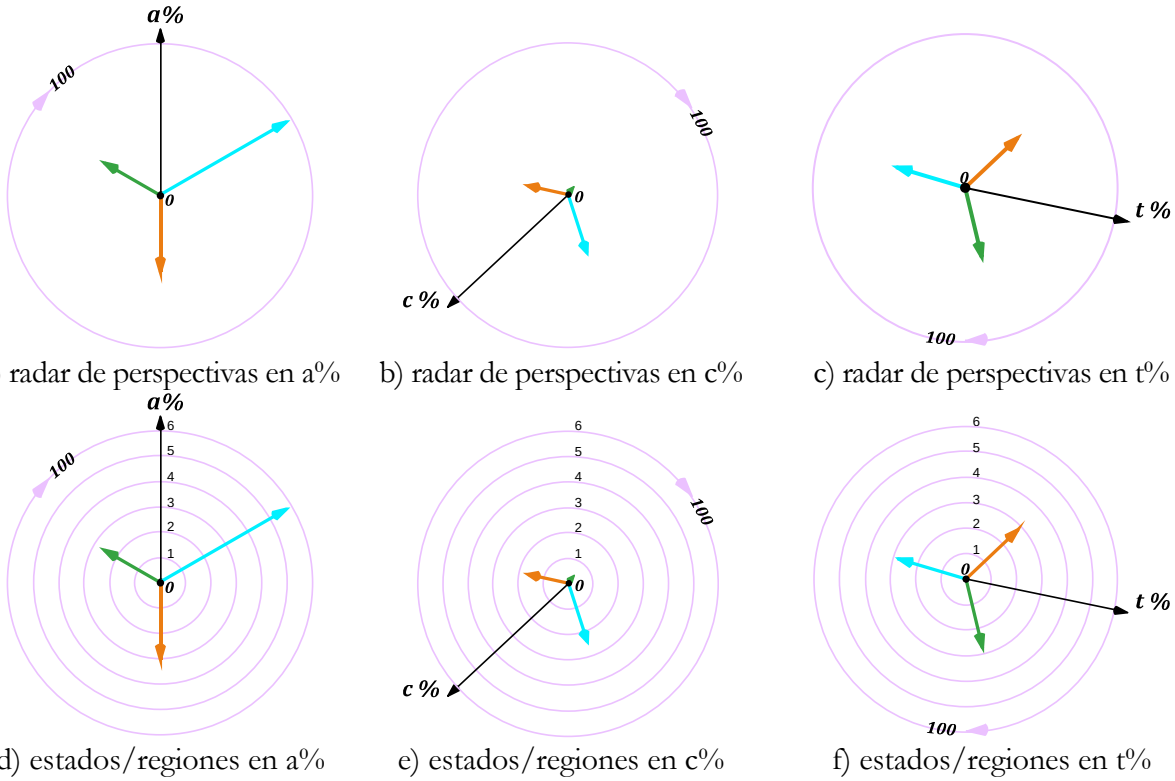
a) progresos de perspectivas en t_n b) escogencia del eje de proyección

c) componentes de alcance del progreso en t_n d) proyecciones de progresos en eje alcance

Figura 4-24. Proyecciones del progreso de perspectivas sobre el eje alcance para un t_n
Fuente: elaboración propia

Debido a que el parámetro de la función perspectiva es el tiempo, el cálculo de la dispersión para la dimensión tiempo en el espacio canónico normalizado siempre es 1. Además, los resultados de este indicador se deben interpretar en el contexto del esfuerzo pertinente. De esta forma, para el caso de la perspectiva equipo se desea que los niveles (estados o vector progreso) más alto del progreso se alcancen en las etapas tempranas del esfuerzo. Entonces, por ejemplo, un equipo conformado mucho tiempo atrás y con niveles altos de competencia podría iniciar un proyecto (esfuerzo) con un porcentaje de progreso para la *perspectiva equipo* cercano al 100%, lo que daría una dispersión grande al inicio del proyecto. En este caso el cálculo de la *dispersión media de las perspectivas* como un indicador de la salud del esfuerzo se debe hacer sin tener en cuenta la perspectiva equipo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados



a) radar de perspectivas en a% b) radar de perspectivas en c% c) radar de perspectivas en t%

d) estados/regiones en a% e) estados/regiones en c% f) estados/regiones en t%

Figura 4-25. Salud como dispersión del progreso de las perspectivas
Fuente: elaboración propia

Por su parte en las partes (d), (e) y (f) de Figura 4-25, se presenta como ejemplo una selección de regiones normalizadas para las tres perspectivas. Con esta representación se puede hacer un análisis comparativo de la salud con estados cualitativos. Esta representación corresponde al diagrama de radar que la comunidad *Semat* propone para medir la salud del esfuerzo de ingeniería de software (Jacobson *et al.*, 2019), que por lo tanto se genera, explica y generaliza en la Teoría del Esfuerzo propuesta.

Por otro lado, se propone el indicador de *salud relativa a dos dimensiones*. A partir de la representación de las perspectivas en el espacio del esfuerzo con este indicador se puede hacer un análisis comparativo del progreso de una perspectiva con respecto a dos ejes. La expresión que representa tal indicador se presenta a continuación:

$$Salud^{e_k(e_q)}: salud_{ev/es}^{e_k(e_q)}(p_j, p_i) = \frac{\left|\vec{p}_j^{\,eje_k}\left(eje_{q_n}\right)\right|}{estimación\left(\left|\vec{p}_i^{\,eje_k}\left(eje_{q_n}\right)\right|\right)};\ j = i$$

Para ilustrar el uso de esta expresión se presenta el siguiente ejemplo. Se asume que se quiere saber cuál es la salud de un SdI, por lo que se escoge la dimensión alcance para compararla con la dimensión tiempo, y se le asignan unos valores representativos al alcance (40% y 50%) en un momento dado (t_n).

$$salud_{ev/es}^{a(t)}(p_{SdI}, p_{SdI}) = \frac{\#\ \%\ del\ alcance\ de\ SdI\ \boldsymbol{evaluado}\ en\ el\ tiempo\ n}{\#\ \%\ del\ alcance\ de\ SdI\ \boldsymbol{estimado}\ para\ el\ tiempo\ n}$$

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

$$salud_{ev/es}^{a(t)}(p_{SdI}, p_{SdI}) = \frac{40\%\ del\ alcance\ de\ SdI\ evaluado\ en\ el\ tiempo\ n}{50\%\ del\ alcance\ de\ SdI\ estimado\ para\ el\ tiempo\ n} = 0{,}8; Razón < 1 \rightarrow \boldsymbol{Retrasado}$$

$$salud_{ev/es}^{a(t)}(p_{SdI}, p_{SdI}) = \frac{40\%\ del\ alcance\ de\ SdI\ evaluado\ en\ el\ tiempo\ n}{40\%\ del\ alcance\ de\ SdI\ estimado\ para\ el\ tiempo\ n} = 1; Razón = 1 \rightarrow \boldsymbol{Esperado}$$

$$salud_{ev/es}^{a(t)}(p_{SdI}, p_{SdI}) = \frac{50\%\ del\ alcance\ de\ SdI\ evaluado\ en\ el\ tiempo\ n}{40\%\ del\ alcance\ de\ SdI\ estimado\ para\ el\ tiempo\ n} = 1{,}25; Razón > 1 \rightarrow \boldsymbol{Adelantado}$$

Con estas expresiones se determina para un momento dado si el alcance del SdI esta retrasada, en el valor esperado o adelantado, si los valores que se obtienen son: menores que 1, igual a 1 o mayor que 1 respectivamente. A continuación, se enumeran las tres comparaciones de salud de una perspectiva o el esfuerzo que se pueden realizar con esta expresión:

- Salud del cronograma (alcance vs tiempo; utilizada en el ejemplo)
- Salud del presupuesto (costo vs tiempo)
- Salud del tamaño (alcance vs costo)

Por consiguiente, con la identificación explícita del progreso y los indicadores de salud se puede medir y hacer un seguimiento sistemático, cuantitativo, cualitativo y coherente con un marco teórico de la interpretación intuitiva que se hace en la literatura de la calidad del (*esfuerzo*) producto y proceso. Por ello, para el estándar PRINCE2 y la aproximación de gestión de la calidad (véase Apartado 2.2.1) según la definición de calidad de producto y proceso y en el contexto de la Teoría propuesta, la forma más sencilla de cuantificar la calidad es con la medida del progreso sobre el eje alcance de las perspectivas de requisitos y forma de trabajo respectivamente. De este modo se consigue una valoración cualitativa con una medida sistemática del alcance mediante un conjunto de estados estandarizados (incluidos criterios de verificación) y cuantitativa con la componente del vector progreso sobre el eje alcance. Por otra parte, en algunas propuestas concretas de gestión de la calidad y en el PMBoK el concepto de calidad también se orienta al ámbito completo del esfuerzo. Esta orientación se aborda desde la comprobación de los indicadores de salud. Entonces, con estos indicadores cuantitativos y cualitativos de salud se contrastan medidas entre dimensiones para valorar la calidad, que son aplicables a cualquier perspectiva y al esfuerzo. Además, se pueden plantear más indicadores de salud para la calidad cuando se considera la expresión ($j \neq i$) en:

$$Salud^{e_k(e_q)}: salud_{ev/es}^{e_k(e_q)}(p_j, p_i) = \frac{\left|\overrightarrow{p_j}^{eje_k}\left(eje_{q_n}\right)\right|}{estimación\left(\left|\vec{p}_i^{eje_k}\left(eje_{q_n}\right)\right|\right)};\ j \neq i$$

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.2.8. Lenguaje cualitativo del esfuerzo

El planteamiento de la Teoría del Esfuerzo se hace con un lenguaje matemático, el cual se usa para describir el fenómeno, que tiene a su vez una interpretación descriptiva (cualitativa). Entonces, para normalizar la interpretación descriptiva se propone el uso de una adaptación del lenguaje de la Esencia, que se justifica en que la Conceptualización y la Teoría del Esfuerzo son compatibles con la Esencia y en la afirmación de la OMG (2014): "*se pueden definir otros núcleos para otros dominios, usando el lenguaje de la Esencia*"; véase el Apartado 2.3.1.2 y la Figura 2-3. Así, en la Figura 4-26 se muestra un diagrama conceptual de los elementos del lenguaje y sus relaciones, resaltando en rojo los cambios en la denominaciones de términos (véase unificación y homologación terminológica en el Apartado 3.3.2.2) con respecto a la Esencia. El significado de cada símbolo se define de acuerdo con la Teoría, la Conceptualización y en analogía con la Esencia, como se muestra en la Tabla 4.1. A pesar de los cambios, el lenguaje propuesto se usa de forma similar a lo que la comunidad de *Semat* propone (Jacobson *et al.*, 2019), considerando en el presente caso la compatibilidad con la Tesis Doctoral.

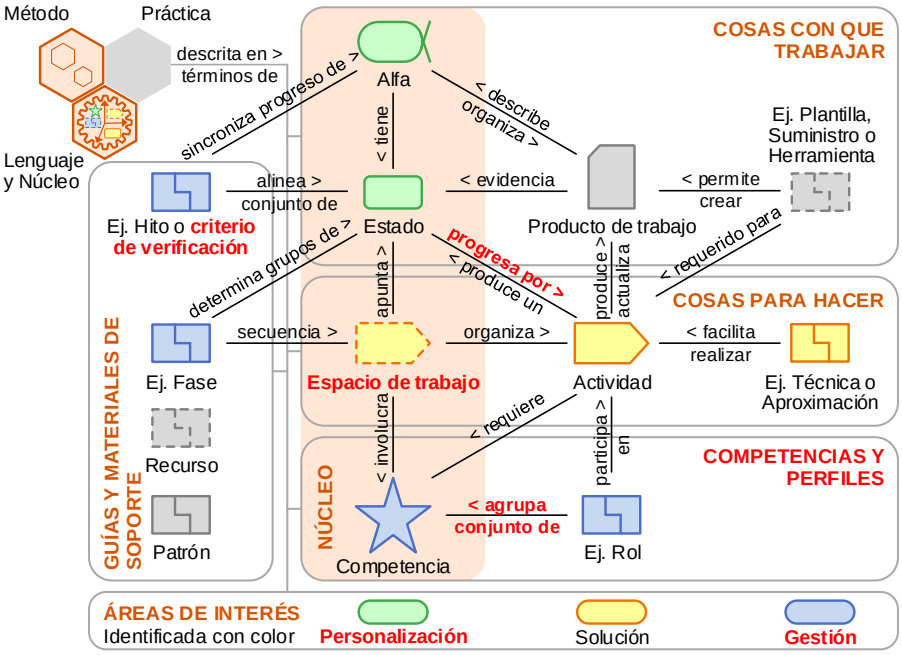


Figura 4-26. Lenguaje cualitativo del esfuerzo
Fuente: elaboración propia en adaptación de figuras de la Esencia (OMG, 2018)

Tabla 4.2. Definición de los elementos del lenguaje cualitativo del esfuerzo (1/2)
Fuente: elaboración propia en analogía a la Esencia (OMG, 2018)

Símbolo	Definición
	Alfa: perspectiva esencial a progresar con la que se trabaja y que en conjunto con otros alfas se usa para determinar un tipo de esfuerzo.
	Estado: interpretación cualitativa genérica de un ámbito del progreso de una perspectiva (o alfa), que se le corresponde a una región de progreso en una dimensión cuando se instancia en el espacio del esfuerzo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla 4.2. Definición de los elementos del lenguaje cualitativo del esfuerzo (2/2)
Fuente: elaboración propia en analogía a la Esencia (OMG, 2018)

Símbolo	Definición
	Producto de trabajo: Artefacto de valor y relevancia para el esfuerzo que es una manifestación tangible de una o varias perspectivas y de su progreso (estado, lista de verificación o vector progreso) y que puede ser modificado o requerido en una actividad.
	Espacio de trabajo: Meta-actividad esencial del esfuerzo de un dominio disciplinar con el que se clasifican acciones (vectores acción o actividades).
	Actividad: Acción en la que se define en "*qué*" y "*cómo*" se trabaja y con la que se produce el progreso de una o varias perspectivas (o alfas).
	Competencia: Conjunto de condiciones necesarias (habilidad, actitud, aptitud y conocimiento) para progresar una perspectiva (o alfa) con una actividad. La competencia tiene niveles con que se define que tan competente o capaz es una persona para ejecutar una actividad.
	Patrón: Estructura conceptual genérica, compuesta de otros elementos del lenguaje.
	Recurso: Información, herramienta, servicio, suministro, material, entre otros, necesarios para ejecutar una actividad.
	Método: Conjunto de prácticas o actividades con los que se describe una forma de trabajo.
	Práctica: Enfoque repetible para hacer algo, con un propósito específico y que hace parte de la forma de trabajo.
	Lenguaje y núcleo: Símbolo del lenguaje cualitativo del esfuerzo, junto con el símbolo de núcleo disciplinar. El **lenguaje** es una notación con la cual se describe el esfuerzo. El **núcleo** es un conjunto de alfas, espacios de trabajo y competencias con el que se caracteriza el esfuerzo de un dominio.

El uso del lenguaje y la Teoría se hace mediante tarjetas con la que se describe el esfuerzo, como se presenta en los Apartados 2.3.1.1 y 4.3 y en la Figura 4-27 a continuación.

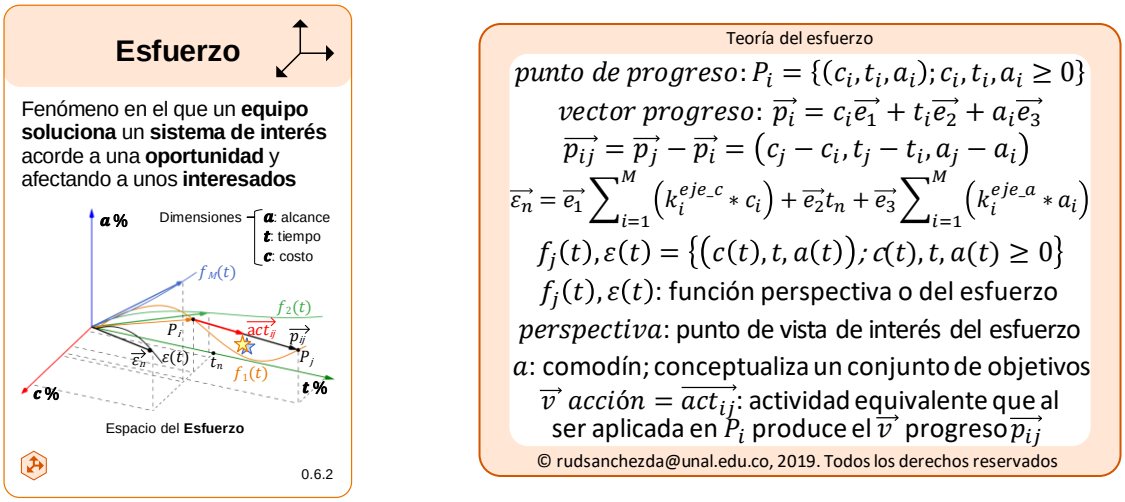


Figura 4-27. Tarjeta de síntesis de la Teoría del Esfuerzo (frontal y reverso)
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.2.9. Extensión de la Teoría del Esfuerzo: formulación de un núcleo disciplinar

La extensión es una parametrización de la Teoría del Esfuerzo que se constituye en un modelo genérico de un dominio disciplinar específico. En este sentido el Modelo es un nivel de abstracción superior, que se corresponde con una Teoría del Esfuerzo de ese dominio. La extensión de la Teoría del Esfuerzo se logra con la definición completa de un núcleo que consta de alfas, espacios de trabajo y competencias. Esto implica que con la extensión y la Teoría del Esfuerzo se debe cubrir todo el dominio disciplinar. El núcleo contiene de forma implícita las diferentes formas de trabajo en las que se puede instanciar los esfuerzos de una profesión.

Entonces se debe definir un conjunto de perspectivas esenciales como los alfas del dominio. Para la escogencia de estos se consideran puntos de vistas críticos y generales del esfuerzo, que a su vez sean conceptualmente independientes (ortogonalidad) y claramente identificables y a los que sea necesario medirles el progreso. A su vez a estos alfas se les determinan sus estados (como interpretaciones genéricas del progreso cualitativo) y listas de verificación. Por otro lado, se deben definir las acciones esenciales del esfuerzo (espacios de trabajo). Para esto se determinan que acciones y competencias generales se necesitan para progresar los alfas desde el inicio hasta su nivel máximo. Para que la selección de los elementos del núcleo se constituya en una representación teórica, se deben considerar criterios de teorización como los que se presentan en el Apartado 3.3.2.3. Además, para mantener la compatibilidad con la característica accionable de la Esencia los elementos del núcleo se deben sintetizar en un conjunto de tarjetas.

Así, de acuerdo con lo que se describe en todo el Apartado 4.2, la Teoría propuesta para el esfuerzo carece de una selección prescriptiva de alfas y acciones esenciales. La selección de estos depende del SdI al que se enfoque el esfuerzo, por lo que depende de un dominio disciplinar particular. En el caso de la Tesis, la Teoría del Esfuerzo se aplica al EIE como se presenta en el Apartado 4.3 para generar la Teoría del EIE. Sin embargo, la Teoría del Esfuerzo que se formula es genérica, por lo que se puede aplicar a dominios diferentes al EIE. Asimismo, debido al proceso de generalización y considerando que en las fuentes que se analizan se abarcan aproximaciones genéricas del esfuerzo, en el Apartado A.2 de los Anexos se propone además la Conceptualización del esfuerzo como una generalidad del esquema preconceptual de la Figura 4-2.

4.2.10. Implicaciones de la teorización

Para cerrar la discusión de la Teoría del Esfuerzo, en este Apartado se describen las implicaciones teóricas de esta formulación.

En cuanto a la relación entre la Conceptualización con la Teoría del Esfuerzo, la primera hace parte de la segunda. Con la Conceptualización también se explica el fenómeno y se sustenta la abstracción teórica representada en lenguaje matemático. Además, mientras en la Conceptualización se explicita a los agentes del fenómeno, en la abstracción teórica del esfuerzo estos se enmascaran con la representación de la acción (vector acción o actividad) sin la necesidad de incluir al agente o su motivación. Esto es posible debido a que se identifican un conjunto finito de acciones con el que se caracteriza el fenómeno. Así, la Teoría del Esfuerzo se plantea con una visión agnóstica a los análisis de la motivación

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

de los agentes para la ejecución de sus acciones. Con esto no se quiere decir que los aspectos humanos o emocionales no son importantes o que se excluyen del fenómeno. La Teoría del Esfuerzo se centra en la cuantificación del esfuerzo (acciones y caracterización de las perspectivas), pero tiene una interpretación cualitativa que dependerá del caso particular y en la que se consideran los aspectos humanos, valorativos o emocionales. En el Apartado 5.1.2 del Capítulo de Validación se presenta un ejemplo de cómo se interpreta el contexto y los aspectos humanos de un esfuerzo desde el planteamiento teórico.

De acuerdo con lo anterior, con los elementos de la Teoría no se prescribe cómo se debe estructurar un esfuerzo o que decisiones o motivaciones se deben asumir. Una instancia del esfuerzo es como sus participantes lo definan. Por lo anterior la propuesta de constructos y proposiciones se hace desde un enfoque de elementos esenciales que se combinan de forma sistémica para mitigar la complejidad y ayudar a que se comprenda el fenómeno y se tomen decisiones pertinentes. Por lo tanto, la Teoría propuesta se aleja de una tipología *prescriptiva* como en los métodos o prácticas descritos en la literatura, en cambio es un medio para que se les defina.

4.3. Teoría del Esfuerzo de ingeniería electrónica

En este Apartado se propone la Teoría del EIE la cual se formula en analogía con la Esencia y con base en la Conceptualización y Teoría del Esfuerzo. Para tal fin se describen los alfas, espacios de trabajo y competencias y se sintetizan en un conjunto de tarjetas.

La *Teoría del EIE* es una parametrización de la Teoría del Esfuerzo con la Conceptualización del EIE como se muestra en la Figura 4-28. La *Teoría del EIE* es una instancia de la Teoría del Esfuerzo para el caso de la ingeniería electrónica, a la cual se le define un núcleo de acuerdo con su Conceptualización. Así se escogen un conjunto de perspectivas esenciales con el que se caracterizan el EIE como los alfas del dominio y las relaciones dinámicas de la Conceptualización se asocian a espacios de trabajo esenciales (como vectores acción genéricos) junto con un conjunto de competencias generales para el esfuerzo. En este sentido en la Teoría del EIE se incluye la Teoría del Esfuerzo con todo lo que ello implica y a la Conceptualización como su marco conceptual. El Modelo que se consolida en esta Tesis Doctoral soporta una definición unificada y carente de ambigüedad del EIE como Teoría de la ingeniería electrónica. Es una definición unificada porque permite integrar la visión de diferentes enfoques relacionados con el EIE y es carente de ambigüedad porque permite caracterizar inequívocamente el dominio.

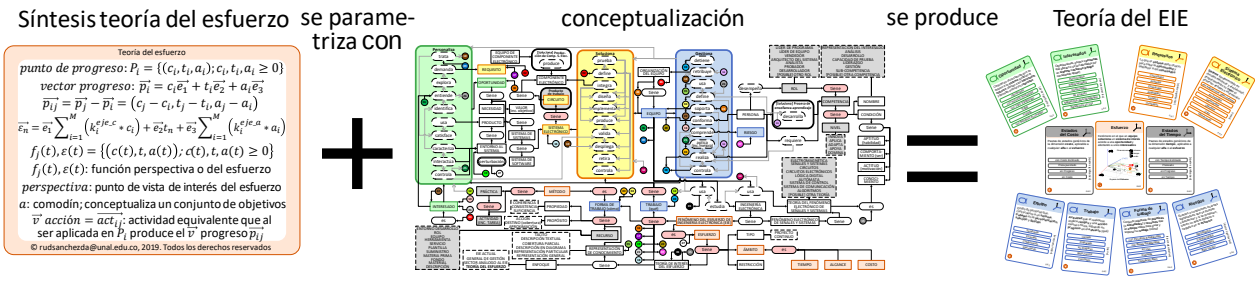


Figura 4-28. Teoría del EIE como una parametrización de la Teoría del Esfuerzo
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.3.1. Alfas del EIE

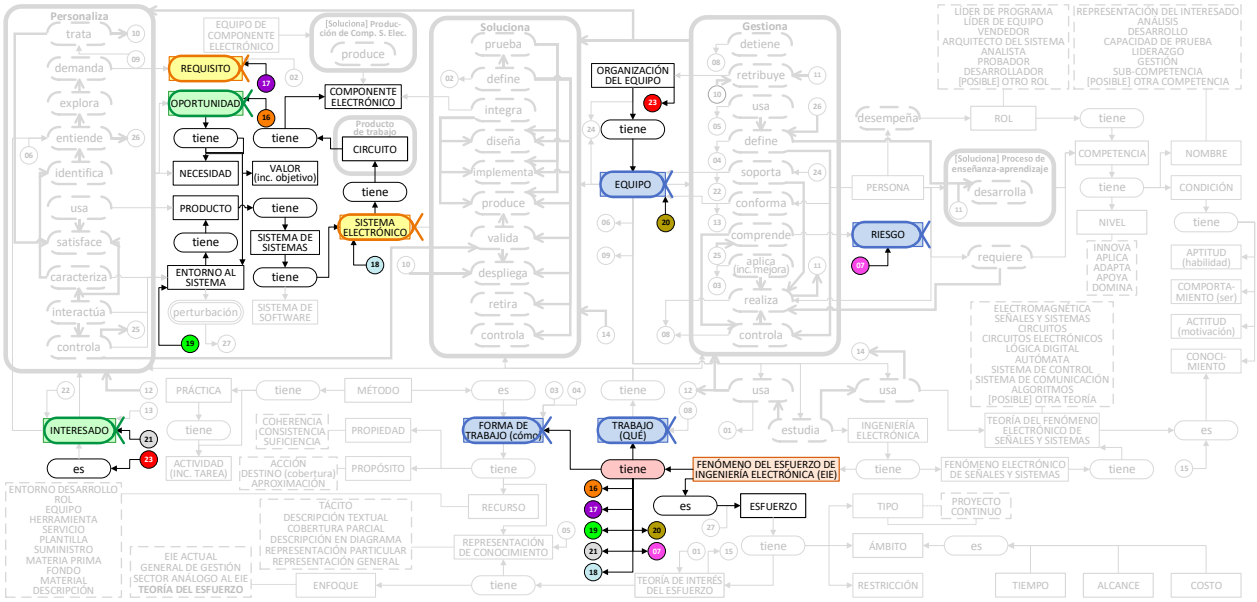


Figura 4-29. Selección de alfas del EIE
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

Como se muestra en la Figura 4-29 la selección de los alfas parte de la Conceptualización. En concreto se escogen como alfas los conceptos que están directamente relacionados con el EIE. Al igual que como se explica para la Conceptualización, los alfas son los mismos sin importar el ámbito del esfuerzo; véase el Apartado 4.1.4. Por ejemplo, para un programa o proyecto se utilizan los mismos alfas, pero en cada caso representan ámbitos diferentes. A partir de esta selección de conceptos, en la Figura 4-30, se presentan las perspectivas esenciales (alfas) alrededor del esfuerzo como un conjunto de tarjetas con las que se caracteriza el *esfuerzo de ingeniería electrónica* (EIE). En la tarjeta de cada alfa se presenta su definición en el contexto de la Teoría y se listan los estados genéricos de *alcance*. Además, en la Figura 4-30, se muestran las tarjetas de los estados genéricos de *costo* y *tiempo* que se aplican a cualquier alfa o al esfuerzo en su conjunto. Con este conjunto de tarjetas se completa la valoración cualitativa genérica del progreso en las tres dimensiones del esfuerzo (*tiempo*, *costo* y *alcance*).

Como se menciona anteriormente la interpretación cualitativa de la Teoría del Esfuerzo es compatible y se inspira en la propuesta de la Esencia. Sin embargo, es pertinente que se resalten las diferencias para que se consideren estas cuando se aplique la Teoría del EIE en la forma en que la comunidad de *Semat* usa la Esencia y como lo describen Jacobson *et al.* (2019). Tales diferencias se listan a continuación:

- El alfa que se corresponde con el SdI del EIE es el *sistema electrónico*.
- Debido a que en la Teoría del EIE se explicita el ámbito, en las tarjetas se le agrega el símbolo del espacio del esfuerzo para que se identifique a que dimensión pertenece una tarjeta (resaltando el eje respectivo) o si se refiere al ámbito completo.
- Los alfas se redefinen con un lenguaje controlado a partir de la Conceptualización y en general con la Teoría.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

- Se propone como octavo alfa, los Riesgos.
- Se retiran los estados de finalización del esfuerzo y se agregan las transiciones excepcionales, como se explica en el Apartado 4.2.5.1.
- La redacción de las listas de verificación se ajusta a la Teoría y se plantean nuevas listas para los elementos adicionales. En el siguiente Apartado se trata este tema.

Figura 4-30. Tarjetas de alfas y estados del EIE
Fuente: elaboración propia en analogía con la Esencia (OMG, 2018)

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.3.1.1. Listas de verificación de los alfas del EIE

En este Apartado se describen las consideraciones que se tienen para la redacción de las listas de verificación y se presentan las nuevas que se proponen. Las nuevas listas se plantean para los elementos adicionales de la Teoría del EIE con respecto a la Esencia. Por otro lado, se realizan ajustes para que la interpretación cualitativa sea compatible con la cuantitativa de la Teoría del EIE.

La primera consideración que se tiene en cuenta con las listas se refiere a los tiempos verbales de su redacción. Se consideran los tiempos presente y pasado. El *tiempo pasado* se utiliza para representar los *criterios de verificación* que una vez satisfecho no se deben realizar nuevas acciones para mantener su cumplimiento; salvo se produzca un retroceso en el esfuerzo que lo amerite. Por otro lado, el *tiempo presente* se utiliza en la redacción para representar los *criterios de verificación* que se tienen que satisfacer y mantener su cumplimiento el resto del esfuerzo para seguir con un progreso saludable. Para el caso de las *transiciones* se resalta el hecho que no representan estados del progreso. Por lo cual sus *listas de verificación* son recomendaciones momentáneas que se consideran en un cambio de estados no consecutivos o excepcional. Una vez se asume el nuevo estado del salto, se continúa con la valoración cualitativa correspondiente. De acuerdo con esto la redacción de las *transiciones* se hace en *tiempo presente*, salvo los *criterios de cierre* que apuntan al estado tácito de finalización (o retorno al origen en 0%) que tienen una redacción mixta.

En el caso del alfa sistema electrónico en contraste con la Esencia, se le agrega el estado intermedio "*en prototipo*" entre los estados "*con arquitectura seleccionada*" y "*demostrable*". Esto con la finalidad de que se brinde una guía adicional en la ejecución de los esfuerzos y se logre una correspondencia equitativa de la valoración cualitativa (estados) con la cuantitativa (progreso en el espacio del esfuerzo). Para la definición de las listas de verificación de este alfa, se consideran las fuentes analizadas en esta Tesis Doctoral y la descripción de servicios de EIE que se ofrecen en internet. Además, la redacción de la lista se inspira en el alfa sistema software de la Esencia, considerando que el SE es la manifestación física de los requisitos y por lo tanto se debe materializar y producir.

Con respecto al *alfa* de *riesgos* y los *estados genéricos* de las dimensiones *tiempo* y *costo*, se proponen nuevas listas de verificación de acuerdo con el planteamiento teórico de la evolución del progreso. Estas listas se inspiran en la propuesta de Henao (2018), en el alfa riesgo del método proceso unificado esencial (EssUP; Ivar Jacobson International, 2016) y en la descripción que se hace de estos conceptos en el PMBoK (PMI, 2017b).

A continuación, en la Figura 4-31 se muestran como ejemplo las tarjetas correspondientes a las listas de verificación de alcance del alfa sistema electrónico. Por otro lado, las listas de verificación genéricas del costo y tiempo se presentan en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4. Conjuntamente, en la Tabla 4.5 y Tabla 4.6 se muestra el planteamiento de estados y criterios de verificación de alcance para los alfas de riesgos y sistema electrónico. Adicionalmente en el Anexo A.1 se muestran todas las listas de verificación de la Teoría del EIE.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Figura 4-31. Tarjetas de listas de verificación de alcance del alfa sistema electrónico
Fuente: elaboración propia en analogía con la Esencia (OMG, 2018)

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla 4.3. Lista de verificación de estados genéricos del costo
Fuente: Fuente: elaboración propia

Estados del costo	
Pautas de estados genéricos de la dimensión **costo**, aplicable a cualquier **alfa** o al **esfuerzo**	
Estado o transición	Criterio de verificación
Con costo estimado (1/4)	• Se identifican y cuantifican los recursos pertinentes necesarios • Se tiene una estimación de la duración de las actividades y del uso de recursos • Se identificaron categorías de costos • Se definió estrategia de adquisición de recursos (alquiler, tercerización, compra, etc.) • Se estimó el costo de la forma de trabajo seleccionada y sus recursos
Presupuestado (2/4)	• Se consideran escenarios extremos de ejecución y riesgos • Se estableció el presupuesto • Se toman decisiones de fuentes de financiamiento • Se define plan de ejecución de presupuesto de acuerdo con expectativas del ámbito • Se autorizó un presupuesto • Se disponen de los recursos
En progreso (3/4)	• Se ejecuta el presupuesto asociado • Se contrasta ejecución con presupuesto • Se adaptan a las circunstancias y se ajustan las desviaciones
En costo (4/4)	• Se controla el presupuesto • Se ajustan y compensan los defaces sin afectación negativa del ámbito • Los costos se mantienen dentro del presupuesto de acuerdo con el ámbito • Se mantiene el presupuesto consolidado, con cortes periódicos
[ajuste significativo]	• Se detectan y comprenden las variaciones en las estimaciones para realizar los ajustes • Se identifican causas raíz y se analizan • Se determinan las consecuencias del ajuste • Se registran cambios y lecciones aprendidas [cierre] • Se suspende ejecución del presupuesto o completó su ejecución • Se cierran los centros de costos respectivos • Se tiene un reporte completo de costos Nota: caso de la transición reestructuración en la que además se finaliza el esfuerzo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla 4.4. Lista de verificación de estados genéricos del tiempo
Fuente: Fuente: elaboración propia

Estados del tiempo	
Pautas de estados genéricos de la dimensión **tiempo**, aplicable a cualquier **alfa** o al **esfuerzo**	
Estado o transición	Criterio de verificación
Con tiempo estimado (1/4)	• Se identifica forma de trabajo seleccionada • Se identifican las actividades sus recursos necesarios • Se estima la duración de las actividades • Se estima momento y duración del uso de recursos
Planeado (2/4)	• Se identifican rutas críticas y cuellos de botellas • Se definió estrategia para afrontar restricciones • Se paralelan y secuencian actividades considerando restricciones y estimaciones • Se consideran escenarios extremos de ejecución y riesgos • Se establece una planeación considerando costos y alcance • Interesados y equipo aceptan la planeación • Planeación disponible
En progreso (3/4)	• Se ejecuta las actividades considerando la planeación • Se contrasta ejecución con planeación • Se adaptan a las circunstancias y se ajustan las desviaciones
En tiempo (4/4)	• Se controla la planeación • Se está en tiempo o adelantado con la planeación • Los defaces se ajustan sin contratiempos ni retrasos y son sobrellevados de acuerdo con la planeación • Se registran memorias de perturbaciones que afectan estimaciones de tiempo
[ajuste significativo]	• Se registran perturbaciones • Se detectan y comprenden las variaciones en las estimaciones para realizar los ajustes • Se identifican causas raíz y se analizan • Se determinan las consecuencias del ajuste • Se registran cambios que afectan las estimaciones y lecciones aprendidas [cierre] • Se cuantifica tiempo de la perspectiva del esfuerzo considerada y se contrasta contra estimación • Se registran memorias de cierre y de ejecución Nota: caso de la transición ajuste significativo en la que además se finaliza el esfuerzo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla 4.5. Lista de verificación del alfa sistema electrónico (alcance; 1/2)
Fuente: elaboración propia en analogía con la Esencia (OMG, 2018)

Sistema electrónico (alcance)	
Sistema fundamentado en circuitos eléctricos y electrónicos, proporcionando su **valor** al procesar señales o información	
Estado o transición	Criterio de verificación
Con arquitectura seleccionada (1/6)	• Se acordaron criterios de selección de arquitectura • Se identificaron interfaces internas/externas y señales de interacción • Se identificaron plataformas de *HW* • Se escogieron entornos de desarrollo y tecnologías • Se conoce límite del sistema • Se decidió sobre estructura del sistema (bloques, componentes, etc.) • Se tomaron decisiones de compra, construcción y reutilización • Se acordaron principales riesgos técnicos
En prototipo (2/6)	• Se disponen de los componentes necesarios y se probaron • Se diseñaron las interfaces internas y externas • Se diseñó el procesamiento lógico o de señales • Se crearon esquemáticos y trazados • Se simuló prototipo (virtual o físico) • Se implementó e integró prototipo • Se cumple con subconjunto de requisitos en entorno de prueba
Demostrable (3/6)	• Se demuestran características arquitectónicas esenciales • Se demuestran características de subconjunto de requisitos [opcional] • Se demostró sistema integrado y se midió su rendimiento • Se demostraron configuraciones críticas de hardware • Se demostraron interfaces criticas • Se integró sistema a carcasa o interfaces de usuario • Se demuestra integración con entorno al sistema • Se aceptan características como aptas para el propósito
Utilizable (4/6)	• Se fabricó la versión de operación • Se puede operar el sistema • Se probó el procesamiento de información o señales • El rendimiento y funcionamiento del sistema es aceptable • Son aceptables niveles de defectos • Se documentó todo el sistema • Se conoce contenido de la liberación • Valor agregado claro

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla 4.5. Lista de verificación del alfa sistema electrónico (alcance; 2/2)
Fuente: elaboración propia en analogía con la Esencia (OMG, 2018)

Estado o transición	Criterio de verificación
Listo (5/6)	• Documentación de usuario disponible • Se aceptó el sistema como apto para el uso • Los interesados quieren el sistema • Se preparó el soporte operacional • Se produce el sistema en las cantidades necesarias
Operacional (6/6)	• Sistema disponible para su uso • Sistema en operación • Se soporta el nivel de servicio acordado
[retiro]	• Sistema reemplazado o descontinuado • Sistema ya no es compatible • No hay usuarios autorizados • Se detiene soporte o actualizaciones

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla 4.6. Lista de verificación del alfa riesgos (alcance)
Fuente: Fuente: elaboración propia basado en Henao (2018)

Riesgos (alcance)	
Eventos o condiciones inciertas significativas que se pueden caracterizar y si se producen, tienen un efecto positivo o negativo en el **esfuerzo**	
Estado o transición	Criterio de verificación
Identificados (1/4)	• Se identificaron los riesgos asociados al esfuerzo • Los interesados y el equipo acordaron abordar la gestión de riesgos durante el esfuerzo • Se han nombrado y esbozado los riesgos
Comprendidos (2/4)	• Se realizo un análisis imparcial de los riesgos (Ej. cualitativo o cuantitativo) • Se entiende la exposición a los riesgos • Se entiende el impacto y la probabilidad de ocurrencia de los riesgos • Se estableció formas de trabajo y recursos que se podrían usar para gestionar los riesgos • Se dispone de un plan de gestión (control, mitigación) de riesgos • Se estableció el presupuesto para los procesos de gestión de riesgos
Gestionados (3/4)	• Se encuentran disponibles los recursos necesarios para ejecutar los planes de gestión de riesgos • Se identifican y programan actividades para mitigar proactivamente los riesgos • Se ejecutan las acciones para aprovechar los riesgos positivos y reducir los negativos
Bajo control (4/4)	• Se reduce continuamente el impacto de los riesgos negativos y su probabilidad de ocurrencia y se encuentran en niveles aceptables • Los riesgos presentados se abordan lo suficiente como para garantizar que se pueda desarrollar una solución adecuada • Está claro que se puede ofrecer una solución adecuada dentro de plazos aceptables y limitaciones de costos.
[ajuste significativo]	• Se identifican causas raíz y se analizan • Se determinan las consecuencias • Se determina la afectación al esfuerzo • Se ajusta la gestión de riesgos

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.3.2. Espacios de trabajo del EIE

Para identificar los espacios de trabajo, se parte de las acciones de la Conceptualización que se agrupan en los marcos de personalización, solución y gestión y que se relacionan con los conceptos identificados como alfas. Adicionalmente en la Conceptualización se observa que para la ejecución de cualquier actividad (trabajo) se requiere las competencias; entendiendo el trabajo como una nominalización de las actividades del esfuerzo. Véase la Figura 4-32.

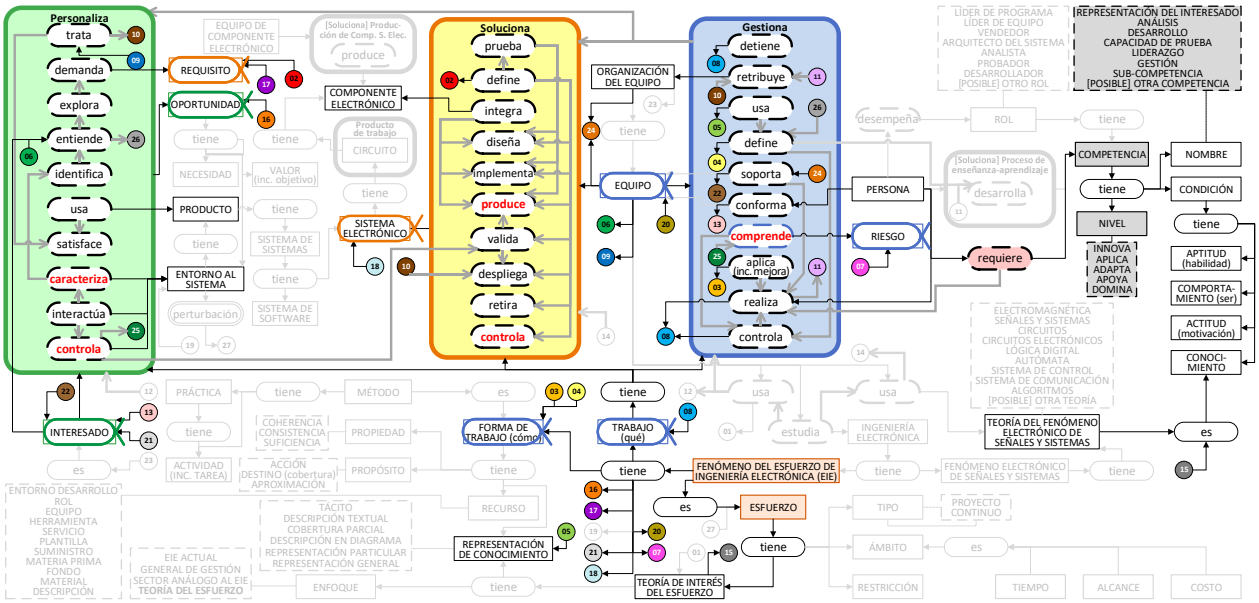


Figura 4-32. Acciones en el EIE relacionada con los alfas
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

A partir de la Conceptualización y en analogía con la Esencia se identifican los espacios de trabajo del EIE. Véanse las Figura 4-33 y Figura 4-34.

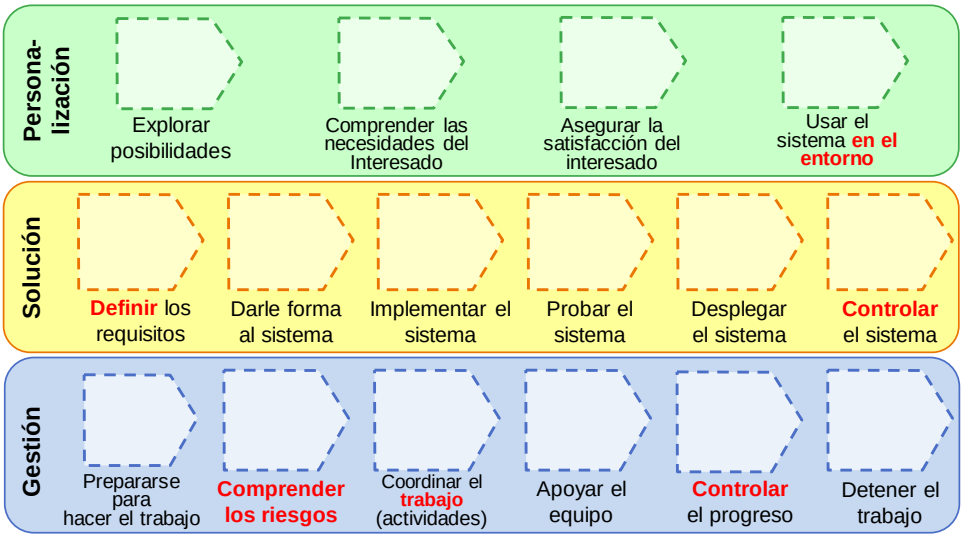


Figura 4-33. Espacios de trabajo del EIE
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

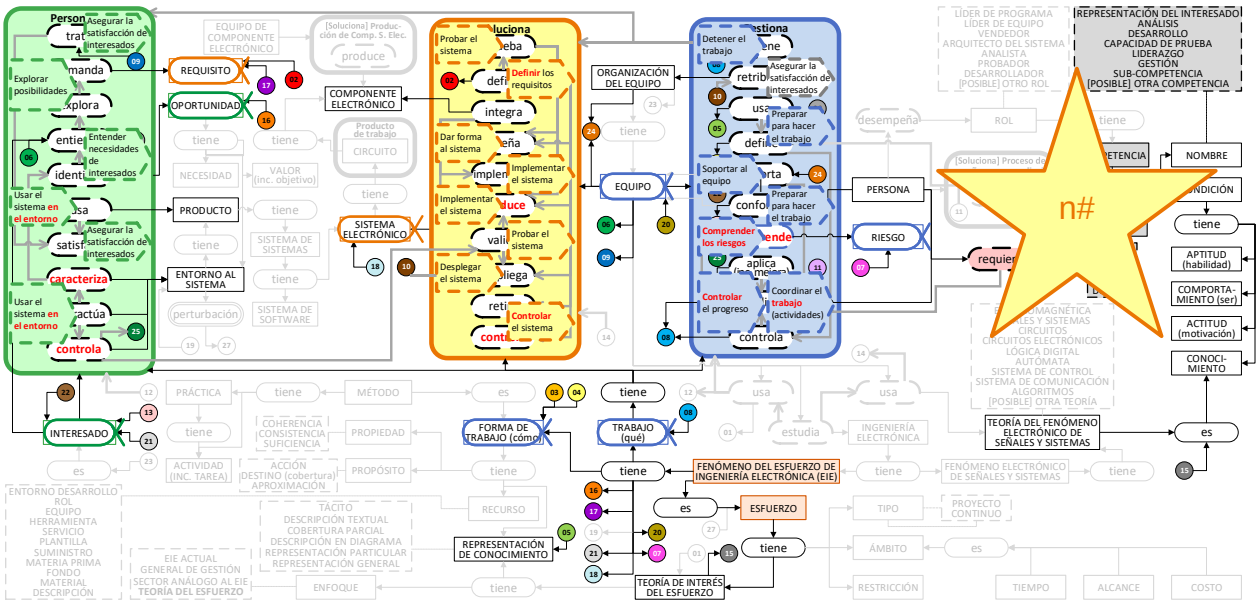


Figura 4-34. Selección de espacios de trabajo y competencias del EIE
Fuente: elaboración propia; véase la Figura 4-2.

En general los espacios de actividad de la Esencia se homologan con los espacios de trabajo de la Teoría del EIE, con la salvedad de remplazar el sistema software por el sistema electrónico. Sin embargo, de la Figura 4-32, la Figura 4-33 y la Figura 4-34 se observa que hay acciones que se resaltan en rojo. Esto se hace para destacar los cambios propuestos para la Teoría del EIE con respecto a la propuesta de la Esencia, que se describen a continuación. Para el resto de los espacios de trabajo, se asume el mismo planteamiento que se hace en la Esencia.

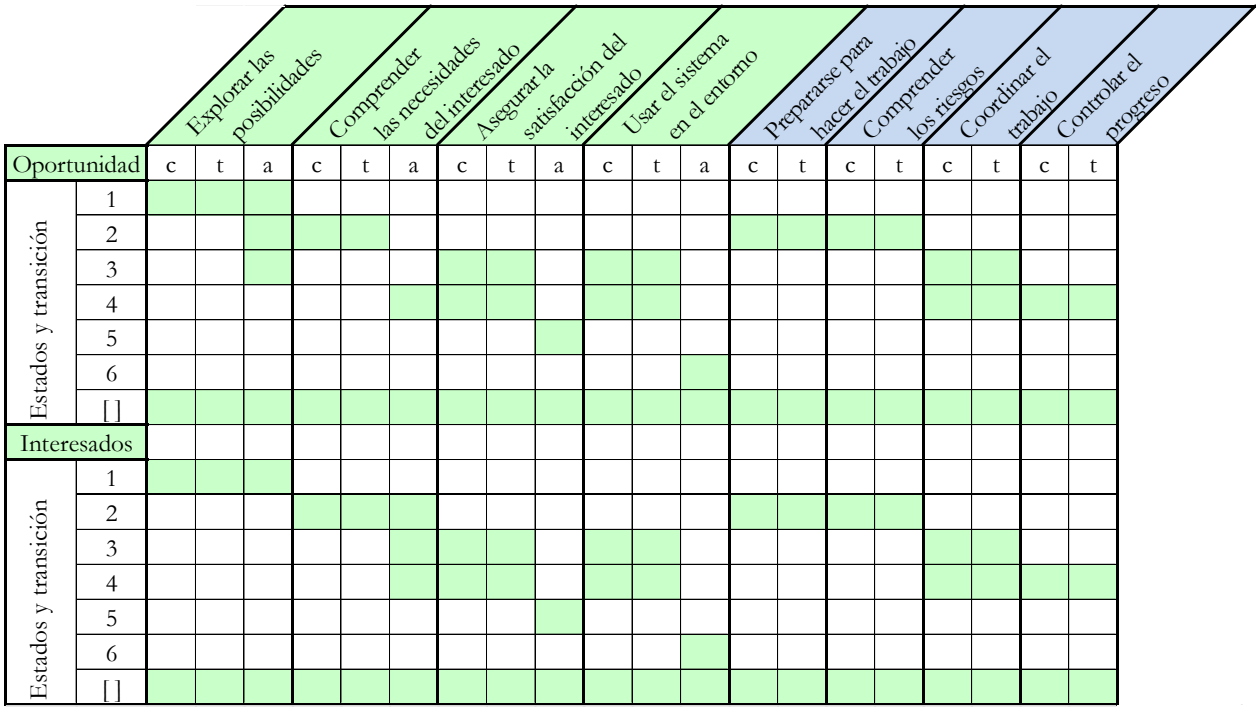
- *Usar el sistema en el entorno*: se ajusta la denominación (agregándole "en el entorno") y se amplía el ámbito al considerar adicionalmente *caracterizar* y *controlar* el entorno del sistema dentro de la meta-actividad.
- *Definir los requisitos*: se ajusta a una denominación más amplia (definir por comprender) de acuerdo con el ámbito de la meta-actividad.
- *Controlar el sistema*: Se ajusta la denominación para no confundirla con *usar el sistema* del área de interés personalización y debido a que se amplía el ámbito de *operar* a *controlar* (medir, decidir y actuar).
- *Implementar el sistema*: se amplía el ámbito al considerar adicionalmente la *producción* de un *sistema* físico.
- *Comprender los riesgos*: se agrega esta meta actividad para explicitar el "análisis de los riesgos (cualitativos o cuantitativos) en el esfuerzo, de modo que las partes interesadas entiendan la exposición al riesgo y la probabilidad de que ocurra; identificar formas de trabajo y recursos que se utilizarán para realizar la gestión de riesgos; planificar acciones para reducir las amenazas y minimizar la probabilidad de ocurrencia de riesgos negativos; establecer cómo se deben monitorear y controlar los riesgos" (Henao, 2018).
- *Controlar el progreso*: Se ajusta la denominación debido a que se amplía el ámbito de la meta-actividad de *seguimiento* a *controlar* (medir, decidir y actuar) *el progreso*.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

- *Apoyar al equipo*: la cobertura del espacio de trabajo se extiende hasta los estados de *ejecutando* y *trabajando bien* de los alfas *equipo* y *forma de trabajo* respectivamente, debido a que en estos estados se mantiene el apoyo al equipo. Este cambio además se resalta en la Figura 4-37 con la letra *n*.

Además de los cambios descritos anteriormente, se proponen otros dos significativos en lo que se refiere a la interpretación que se les dan a los espacios de trabajo en esta Tesis Doctoral. En la Teoría del Esfuerzo se concibe un ámbito que incluye al tiempo, costo y alcance, a diferencia de la Esencia en la que solo se hace explícito el alcance. Debido a esto los espacios de trabajo no solo afectan al alcance, sino que también lo hacen sobre el costo y el tiempo. Por otro lado, como se describe en el Apartado 4.2.6.1, el trabajo es una nominalización de la acción en el esfuerzo (véase la frase *trabajo tiene marcos de personaliza*, *soluciona* y *gestiona* en Figura 4-2 y la definición del alfa *trabajo* en la Figura 4-30). Esto implica que las acciones que se hacen sobre este alfa afectan también las acciones (y por consiguiente a los alfas) de las áreas de interés de *personalización* y *solución*. Esta afectación y consideraciones de la relación de los espacio de trabajo con los estados cualitativos se sintetizan por área de interés en la Figura 4-35, la Figura 4-36 y Figura 4-37. Además, debido a que el cronograma y presupuesto se tratan explícitamente desde los estados de costo y tiempo, al ejecutar las acciones desde el área de interés de gestión también se afecta el alcance de los alfas respectivos. En consecuencia, en la Figura 4-35 y la Figura 4-36 se explicita la afectación de la acción del área de interés gestión en las dimensiones de costo y tiempo de los alfas de personalización y solución.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados



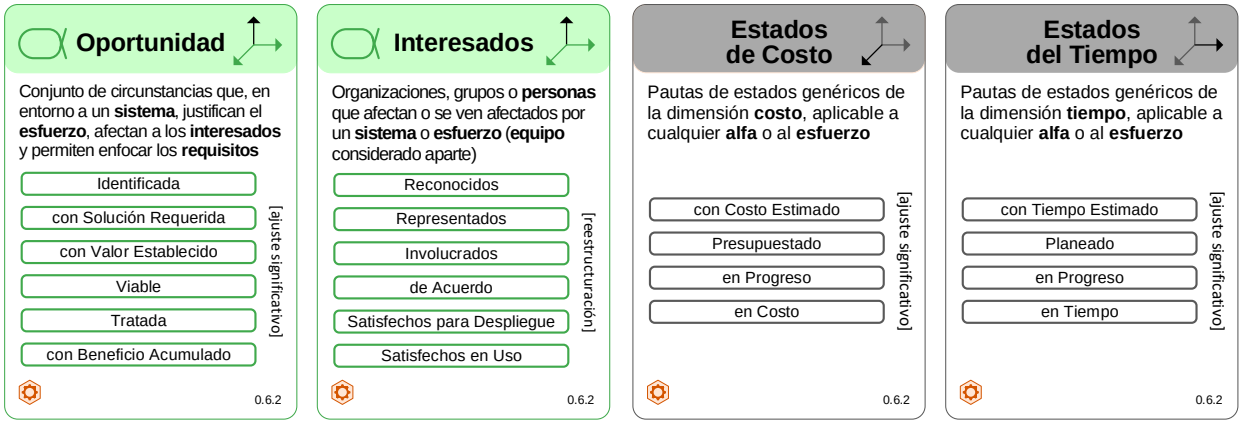


Figura 4-35. Espacios de trabajo versus estados del área de interés personalización
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

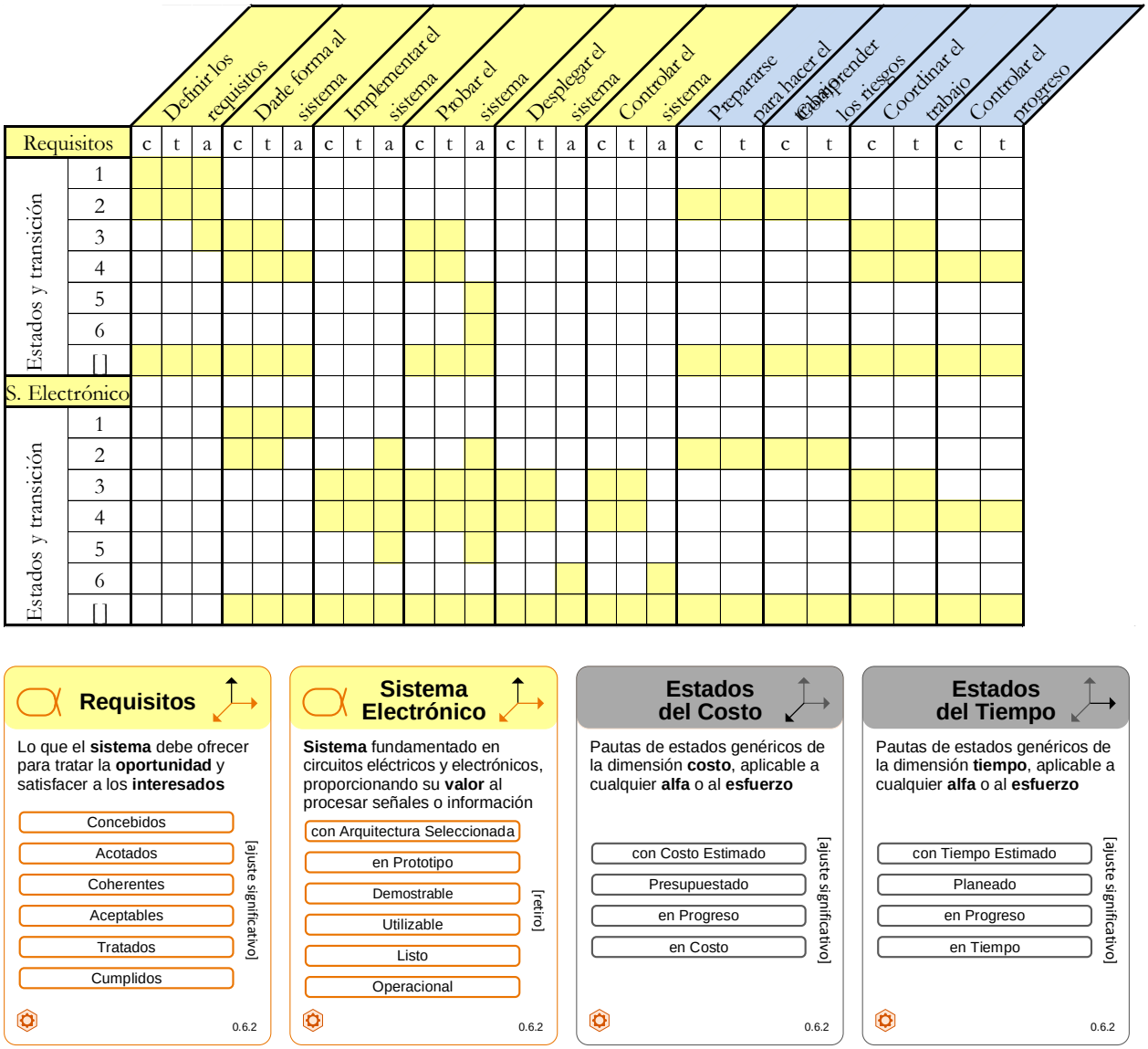


Figura 4-36. Espacios de trabajo versus estados del área de interés solución
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

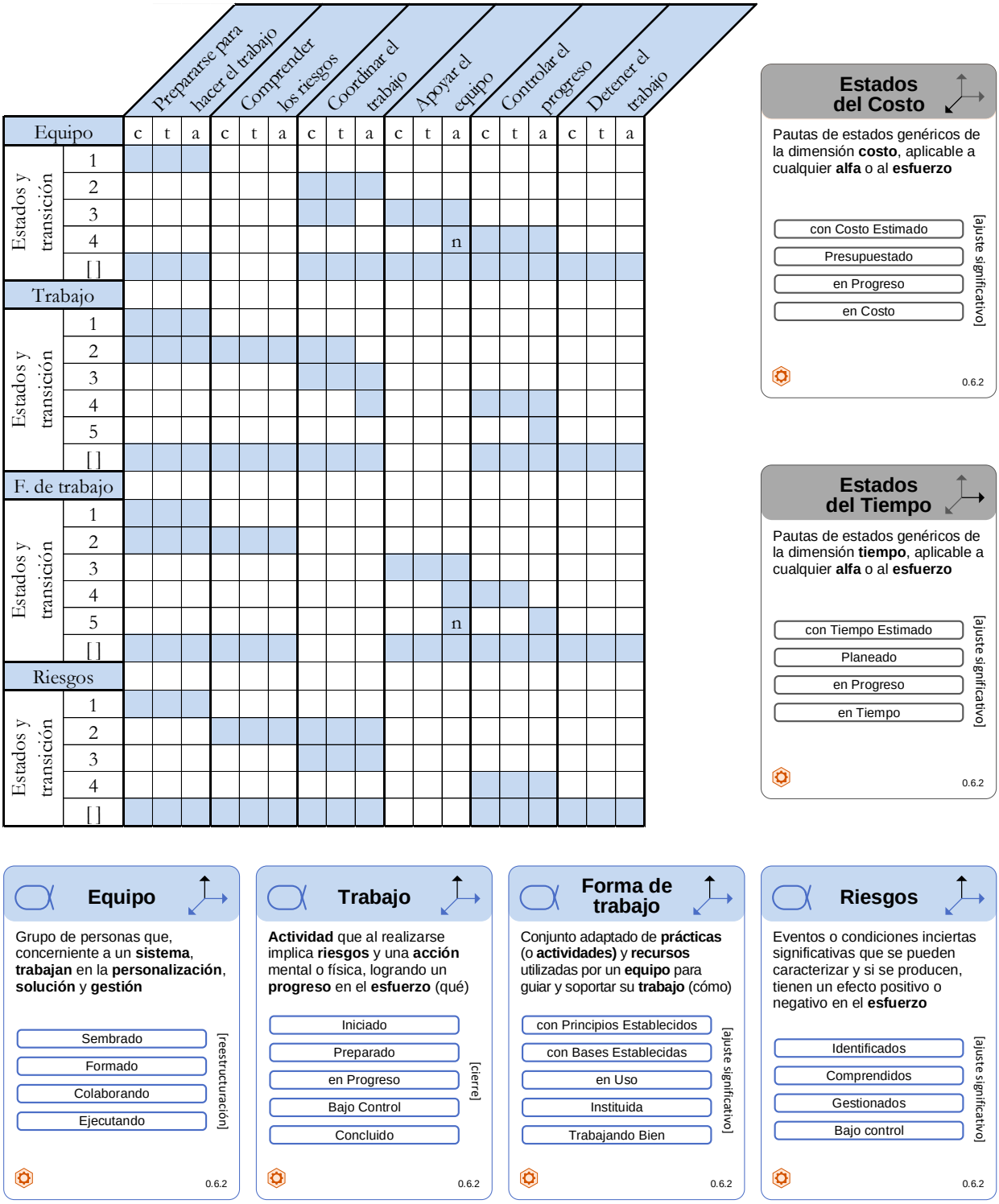


Figura 4-37. Espacios de trabajo versus estados del área de interés gestión
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

4.3.2.1. Competencias del EIE

La Conceptualización que se propone para la Teoría del EIE es la misma que se describe en la Esencia. En la Figura 4-38 se replica el diagrama de las competencias que se presenta en la Esencia (OMG, 2018) ajustando la denominación de las áreas de interés.

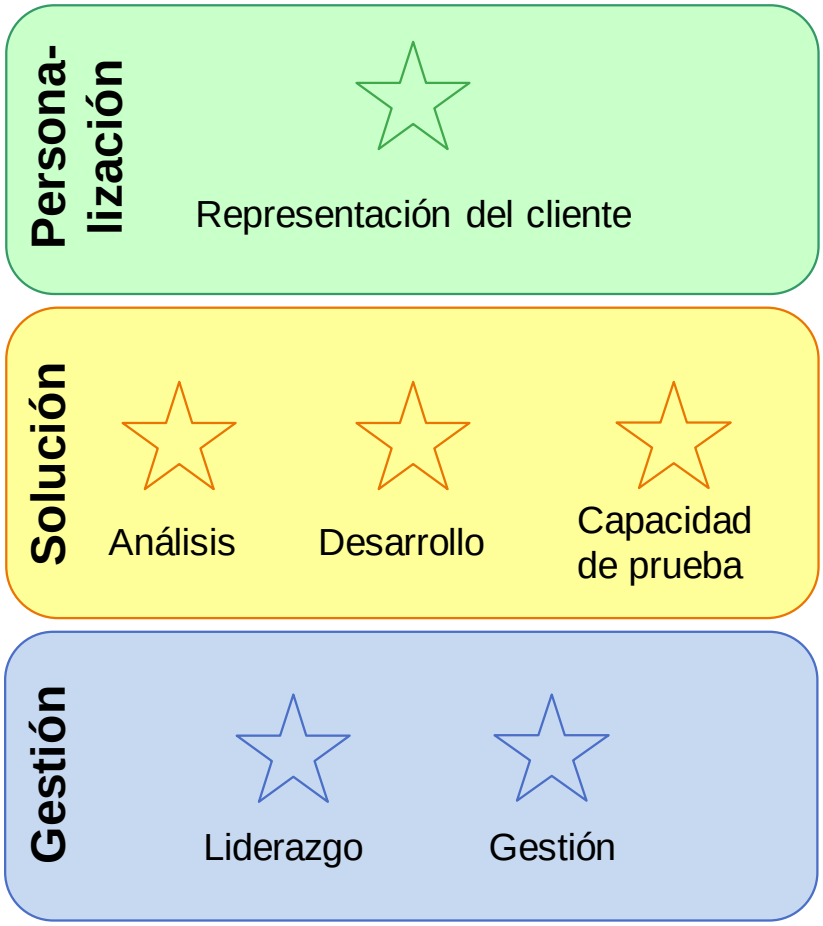


Figura 4-38. Competencias del EIE
Fuente: adaptación de figuras de la Esencia (OMG, 2018)

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

5. Validación

En este Capítulo se describe la validación de la propuesta como una comprobación empírica de la Teoría del EIE. La validación se realiza mediante un caso de estudio en el que se utilizan los productos de la Tesis Doctoral, aplicándolos en tres pasos. En el primero se utiliza la Conceptualización, en el segundo se emplean las tarjetas con las que se describe la Teoría del EIE y finalmente se representa el EIE con la Teoría del Esfuerzo. Para el desarrollo del Capítulo se describe el caso, posteriormente la aplicación de los pasos, seguidamente se explica la síntesis del esfuerzo en funciones perspectivas y finalmente se analizan los resultados.

Para realizar la validación se escoge un EIE que se desarrolle en una universidad o en un centro de investigación, debido a que se facilita el acceso al esfuerzo por estar en un entorno académico y que además usualmente se documentan. En este tipo de esfuerzos también se tiene acceso a laboratorios e infraestructura que permite se desarrollen SE con tecnologías actuales. El EIE debe estar orientado a un producto con aplicación en alguna industria o sector más allá de la ingeniería electrónica, lo que permite una evaluación de un esfuerzo amplio. En este sentido además se escoge un esfuerzo tipo proyecto finalizado recientemente o que se finalice durante el caso de estudio, para capturar la evolución del ciclo de vida de un esfuerzo y contar con la información que los participantes ofrecen de su experiencia en el esfuerzo. Además, es necesario que se pueda hacer una aplicación de la Teoría en conjunto con los participantes, para adquirir la información del caso en estudio.

5.1. EIE de un sistema IoT de supervisión de variables para la agricultura

La agricultura es una actividad humana necesaria para la producción de alimentos que depende del suministro de agua, nutrientes y calidad de los campos de cultivos. En la actualidad el suministro de agua y nutrientes en los campos se hace principalmente de acuerdo con el juicio que un granjero o campesino hace de la superficie de cultivo y en el mejor de los casos mediante análisis periódicos de muestras del suelo, sin realizar un seguimiento continuo de las condiciones de este que permita un suministro eficiente de insumos. Con el esfuerzo del caso de estudio se propone un sistema que recopila información de las condiciones del suelo y la almacena, con la finalidad de que se tomen mejores y más eficientes decisiones en el suministro de agua y nutrientes en los campos de cultivo. Para tal fin se utilizan la tecnología de internet de las cosas (IoT) lo que permite un seguimiento continuo de las condiciones del suelo y que se ejecuten modelos en plataformas en la nube para la toma eficiente de decisiones.

El presente esfuerzo se da en el contexto del desarrollo de los estudios doctorales del profesor de la Universidad Tecnológica de Bolívar Ricardo Arjona Angarita en la Universidad de Dallas; véase la Figura 5-1. Parte de los estudios doctorales son financiados por la empresa Texas *Instruments*, por lo que en contraprestación durante el desarrollo del doctorado se ejecutan proyectos de IoT con aplicación en la agricultura que además son apoyados por la empresa AT&T y en la que se utilizan productos y tecnología de ambas empresas. El caso de estudio es el segundo proyecto que se ejecuta en este

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

convenio durante un periodo de cuatro meses comprendidos entre agosto y diciembre del 2018. El costo del proyecto por temas de confidencialidad se maneja en porcentaje como un monto total del 100%. A continuación, se describe el alcance del caso de estudio de acuerdo con los alfas de la Teoría del EIE.

Figura 5-1. Participante en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad de Dallas
Fuente: https://www.utdallas.edu/admissions/graduate/degrees/detail.php?d=761

Oportunidad. La necesidad a la que se orienta el esfuerzo es proporcionar información de las condiciones del suelo para la toma de decisiones sin que se vean afectado los procedimientos convencionales de la agricultura como el arado o el riego. El valor esperado se refiere a obtener una mejoría en las cosechas con el mismo uso de recursos o mantener la calidad con un menor uso de recursos. El entorno en el que se ejecuta el esfuerzo es en los laboratorios de AT&T y en el campus de la Universidad de Dallas.

Interesados. Los interesados están conformados principalmente por: el tutor doctoral, el jefe del laboratorio de AT&T (sede del proyecto), un representante de Texas *Instruments* y el equipo de solución. Para este proyecto los interesados esperan obtener un SE que en condiciones simuladas almacene información del suelo de un campo.

Sistema electrónico y *requisitos*. El SE, se conforma por una red de sensores que se disponen en el suelo, unos colectores de información de los sensores y un controlador en el que se centraliza la configuración y gestión de la red y el almacenamiento de información. La funcionalidad del SE, se resume en el diagrama de casos de uso que se muestra en la Figura 5-2. El alcance de los requisitos y el SE, se limita hasta la recopilación de la información en un controlador con acceso a internet. La gestión de la información en la plataforma de IoT en la nube queda fuera del alcance de la ejecución de este proyecto. Además, debido a que es un proyecto en un contexto de investigación y desarrollo, el progreso cualitativo del alfa sistema electrónico se lleva hasta el cumplimiento parcial del estado *listo* y en el caso de requisitos no se cumple el criterio de verificación "*se merece pasar a operacional el sistema conforme a los requisitos*" del estado *tratado*. El resto de alfas se consideran completos al 100% considerando esta restricción.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

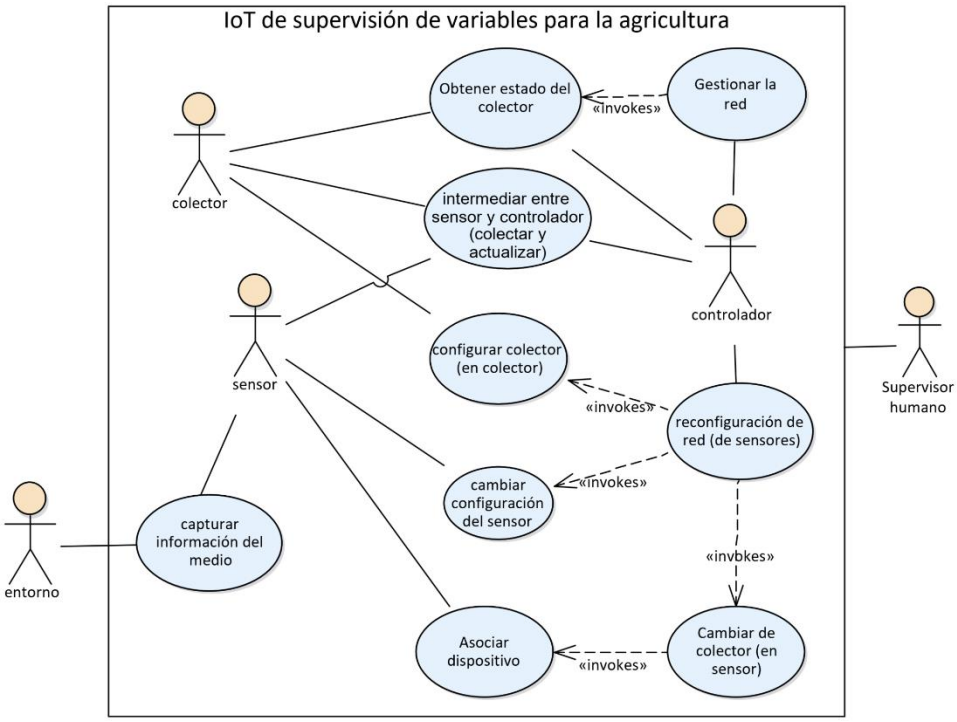


Figura 5-2. Casos de uso del sistema IoT de supervisión de variables para la agricultura
Fuente: elaboración propia

Equipo. El equipo lo conforma Ricardo como estudiante doctoral junto a otros miembros del laboratorio de AT&T que participan en el desarrollo. Debido a que la responsabilidad recae directamente sobre el estudiante doctoral los demás miembros se enmascaran como servicios externos del esfuerzo, lo que simplifica el cálculo de costos e identificación de actividades en el esfuerzo. Se tiene como objetivos mejorar el desempeño del equipo para conseguir un mayor progreso en el esfuerzo.

Trabajo y *forma de trabajo*. Las actividades del trabajo del equipo se ejecutan principalmente en los laboratorios de AT&T en el que se definen y desarrollan los requisitos. Ricardo tiene reuniones independientes semanales con el tutor y con el representante de AT&T y esporádicas con el representante de Texas *Instruments*. Además, se programan una reunión general al inicio y otra al final del proyecto. Como forma de trabajo se utiliza el método en V con iteraciones en la etapa de desarrollo y pruebas del SE.

Riesgos. En esta validación no se incluyó el alfa riesgo principalmente por no estar en la Esencia.

5.1.1. Procedimiento para el caso de estudio

Al caso de estudio se le hizo seguimiento durante tres meses de su ejecución. Para el seguimiento se realizan reuniones virtuales periódicas con el participante Ricardo, las cuales se grabaron como registro. El caso de estudio se inicia con una introducción general de los fines de esta Tesis Doctoral en una primera reunión en la que además se acuerdan reuniones periódicas de seguimiento. A continuación, en las siguientes reuniones el participante explica el proyecto en estudio y se le explica la Teoría del EIE. Para la explicación de la Teoría primero se trata en detalle la Conceptualización del fenómeno

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

abordando sus conceptos y relaciones, con lo que se busca tener un marco conceptual común con el participante. Con la Conceptualización se identifican los elementos del proyecto, su ámbito y nivel de escalado y posteriormente se utiliza como contexto para la explicación y utilización de la Teoría del EIE.

Por otro lado, se utiliza un paquete de tarjetas para resumir la Tesis Doctoral, entablar una discusión y capturar la información del esfuerzo en estudio. Las tarjetas se utilizan además para representar el progreso de los alfas en el espacio del esfuerzo mediante las listas de verificación. Asimismo, la información de cada alfa se captura en las vistas canónicas tiempo/alcance y tiempo/costo en una hoja de cálculo con puntos coordenados de cada medida del progreso. Este proceso se ejemplifica en la Figura 5-3. Entonces con el fin de recopilar la información de todo el ciclo de vida del proyecto, este procedimiento se realiza en su etapa final haciendo un seguimiento retrospectivo de la evolución del progreso de los alfas, como se explica a continuación.

La captura de la información se inicia con la vista tiempo/alcance, para ello se utilizan las tarjetas con listas de verificación del alcance. Entonces, se le pregunta al participante en qué momento del proyecto se cumple cada ítem de verificación y se le asigna un progreso, conformando coordenadas (t_i, a_i). El cálculo del progreso cuantitativo del alcance se hace como una medida comparativa con el alcance total de ese alfa versus el cumplimiento de un estado; para un estado se hace un procedimiento similar entre el progreso total del estado y el de un ítem de verificación. Las valoraciones comparativas cualitativas en porcentaje se contrastan además con los productos de trabajo que evidencian el progreso. Cuando diera lugar, por dudas en el momento de cumplimiento de un criterio o estado de progreso, el participante consulta los archivos del proyecto para fijar la coordenada. En cuanto a la vista tiempo/costo se hace una tabla de categorías típicas de costos de un EIE. Estas categorías se asocian a los alfas como abstracciones de los puntos de vistas esenciales del esfuerzo. Para el caso de estudio y por simplificación de la distribución, cada tipo o categoría de costo se le asigna a un solo alfa. Sin embargo, la distribución de los costos en los alfas se puede realizar cargándole a más de un alfa una categoría de costo, asignándole a cada alfa una porción del costo. Posteriormente se discute con el participante la distribución de costos y se ajusta al caso particular. Con la tabla de costos se hace un análisis similar al de tiempo/alcance, así, se analiza cada alfa y por cada tipo se define que porcentaje del costo se ejecuta y en qué momento, capturando la información en coordenadas (t_i, c_i).

Con la información del esfuerzo capturado en tablas se procede con el siguiente paso para generar las funciones perspectivas de los alfas y el esfuerzo utilizando un software de análisis matemático. Así, a partir de las tablas se trabaja por separado en las dos vistas tiempo/alcance y tiempo/costo. En cada vista se ubican las coordenadas (t_i, a_i) y (t_i, c_i) y se crean vectores con ellas por cada alfa. Con ayuda de una representación gráfica de las coordenadas se calculan aproximaciones polinómicas con los vectores de cada alfa, siendo un proceso iterativo y de continuo ajuste hasta que se encuentran funciones compactas. Entonces estas funciones representan: $a_j(t)$ y $c_j(t)$ de cada alfa, con lo cual se conforman las funciones perspectivas (paramétricas) que se grafican en el espacio de acuerdo con la siguiente proposición de la Teoría del Esfuerzo:

$$\varepsilon(t), f_j(t) = \left\{ \left(c_j(t), t, a_j(t) \right); c_j(t), t, a_j(t) \geq 0 \right\}$$

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

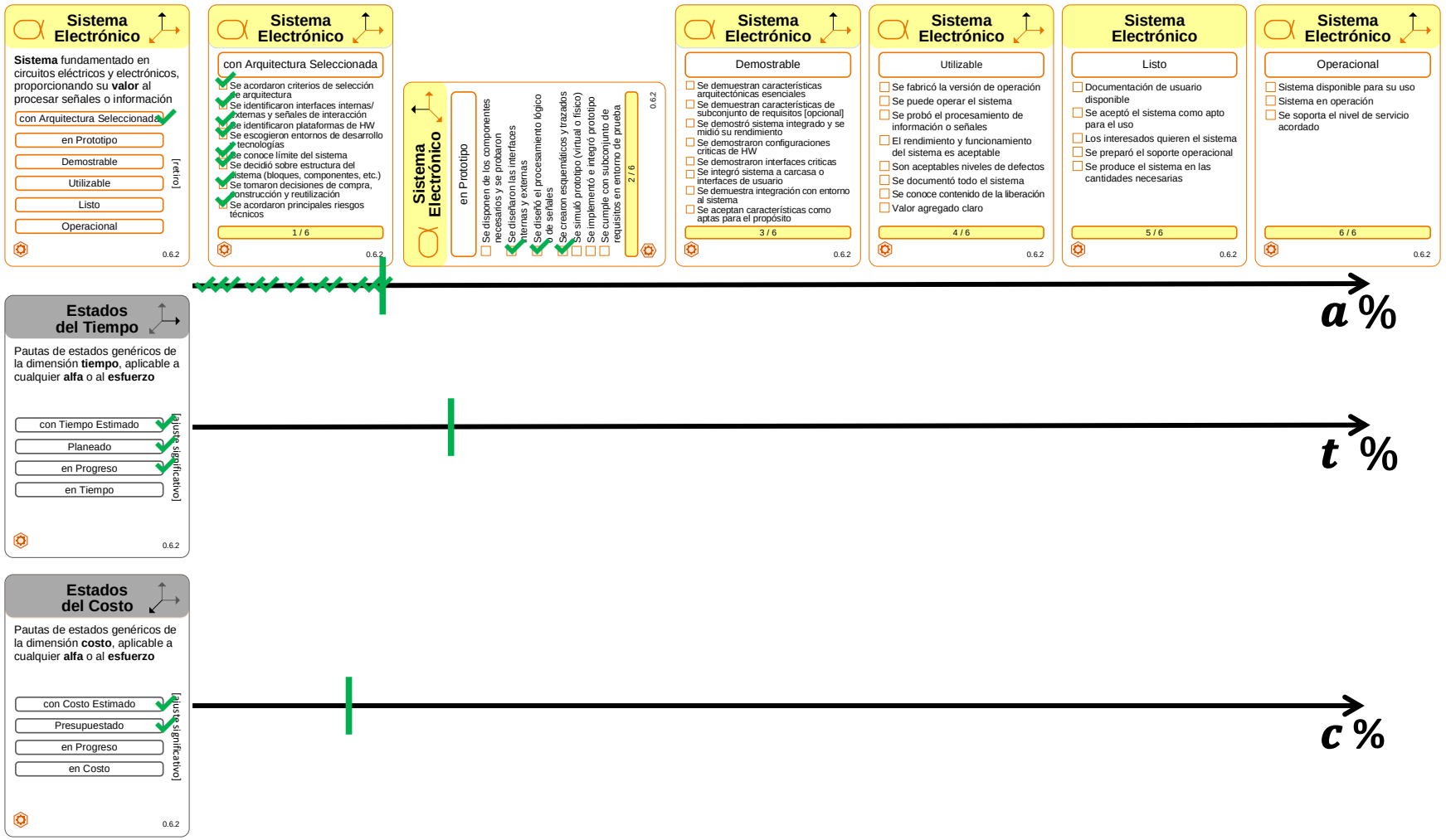


Figura 5-3. Uso de tarjetas para reconstrucción del caso de estudio
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

A continuación, se genera una función por cada perspectiva y con estas se calcula la función del esfuerzo. Con lo anterior, se describe el esfuerzo en estudio de forma sintética como un conjunto de ecuaciones matemáticas. Para el caso de la Tesis Doctoral este procedimiento matemático se realiza con el software Geogebra. Este software se usa por varias razones, de las cuales las principales son que es gratuito, se puede trabajar con funciones en tres dimensiones que se grafican dinámicamente[9] y tiene un repositorio gratuito en el que se pueden publicar los desarrollos matemáticos. En el siguiente enlace se conduce a la versión web de la herramienta matemática con el desarrollo matemático del caso de estudio presentado y las curvas en el espacio, con las que se puede interactuar[10]:

https://www.geogebra.org/classic/es8ytrmh

En el último paso se presentan los resultados a los participantes, se indaga sobre los cuestionamientos planteados con el estudio de caso y se realizan preguntas abiertas respecto de la utilización de la Teoría o la Teoría misma.

5.1.2. Síntesis del EIE en funciones perspectivas

En este Apartado se presentan las trayectorias de las funciones perspectivas, como en ellas se sintetiza la información del esfuerzo y el desarrollo matemático del caso de estudio. Para este desarrollo se aclara la convención que se utiliza en el software para la representación de los ejes del espacio del esfuerzo: el eje rojo corresponde al tiempo, el verde al costo y el azul al alcance. Además, en la Tabla 5.1 se presenta la convención de colores que se sigue para representar las trayectorias de los alfas en el espacio.

[9] Con el software se facilita la generación de curvas que representan el esfuerzo, gracias a la característica de ajustes interactivos de parámetros que se pueden hacer en las gráficas con repercusiones en las expresiones matemáticas analíticas y viceversa. Con tal característica se generan aproximaciones polinómicas de los datos capturados del EIE. Por ejemplo, se pueden mover levemente coordenadas o vectores para generar mejores y más compactas aproximaciones matemáticas.

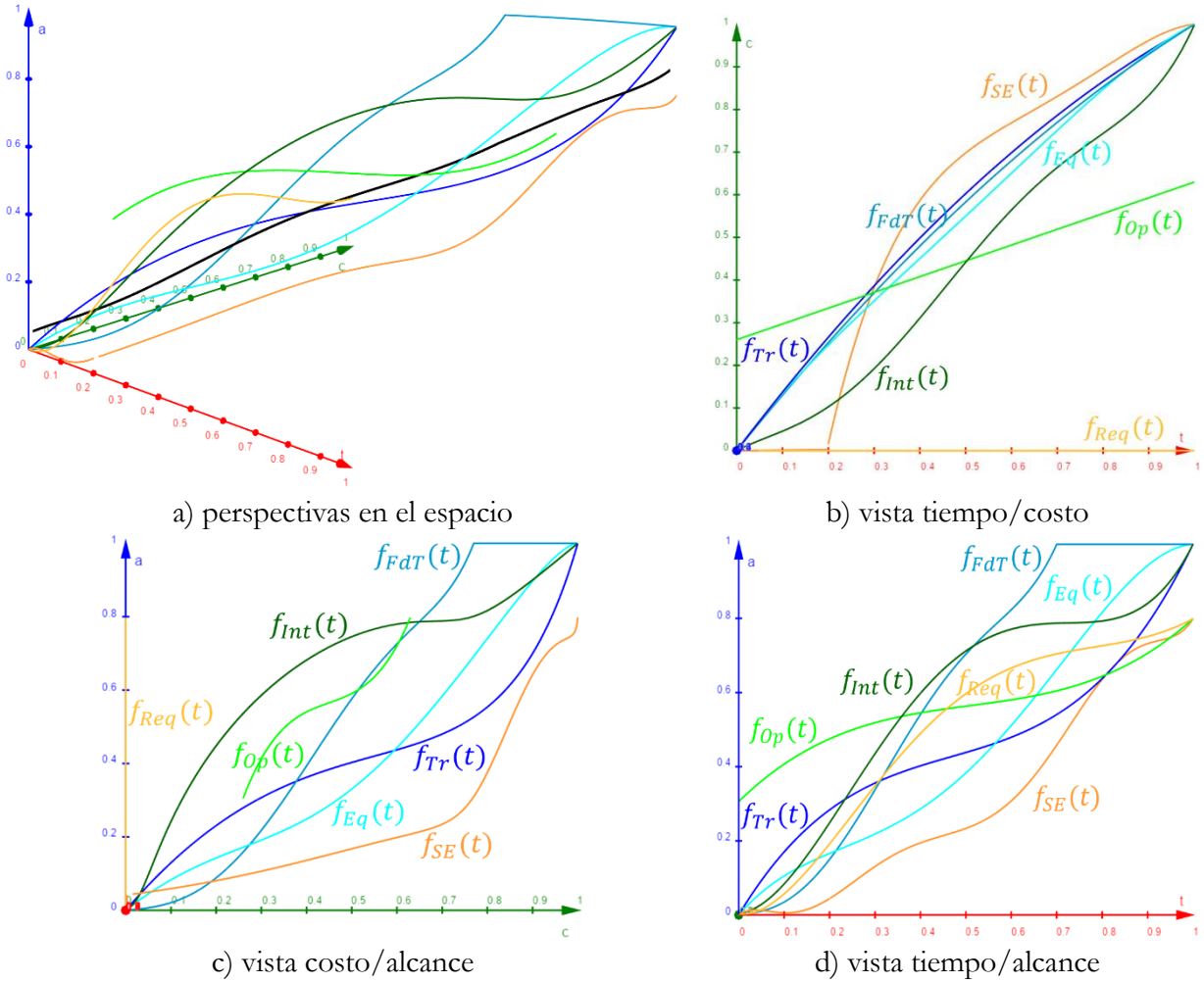
[10] Una vez abierto el enlace, se recomienda ajustar el zum del explorador web (no dentro de la aplicación), hasta ver los 3 ejes del espacio en el rango de 0% a 100% (de 0 a 1). Una vez ajustada la imagen con un clic sostenido del ratón se puede rotar el espacio. Asimismo, con el logo de una casa en la parte superior derecha de la aplicación se puede seleccionar las vistas canónicas del espacio del esfuerzo o puntos de vistas predefinidos del espacio. Si con los ajustes de visualización por accidente se oculta la gráfica, se pude volver a cargar el enlace. Además, del lado izquierdo de la herramienta está el panel con las expresiones matemáticas con las que se generan la funciones perspectivas; en el historial se registran los puntos de muestra con los que se generan las funciones perspectivas.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla 5.1. Colores de las funciones perspectivas de los alfas del caso de estudio
Fuente: elaboración propia

Alfa	Color	Función
Oportunidad	Verde	$f_{Op}(t)$
Interesados	Verde oscuro	$f_{Int}(t)$
Requisitos	Naranja claro	$f_{Req}(t)$
Sistema electrónico	Naranja	$f_{SE}(t)$
Equipo	Cian	$f_{Eq}(t)$
Trabajo	Azul	$f_{Tr}(t)$
Forma de trabajo		$f_{FdT}(t)$

En la Figura 5-4 se muestran las trayectorias de los alfas en el espacio del esfuerzo y sus vistas canónicas.



a) perspectivas en el espacio

b) vista tiempo/costo

c) vista costo/alcance

d) vista tiempo/alcance

Figura 5-4. Vistas del espacio del esfuerzo (canónicas) del caso de estudio
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

En estas trayectorias se sintetiza el esfuerzo en estudio, utilizando las ecuaciones matemáticas de la Teoría del Esfuerzo. A continuación, se explica el esfuerzo mediante cada una de las vistas de la Figura 5-4, describiendo la trayectoria de cada alfa en el contexto del esfuerzo. La curva negra de la parte (a) corresponde a la trayectoria del esfuerzo, la cual se explica por separado en el Apartado 5.1.2.5.

5.1.2.1. Vista de tiempo contra costo

Esta vista se presenta en la parte (b) de la Figura 5-4.

Requisitos. En la distribución de las categorías a este alfa no se le corresponden costos. Esto no implica que los requisitos no tengan costo, es simplemente la consecuencia de asignarle a otros alfas las categorías que también se comparten con los requisitos. Para el caso particular de esta representación los costos que corresponden con este alfa se asignan al equipo, al trabajo y al SE.

Equipo. En este se asignan los desperdicios del trabajo, el transporte y los costos de soporte al equipo. Los desperdicios se conciben en el sentido de la aproximación de *Lean Six sigma* (véase Apartado 2.2.1). Ejemplos de actividades del trabajo que no contribuyen al progreso del esfuerzo son: leer correos electrónicos, pausas en el trabajo, entre otras.

Trabajo y *forma de trabajo*. Los costos asociados al progreso que genera el equipo en el esfuerzo se asocian al alfa de trabajo. Así, a este se le asignan las actividades que generan el progreso, por lo tanto, el costo del personal del equipo y los costos de servicios del personal del laboratorio de AT&T se asocian con este alfa. Por otro lado, los cotos de los recursos del esfuerzo se asocian a la *forma de trabajo* (Entorno de desarrollo, equipos de laboratorio y gastos de operación) salvo lo que tiene que ver con los suministros del SE. Las curvas de equipo, trabajo y forma de trabajo son suaves debido que para su cálculo se hicieron ponderaciones de los costos para el periodo del esfuerzo.

Oportunidad. Debido a que el caso de estudio es el segundo proyecto relacionado con una misma oportunidad se le asocia un costo inicial diferente de 0%. Esto se debe a que se han incurrido en costos para progresar el alcance de la oportunidad. Además, a este alfa se le asignan costos previos al inicio del proyecto en estudio, como los costos de la gestión del tutor con Texas *Instruments* y AT&T, que involucran el desarrollo de la propuesta, las reuniones y la logística en la Universidad de Dallas para legalizar el proceso y la financiación del estudiante doctoral. También en la oportunidad se asignan los costos financieros del proyecto. Entonces en esta vista, la oportunidad se ve como una línea recta a razón de que el cálculo de la trayectoria se hace sobre una ponderación en porcentaje de las categorías de costos que se le asignan en el periodo del esfuerzo.

Sistema electrónico (SE). La ejecución del presupuesto del SE inicia alrededor del 20% del tiempo del proyecto. Esta situación se da en consecuencia a que primero se definen unos requisitos iniciales antes de ejecutar las compras relacionados con el SE. Por lo tanto, las categorías relacionadas con este alfa involucran a los suministros del SE. El costo de los equipos de laboratorio y de operación se cargan a la forma de trabajo. La trayectoria del SE en esta vista sigue el ritmo de la ejecución del presupuesto, la cual se suaviza a partir del 50% del tiempo del esfuerzo debido a que las compras disminuyen y solo se ejecutan los consumibles del SE.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Interesados. En el caso de este alfa la trayectoria tiene una pendiente mayor después del 80% del esfuerzo y al inicio del esfuerzo es menos pronunciada. Esta situación se da porque los interesados dedican más horas al final del esfuerzo, debido a que para ese momento los interesados participan en la revisión y creación del artículo que se presenta en una conferencia. En cambio, la participación de los interesados tiene un progreso suave al inicio del esfuerzo y aumenta cuando el equipo presenta resultados parciales del SE (aproximadamente después del 20% del tiempo) por las revisiones que ellos hacen.

5.1.2.2. Vista de tiempo contra alcance

Esta vista se presenta en la parte (d) de la Figura 5-4.

Sistema electrónico (SE). Al inicio del esfuerzo durante el primer 15% del tiempo, se intenta progresar el SE, pero sin la definición inicial de requisitos y sin la disponibilidad de los suministros. Esto se hace con base en la experiencia del proyecto anterior, pero no se progresa significativamente el SE e incluso se produce un retroceso. Después de esto con la disponibilidad de suministros y requisitos se inicia un progreso suave del alcance que se acelera alrededor del 55% del tiempo y se estabiliza hacia el final del esfuerzo. También se observa que el alcance del SE no llega al 100% y solo se progresa hasta el 80% debido a un imprevisto en los resultados obtenidos de los patrones de radiación entre el colector y el sensor. Entonces, se dieron cuenta que con la arquitectura que se plantea no se satisface la oportunidad en las condiciones de operación de entorno del SE. Esta situación además afecta el cumplimiento del alcance esperado de los requisitos y de la oportunidad.

Oportunidad. La oportunidad se progresa desde el principio hasta el 30% del tiempo. Después, mientras se realiza el desarrollo del SE, la oportunidad se estabiliza y se progresa nuevamente hacia el final del esfuerzo (del 65% del tiempo en adelante) cuando se realizan las pruebas en un entorno simulado de operación. Como se explica para el SE no se alcanza el 100% del alcance de la oportunidad.

Requisitos. Al inicio del esfuerzo durante el 7% inicial del tiempo los requisitos se progresan poco, mientras se ajustan las expectativas de la oportunidad de acuerdo con el proyecto anterior. Después se da un periodo de progreso de este alfa, en el que se esboza una arquitectura y se definen los primeros requisitos y la expectativa general del sistema, antes de poder progresar el SE. Esta situación es la explicación de porque al inicio no se progresa el SE. A partir del 50% del tiempo los requisitos se estabilizan por lo que la curva se suaviza hasta el final del esfuerzo. Como se explica para el SE, no se alcanza el 100% del alcance de este alfa.

Equipo y *forma de trabajo*. La forma de trabajo se inicia con una evolución del alcance lento y alrededor del 10% del tiempo se aumenta su pendiente de mejora, progresando hasta el 70% del tiempo, en el que se logra el desempeño optimo del 100%. Sin embargo, el equipo no evoluciona igual, estando retrasado el progreso de este con respecto al de la forma de trabajo. Esto se debe a un inconveniente de comunicación entre el equipo y los interesados que persiste hasta el final, lo que afecto su desempeño al no poder enfocar una misión del esfuerzo completamente definida. Así, el criterio cualitativo "*equipo enfocado en la misión"*, se cumple alrededor del 75% del tiempo y los criterios del ultimo estado del equipo "*se cumplen constantemente los compromisos*" y "*se adapta continuamente al cambio*", solo se cumplen

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

hasta el final del esfuerzo. A pesar de este desface, este incremento en la pendiente del equipo y forma de trabajo es la razón por la cual los demás alfas mejoran su desempeño aumentando la pendiente hacia el final del esfuerzo.

Interesados. Este alfa se progresa de forma continua desde el inicio hasta aproximadamente el 55% del tiempo, en el que se estanca su progreso y vuelve amentar hacia el final del esfuerzo. La causa del estancamiento es el inconveniente en la comunicación que se menciona en la descripción anterior del equipo. Entonces a partir del 55% del tiempo se inicia la entrega de resultados del SE, que divergen con la misión de los interesados. Esta divergencia afecta el progreso de este alfa entre el 55% y el 85% del tiempo. Al final la curva mejora por la entrega de resultados del SE de acuerdo con las expectativas de los interesados y al mejor desempeño que se tiene del equipo y la forma de trabajo para ese momento. Adicionalmente se aclara que una vez satisfechos con los resultados del SE, los interesados participan en la documentación del esfuerzo (artículo) con lo que se explica el aumento de costo del interesado al final del esfuerzo.

Trabajo. Este alfa tiene pendientes con incrementos y decrementos contrarios a los de requisitos. Esto se puede explicar debido a que la cantidad de trabajo inicial ayuda a que se definan y estabilicen los requisitos. A su vez, cuando se cuentan con unos requisitos coherentes (alrededor del 28% del tiempo) estos se estabilizan, permitiendo que se enfoque el trabajo de mejor manera logrando mayores progresos. El aumento de la pendiente al final del esfuerzo se explica por el desempeño alcanzado en la forma de trabajo alrededor del 70% del tiempo del esfuerzo.

5.1.2.3. Vista de costo contra alcance

Esta vista se presenta en la parte (c) de la Figura 5-4.

La explicación de esta vista se justifica con las otras vistas. Sin embargo, se resalta una tendencia en la relación costo/alcance con un aumento de pendiente hacia el final de la ejecución del presupuesto que es válida para todos los alfas. Entonces en esta vista se identifica que la ejecución del alcance se acelera hacia el final del esfuerzo (debido al desempeño del equipo y su forma de trabajo) y trae como consecuencia una mejora en la ejecución del presupuesto. En otras palabras, hacia el final del esfuerzo con menos costo se consigue más progreso en el alcance.

5.1.2.4. Funciones perspectivas del caso de estudio

$$f_{Op}(t) = \begin{Bmatrix} t = t \\ c = 0.37t + 0.26 \\ a = 0.85(1.556t^3 - 2.385t^2 + 1.409t + 0.36) \end{Bmatrix}$$

$$f_{Int}(t) = \begin{Bmatrix} t = t \\ c = 8.5665t^5 - 18.662t^4 + 12.572t^3 - 2.026t^2 + 0.551t \\ a = 8.041t^4 - 15.534t^3 + 8.39t^2 + 0.098t + 0.005 \end{Bmatrix}$$

$$f_{Req}(t) = \begin{Bmatrix} t = t \\ c = 0 \\ a = 0.85(-3.313t^5 + 13.76t^4 - 18.797t^3 + 9.403t^2 - 0.114t + 0.002) \end{Bmatrix}$$

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

$$f_{SE}(t) = \begin{Bmatrix} t = t \\ c = Si(t < 0.2, 0.013t, -7.995t^4 + 22.98t^3 - 24.447t^2 + 12.051t - 1.588) \\ a = 0.85(204.573t^7 - 695.769t^6 + 910.15t^5 - 572.336t^4 - 175.401t^3 - 22.272t^2 + 1.028t) \end{Bmatrix}$$

$$f_{Eq}(t) = \begin{Bmatrix} t = t \\ c = -1.067t^4 + 2.133t^3 - 1.533t^2 + 1.467t \\ a = -4.576t^4 + 8.63t^3 - 4.47t^2 + 1.415t \end{Bmatrix}$$

$$f_{Tr}(t) = \begin{Bmatrix} t = t \\ c = -0.411t^2 + 1.411t \\ a = 2.561t^3 - 3.595t^2 2.034t \end{Bmatrix}$$

$$f_{FdT}(t) = \begin{Bmatrix} t = t \\ c = -0.332t^2 + 1.332t \\ a = Si(t < 0.7, 42.387t^5 - 62.922t^4 + 25.853t^3 + 0.03t^2 + 0.146t, 1) \end{Bmatrix}$$

$$f_{Op}(t), f_{Int}(t), f_{Req}(t), f_{SE}(t), f_{Eq}(t), f_{Tr}(t), f_{FdT}(t); 0 \geq t \geq 1$$

5.1.2.5. Función perspectiva del esfuerzo del caso de estudio

La función perspectiva del esfuerzo $\varepsilon(t)$ se obtiene con una suma ponderada de las trayectorias de los alfas, por lo tanto, la resultante es una curva suave en la que se muestra la tendencia del progreso del esfuerzo. Como se describe en el Apartado 4.2.2.3, el tiempo por ser el parámetro no se pondera, el costo depende de la distribución del presupuesto ejecutado y la ponderación del alcance depende de las características particulares de la instancia del esfuerzo y del acuerdo que se haga. Por ejemplo, en los esfuerzos de investigación no siempre se llega al alcance esperado, por lo que se necesitan acuerdos de ajustes. Para el caso de estudio no se alcanzan a cumplir la totalidad de requisitos iniciales con el SE, porque en el trascurso del proyecto se identifican nuevos desafíos del entorno que impiden que con el sistema se satisfaga por completo las necesidades de la oportunidad. En otras palabras, en el proyecto se alcanzan a cumplir los requisitos planteados al inicio, pero aun así no se satisfacen las necesidades. De acuerdo con esto en el proyecto se ajusta el alcance del SE, de los requisitos y la oportunidad a un 85% del valor esperado. Por otro lado, la ponderación de las componentes de alcance de los alfas se escogen dependiendo de su contribución al alcance total del esfuerzo. En consecuencia a continuación se presenta la función $\varepsilon(t)$ resultante, en la Tabla 5.2 las ponderaciones para el caso de estudio y en la Figura 5-5 la representación de $\varepsilon(t)$ en las vistas canónicas del espacio del esfuerzo.

$$\varepsilon(t) = \begin{Bmatrix} t = t \\ c = 0.25f_{FdT}^{c}(t) + 0.45f_{Tr}^{c}(t) + 0.08f_{Eq}^{c}(t) + 0.04f_{SE}^{c}(t) + 0f_{Req}^{c}(t) + 0.13f_{Int}^{c}(t) + 0.05f_{Op}^{c}(t) \\ a = 0.05f_{FdT}^{a}(t) + 0.12f_{Tr}^{a}(t) + 0.11f_{Eq}^{a}(t) + 0.2125f_{SE}^{a}(t) + 0.1615f_{Req}^{a}(t) + 0.12f_{Int}^{a}(t) + 0.136f_{Op}^{a}(t) \end{Bmatrix}$$

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

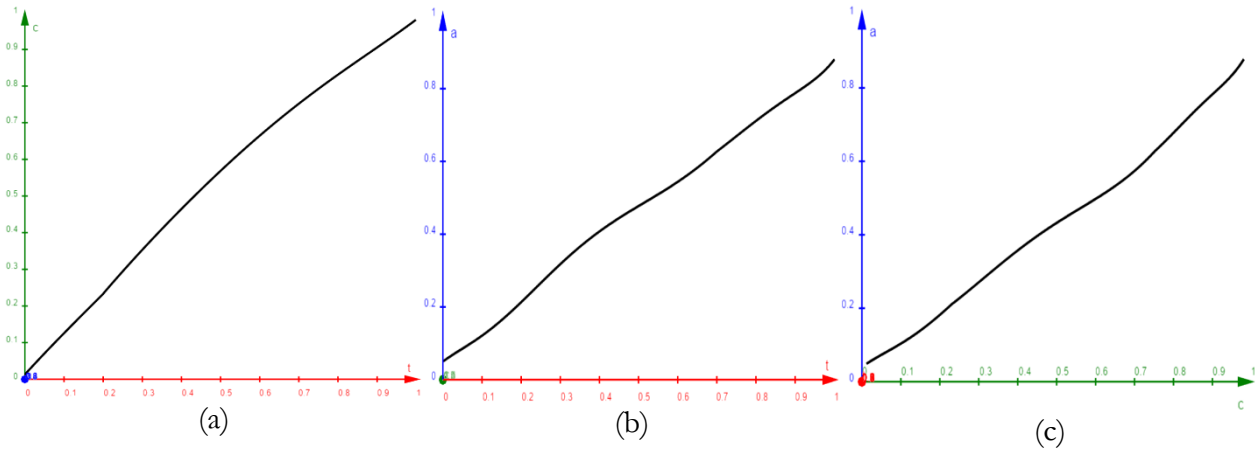


Figura 5-5. Función perspectiva del esfuerzo resultante del caso de estudio
Fuente: elaboración propia

Tabla 5.2. Ponderación de la función perspectiva del esfuerzo
Fuente: elaboración propia

Alfa	Ponderación			
	Costo	Alcance	Ajuste alcance	Alcance ajustado
Oportunidad	5%	16%	85%	13.6%
Interesados	13%	12%		12%
Requisitos	0%	19%	85%	16.15%
Sistema electrónico	4%	25%	85%	21.25%
Equipo	8%	11%		11%
Trabajo	45%	12%		12%
Forma de trabajo	25%	5%		5%

A partir de la Tabla 5.2, se observa que el alfa con mayor peso en el presupuesto es el trabajo, seguido de forma de trabajo que en conjunto suman el 70% del costo. Entonces $\varepsilon(t)$ en la vista tiempo/costo (parte a de la Figura 5-5) sigue la tendencia de estos alfas y se resalta el hecho que al final la curva se suaviza, lo que muestra una mejor eficiencia del gasto al final del esfuerzo. Para el caso de la vista tiempo/alcance (parte b de la Figura 5-5), del 20% al 60% del tiempo se observa como disminuye levemente la pendiente de $\varepsilon(t)$. Esto se debe en general a que el progreso del alcance de los alfas se suaviza en este rango de tiempo. Por otro lado, en la vista costo/alcance se observa que alrededor del 70% del costo total del esfuerzo la pendiente aumenta levemente, con lo que se muestra una pequeña mejora en la eficiencia del gasto.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

5.1.3. Análisis de los resultados de la aplicación de la Teoría del EIE

Con el caso de estudio se pretende comprobar empíricamente la valides de la Teoría del EIE y con esto evaluar el cumplimiento de los objetivos propuestos en esta Tesis Doctoral. Para esta comprobación se plantean los siguientes cuestionamientos antes del desarrollo del caso de estudio:

- ¿Cómo es la aplicación de la Teoría en casos particulares del EIE?
- ¿Qué tan adecuada es la representación del EIE con la Teoría?
- ¿La utilización de la Teoría permite la representación y especificación de un EIE particular?

Ante la primera pregunta: ¿cómo es la aplicación de la Teoría en casos particulares del EIE?, en el Apartado 5.1.1 se presenta el procedimiento de aplicación de la Teoría al caso de estudio, el cual se puede utilizar como modelo. Asimismo, en el Capítulo 4 se describe la Teoría con ejemplos ilustrativos. Además, debido a la compatibilidad de la Teoría propuesta con la Esencia, en el libro de Jacobson *et al.* (2019) se presentan varios ejemplos de aplicación que también se aplican al uso de la interpretación cualitativa de la Teoría.

Para la segunda y tercera pregunta: ¿qué tan adecuada es la representación del EIE con la Teoría? y ¿la utilización de la Teoría permite la representación y especificación de un EIE particular?, se presenta el siguiente análisis.

En la retroalimentación del caso se menciona que la Teoría sirve como marco de trabajo para mantener a la vista las consideraciones más importantes del esfuerzo. Los participantes del caso se abruman por la identificación de elementos esenciales (alfas, espacios de trabajo, competencias, entre otros) que se utilizan en los esfuerzos pero que no se racionalizan y de las explicaciones explícitas del fenómeno. En este sentido, durante el caso se identifican las explicaciones y causas de las dificultades que se presentan en el proyecto, pero de las cuales no se percatan en su momento. Esto puede deberse al sesgo del enfoque de los participantes, que abordan principalmente algunos alfas y pierden de vista otros. En otras palabras, los ingenieros electrónicos participantes en el esfuerzo se centran en racionalizar los elementos del área de interés solución, siendo la Teoría propuesta un medio para analizar el esfuerzo desde un marco más amplio. Además, se resalta la información que se extraen de las trayectorias de los alfas y como con estas se muestran y capturan las situaciones particulares del esfuerzo en estudio. En consecuencia, se considera que la aplicación de la Teoría ayuda a comprender la evolución del esfuerzo. En este sentido a pesar de que con la Teoría del Esfuerzo se enmascaran a los agentes, las representaciones de las funciones perspectivas se pueden utilizar para analizar motivaciones o comportamientos humanos, como se presenta en el Apartado 5.1.2. Por lo tanto, la Teoría del Esfuerzo es una herramienta que se puede usar de diferentes formas para análisis cuantitativos o cualitativos.

Por otro lado, en el caso de estudio los participantes no sugieren mejoras respecto de la Teoría o su planteamiento teórico, salvo la inclusión del alfa *riesgos*. Así, durante la aplicación de la Teoría se evidencia la necesidad de incluir este alfa (presente en la Conceptualización) para comprender mejor las implicaciones de los imprevistos en el esfuerzo. Con este alfa se podría ver la relación de la mitigación de los riesgos negativos, con la mejora en el desempeño del alcance de las perspectivas. Entonces

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

se podría explicar el estancamiento en el proyecto cerca de ¾ del tiempo de ejecución, que impide que se logren los valores esperados del alcance en la oportunidad, en los requisitos y en el SE. Por lo que la validación sirve para que los *riesgos* se considere el octavo alfa del EIE como se presenta en el Apartado 4.3.1. El resto de las observaciones que se hacen se refieren a consideraciones de forma sobre las tarjetas, en cuanto al uso de colores, un error en el logo de ejes en las tarjetas de tiempo y costo, actualización al nombre del estado 4 del SE (*utilizable*) y disponer de una versión más grande de las tarjetas para las explicaciones que se hacen a un grupo de personas.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

6. Conclusiones

En los Capítulos anteriores se propuso la solución y el proceso para llegar a ella. En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos, las conclusiones de la Tesis Doctoral que se derivan de la Conceptualización del EIE, la Teoría del Esfuerzo, el Modelo teórico del proceso de desarrollo de ingeniería electrónica (*Teoría del EIE*) y la validación por casos de estudio y el trabajo futuro que se deriva de esta investigación.

6.1. Resultados

6.1.1. Artículos

Gómez, M.C., Sánchez, R.D. y Barón, A. A. (2018). A representation proposal of practices for teaching and learning software engineering using a Semat kernel extension. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32).

Meléndez, F.A., Sánchez, R.D., Vélez – Zapata, J. y Simancas, J.L. (2016). Aproximación al cálculo de la tasa de retorno sobre la inversión en proyectos Intranet. *Espacios*, 37(16).

Meléndez, F.A., Sánchez, R.D., Caicedo, J.G., Velez – Zapata, J., Ovallos, D.A., Mendinueta, V., y Cortés, G. (2018). Design and development of a didactic an innovative dashboard for home automation teaching using LabVIEW programming environment. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(2).

6.1.2. Capítulos de libros

Sánchez-Dams, R., Barón-Salazar, A. y Gómez-Álvarez, M. (2017). Representation of teaching and learning practices about embedded systems using a SEMAT kernel extension. En C. Zapata, C. Durango and W. Perdomo. (Eds.), *Software Engineering: Methods, Modeling and Teaching* (pp. 443-465), Vol 4. Bogotá, Editorial Bonaventuriana.

Sánchez-Dams, R.D., Barón-Salazar, A.A. y Gómez-Álvarez, M.C. (2017). Extensión al núcleo de Essence para la representación de prácticas de implementación de sistemas productivos de Industria 4.0. En *Industria 4.0: Escenarios e Impacto*. Medellín: Ed. Sello Editorial Universidad de Medellín.

6.1.3. Ponencias

Sánchez, R.D., Barón, A.A. y Gómez, M.C. (2015). Una extensión del núcleo de SEMAT para la representación de prácticas de enseñanza de sistemas embebidos. In Proceedings of the Latin American Software Engineering Symposium (pp.47-52). Bogotá: Cidenet Sello Editorial.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Sánchez-Dams, R.D., Barón-Salazar, A. y Gómez-Álvarez, M.C. (2016). An extension of the SEMAT kernel for representing teaching and learning practices about embedded systems. In 4th International Conference in Software Engineering Research and innovation (CONISOFT 2016). Puebla, México.

Gómez-Álvarez, M.C., Sánchez-Dams, R.D. y Barón-Salazar, A. (2016). Cazadores de Fallos: Un juego para asignaturas de Introducción a Ingeniería Informática. En XLII Conferencia Latinoamericana de Informática (CLEI 2016). Valparaiso, Chile.

6.1.4. Pasantías de investigación

Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá. Periodo: 15 de abril al 14 de julio de 2017. Tutora: Dra. Nilda Yangüés Cervantes, PhD. http://www.utp.ac.pa/.

Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Periodo: 19 de febrero al 18 de mayo 2018. Tutora: Dra. Hanna Jadwiga Oktaba, PhD. https://www.unam.mx/.

6.1.5. Dirección de trabajos de grado

Víctor Alfonso Mendinueta Gámez. Tablero didáctico para la enseñanza de la domótica en el programa de ingeniería electrónica de la Universidad de la Costa, utilizando el entorno de programación de LABVIEW. *Tutor principal*. Programa de Ingeniería Electrónica, Universidad de la Costa (2014).

Nazhir Amaya Tejera. Evaluación simulada del desempeño de protocolos de enrutamiento de mensajes en redes vehiculares tolerantes al retardo (VDTN) en el escenario Juan de Acosta – Barranquilla. *Codirección de Tesis de Maestría*. Maestría en Ingeniería, Universidad de la Costa (2017).

6.1.6. Eventos organizados

Latin American Software Engineering Symposium - LASES 2014. Barranquilla, Atlántico.

6.1.7. Propuesta teórica

En esta Tesis doctoral se proponen tres productos: La Conceptualización, la Teoría del Esfuerzo y la Teoría del Esfuerzo de Ingeniería Electrónica.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

6.2. Conclusiones

Como resultado de todo el proceso antes descrito, en la Tesis Doctoral se plantea primeramente la Conceptualización del fenómeno del EIE, la cual se representa en un esquema preconceptual mediante una red de conceptos y relaciones de concurrencia, causalidad y retroalimentaciones. Para ello, se identifican los agentes y sus acciones; así como también se diferencia el *fenómeno del esfuerzo de ingeniería electrónica* (EIE) del *fenómeno electrónico de señales y sistemas*.

La Tesis Doctoral (con sus tres productos) es un medio de representación general para el EIE. Para ello se escogen términos de carácter general, con coherencia terminológica entre las partes de la Tesis y compatibles con lo que se describe en la literatura de los tres enfoques abordados. La Tesis Doctoral se constituye en una primera aproximación a un lenguaje común para que se mejore la comunicación entre los profesionales de los enfoques abordados. En este sentido, se busca que la Tesis sirva como medio para representar, comparar y transferir las diferentes formas de trabajo del EIE. Además, debido a que los productos son generados a partir de enfoques que incluyen aproximaciones genéricas más allá del EIE, la Tesis Doctoral se puede extender a otros dominios disciplinares y en particular a la ingeniería de software y la Esencia

A partir de una revisión de literatura, en la presente Tesis Doctoral se sintetizan los enfoques pertinentes al EIE actuales en una Conceptualización. Así, se abarcan los enfoques hasta llegar a saturaciones teóricas, sin tomar partido por alguno en especial. Entonces, se construye una Teoría aprovechando las fortalezas de unas propuestas para corregir las debilidades de otras, sintetizando los enfoques de forma coherente. Además, en la Teoría se incluyen mejoras y se expresa en lenguaje formal matemático.

La descripción formal de la Teoría tiene una interpretación intrínseca cuantitativa (tipología de *varianza*) y otra cualitativa que son compatibles con lo que se expresa en la literatura (teoría de tipo *proceso*). Así, a partir de la Conceptualización se llega a una abstracción matemática de los constructos con los que se caracteriza el fenómeno (los alfas) y se representan con funciones matemáticas (cuantitativas). Tales funciones se interpretan como el progreso que tiene el esfuerzo o alguno de sus alfas (perspectivas esenciales) en cuanto a costo, tiempo y alcance. Además, al progreso se le da una interpretación cualitativa (criterios de verificación de un estado, regiones/estados de un alfa y salud del esfuerzo) para facilitar el uso de la Teoría. Asimismo, los productos de esta Tesis Doctoral se describen en tarjetas con lo cual la propuesta es accionable y práctica (Jacobson *et al.*, 2012b).

Se considera que el alcance es la dimensión más importante, debido a que en ella se abstraen los objetivos del esfuerzo y sus perspectivas esenciales (alfas) y a las cuales se les asignan unas expectativas de progreso para un esfuerzo (restricciones). Por su parte el tiempo y el costo se pueden interpretar como dimensiones restrictivas del esfuerzo. En todo caso las tres dimensiones son esenciales y se necesitan para analizar y comprender el fenómeno en su conjunto.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente Tesis se constituye en un marco de pensamiento para el EIE, el cual sirve como base para la toma de decisiones o análisis de esfuerzos, e igualmente se

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

puede utilizar como un medio para comprender los fundamentos del EIE o se mejore el desempeño del *esfuerzo* o EIE.

Se concibe la Teoría del Esfuerzo como un planteamiento genérico para el esfuerzo. Así, en esta propuesta se generalizan los planteamientos teóricos de las ciencias del diseño (Hubka *et al.* 1996) y de la Esencia (OMG, 2018). Además, sirve como sustento teórico de las descripciones actuales de gestión de la calidad y de proyectos (micro teorías).

Por último, es necesario señalar que, en contraste con las teorías de rango medio actuales, en la presente Tesis se propone una Teoría unificada a partir de la cual se obtiene lo siguiente:

- Se sintetizan y abstraen constructos y proposiciones a este nivel de teorización. Por ejemplo, el constructo vector acción $\overrightarrow{v}$ o la proposición función del esfuerzo $p_j(t)$.
- Se cubren las micro teorías disponibles para el EIE, abarcando la explicación y la capacidad de predicción del fenómeno.
- Se tiene acceso a nuevos tipos de análisis del *esfuerzo* y del EIE mediante la aplicación de herramientas matemáticas a la Teoría, como: derivadas, integrales, análisis estadísticos, teoría de conjuntos, entre otras. Por ejemplo, con la Teoría se puede calcular la velocidad de cambio entre dimensiones (primera derivada de la función esfuerzo).

6.3. Discusión y trabajo futuro

Los términos de la Tesis Doctoral se escogen a partir de su significado en los diccionarios y en la Esencia, de su uso en la literatura y de la coherencia terminológica de la Teoría. Sin embargo, tales términos están abiertos a la discusión, y por lo tanto son susceptibles de que se ajusten o remplacen por sinónimos. En el grupo de investigación de lenguajes computacionales de la facultad de minas de la Universidad nacional de Colombia se considera que lo importante es que en la comunidad de disciplinas orientadas al esfuerzo (como las ingenierías) se decante una terminología común, de forma similar a como sucede con la terminología de las ciencias naturales. Así, por ejemplo, el termino electrón tiene el mismo significado en la física, química o ingenierías.

Además, de acuerdo con los resultados de esta investigación se vislumbran las siguientes líneas de trabajo en el área del EIE y el *esfuerzo* en general, llevando a que se continúe desarrollando proyectos que aborden y profundicen en los siguientes aspectos:

- Expresar en lenguaje matemático la *proposición de dinámica* en relación con las *perspectivas*, *vectores acción* y *competencias*.
- Usar la Teoría para proponer estructuras más complejas como *prácticas* y *métodos*. Consecuentemente, se deben explicar las consideraciones de describir cuantitativamente el *propósito* y la *propiedad* de la *acción* (*forma de trabajo*) con *vectores acción*.
- Realizar descripciones de instancias típicas de EIE como ejemplos de uso de la Teoría.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

  - Así, por ejemplo, se podría utilizar el planteamiento cuantitativo estadístico que se hace desde la aproximación de *Lean Six sigma* como medio para caracterizar funciones perspectivas como modelos genéricos típicos de casos comunes.
- Extender la propuesta a otros dominios.
  - Aprovechar la compatibilidad de la Teoría con la Esencia y las propuestas del área de teoría de *Semat* para abstraer una teoría del esfuerzo de ingeniería de software.
  - Aprovechar que en la Tesis se abordan enfoques genéricos del Esfuerzo para abstraer teorías del esfuerzo de la ingeniería de sistemas u otras ingenierías; véase el Anexo A.2.
- Utilizar la propuesta como un marco de pensamiento y de trabajo empírico del esfuerzo para describir situaciones típicas actuales desde un marco teórico unificado.
- Plantear modelos útiles de casos generales del *esfuerzo* y del EIE.
- Se debe realizar un análisis para definir las unidades absolutas de los alfas en el eje alcance. En la propuesta que se hace, la asignación del porcentaje de progreso tiene un grado de subjetividad que se propone de acuerdo con la percepción de los participantes. Sería deseable que dentro de la comunidad de disciplinas orientadas al esfuerzo se identificaran en conceso estas unidades absolutas.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Página intencionalmente en blanco

Anexos

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Página intencionalmente en blanco

A.1. Listas de verificación de los alfas del EIE

Tabla A.1.1. Lista de verificación de estados genéricos del costo
Fuente: elaboración propia

Estados del costo	
Pautas de estados genéricos de la dimensión **costo**, aplicable a cualquier **alfa** o al **esfuerzo**	
Estado o transición	Criterio de verificación
Con costo estimado (1/4)	• Se identifican y cuantifican los recursos pertinentes necesarios • Se tiene una estimación de la duración de las actividades y del uso de recursos • Se identificaron categorías de costos • Se definió estrategia de adquisición de recursos (alquiler, tercerización, compra, etc.) • Se estimó el costo de la forma de trabajo seleccionada y sus recursos
Presupuestado (2/4)	• Se consideran escenarios extremos de ejecución y riesgos • Se estableció el presupuesto • Se toman decisiones de fuentes de financiamiento • Se define plan de ejecución de presupuesto de acuerdo con expectativas del ámbito • Se autorizó un presupuesto • Se disponen de los recursos
En progreso (3/4)	• Se ejecuta el presupuesto asociado • Se contrasta ejecución con presupuesto • Se adaptan a las circunstancias y se ajustan las desviaciones
En costo (4/4)	• Se controla el presupuesto • Se ajustan y compensan los defaces sin afectación negativa del ámbito • Los costos se mantienen dentro del presupuesto de acuerdo con el ámbito • Se mantiene el presupuesto consolidado, con cortes periódicos
[ajuste significativo]	• Se detectan y comprenden las variaciones en las estimaciones para realizar los ajustes • Se identifican causas raíz y se analizan • Se determinan las consecuencias del ajuste • Se registran cambios y lecciones aprendidas [cierre] • Se suspende ejecución del presupuesto o completó su ejecución • Se cierran los centros de costos respectivos • Se tiene un reporte completo de costos Nota: caso de la transición reestructuración en la que además se finaliza el esfuerzo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.2. Lista de verificación de estados genéricos del tiempo
Fuente: elaboración propia

Estados del tiempo	
Pautas de estados genéricos de la dimensión **tiempo**, aplicable a cualquier **alfa** o al **esfuerzo**	
Estado o transición	Criterio de verificación
Con tiempo estimado (1/4)	• Se identifica forma de trabajo seleccionada • Se identifican las actividades sus recursos necesarios • Se estima la duración de las actividades • Se estima momento y duración del uso de recursos
Planeado (2/4)	• Se identifican rutas críticas y cuellos de botellas • Se definió estrategia para afrontar restricciones • Se paralelan y secuencian actividades considerando restricciones y estimaciones • Se consideran escenarios extremos de ejecución y riesgos • Se establece una planeación considerando costos y alcance • Interesados y equipo aceptan la planeación • Planeación disponible
En progreso (3/4)	• Se ejecuta las actividades considerando la planeación • Se contrasta ejecución con planeación • Se adaptan a las circunstancias y se ajustan las desviaciones
En tiempo (4/4)	• Se controla la planeación • Se está en tiempo o adelantado con la planeación • Los defaces se ajustan sin contratiempos ni retrasos y son sobrellevados de acuerdo con la planeación • Se registran memorias de perturbaciones que afectan estimaciones de tiempo
[ajuste significativo]	• Se registran perturbaciones • Se detectan y comprenden las variaciones en las estimaciones para realizar los ajustes • Se identifican causas raíz y se analizan • Se determinan las consecuencias del ajuste • Se registran cambios que afectan las estimaciones y lecciones aprendidas [cierre] • Se cuantifica tiempo de la perspectiva del esfuerzo considerada y se contrasta contra estimación • Se registran memorias de cierre y de ejecución Nota: caso de la transición ajuste significativo en la que además se finaliza el esfuerzo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.3. Lista de verificación del alfa oportunidad (alcance)
Fuente: adaptada y modificada a partir de listas de verificación de la Esencia (OMG, 2018)

Oportunidad (alcance)	
Conjunto de circunstancias que, en entorno a un **sistema** (necesidades, valor, objetivos), justifican el **esfuerzo**, afectan a los **interesados** y permiten enfocar los **requisitos**	
Estado o transición	Criterio de verificación
Identificada (1/6)	• Se identificó la idea subyacente a la oportunidad • Al menos un interesado quiere invertir • Se identifican otros interesados
Con solución requerida (2/6)	• Se identifica una solución • Se identifican las necesidades de los interesados • Se identifican los problemas y las casusas raíz • Se confirma la necesidad de una solución • Se propone al menos una solución
Con valor establecido (3/6)	• Se cuantificó el valor de la oportunidad • Se entiende el impacto de la solución • Se entiende el valor del sistema • Se clarificó el criterio de éxito • Se clarificó y cuantificó el resultado
Viable (4/6)	• Se esbozó una solución • Solución posible dentro de las restricciones • Riesgos aceptables y manejables • Solución rentable • Se entienden las razones para desarrollar la solución • Oportunidad viable de conseguir
Tratada (5/6)	• Se trató la oportunidad • Se amerita desplegar la solución • Interesados satisfechos
Con beneficio Acumulado (6/6)	• Se acumulan beneficios con la solución • Retorno de la inversión (ROI) aceptable
[ajuste]	• Se identifican causas raíz y se analizan • Se determinan las consecuencias del ajuste (necesidades, cubrimiento de objetivos, entrega de valor) • Se contrasta la pertinencia del sistema propuesto • Se determina la afectación al esfuerzo

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.4. Lista de verificación del alfa interesados (alcance)
Fuente: adaptada y modificada a partir de listas de verificación de la Esencia (OMG, 2018)

Interesados (alcance)	
Organizaciones, grupos o **personas** que afectan o se ven afectados por un **sistema** o **esfuerzo** (**equipo** se considerado aparte)	
Estado o transición	Criterio de verificación
Reconocidos (1/6)	• Se identificaron grupos de interesados • Se acordaron los interesados esenciales que se van a representar • Se les definen responsabilidades a los representantes
Representados (2/6)	• Representantes de acuerdo con responsabilidades • Se autorizaron a representantes • Se acordó enfoque de colaboración • Representantes respetan forma de trabajo y prepararon asistencia
Involucrados (3/6)	• Representantes asisten al equipo • Representantes retroalimentan y participan en decisiones a tiempo • Representantes comunican los cambios rápidamente
De acuerdo (4/6)	• Representantes de acuerdo en expectativas mínimas • Representantes felices con su participación • Se valoran los aportes de los representantes • Representantes valoran y respetan los aportes del equipo • Representantes tienen prioridades claras y perspectivas equilibradas
Satisfechos para despliegue (5/6)	• Representantes proporcionaron retroalimentación • Representantes confirman que el sistema está listo para despliegue
Satisfechos en uso (6/6)	• Usuarios del sistema proveen retroalimentación • El sistema cumple expectativas de los interesados
[reestructuración]	• Se inventarían responsabilidades • Se identifican y analizan causas raíz • Se determinan las consecuencias del ajuste • Se determina la afectación al esfuerzo [retiro] • Se concluye la misión Nota: caso de la transición reestructuración en la que además se finaliza el esfuerzo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.5. Lista de verificación del alfa requisitos (alcance; 1/2)
Fuente: adaptada y modificada a partir de listas de verificación de la Esencia (OMG, 2018)

Requisitos (alcance)	
Lo que el **sistema** debe ofrecer para tratar la **oportunidad** y satisfacer a los **interesados**	
Estado o transición	Criterio de verificación
Concebidos (1/6)	• Interesados acordaron que el sistema se producirá • Se identificaron los usuarios • Se identificaron los interesados financiadores • Es clara la oportunidad
Acotados (2/6)	• Se identificaron interesados implicados en el esfuerzo • Se acordó propósito del sistema • Se aclaró criterios de éxito • Se comparte compresión del sistema • Se acordó formato de requisitos • Se estableció la gestión de requisitos • Se aclaro esquema de priorización • Se identifican y consideran las restricciones • Se aclararon las suposiciones
Coherentes (3/6)	• Se comparten los requisitos • Se aclaran origen de requisitos • Se aclaran justificaciones de requisitos • Se tratan conflictos • Se aclararon características esenciales • Se explicaron escenarios de uso importantes • Se aclaran prioridades • Se entiende el impacto • El equipo sabe y está de acuerdo con lo que debe entregar
Aceptables (4/6)	• Se aceptan requisitos de solución admisible • Cambios de requisitos bajo control • El valor es claro • Es claro cómo se trata la oportunidad • Se pueden probar los requisitos
Tratados (5/6)	• Se trataron suficientes requisitos para un sistema aceptable • Sistema acorde con los requisitos • Es claro el valor de los requisitos implementados • Se merece pasar a operacional sistema conforme a requisitos

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.5. Lista de verificación del alfa requisitos (alcance; 2/2)
Fuente: adaptada y modificada a partir de listas de verificación de la Esencia (OMG, 2018)

Estado o transición	Criterio de verificación
Cumplidos (6/6)	• Los interesados aceptan los requisitos • Sin requisitos que impidan considerar un sistema completo • Requisitos totalmente satisfechos
[ajuste significativo]	• Se identifican causas raíz y se analizan • Se ajustan los requisitos a circunstancias • Se contrasta la pertinencia del sistema propuesto • Se ajusta propósito del sistema • Se determina la afectación al esfuerzo

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.6. Lista de verificación del alfa sistema electrónico (alcance; 1/2)
Fuente: elaboración propia en analogía con la Esencia (OMG, 2018)

Sistema electrónico (alcance)	
Sistema fundamentado en circuitos eléctricos y electrónicos, proporcionando su **valor** al procesar señales o información	
Estado o transición	Criterio de verificación
Con arquitectura seleccionada (1/6)	• Se acordaron criterios de selección de arquitectura • Se identificaron interfaces internas/externas y señales de interacción • Se identificaron plataformas de HW • Se escogieron entornos de desarrollo y tecnologías • Se conoce límite del sistema • Se decidió sobre estructura del sistema (bloques, componentes, etc.) • Se tomaron decisiones de compra, construcción y reutilización • Se acordaron principales riesgos técnicos
En prototipo (2/6)	• Se disponen de los componentes necesarios y se probaron • Se diseñaron las interfaces internas y externas • Se diseñó el procesamiento lógico o de señales • Se crearon esquemáticos y trazados • Se simuló prototipo (virtual o físico) • Se implementó e integró prototipo • Se cumple con subconjunto de requisitos en entorno de prueba
Demostrable (3/6)	• Se demuestran características arquitectónicas esenciales • Se demuestran características de subconjunto de requisitos [opcional] • Se demostró sistema integrado y se midió su rendimiento • Se demostraron configuraciones críticas de hardware • Se demostraron interfaces criticas • Se integró sistema a carcasa o interfaces de usuario • Se demuestra integración con entorno al sistema • Se aceptan características como aptas para el propósito
Utilizable (4/6)	• Se fabricó la versión de operación • Se puede operar el sistema • Se probó el procesamiento de información o señales • El rendimiento y funcionamiento del sistema es aceptable • Son aceptables niveles de defectos • Se documentó todo el sistema • Se conoce contenido de la liberación • Valor agregado claro

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.6. Lista de verificación del alfa sistema electrónico (alcance; 2/2)
Fuente: elaboración propia en analogía con la Esencia (OMG, 2018)

Estado o transición	Criterio de verificación
Listo (5/6)	• Documentación de usuario disponible • Se aceptó el sistema como apto para el uso • Los interesados quieren el sistema • Se preparó el soporte operacional • Se produce el sistema en las cantidades necesarias
Operacional (6/6)	• Sistema disponible para su uso • Sistema en operación • Se soporta el nivel de servicio acordado
[retiro]	• Sistema reemplazado o descontinuado • Sistema ya no es compatible • No hay usuarios autorizados • Se detiene soporte o actualizaciones

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.7. Lista de verificación del alfa equipo (alcance; 1/2)
Fuente: adaptada y modificada a partir de listas de verificación de la Esencia (OMG, 2018)

Equipo (alcance)	
Grupo de personas que, concerniente a un **sistema**, **trabajan** en la **personalización**, **solución** y **gestión**	
Estado o transición	Criterio de verificación
Sembrado (1/4)	• Se definió la misión • Se definen y conocen restricciones • Se disponen de mecanismos de crecimiento • Se definió la composición • Se definieron responsabilidades • Se aclaro nivel de compromiso requerido • Se identificaron competencias requeridas • Se determino el tamaño • Se definieron reglas de gobierno • Se selecciono modelo de liderazgo
Formado (2/4)	• Se reclutaron suficientes miembros • Se entienden los roles • Se entiende la forma de trabajo • Los miembros se presentaron • Se entienden responsabilidades individuales y se alinean con las competencias • Los miembros aceptan el trabajo • Se identifican colaboradores externos • Se definieron mecanismos de comunicación • Los miembros se comprometen con el equipo
Colaborando (3/4)	• Equipa funciona como una unidad • Comunicación abierta y honesta • Equipo se enfoca en la misión • Los miembros se conocen
Ejecutando (4/4)	• Se cumplen constantemente los compromisos • Se adaptan continuamente al cambio • Se solucionan los problemas • Se minimiza el retrabajo y retroceso • Se eliminan continuamente desperdicios

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.7. Lista de verificación del alfa equipo (alcance; 2/2)
Fuente: adaptada y modificada a partir de listas de verificación de la Esencia (OMG, 2018)

Estado o transición	Criterio de verificación
[reestructuración]	• Se inventarían responsabilidades • Se identifican y analizan causas raíz • Se determina la afectación al esfuerzo • Se registran lecciones aprendidas [retiro] • Se concluye la misión • Se concluyen responsabilidades • Miembros disponibles para otros equipos Nota: caso de la transición reestructuración en la que además se finaliza el esfuerzo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.8. Lista de verificación del alfa trabajo (alcance; 1/2)
Fuente: adaptada y modificada a partir de listas de verificación de la Esencia (OMG, 2018)

Trabajo (alcance)	
Actividad que al realizarse implica **riesgos** y una **acción** mental o física, logrando un **progreso** en el **esfuerzo** (qué)	
Estado o transición	Criterio de verificación
Iniciado (1/5)	• Se aclaro resultado requerido • Se aclararon restricciones • Se conocen interesados financiadores • Se identifico iniciador del trabajo • Se conocen los interesados • Fuente de financiación clara • Prioridad clara
Preparado (2/5)	• Se acordaron compromisos • Se estima el tiempo, costo y alcance • Se entiende la disponibilidad de recursos • Se entiende la exposición al riesgo • Se establecieron criterios de aceptación • Se desgloso lo suficiente para iniciar • Se identifican y priorizan las tareas • Se define un plan creíble • Está disponible el financiamiento • Al menos un miembro del equipo listo para iniciar • Se definieron hitos de liberación
En progreso (3/5)	• Se inicio el desarrollo • Se ejecutan tareas para progresar el esfuerzo • Se monitorea el progreso • Se estableció definición de terminado
Bajo control (4/5)	• Se completan las tareas • Trabajo no planificado bajo control • Riesgos bajo control • Se revisan estimaciones para contrastar rendimiento • Se mide el progreso • Retrabajo bajo control • Se cumplen compromisos consistentemente
Concluido (5/5)	• Solo quedan tareas administrativas • Se archivan los resultados • Se acepta sistema resultante

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.8. Lista de verificación del alfa trabajo (alcance; 2/2)
Fuente: adaptada y modificada a partir de listas de verificación de la Esencia (OMG, 2018)

Estado o transición	Criterio de verificación
[ajuste significativo]	• Se identifican causas raíz y se analizan • Se determina la afectación al esfuerzo • Se registran lecciones aprendidas [cierre] • Métricas disponibles • Se archiva todo • Se cierra y concilia el presupuesto • Se libera el equipo • No hay tareas pendientes ni incompletas Nota: caso de la transición ajuste significativo en la que además se finaliza el esfuerzo.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.9. Lista de verificación del alfa forma de trabajo (alcance)
Fuente: adaptada y modificada a partir de listas de verificación de la Esencia (OMG, 2018)

Forma de trabajo (alcance)	
Conjunto adaptado de **prácticas** (o **actividades**) y **recursos** que un **equipo** utiliza para guiar y soportar su **trabajo** (cómo)	
Estado o transición	Criterio de verificación
Con principios establecidos (1/5)	• Equipo apoya activamente los principios • Se convinieron los recursos necesarios • Se dispone de un enfoque adecuado • Se entiende contexto del esfuerzo • Se conocen restricciones de prácticas y recursos
Con bases establecidas (2/5)	• Se seleccionaron las principales prácticas y recursos • Se acordaron prácticas necesarias para iniciar el trabajo • Se identificaron prácticas y recursos indispensables • Se entiende faltante entre forma de trabajo necesaria y disponible • Se entiende faltante de capacidad • Se dispone de un método adecuado (coherencia/consistencia/suficiencia)
En uso (3/5)	• Se usan las prácticas • Se inspecciona regularmente • Se adapta al contexto • El equipo la apoya • Se establecen mecanismos de retroalimentación • Se soporta la colaboración con las prácticas
Instituida (4/5)	• Todo el equipo la utiliza • Accesible a todo el equipo • Todo el equipo la inspecciona y adapta
Trabajando bien (5/5)	• Se logran progresos predecibles • Se aplican naturalmente las prácticas • Recursos son naturalmente compatibles con la forma de trabajo • Se ajusta continuamente • Coherente, consistente y suficiente
[ajuste significativo]	• Se identifican causas raíz y se analizan • Se determina la afectación al esfuerzo • Se registran lecciones aprendidas [retiro] • Ya no se usa • Se comparten lecciones aprendidas Nota: caso de la transición ajuste significativo en la que además se retira una o varias prácticas.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Tabla A.1.10. Lista de verificación del alfa riesgos (alcance)
Fuente: Fuente: elaboración propia

Riesgos (alcance)	
Eventos o condiciones inciertas significativas que se pueden caracterizar y si se producen, tienen un efecto positivo o negativo en el **esfuerzo**	
Estado o transición	Criterio de verificación
Identificados (1/4)	• Se identificaron los riesgos asociados al esfuerzo • Los interesados y el equipo acordaron abordar la gestión de riesgos durante el esfuerzo • Se han nombrado y esbozado los riesgos • Se estableció formas de trabajo y recursos que se podrían usar para gestionar los riesgos
Comprendidos (2/4)	• Se realizo un análisis imparcial de los riesgos (Ej. cualitativo o cuantitativo) • Se entiende la exposición a los riesgos • Se entiende el impacto y la probabilidad de ocurrencia de los riesgos • Se dispone de un plan de gestión (control, mitigación) de riesgos • Se estableció el presupuesto para los procesos de gestión de riesgos
Gestionados (3/4)	• Se encuentran disponibles los recursos necesarios para ejecutar los planes de gestión de riesgos • Se identifican y programan actividades para mitigar proactivamente los riesgos • Se ejecutan las acciones para aprovechar los riesgos positivos y reducir los negativos
Bajo control (4/4)	• Se reduce continuamente el impacto de los riesgos negativos y su probabilidad de ocurrencia y se encuentran en niveles aceptables • Los riesgos presentados se abordan lo suficiente como para garantizar que se pueda desarrollar una solución adecuada • Está claro que se puede ofrecer una solución adecuada dentro de plazos aceptables y limitaciones de costos.
[ajuste significativo]	• Se identifican causas raíz y se analizan • Se determinan las consecuencias • Se determina la afectación al esfuerzo • Se ajusta la gestión de riesgos

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

A.2. Conceptualización del esfuerzo (ingenierías y calidad)

Para el desarrollo de la tesis se consideran de la literatura los enfoques y aproximaciones generales en los que se aborda el esfuerzo (gestión de proyectos y calidad, ingeniería de sistemas, ciencias del diseño y ciencias del diseño aplicado a las disciplinas de ingeniería) y aproximaciones disciplinares como la Esencia de la ingeniería de software y su extensión a la ingeniería de sistemas. En consecuencia, en la Figura A.2-1, se presenta una modificación de la Figura 4-2 como una versión general de la Conceptualización del esfuerzo. Esta Conceptualización se propone como una descripción de los esfuerzos de ingeniería de sistemas, de software y electrónica, en la que se considera la aplicación de la gestión de calidad y de proyectos como instancias del Modelo y que además se podría extender en primera instancia a esfuerzos de otras ingenierías.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

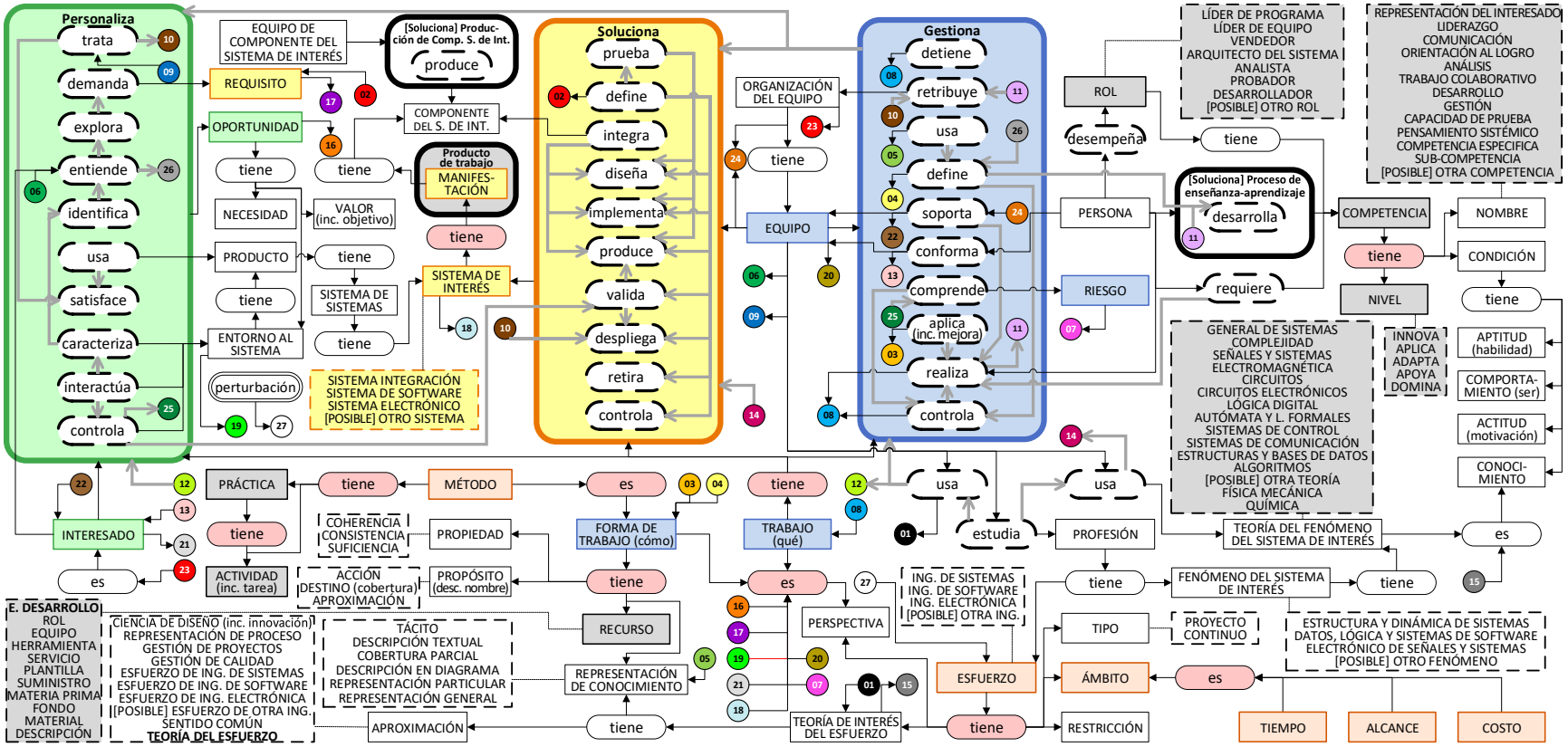


Figura A.2-1. Conceptualización del esfuerzo (ingenierías y calidad)
Fuente: elaboración propia

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Referencias

Abdelhalim, M. B. y Habib, S.-D. (2011). An integrated high-level hardware/software partitioning methodology. *Design Automation for Embedded Systems*, *15*(1), 19–50.

ACM. (2006, noviembre 17). Curricula Recommendations. Recuperado el 12 de noviembre de 2014, de http://www.acm.org/education/curricula-recommendations

Adams, K. MacG., Hester, P. T., Bradley, J. M., Meyers, T. J. y Keating, C. B. (2014). Systems Theory as the Foundation for Understanding Systems. *Systems Engineering*, 17(1), 112–123.

Adams, K. MacG. y Keating, C. B. (2011a). Overview of the systems of systems engineering methodology. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2(2/3), 112–119.

Adams, K. MacG. y Meyers, T. J. (2011b). Perspective 1 of the SoSE methodology: framing the system under study. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2(2–3), 163–192.

Ambler, S. (2019, enero 16). Essence – Disciplined Agile (DA). Recuperado el 28 de junio de 2019, de Disciplined Agile (DA) website: http://disciplinedagiledelivery.com/category/essence/

Ambler, S. y Lines, M. (2011, octubre). DA Home. Recuperado el 28 de noviembre de 2018, de Disciplined Agile (DA) website: https://disciplinedagiledelivery.com/

Ambler, S. y Lines, M. (2016). The Disciplined Agile Process Decision Framework. En D. Winkler, S. Biffl y J. Bergsmann (Eds.), *Software Quality. The Future of Systems- and Software Development. SWQD 2016* (pp. 3–14). Berlin: Springer.

American Society for Quality. (2002, julio 1). Quality Glossary - T - ASQ. Recuperado el 14 de mayo de 2015, de http://asq.org/glossary/t.html

Appleyard, M., Hatch, N. W. y Mowery, D. C. (2001). Managing the development and transfer of process technologies in the semiconductor manufacturing industry. En G. Dosi, R. R. Nelson y S. Winter (Eds.), *The nature and dynamics of organizational capabilities* (pp. 183–208). New York: Oxford University Press.

Arellano, J. y Santoyo, M. (2009). *Investigar con Mapas Conceptuales*. Madrid: Narcea, S.A. de Ediciones.

Artiles-Visbal, L. (1995). El artículo científico. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 11(4), 387–394.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Barón-Salazar, A. (2019). *Modelo para la Definición Unificada de la Práctica como Constructo Teórico en Ingeniería de Software* (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia—Sede Medellín, Medellín, Colombia). Recuperado de http://bdigital.unal.edu.co/72763/

Baskerville, R. y Pries-Heje, J. (2010). Explanatory Design Theory. *Business & Information Systems Engineering*, 2(5), 271–282.

Bendraou, R., Combemale, B., Crégut, X. y Gervais, M.-P. (2007). Definition of an Executable SPEM 2.0. En *14th Asia-Pacific Software Engineering Conference, APSEC 2007* (pp. 390–397). Aichi, Japan.

Bennett, N., Buttrick, R. y Stanton, P. (2017). *Managing successful projects with PRINCE2* (6a ed.). London: The Stationery Office.

Berre, A. J., Huang, S. y Elvesæter, B. (2015, junio). *Beyond Essence – Extending Essence for Enterprise Engineering*. Presentado en Essence in Practice: A Revolution in Software Engineering?, Berlin, Alemania. Recuperado de https://www.omg.org/news/meetings/tc/berlin-15/special-events/Essence_Day_agenda.htm

Bertoze Lima, G. L., Lopes Ferreira, G. A., Saotome, O., Marques da Cunha, A. y Vieira Dias, L. A. (2015). Hardware Development: Agile and Co-Design. En *12th International Conference on Information Technology - New Generations* (pp. 784–787). Las Vegas, USA.

Blomquist, T., Hällgren, M., Nilsson, A. y Söderholm, A. (2010). Project-as-practice: In search of project management research that matters. *Project Management Journal*, 41(1), 5–16.

Board, J. (2004, enero 18). Computer Science vs. Electrical and Computer Engineering. Recuperado el 8 de mayo de 2015, de http://pratt.duke.edu/undergrad/cs-vs-ce

Boylestad, R. L. (2004). *Introducción al análisis de circuitos*. (C. M. Barraza, Trad.). México: Pearson Educación.

Braha, D. y Maimon, O. (1998). A Mathematical Theory of Design: Foundations, Algorithms and Applications. Boston: Springer.

British Standards Institution. (1994). Harmonized system of quality assessment for electronic components. Guide to total quality management (TQM) for CECC approved organizations (No. BS CECC 00806:1997). Recuperado de https://shop.bsigroup.com

Brunswicker, S. y Chesbrough, H. (2018). The adoption of open innovation in large firms: practices, measures, and risks. *Research-Technology Management*, 61(1), 35–45.

Bunse, C., Gross, H.-G. y Peper, C. (2007). Applying a model-based approach for embedded system development. En *33rd EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications (EUROMICRO 2007)* (pp. 121–128). Lübeck, Alemania.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Bureau of Labor Statistics. (2015). Electrical and Electronics Engineers. En *U.S. Department of Labor, Occupational Outlook Handbook* (2016-17 ed.). Recuperado el 17 noviembre de 2018, de http://www.bls.gov/ooh/architecture-and-engineering/electrical-and-electronics-engineers.htm

Cantarelli, C. C., Flyvbjerg, B. y Buhl, S. L. (2012a). Geographical variation in project cost performance: the Netherlands versus worldwide. *Journal of Transport Geography*, 24, 324–331.

Cantarelli, C. C., van Wee, B., Molin, E. J. E. y Flyvbjerg, B. (2012b). Different cost performance: different determinants?: The case of cost overruns in Dutch transport infrastructure projects. *Transport Policy*, 22, 88–95.

Carloni, L. P., Passerone, R., Pinto, A. y Sangiovanni-Vincentelli, A. L. (2006). Languages and Tools for Hybrid Systems Design. *Foundations and Trends® in Electronic Design Automation*, 1(1/2), 1–193.

Carlson, R. y Turner, R. (2013). Review of Agile Case Studies for Applicability to Aircraft Systems Integration. *Procedia Computer Science*, 16, 469–474.

Casamayor, E. D. L. (2011). *Metodología de síntesis para uso de bloques DSP con HDL sobre FPGAs* (Tesis de Maestría, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España). Recuperado de https://eprints.ucm.es/13515/

Castro, L. F. y Zapata, C. M. (2013). Executable pre-conceptual schemas for representing key performance indicators. En *8th Computing Colombian Conference (8CCC)* (pp. 1–6). Armenia, Colombia.

Chen, D., Cong, J. y Pan, P. (2006). FPGA Design Automation: A Survey. *Foundations and Trends® in Electronic Design Automation*, 1(3), 195–330.

Chesbrough, H. (2017). The Future of Open Innovation. *Research Technology Management*, *60*(1), 35–38.

Chong, S., Wong, C.-B., Jia, H., Pan, H., Moore, P., Kalawsky, R. y O'Brien, J. (2011). Model Driven System Engineering for vehicle system utilizing Model Driven Architecture approach and hardware-in-the-loop simulation. En *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (pp. 1451–1456). Beijing, China.

Christie, J. (2008). The seductive and Dangerous V-model. *Testing Experience*, (4), 73–77.

Clark, John O. (2009). System of Systems Engineering and Family of Systems Engineering from a standards, V-Model, and Dual-V Model perspective. En *3rd Annual IEEE Systems Conference* (pp. 381–387). Vancouver, Canadá.

Software Engineering Institute. (2010). CMMI for Development, Version 1.3. *Carnegie Mellon Institute*. Pittsburgh, USA, Technical report

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Columbia University. (2001, febrero 1). Computer Engineering Undergraduate Program. Recuperado el 8 de mayo de 2015, de http://compeng.columbia.edu/compeng-undergraduate

Crosby, P. B. (1979). Quality is free: *The art of making quality certain* (1a ed.). New York: McGraw-Hill.

Cross, N. (2001). Designerly Ways of Knowing: Design Discipline Versus Design Science. *Design Issues*, 17(3), 49–55.

Dahmen, U. y Rossmann, J. (2018). Experimentable Digital Twins for a Modeling and Simulation-based Engineering Approach. En *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)* (pp.1–8). Roma, Italia.

Daigneault, M.-A. y David, J. P. (2012). Synchronized-transfer-level design methodology applied to hardware matrix multiplication. En *2012 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs* (pp. 1–7). Cancún, México.

Darder, A., Pérez, A. y Salinas, J. (2012). El Mapa Conceptual como Instrumento de Investigación: Construcción y Representación de un Modelo de Tutoría Virtual. En A. J. Cañas, J. D. Novak y J. Vanhear (Eds.), *Concept Maps: Theory, Methodology, Technology. Proceedings of the Fifth International Conference on Concept Mapping* (Vol. 1, pp. 180–187). Valetta: University of Malta.

De Micheli, G., Ernst, R. y Wolf, W. (2002). *Readings in Hardware/software Co-design*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Deming, W. E. (1994). *The New Economics for Industry, Government, Education* (2a ed.). Cambridge: Education, MIT Press.

Díaz González, F. A., Andrés Andrade, J. M., Cáceres Prado, M. X. y Corredor Bedoya, A. C. (2013). Development Model for Technological Products. *International Journal of Applied*, 3(8).

Drucker, P. F. (1999). *La sociedad postcapitalista*. Buenos Aires: Sudamericana.

Easterbrook, S., Singer, J., Storey, M.-A. y Damian, D. (2008). Selecting Empirical Methods for Software Engineering Research. En F. Shull, J. Singer y D. I. K. Sjøberg (Eds.), *Guide to Advanced Empirical Software Engineering* (pp. 285–311). London: Springer.

EE Times y Embedded.com. (2017). 2017 Embedded Market Survey. Recuperado de https://www.embedded.com/electronics-blogs/embedded-market-surveys/4458724/2017-Embedded-Market-Survey

Ekstedt, M. (2013). An empirical approach to a general theory of software (engineering). En *2nd SEMAT Workshop on a General Theory of Software Engineering (GTSE)* (pp. 23–26). San Francisco, USA.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Ellner, R., Al-Hilank, S., Drexler, J., Jung, M., Kips, D. y Philippsen, M. (2010). eSPEM – A SPEM Extension for Enactable Behavior Modeling. In *Proceedings of the 6th European Conference on Modelling Foundations and Applications*, 116–131. Berlin: Springer-Verlag.

Embedded.com. (2013). Embedded Market Surveys. Recuperado el 14 de octubre de 2018, de Embedded website: https://www.embedded.com/collections/4402460/Embedded-Market-Surveys

Engineers Australia. (2001, febrero 1). What Is Engineering? Recuperado el 13 de diciembre de 2018, de https://www.engineersaustralia.org.au/For-Students-And-Educators/Engineering-Careers/What-Is-Engineering

Erasmus. (2018, abril 5). Competence model of INSPIRE Master programs. Recuperado el 15 de febrero de 2019, de http://inspire-erasmus.org/documents/competence-model

Esposito, W. J., Mujica, F. A., Garcia, D. G. y Kovacs, G. T. A. (2015). The Lab-In-A-Box project: an arduino compatible signals and electronics teaching system. *En IEEE Signal Processing and Signal Processing Education Workshop (SP/SPE)* (pp. 301–306). Salt Lake City, USA.

Fernandes, J. E. y Machado, R. J. (2012). SPEM 2.0 extension for pervasive information systems. *WSEAS Transactions on Computers*, *11*, 319–328.

Figueroa-Vázquez, C. F. (2017). Diseño físico y diseño de hardware en Intel. Tlaquepaque: ITESO. Recuperado de http://repositorio.ausjal.org/handle/11117/4654

Fischer, C., Winter, R. y Wortmann, F. (2010). Design Theory. *Business & Information Systems Engineering*, 2(6), 387–390.

Floyd, Thomas L. (2015). *Digital fundamentals*, global edition (11a ed.). Edinburgh: Pearson Education Limited.

Flyvbjerg, B. (2013). Quality control and due diligence in project management: Getting decisions right by taking the outside view. *International Journal of Project Management*, 31(5), 760–774.

Flyvbjerg, B. (2018). *Oral Evidence: The Government's Management of Major Projects* (SSRN Scholarly Paper No. ID 3294656). Rochester, NY: Social Science Research Network. Recuperado de https://papers.ssrn.com/abstract=3294656

Flyvbjerg, B., Ansar, A., Budzier, A., Buhl, S., Cantarelli, C., Garbuio, M. y Van Wee, B. (2018). Five things you should know about cost overrun. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 174–190.

Flyvbjerg, B., Holm, M. S. y Buhl, S. (2002). Underestimating costs in public works projects: Error or lie?. *Journal of the American planning association,* 68(3), 279–295.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Franke, David W. y Purvis, M. K. (1991). Hardware/software codesign: a perspective. En *13th International Conference on Software Engineering* (pp. 344–352). Austin, USA.

Freeman, C. y Soete, L. (1997). *The economics of industrial innovation* (3a ed.). Cambridge: The MIT Press.

Fuller, R. B. (1957). A comprehensive anticipatory design science. *Royal Architectural Institute of Canada*, 34(8), 357–361.

Fummi, F. y Wille, R. (Eds.). (2017). Languages, design methods, and tools for electronic system design: selected contributions from FDL 2016 (1a ed.). New York: Springer.

Gallina, B., Pitchai, K. R. y Lundqvist, K. (2014). S-TunExSPEM: Towards an Extension of SPEM 2.0 to Model and Exchange Tunable Safety-Oriented Processes. En R. Lee (Ed.), *Software Engineering Research, Management and Applications* (pp. 215–230). Heidelberg: Springer.

Gassmann, O., Enkel, E. y Chesbrough, H. (2010). The future of open innovation. *R&D Management*, 40(3), 213–221.

Gauthier, J.-B. y Ika, L. A. (2012). Foundations of Project Management Research: An Explicit and Six-Facet Ontological Framework. *Project Management Journal*, 43(5), 5–23.

Glaser, B. G. y Strauss, A. L. (1967). *Discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research*. Hawthorne: Aldine de Gruyter.

Gray, P. R., Hurst, P. J. y Lewis, S. H. (2009). *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits* (5a ed.). New York: John Wiley & Sons.

Gregor, S. (2006). The nature of theory in information systems. *MIS Quarterly*, 30(3), 611–642.

Gregor, S. y Jones, D. (2007). The Anatomy of a Design Theory. *Journal of the Association for Information Systems*, 8(5), 312–335.

Gregory, S. A. (1966). Design Science. En S. A. Gregory (Ed.), *The Design Method* (pp. 323–330). Boston: Springer.

Guarino, N., Oberle, D. y Staab, S. (2009). What is an ontology?. En S. Staab y R. Studer (Eds.), *Handbook on ontologies* (pp. 1-17). Berlin: Springer.

Gustavsson, T. y Rönnlund, P. (2013). Agile adoption at Ericsson hardware product development. En *22nd Nordic Academy of Management Conference NNF* (pp. 7-16). Reykjavik, Iceland.

Hatchuel, A. y Weil, B. (2008). C-K design theory: An advanced formulation. *Research in Engineering Design,* 19(4), 181.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Heath, S. (2002). *Embedded Systems Design* (2a ed.). Oxford: Newnes.

Henao, A. d J. (2018). *Towards a theory for defining a project management multidisciplinary kernel: an approach based on Abstract Level Progress Health Attributes* (Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia—Sede Medellín, Medellín, Colombia). Recuperado de http://www.bdigital.unal.edu.co/71042/

Henzinger, T. A. y Sifakis, J. (2007). The Discipline of Embedded Systems Design. *Computer*, 40(10), 32–40.

Hopcroft, J. E., Motwani, R. y Ullman, J. D. (2007). *Introduction to automata theory, languages, and computation* (3a ed.). Boston: Pearson/Addison Wesley.

Huang, P. M., Darrin, A. G. y Knuth, A. A. (2012a). Agile hardware and software system engineering for innovation. En *IEEE Aerospace Conference* (pp. 1–10). Montana, USA.

Huang, P. M., Knuth, A. A., Krueger, R. O. y Garrison-Darrin, M. A. (2012b). Agile hardware and software systems engineering for critical military space applications. En *SPIE Defense, Security, and Sensing* (Vol. 8385, pp. 83850F-83850F – 9). Baltimore, USA.

Hubka, V. y Eder, W. E. (1996). *Design Science: Introduction to the Needs, Scope and Organization of Engineering Design Knowledge*. London: Springer-Verlag.

IBM. (2013, septiembre 6). IBM Rational solutions for product and embedded systems development [CT401]. Recuperado el 22 de septiembre de 2013, de http://www-03.ibm.com/software/products/us/en/category/SWV00

IEEE. (2010, marzo 31). IEEE - The world's largest professional association for the advancement of technology. Recuperado el 12 de noviembre de 2014, de https://www.ieee.org/about/index.html

IEEE. (2015a, diciembre 1). Education. Recuperado el 6 de marzo de 2019, de https://www.ieee.org/education/index.html

IEEE. (2015b, diciembre 1). IEEE-SA - IEEE Standards Education. Recuperado el 6 de marzo de 2019, de https://standards.ieee.org/about/standards-education.html

INCOSE. (2002, febrero 1). About Systems Engineering. Recuperado el 23 de noviembre de 2018, de INCOSE website: https://www.incose.org/about-systems-engineering

INCOSE. (2004). What is Systems Engineering? Recuperado el 27 de junio de 2013, de http://www.incose.org/practice/whatissystemseng.aspx

INCOSE. (2014). INCOSE Systems Engineering Vision 2025. Recuperado de https://www.incose.org/products-and-publications/se-vision-2025

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

INCOSE, SERC y IEEE Computer Society. (2013, mayo). Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SWEBoK). Recuperado el 12 de noviembre de 2014, de http://sebokwiki.org/wiki/Main_Page

International Labour Organization. (2004a, octubre 8). Electrical engineers, 2143. Recuperado el 10 de octubre de 2015, de https://www.ilo.org/public/english/bureau/stat/isco/isco88/2143.htm

International Labour Organization. (2004b, octubre 8). Electronics and telecommunications engineers, 2144. Recuperado el 10 de octubre de 2015, de http://www.ilo.org/public/english/bureau/stat/isco/isco88/2144.htm

Ishikawa, K. (1985). *What Is Total Quality Control?: The Japanese Way*. Englewood: Prentice Hall.

ISO. (2012a, julio). ISO 9001 Quality management. Recuperado el 8 de noviembre de 2018, de ISO website: https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html

ISO. (2012b, septiembre). ISO 21500:2012 Guidance on project management. Recuperado el 21 de noviembre de 2018, de ISO website: https://www.iso.org/standard/50003.html

ISO. (2014, noviembre). ISO/IEC 24744. Recuperado el 8 de noviembre de 2018, de ISO website: http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/26/62644.html

ISO. (2016, junio 14). ISO/IEC TR 29110-1:2016. Recuperado el 30 de noviembre de 2018, de ISO website: http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/27/62711.html

ISO, IEC y IEEE. (2010, febrero 4). ISO/IEC/IEEE 42010:2011 Systems and software engineering—Architecture description. Recuperado el 24 de noviembre de 2018, de ISO website: http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/05/05/50508.html

ISO, IEC y IEEE. (2015, mayo 2). ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering—System life cycle processes. Recuperado el 23 de noviembre de 2018, de ISO website: http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/37/63711.html

Ivar Jacobson International. (2016, noviembre 16). Essential Unified Process Publication. Practice Library. Recuperado el 14 de enero de 2017, de https://practicelibrary.ivarjacobson.com/content/essential-unified-process-publication

Jacobson, I. (2010). A Smarter Way: The Software Engineering Method and Theory Initiative (Semat). En M. Nordio, M. Joseph, B. Meyer y A. Terekhov (Eds.), *Software Engineering Approaches for Offshore and Outsourced Development: 4th International Conference, SEAFOOD 2010* (pp. 1–1). St. Petersburg: Springer.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Jacobson, I. (2011). Discover the Essence of Software Engineering. *CSI Communications*, 35(4), 9–11.

Jacobson, I., Huang, S., Kajko-Mattsson, M., McMahon, P. y Seymour, E. (2012a). *Semat*—Three Year Vision. *Programming and Computer Software*, 38(1), 1–12.

Jacobson, I. y Lawson, H. B. (Eds.). (2015b). *Software Engineering in the Systems Context*. London: College Publications.

Jacobson, I., Lawson, H., Ng, P.-W., McMahon, P. E. y Goedicke, M. (2019). *The Essentials of Modern Software Engineering* (1a ed.). New York: ACM and Morgan & Claypool Publishers.

Jacobson, I., McMahon, P. E. y Racko, R. (2015a, noviembre). 24 Questions. *Semat* am Essence: They Why's, What's and How's to See the Difference. Ivar Jacobson International. Recuperado de https://www.ivarjacobson.com/publications/white-papers/24-questions-semat-essence

Jacobson, I., Ng, P. W., McMahon, P., Spence, I. y Lidman, S. (2012b). The essence of software engineering: the *SEMAT* kernel. *ACM queue*, 55(12), 42-49.

Jäger, J., Schöllhammer, O., Lickefett, M. y Bauernhansl, T. (2016). Advanced Complexity Management Strategic Recommendations of Handling the "Industrie 4.0" Complexity for Small and Medium Enterprises. *Procedia CIRP*, 57, 116–121.

Jaradat, R. M. y Katina, P. F. (2011). A synthesis of definitions for system of systems engineering. En *32nd ASEM International Annual Conference* (pp.89–596). Texas, USA.

Johnson, P., Ekstedt, M. y Jacobson, I. (2012a). Where's the Theory for Software Engineering? *IEEE Software*, 29(5), 96.

Johnson, T., Kerzhner, A., Paredis, C. J. J. y Burkhart, R. (2012b). Integrating models and simulations of continuous dynamics into SysML. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 12(1), 011002–011011.

Jonassen, D. H. (2000). Toward a design theory of problem solving. *Educational Technology Research and Development*, 48(4), 63–85.

Jørgensen, M. y Moløkken-Østvold, K. (2006). How large are software cost overruns? A review of the 1994 CHAOS report. *Information and Software Technology*, 48(4), 297–301.

Juan, L., Yang, C. y Jian-Lin, J. (2005). Transaction-level object-oriented framework for SOC design. En *2005 International Conference on Communications, Circuits and Systems* (Vol. 2, pp. 1343–1347). Hong Kong, China.

Juran, J. (1986). The quality trilogy. *Quality Progress*, 19(8), 19–24.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Juran, J. y Godfrey, A. B. (2000). *Juran's Quality Handbook* (5a ed.). New York: McGraw-Hill Professional.

Kaisti, M., Rantala, V., Mujunen, T., Hyrynsalmi, S., Könnölä, K., Mäkilä, T. y Lehtonen, T. (2013). Agile methods for embedded systems development - a literature review and a mapping study. *EURASIP Journal on Embedded Systems*, 2013(1), 1–16.

Kaizen Institute. (2011, julio 3). 5S Definition. Recuperado el 14 de mayo de 2015, de http://www.kaizen.com/knowledge-center/what-is-5s.html

Kasse, Tim. (2008). Practical Insight Into CMMI (2a ed.). New York: Artech House.

Keating, C. B. (2011a). Perspective 2 of the SoSE methodology: designing the unique methodology. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2(2/3), 208–225.

Keating, C. B. y Katina, P. F. (2011b). Systems of systems engineering: prospects and challenges for the emerging field. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2(2/3), 234–256.

Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. Keele, UK, *Keele University*, 33(2004), 1–26.

Kopec, D. y Tamang, S. (2007). Failures in complex systems: case studies, causes, and possible remedies. *ACM SIGCSE Bulletin*, 39(2), 180–184.

Koskela, L. J. y Howell, G. (2002). The underlying theory of project management is obsolete. En *Proceedings of the PMI Research Conference* (pp. 293–302). Seattle, USA.

Kundert, K. (2003, febrero 1). Principles of top-down mixed-signal design. The Designers Guide Community. Recuperado de http://www.designers-guide.org/Design/tdd-principles.pdf

Kundert, K. y Chang, H. (2010). Model-based functional verification. En *Design Automation Conference* (pp. 421–424). Anaheim, USA.

Kundert, K., Chang, H., Jefferies, D., Lamant, G., Malavasi, E. y Sendig, F. (2000). Design of mixed-signal systems-on-a-chip. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 19(12), 1561–1571.

Laporte, C. Y. (2013). Public Site of the ISO Working Group Mandated to Develop ISO/IEC 29110. Recuperado el 30 de noviembre de 2018, de École de technologie supérieure website: http://profs.etsmtl.ca/claporte/english/vse/

Lean Enterprise Institute. (2009, julio 19). What is Lean? Recuperado el 6 de noviembre de 2018, de Lean Enterprise Institute website: https://www.lean.org/WhatsLean/

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Leffingwell, D. y Knaster, R. (2018). *SAFe 4.5 Distilled: Applying the Scaled Agile Framework for Lean Enterprises* (2a ed.). Boston, MA: Addison-Wesley Professional.

LeSS Company B.V. (2014). Overview - Large Scale Scrum (LeSS). Recuperado el 28 de noviembre de 2018, de LeSS website: https://less.works

Levenchuk, A. (2015). *Towards a Systems Engineering Essence* (product at 99th INCOSE Russian chapter meeting Núm. arXiv:1502.00121 [cs]; pp. 1–28). Recuperado de INCOSE Russian chapter website: https://incose-ru.livejournal.com/51291.html

Levenchuk, A., Agroskin, V. y Bayda, A. (2013, junio). *Essence for Systems Engineering*. Presentado en OMG's ESSENCE Information Day, Berlin, Alemania. Recuperado de https://www.omg.org/news/meetings/tc/berlin-13/special-events/Essence_Day.htm

Li, L., Ma, L., Wang, N. y Yang, Q. (2011). Modeling method of military aircraft support process based SysML. En *9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety* (pp. 1247–1251). Guiyang, China.

Lienig, J. y Bruemmer, H. (2017). *Fundamentals of electronic systems design*. Cham: Springer.

Liu, S. (2018). *A Systematic Mapping Study on SEMAT and Its Methods* (Tesis de Maestría, Waseda University, Tokio, Japón). Recuperado de http://hdl.handle.net/2065/00057676

Marick, B. (1999). New models for test development. En *12th International Software Quality Week Technical Program*. San Jose, USA.

Markus, M. L. y Robey, D. (1988). Information Technology and Organizational Change: Causal Structure in Theory and Research. *Management Science*, 34(5), 583–598.

Martínez Carazo, P. C. (2011). El método de estudio de caso Estrategia metodológica de la investigación científica. *Revista científica Pensamiento y Gestión*, (20), 165–193.

Martinson, A. (1983). Guía para la redacción de artículos científicos destinados a la publicación (2ª ed.). Paris: UNESCO.

Marwedel, P. (2018). Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things (3a ed.). Cham: Springer.

Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism* (Vol. 1). London: Oxford: Clarendon Press. Recuperado de https://archive.org/details/electricandmagne01maxwrich

Merriam-Webster. (2001, febrero 1). Definition of endeavor. Recuperado el 4 de diciembre de 2018, de https://www.merriam-webster.com/dictionary/endeavor

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Merton, R. K. (1968). *Social theory and social structure* (1968 enlarged ed). New York: Simon and Schuster.

Millward Brown. (2014). 2014 BrandZ Top 100 (No. 9) (p. 143). Millward Brown. Recuperado de http://www.millwardbrown.com/brandz/top-global-brands

Millward Brown. (2018). 2018 BrandZ Top 100 (No. 13) (p. 147). Millward Brown. Recuperado de http://www.millwardbrown.com/brandz/top-global-brands

MIT EECS. (2012c, mayo 30). Course 6-1: Electrical Science and Engineering. Recuperado el 30 de abril de 2015, de https://www.eecs.mit.edu/academics-admissions/undergraduate-programs/course-6-1-electrical-science-and-engineering

MIT EECS. (2012a, mayo 28). Course 6-2: Electrical Eng. & Computer Science. Recuperado el 31 de marzo de 2015, de http://www.eecs.mit.edu/academics-admissions/undergraduate-programs/course-6-2-electrical-eng-computer-science

MIT EECS. (2012b, mayo 28). Course 6-3: Computer Science and Engineering. Recuperado el 30 de abril de 2015, de https://www.eecs.mit.edu/academics-admissions/undergraduate-programs/course-6-3-computer-science-and-engineering

Mosher, T. J., Kolozs, J. y Wilder, E. (2018). Agile hardware development approaches applied to space hardware. En *2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*. Orlando, USA.

Motorola University. (2004). The Inventors of Six Sigma. Recuperado el 8 de noviembre de 2018, de https://web.archive.org/web/20051106025733/http://www.motorola.com/content/0,,3079,00.html

Mukherjee, P. N. (2006). *Total Quality Management*. New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd.

Müller-Glaser, Klaus D., Frick, G., Sax, E. y Kuhl, M. (2004). Multiparadigm modeling in embedded systems design. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12(2), 279–292.

Nacif, J. A., Silva, T. S., Vieira, L. F. M., Vieira, A. B., Fernandes, A. O. y Coelho, C. (2011). Tracking hardware evolution. En *2011 12th International Symposium on Quality Electronic Design* (pp. 1–6). Santa Clara, USA.

NCSOSE. (2017, noviembre 7). System of Systems Engineering. Recuperado el 22 de noviembre de 2018, de https://sites.wp.odu.edu/ncsose/research-areas/system-of-systems-engineering/

Nguyen-Duc, A., Weng, X. y Abrahamsson, P. (2018). A preliminary study of agility in business and production: cases of early-stage hardware startups (p. 51). En *Proceedings of the 12th ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*. Oulu, Finland.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Northrop, L., Feiler, P., Gabriel, R. P., Goodenough, J., Linger, R., Longstaff, T. y Sullivan, K. (2006). *Ultra-large-scale systems: The software challenge of the future* (p. 151). Pittsburgh: Software Engineering Institute - Carnegie Mellon University.

Oktaba, H., Alquicira Esquivel, C., Su Ramos, A., Martínez, A., Quintanilla Osorio, G., Ruvalcaba López, M., … Flores Lemus, M. Á. (2005). *Modelo de Procesos para la Industria de Software MoProSoft v1.3: Por Niveles de Capacidad de Procesos* (Estándar Núm. NMX-059/02-NYCE-2005). México D.F.: Secretaría de Economía – México.

Oktaba, H., Piattini, M., Pino, F. J., Orozco, M. J. y Alquiricia, C. (2009). *COMPETISOFT, Mejora de Procesos Software para pequeñas y Medianas Empresas y Proyectos* (1ª ed.). Mexico D.F.: Alfaomega - Rama.

OMG. (2008). *Software & Systems Process Engineering Meta-Model Specification Version 2.0* (Estándar No. formal/2008-04-01). Needham, MA: OMG. Recuperado de OMG website: http://www.omg.org/spec/SPEM/2.0/

OMG. (2013). *About the Business Process Model And Notation Specification Version 2.0.2* (Estándar No. formal/13-12-09). Needham, MA: OMG. Recuperado de OMG website: https://www.omg.org/spec/BPMN/

OMG. (2014). *Essence – Kernel and Language for Software Engineering Methods Version 1.0* (Estándar No. formal/14-11-02). Needham, MA: OMG. Recuperado de OMG website: http://www.omg.org/spec/Essence/1.0/

OMG. (2018). *Essence – Kernel and Language for Software Engineering Methods Version 1.2* (Estándar No. formal/18-10-02). Needham, MA: OMG. Recuperado de OMG website: http://www.omg.org/spec/Essence/1.2

Ordóñez, S. (2005). Empresas y cadenas de valor en la industria electrónica en México. *Economía UNAM*, 2(5), 90–111.

Ordóñez, S. (2012). Nuevos determinantes del desarrollo y el sector electrónico-informático y de las telecomunicaciones en México. *Comercio Exterior*, 62(4), 37–55.

Ordóñez, S. (2017). Sistemas de innovación y conocimiento: el caso de Jalisco, México. *Problemas del Desarrollo*, 48(191), 161–184.

Osborn, J., Summers, J. y Mocko, G. (2011). Review of Collaborative Engineering Environments: Software, Hardware, Peopleware. En *18th International Conference on Engineering Design (ICED11)* (Vol. 7, pp. 204–213). Lyngby, Copenhagen.

Pearce, J. M. (2015). Quantifying the Value of Open Source Hardware Development. *Modern Economy*, 06(01), 1–11.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Pedre, S., Krajník, T., Todorovich, E. y Borensztejn, P. (2012). A co-design methodology for processor-centric embedded systems with hardware acceleration using FPGA. En *2012 VIII Southern Conference on Programmable Logic* (pp. 1–8). Bento Goncalves, Brasil.

Perez, A., Berreteaga, O., Ruiz de Olano, A., Urkidi, A. y Perez, J. (2006). Una metodología para el desarrollo de Hardware y Software embebidos en sistemas críticos de seguridad. *Revista iberoamericana de sistemas, cibernética e informática*, 3(2), 70–75.

PMI. (2010a, septiembre 8). Guide and Standards. Recuperado el 2 de diciembre de 2018, de Project Management Institute website: https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards

PMI. (2010b, septiembre 9). What is Project Management? Recuperado el 13 de mayo de 2015, de Project Management Institute website: http://www.pmi.org/About-Us/About-Us-What-is-Project-Management.aspx

PMI. (2010c, septiembre 12). About Us. Recuperado el 12 de noviembre de 2014, de Project Management Institute website: http://www.pmi.org/About-Us.aspx

PMI. (2013). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) (5a ed.). Newtown: Project Management Institute.

PMI. (2014, septiembre 29). Foundational Standards. Recuperado el 2 de noviembre de 2018, de Project Management Institute website: https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards/foundational

PMI. (2017a). *Agile Practice Guide*. Newtown: Project Management Institute.

PMI. (2017b). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) (6a ed.). Newtown: Project Management Institute.

Punkka, T. (2012). Agile hardware and co-design. En *Embedded Systems Conference*. Boston, USA.

Popper, K. (2005). *The Logic of Scientific Discovery*. London: Routledge.

Porter, J., Karsai, G., Völgyesi, P., Nine, H., Humke, P., Hemingway, G., … Sztipanovits, J. (2008). Towards Model-Based Integration of Tools and Techniques for Embedded Control System Design, Verification, and Implementation. En M. R. V. Chaudron (Ed.), *Models in Software Engineering* (pp. 20–34). Berlin: Springer.

RAE. (2014). esfuerzo. Recuperado el 4 de diciembre de 2018, de https://dle.rae.es/?id=GPx2ruM

Ralph, P. (2019). Toward Methodological Guidelines for Process Theories and Taxonomies in Software Engineering. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 45(7), 712–735.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Reddy, B. V. R. y Dipti. (2016). Field programmable analog array: A boon for analog world. En *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)* (pp. 2975–2980). New Delhi, India.

Reynolds, P. D. (1971). *A primer in theory construction*. New York: Bobbs-Merrill.

Riccobene, E., Scandurra, P., Rosti, A. y Bocchio, S. (2005). A SoC design methodology involving a UML 2.0 profile for SystemC. *En Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe* (pp. 704–709). Munich, Germany.

Robles, P. y Rojas, M. C. (2015). La validación por juicio de expertos: dos investigaciones cualitativas en Lingüística aplicada. *Revista Nebrija de lingüística aplicada a la enseñanza de lenguas*, (18), 124-139.

Rompaey, K. V., Verkest, D., Bolsens, I. y Man, H. D. (1996). CoWare-a design environment for heterogeneous hardware/software systems. En *European Design Automation Conference with EURO-VHDL '96 and Exhibition Proceedings EURO-DAC '96* (pp. 252–257). Geneva, Switzerland.

Sadler, D. R., Lloyd, D. W. y Jelly, I. E. (1996). Object-based hardware/software co-design. En *Proceedings of the 1996 IEEE Fifteenth Annual International Phoenix Conference on Computers and Communications* (pp. 282–288). San Diego, USA.

SAFe. (2011). Scaled Agile Framework – SAFe for Lean Enterprises. Recuperado el 28 de noviembre de 2018, de https://www.scaledagileframework.com/

Sánchez-Dams, R. (2014). *Metodología ágil estandarizada para el desarrollo o ejecución de proyectos de sistemas embebidos* (Tesis de Maestría, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia). Recuperado de http://ciruelo.uninorte.edu.co/F/8F71U18S29X3681XP4SFU4D85BQ8HBB1K2B9XDI7AR6GP17IDR-29676?func=full-set-set&set_number=718447&set_entry=000001&format=999

Santiago, B. y Morales, M. (2016, abril 29). ALPHAs basadas en el PMBOK: los elementos esenciales de un proyecto de software. En *4th International Conference in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT 2016)*, Puebla, México.

Sarkar, T. K., Salazar-Palma, M. y Sengupta, D. L. (2010). James Clerk Maxwell: The Founder of Electrical Engineering. *En 2010 Second IEEE Region 8 Conference on the History of Telecommunications Conference (HISTELCON)* (pp. 1–7). Madrid: Spain.

Schmidt, T. S., Weiss, S. y Paetzold, K. (2018). Expected vs. Real effects of agile development of physical products-apportioning the hype. En *15th International Design Conference*. Zagreb, Croatia.

Schwaber, K. y Sutherland, J. (2017, noviembre). Scrum guide 2017. Recuperado de https://www.scrumguides.org/

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Semat. (2013, mayo 3). Theory Area - *SEMAT*. Recuperado el 28 de noviembre de 2018, de http://semat.org/theory-area

Semat. (2014, junio 15). What is it and why should you care? - *SEMAT*. Recuperado el 7 de julio de 2016, de http://semat.org/what-is-it-and-why-should-you-care-

Semat. (2015, diciembre 14). Conferences & Workshops - *SEMAT*. Recuperado el 28 de noviembre de 2018, de http://semat.org/conferences-workshops

Shuping, L. y Ling, P. (2008). The Research of V Model in Testing Embedded Software. En *2008 International Conference on Computer Science and Information Technology* (pp. 463–466). Singapore. Singapore.

Sifakis, J. (2009). Embedded systems design - Scientific challenges and work directions. En *Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition, 2009. DATE '09.* (pp. 2–2). Nice, France.

Sifakis, J. (2011). A vision for computer science—the system perspective. *Central European Journal of Computer Science*, 1(1), 108–116.

Sifakis, J. (2013). Rigorous system design. *Foundations and Trends® in Electronic Design Automation*, 6(4), 293-362.

Sifakis, J. (2014). Toward a System Design Science. En *From Programs to Systems. The Systems perspective in Computing* (pp. 225–234). Berlin: Springer.

Sifakis, J. (2018). System Design in the Era of IoT—Meeting the Autonomy Challenge. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, 272, 1–22.

Simonette, M. J., Magalhães, M. E. S. y Spina, E. (2016, abril 29). PMBoK Five Process Groups and Essence Standard: Perfect Partners?. En *4th International Conference in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT 2016)*. Puebla, México.

Simonette, M. J., Magalhães, M. E. S. y Spina, E. (2017). PMBOK and Essence: Partners for IoT Projects. En *Software Engineering: Methods, Modeling, and Teaching* (Vol. 4, pp. 211–223). Bogotá, Colombia: Bonaventuriana.

Sjøberg, D. I., Dybå, T., Anda, B. C. y Hannay, J. E. (2008). Building theories in software engineering. En F. Shull, J. Singer y D. I. K. Sjøberg (Eds.), *Guide to advanced empirical software engineering* (pp. 312–336). London: Springer.

Sjøberg, D. I. K., Dyba, T. y Jorgensen, M. (2007). The future of empirical methods in software engineering research. *Future of Software Engineering*, 358–378.

Smith, C. A. y Corripio, A. B. (2006). *Principles and practice of automatic process control* (3a ed.). Hoboken: Wiley.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Standish Group. (1995). *CHAOS Report* (No. 1994). Standish Group International. Recuperado de https://www.standishgroup.com/

Standish Group. (2010). *Chaos summary* (No. 2009). Standish Group International. Recuperado de https://www.standishgroup.com/

Standish Group. (2013). *CHAOS manifesto* (No. 2013). Standish Group International. Recuperado de https://www.standishgroup.com/

Standish Group. (2015). *CHAOS Report* (No. 2015). Standish Group International. Recuperado de Standish Group International website: https://www.standishgroup.com/

Standish Group. (2018). *CHAOS Report Demo* (No. 2018). Standish Group International. Recuperado de Standish Group International website: https://www.standishgroup.com/

Stol, K., Ralph, P. y Fitzgerald, B. (2016). Grounded Theory in Software Engineering Research: A Critical Review and Guidelines. En *2016 IEEE/ACM 38th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 120–131). Austin, USA.

Stol, K.-J. y Fitzgerald, B. (2015). Theory-oriented software engineering. *Science of Computer Programming*, 101, 79–98.

Suh, N. P. (1998). Axiomatic Design Theory for Systems. *Research in Engineering Design*, 10(4), 189–209.

Sutherland, J. (2001). Agile Can Scale: Inventing and Reinventing SCRUM in five Companies. *Cutter IT Journal*, 14(12).

Sutherland, J. y Scrum Inc. (2019, abril 29). Scrum@Scale guide v1.05. Scrum Inc. Recuperado de https://www.scrumatscale.com/scrum-at-scale-guide/

Takahira, R. Y., Laraia, L. R., Dias, F. A., Yu, A. S., Nascimento, P. T. S. y Camargo, A. S. (2014). Scrum and Embedded Software development for the automotive industry. En *Proceedings of PICMET '14 Conference: Portland International Center for Management of Engineering and Technology; Infrastructure and Service Integratio*n (pp. 2664–2672). Kanazawa, Japan.

Tanenbaum, A. S., Austin, T. y Chandavarkar, B. R. (2012). *Structured computer organization* (6a ed.). Boston: Pearson.

Tatnall, A. (2009). History of computers: Hardware and software development. En Z. Navabi y D. R. Kaeli (Eds.), *Computer Science and Engineering*. Oxford: EOLSS Publications.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Taubin, A., Cortadella, J., Lavagno, L., Kondratyev, A. y Peeters, A. (2007). Design Automation of Real-Life Asynchronous Devices and Systems. *Foundations and Trends® in Electronic Design Automation*, 2(1), 1–133.

Teich, J. (2012). Hardware/Software Codesign: The Past, the Present, and Predicting the Future. *Proceedings of the IEEE*, *100*(Special Centennial Issue), 1411–1430.

Teodorov, C., Picard, D. y Lagadec, L. (2011). FPGA physical-design automation using Model-Driven Engineering. En *6th International Workshop on Reconfigurable Communication-Centric Systems-on-Chip (ReCoSoC)* (pp. 1–6). Montpellier, France.

Tuckman, B. W. y Jensen, M. A. C. (1977). Stages of Small-Group Development Revisited. *Group & Organization Studies*, *2*(4), 419–427.

Van de Ven, A. H. (2007). Engaged Scholarship: A Guide for Organizational and Social Research. New York: Oxford University Press.

Vanderperren, Y., Mueller, W. y Dehaene, W. (2008). UML for electronic systems design: a comprehensive overview. *Design Automation for Embedded Systems*, 12(4), 261–292.

Venable, J. R. (2006). The role of theory and theorising in Design Science research. Design Science Research in Information Systems and Technology. En *First International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology*, Claremont, USA.

Version One. (2014, agosto). Annual State of Agile Survey. Recuperado el 6 de septiembre de 2018, de CollabNet VersionOne website: https://www.stateofagile.com

Virginia Tech ECE. (2003, octubre 31). What is Computer Engineering? Recuperado el 1 de abril de 2015, de http://www.ece.vt.edu/ugrad/cpe.html

Wagner, S. (2014). Scrum for Cyber-physical Systems: A Process Proposal. En *Proceedings of the 1st International Workshop on Rapid Continuous Software Engineering* (pp. 51–56). Hyderabad, India.

Walls, J. G., Widmeyer, G. R. y El Sawy, O. A. (1992). Building an Information System Design Theory for Vigilant EIS. *Information Systems Research*, 3(1), 36–59.

Wheat, B., Mills, C. y Carnell, M. (2003). Leaning Into Six Sigma: A Parable of the Journey to Six Sigma and a Lean Enterprise. New York: McGraw Hill.

Xue, R., Baron, C., Esteban, P. y Zheng, L. (2015). Analysis and comparison of project management standards and guides. Recent Advances in Mechanical Engineering Series. En *International Conference on Mechanics, Materials, Mechanical Engineering and Chemical Engineering (MMMCE 2015)*. Barcelona, Spain.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados

Yin, R. K. (2017). *Case Study Research and Applications: Design and Methods* (6a ed.). Los Angeles: SAGE Publications, Inc.

Zapata, C. M., Castro, L., Shihong, H. y Ng, P.-W. (2014). Preface. En *Software Engineering: Methods, Modeling, and Teaching* (Vol. 3, pp. v–ix). Medellín: Sello Editorial Universidad de Medellín.

Zapata Jaramillo, C. M., Gelbukh, A. y Arango, F. (2006). Pre-conceptual Schema: A Conceptual-Graph-like Knowledge Representation for Requirements Elicitation. *Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, 27–37. Berlin: Springer.

Zapata, C. M., Giraldo, G. L. y Londoño, S. (2011). Esquemas preconceptuales ejecutables. *Avances en Sistemas e Informática*, 8(1), 15–24.

Zapata, C. M. y Henao, A. d J. (2016, abril 28). Alfa Riesgo: Un elemento universal presente en todos los esfuerzos de ingeniería de software. En *4th International Conference in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT 2016)*. Puebla, México.

Zapata, C. M. y Henao, A. d J. (2017). New relationships of the Risk alpha with the Semat Essence kernel. En *Software Engineering: Methods, Modeling, and Teaching* (Vol. 4, pp. 352–362). Bogotá, Colombia: Bonaventuriana.

Zapata, C. M., Sánchez-Dams, R. y Paez-Logreira, H. (2012). Contributions of software engineering to the embedded system development. En *Software Engineering: Methods, Modeling, and Teaching* (Vol. 2, pp. 47–54). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Zapater, M., Malagon, P., de Goyeneche, J.-M. y Moya, J. M. (2013). Project-Based Learning and Agile Methodologies in Electronic Courses: Effect of Student Population and Open Issues. *Electronics*, 17(2), 82–88.

© Rubén Sánchez-Dams, 2019. Todos los derechos reservados