



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

## TESIS DOCTORAL

INGENIERÍA DE LA RESILIENCIA PARA  
LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD EN EL  
SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN:  
FUNCTIONAL RESONANCE ANALYSIS METHOD (FRAM)  
Y RESILIENCE ASSESSMENT GRID (RAG)

Autora: MARIA DEL CARMEN PARDO FERREIRA

Director: JUAN CARLOS RUBIO ROMERO

Departamento de Economía y Administración de Empresas

Escuela de Ingenierías Industriales

2018





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: María del Carmen Pardo Ferreira

 <http://orcid.org/0000-0002-0385-5683>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)





UNIVERSIDAD DE MÁLAGA  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA Y ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

## TESIS DOCTORAL

### **“INGENIERÍA DE LA RESILIENCIA PARA LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN: FUNCTIONAL RESONANCE ANALYSIS METHOD (FRAM) Y RESILIENCE ASSESSMENT GRID (RAG)”**

TESIS DOCTORAL presentada por  
Dña. María del Carmen Pardo Ferreira  
para optar al título de Doctor por la  
Universidad de Málaga.

DIRECTOR:

Dr. D. Juan Carlos Rubio Romero,  
Catedrático de Universidad, área de  
conocimiento de Organización de  
Empresas.

Málaga, Noviembre de 2018.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

JUAN CARLOS RUBIO ROMERO, Doctor Ingeniero Industrial, Catedrático de Universidad del Área de Conocimiento de Organización de Empresas, del Departamento de Economía y Administración de Empresas de la Universidad de Málaga.

HACE CONSTAR:

Que la tesis doctoral presentada por Dña. María del Carmen Pardo Ferreira, con el título de:

**“Ingeniería de la resiliencia para la gestión de la seguridad en el sector de la construcción: Functional Resonance Analysis Method (FRAM) y Resilience Assessment Grid (RAG)”**

Se ha desarrollado bajo mi dirección y reúne los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor, por lo que autorizo iniciar el trámite de su depósito, lectura y defensa.

Y para que así conste a los efectos oportunos, expido y firmo el presente documento en Málaga, a 5 de noviembre de dos mil dieciocho.

JUAN CARLOS RUBIO ROMERO





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

A mi futuro marido, Rafa, por su paciencia infinita y su ayuda desmedida, y a mis padres Ricardo y Carmen porque siempre han estado ahí apoyándome.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

“Es el dilema de la gestión de seguridad y la evaluación de riesgos, que inadvertidamente creamos los problemas del futuro tratando de resolver los desafíos del presente con la mentalidad (modelos, teorías y métodos) del pasado”.

Erik Hollnagel



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## AGRADECIMIENTOS

Comienzo estas líneas mostrando mi gratitud a todas esas personas que me han acompañado y apoyado desde que, en 2011, volví a la Universidad de Málaga para afrontar el reto de sumergirme en el mundo de la investigación. Desde entonces, han sido muchas las dificultades vencidas y estoy segura de que sin ellos no habría podido llegar hasta aquí.

En primer lugar, debo mencionar a mi director de tesis el Profesor Dr. D. Juan Carlos Rubio Romero por su inestimable ayuda y apoyo en el desarrollo de esta tesis. Sin embargo, no me gustaría limitarme a las simples palabras de agradecimiento que todo Director de Tesis se merece. El haber podido trabajar con el Dr. Rubio ha sido una experiencia que ha cambiado mi vida transformándola por completo. Para mí es un honor que haya guiado mi camino en el ámbito universitario. Todas las palabras se quedan cortas para expresar la gratitud y admiración que siento hacia él. Gracias por tu afecto, por tu comprensión, por tus sabios consejos y por tu inestimable apoyo. Gracias por confiar en mí y darme la oportunidad de caminar a tu lado enriqueciéndome de tu experiencia y sabiduría todos estos años.

Por otro lado, no puedo olvidar agradecer la ayuda de todos los miembros del Departamento, en especial a los miembros del Área de Organización de Empresas adscritos a la Escuela de Ingenierías. En particular, al Dr. D. Antonio López Arquillos, quien ha sido mi primer compañero de despacho, sufridor de mis agobios y un apoyo importante. A Dr. D. Santiago Calero, porque siempre estaba ahí para resolver mis dudas sobre el proceso de construcción de estructuras y mi modelo FRAM. A la Dra. Dña. María Martínez Rojas, que llegó hace poco al grupo pero desde entonces me ha brindado todo su apoyo y afecto.

No puedo olvidarme de mi novio Rafa, que ha desarrollado una paciencia infinita conmigo y me ha dejado robarle muchísimas horas que hoy dan su fruto. Gracias por seguir ahí, por comprenderme y quererme incondicionalmente.

Finalmente, debo agradecer a mi madre, Carmen, y a mi padre, Ricardo, la educación que me han dado y las oportunidades que me han ofrecido. Gracias por vuestro apoyo y cariño. Así mismo, debo agradecer a mi abuela Rosario la huella que ha dejado en mí. Gracias por ser mi segunda madre y un ejemplo a seguir.

No puedo acabar sin agradecer el apoyo de la Universidad de Málaga, a través del Plan Propio de Investigación, al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, a través de la FPU 2016/03298, al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, a través del proyecto BIA2016-79270-P, a los demás investigadores y empresas que ha colaborado apoyando esta investigación y mi carrera como doctorando, haciendo posible que llegue este día.

## ABSTRACT

Organizations and their productive systems have evolved with the development of technology and digital revolution. In this way, they have notably increased their complexity and interactivity. Traditionally, safety management in the organizations has focused on simple or complex linear causality models to determine how accidents originated in order to try and prevent them. However, these models were unable to properly explain some of the accidents that took place. As a result, this showed the need to look for new models to better explain reality. Due to this, systemic models considering accidents as non-linear phenomena arising from the performance of complex systems arise. In this context, Resilience Engineering is born as a new safety management paradigm redefining the concept of safety to direct it towards what works instead of what does not, what turns out wrong. In this way, Resilience Engineering is focused on understanding how to succeed in performing daily activities and how variability affects systems performance. In this sense, the research developed by this doctoral thesis intends to cover the improvement of safety management in building activities by means of the new approach provided by Resilience Engineering. This work presents a model according to the Functional Resonance Analysis Method of the building activities of a site to improve the understanding of construction tasks on a daily basis. This new understanding of the performance of the organizations taking part in the works must be the basis for the development of measures and actions to improve safety management from a Resilience Engineering perspective. According to this, a questionnaire to assess health and safety management resilience in building activities has been designed according to the Resilience Assessment Grid. This questionnaire has been validated by means of techniques based on expert judgment. Thanks to its application, it will be possible to determine how safety and health plans contribute to a resilient performance during the execution of building works and to establish priority action lines to increase their resilience. Though research in the building sector from the framework of the Resilience Engineering is scarce, the obtained results prove the suitability of this new paradigm to address the improvement of health and safety in construction works.

**Keywords:** Resilience Engineering, Functional Resonance Analysis Method, Resilience Assessment Grid, Construction sector, Safety-II

## RESUMEN

Las organizaciones y sus sistemas productivos han ido evolucionando con el desarrollo de la tecnología y la revolución digital, de manera que poco a poco han incrementado notablemente su complejidad y su interactividad. Tradicionalmente, la gestión de la seguridad en las organizaciones se ha centrado en modelos de causalidad lineales simples o complejos para determinar cómo se originaban los accidentes e intentar evitarlos. Sin embargo, estos modelos no conseguían explicar adecuadamente algunos accidentes sucedidos, lo que puso de manifiesto la necesidad de buscar nuevos modelos que explicaran mejor la realidad. Por ello, surgen los modelos sistémicos que consideran a los accidentes como fenómenos no lineales que emergen del desempeño de los sistemas complejos. En este contexto, nace la Ingeniería de la Resiliencia como un nuevo paradigma de la gestión de la seguridad que redefine el concepto de seguridad para enfocarlo hacia las cosas que van bien en vez de las que salen mal. Así, la Ingeniería de la Resiliencia se focaliza en comprender cómo se alcanza el éxito en las actividades diarias y analizar cómo afecta la variabilidad al desempeño de los sistemas. En este sentido, la investigación desarrollada en la presente tesis doctoral pretende abordar la mejora de la gestión de la seguridad en las actividades de construcción mediante el nuevo enfoque proporcionado por la Ingeniería de la Resiliencia. Como contribución esta tesis presenta un modelo conforme al *Functional Resonance Analysis Method* de las actividades de construcción de un edificio para mejorar el entendimiento sobre cómo se ejecutan los trabajos en el día a día. Esta nueva comprensión del desempeño de las organizaciones que intervienen en la obra, debe ser la base para el desarrollo de medidas y acciones que permitan mejorar la gestión de la seguridad desde el prisma de la Ingeniería de la Resiliencia. De acuerdo con esto, un cuestionario para evaluar la resiliencia de la gestión de la seguridad en las actividades de construcción. Dicho cuestionario ha sido diseñado conforme al *Resilience Assessment Grid* y validado mediante técnicas basadas en el juicio de expertos. Gracias a su aplicación podrá determinarse cómo contribuyen los planes de seguridad y salud al desempeño resiliente durante la ejecución de los trabajos de construcción, así como establecer líneas de acción prioritarias para incrementar su resiliencia. Si bien es cierto que la investigación en el sector de la construcción desde marco de la Ingeniería de la Resiliencia es escasa, los resultados obtenidos pueden de manifiesto la idoneidad de este nuevo paradigma para abordar la mejora de la gestión de la seguridad en la construcción.

**Palabras clave:** Ingeniería de la Resiliencia, Functional Resonance Analysis Method, Resilience Assessment Grid, Sector de la Construcción, Safety-II



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## ACRÓNIMOS

CREAM: Cognitive Reliability and Error Analysis Method

CSE: Cognitive Systems Engineering

ETTO: Efficiency-Thoroughness Trade-Off

FMEA: Failure Modes and Effects Analysis

FMV: FRAM Model Visualiser

FRAM: Functional Resonance Analysis Method

HAZOP: Hazard and Operability analysis

LIIM: Leading Indicator Identification Method

NAT: Normal Accident Theory

PRA: Probabilistic Risk Analysis

RAG: Resilience Assessment Grid

STAMP: Systems-Theoretic Accident Modeling and Processes



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	IX
ABSTRACT.....	X
RESUMEN.....	XI
ACRÓNIMOS.....	XIII
ÍNDICE GENERAL.....	XIII
INDICE DE FIGURAS.....	XVII
INDICE DE TABLAS.....	XIX
SUMMARY.....	1
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE LA TESIS.....	15
1.1 Motivación de la Tesis Doctoral.....	15
1.2 Objetivos y preguntas de investigación.....	17
1.3 Estructura de la Tesis.....	19
2 ESTADO DEL ARTE.....	21
2.1 Introducción.....	21
2.2 Edades de la Seguridad: Evolución de la gestión de la seguridad en el trabajo.....	21
2.2.1 Modelos secuenciales o lineales simples.....	25
2.2.2 Modelos epidemiológicos o lineales complejos.....	27
2.2.3 Modelos sistémicos o complejos no lineales.....	28
2.3 Un nuevo enfoque de la gestión de la seguridad: Ingeniería de la Resiliencia.....	31
2.3.1 Concepción de la seguridad: Safety-I y Safety-II.....	32
2.3.2 Concepto de Resiliencia.....	34
2.3.3 Ingeniería de la Resiliencia.....	35
2.3.4 Modelado de sistemas socio-técnicos complejos: Functional Resonance Analysis Method.....	40
2.3.5 Evaluación del desempeño resiliente: Resilience Assessment Grid (RAG).....	47
2.4 El sector de la construcción y las actividades de construcción de estructuras en la edificación.....	51
2.4.1 Caracterización del sector de la construcción.....	52

2.4.2	Las actividades de construcción de edificios en España .....	55
2.4.3	Tipología de las estructuras de hormigón en la construcción de edificios.....	57
2.4.4	La gestión de la seguridad en las obras de construcción: Planes de Seguridad y Salud en el trabajo .....	63
2.4.5	El sector de la construcción y la Ingeniería de la Resiliencia.....	65
2.5	Indicadores: herramientas claves para gestión del desempeño en seguridad .....	67
2.5.1	Concepto de indicador .....	68
2.5.2	Tipos de indicadores para la gestión de la seguridad.....	69
2.5.3	Indicadores leading y lagging .....	73
2.5.4	Indicadores para la gestión de la seguridad en construcción .....	74
2.5.5	Indicadores en la Ingeniería de la Resiliencia .....	78
3	METODOLOGÍA .....	81
3.1	Introducción.....	81
3.2	Metodología para el análisis FRAM de las actividades de construcción de la estructura de un edificio .....	81
3.2.1	Functional Resonance Analysis Method (FRAM) .....	82
3.2.2	Método de Identificación de Indicadores Leading.....	86
3.2.3	Proceso de investigación para la aplicación del FRAM a la construcción de la estructura de un edificio .....	87
3.3	Metodología para el diseño y validación de un instrumento de evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad de las actividades de construcción mediante el RAG .....	96
3.3.1	Resilience Assessment Grid (RAG).....	96
3.3.2	Método de Agregados Individuales .....	97
3.3.3	Método Delphi.....	98
3.3.4	Proceso de investigación para el diseño del cuestionario basado en el RAG.....	99
4	RESULTADOS.....	111
4.1	Introducción.....	111
4.2	Análisis FRAM de las actividades de construcción de la estructura de un edificio ...	111
4.2.1	Definición del propósito del análisis FRAM.....	111

4.2.2 Identificación y descripción de las funciones .....	112
4.2.3 Identificación de la variabilidad.....	116
4.2.4 Agregación de la variabilidad .....	118
4.2.5 Consecuencias del análisis .....	124
4.2.6 Identificación de indicadores <i>leading</i> a partir del modelo FRAM .....	128
4.3 Diseño y validación de un instrumento de evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad de las actividades de construcción mediante el RAG .....	130
4.3.1 Diseño del cuestionario basado en el RAG .....	130
4.3.2 Resultados del método de Agregados Individuales .....	130
4.3.3 Resultados del método Delphi.....	132
4.3.4 Análisis de los expertos sobre la Ingeniería de la Resiliencia y el sector de la construcción.....	138
5 CONCLUSIONES .....	147
5.1 Conclusiones (en español) .....	147
5.2 Conclusiones (en inglés) .....	150
6 APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN, LIMITACIONES, FUTURAS LÍNEAS Y APORTACIONES .....	153
6.1 Aplicación de la investigación .....	153
6.2 Limitaciones de la investigación .....	153
6.3 Futuras líneas de investigación .....	155
6.4 Aportaciones .....	156
REFERENCIAS .....	159
ANEXOS.....	179
ANEXO A: Publicaciones analizadas en la revisión bibliográfica sobre el Functional Resonance Analysis Method .....	181
ANEXO B: Publicaciones analizadas en la revisión bibliográfica sobre el Resilience Assessment Grid .....	191
ANEXO C: Plantillas para los trabajos de campo .....	195
ANEXO D: Plantilla del cuestionario diseñado conforme al Resilience Assessment Grid .....	199



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Edades de la Seguridad y Modelos de Accidentes.....	23
Figura 2. Modelo del Dominó de Heirinch .....	26
Figura 3. Modelo de Causalidad de Pérdidas de Bird.....	26
Figura 4. Modelo del Queso Suizo de Reason .....	27
Figura 5. Modelo jerárquico de los sistemas socio-técnicos implicados en la gestión del riesgo.....	29
Figura 6. Resonancia funcional como modelo sistémico de accidente .....	30
Figura 7. Relación entre Safety-I y Safety-II.....	32
Figura 8. Proceso de revisión sistemática de la literatura sobre FRAM.....	43
Figura 9. Distribución de documentos sobre FRAM por año .....	45
Figura 10. Distribución de documentos sobre FRAM por tipo de publicación .....	45
Figura 11. Las cuatro habilidades o potenciales para la Resiliencia.....	48
Figura 12. Proceso de revisión sistemática de la literatura sobre RAG .....	49
Figura 13. Distribución de documentos sobre RAG por año.....	50
Figura 14. Distribución de documentos sobre FRAM por tipo de publicación .....	50
Figura 15. Clasificación de las empresas según la actividad principal (CNAE 2009). Año 2016.....	56
Figura 16. Clasificación porcentual de las personas empleadas en el sector de la construcción según los grupos de la actividad principal .....	56
Figura 17. Volumen de negocio en actividades de construcción según tipo de obra. Año 2016 (Millones de euros).....	57
Figura 18. Pilares de hormigón de la estructura vertical.....	58
Figura 19. Losas de escalera .....	61
Figura 20. Tres aplicaciones del FRAM .....	82
Figura 21. Los seis aspectos que definen una función .....	83
Figura 22. Pasos para aplicar el método FRAM.....	87
Figura 23. Distribución de los trabajadores entrevistados según la edad .....	93
Figura 24. Distribución de los trabajadores entrevistados según su antigüedad en el puesto de trabajo.....	93
Figura 25. Fotografías de la tarea de encofrado de un pilar tomadas durante las observaciones realizadas en los trabajos de campo .....	94
Figura 26. Fotografías de la tarea de montaje del mecano tomadas durante las observaciones realizadas en los trabajos de campo .....	94
Figura 27. Ventana principal del FRAM Model Visualiser.....	95
Figura 28. Procedimiento para la aplicación del método de agregados individuales. ....	98

Figura 29. Etapas del proceso de investigación para el diseño y validación del cuestionario para los planes de seguridad y salud basado en el RAG. .... 100

Figura 30. Modelo FRAM de las tareas de construcción de la estructura de hormigón de un edificio..... 115

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Los tres grandes modelos de accidentes: principios y propósitos.....	25
Tabla 2. Comparación entre Safety-I y Safety-II en relación a las prácticas de gestión.....	33
Tabla 3. Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la revisión de la literatura sobre FRAM .....	44
Tabla 4. Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la revisión de la literatura sobre RAG.....	49
Tabla 5. Clasificación de los tipos de forjados horizontales.....	60
Tabla 6. Clasificación de los sistemas de encofrado .....	62
Tabla 7. Edades de la gestión de la seguridad e indicadores de desempeño en seguridad.....	70
Tabla 8. Clasificación de los indicadores de desempeño en seguridad.....	72
Tabla 9. Características de los indicadores <i>leading</i> y <i>lagging</i> .....	73
Tabla 10. Principales indicadores para el análisis de accidentes registrados.....	75
Tabla 11. Caracterización de las obras visitas durante los trabajos de campo.....	89
Tabla 12. Distribución de las entrevistas realizadas por puesto de trabajo.....	92
Tabla 13. Descripción de las categorías empleadas para evaluar el contenido del cuestionario. ....	102
Tabla 14. Criterios de selección de los expertos en el Método Delphi.....	104
Tabla 15. Características del panel de expertos participantes en el Método Delphi .....	105
Tabla 16. Criterios del panel de expertos participantes en el Método Delphi.....	106
Tabla 17. Codificación de las funciones del modelo FRAM por colores y actividades .....	112
Tabla 18. Funciones del modelo FRAM agrupadas por actividades .....	114
Tabla 19. Identificación de la variabilidad externa e interna en la fase de estructuras.....	116
Tabla 20. Análisis de la variabilidad de la función “encargar el hormigón”.....	118
Tabla 21. Análisis de los acoplamientos aguas abajo de la función de “encargar el hormigón”.....	119
Tabla 22. Análisis de los acoplamientos de las funciones aguas arriba y aguas abajo relacionadas con el transporte de materiales, recursos, y elementos por la grúa torre.....	121
Tabla 23. Análisis de los acoplamientos aguas abajo de las funciones relacionadas con las protecciones colectivas .....	123
Tabla 24. Indicadores Leading identificados a partir del FRAM.....	129
Tabla 25. Resultados de la validación de los expertos de los ítems incluidos en el potencial de aprender mediante el método de agregados individuales .....	131
Tabla 26. Resultados de los ítems incluidos en el potencial de aprender en las tres rondas del panel de expertos del método Delphi .....	133

Tabla 27. Distribución de los ítems del cuestionario en cada uno de las dimensiones o potenciales para la resiliencia .....	133
Tabla 28. Ítems del cuestionario final para el potencial de responder .....	134
Tabla 29. Ítems del cuestionario final para el potencial de monitorizar .....	135
Tabla 30. Ítems del cuestionario final para el potencial de aprender .....	136
Tabla 31. Ítems del cuestionario final para el potencial de anticipar .....	137
Tabla 32. Valoración de la relevancia de los potenciales para la resiliencia en las obras de construcción.....	138



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## SUMMARY

This section includes a summary of the research work developed in this doctoral thesis with the aim of obtaining an international doctorate at the University of Malaga. In this way, antecedents, objectives, applied methods, and main results are presented below.

## Introduction

Construction is one of the oldest activities carried out by human beings. Although it is a traditional industry, it is not alien to the global transformation that society as a whole has experienced and with it, organizations and systems of work. Organizations have become socio-technical systems that are the result of a synergistic and dynamic combination of people, technology, environments, work activities, processes, and organizational structures. This conception of organizations as increasingly more complex socio-technical systems and constituted by a multitude of interrelated, intractable, and coupled parts has led to a new understanding of safety as an "emergent" property of socio-technical systems. Thus, safety has evolved from being understood as something had by systems to something done by systems. Therefore, it is difficult to continue explaining accidents, incidents, and failures from a causal perspective. This has led to the development of new methods and models that allow safety to be addressed from a new point of view to the understanding of these new interrelationships and of a growing variability, which can be adequately managed through the inherent adaptability of the human being. For this purpose, the focus of attention has to be placed on the daily performance of the systems and not on the failures.

### ***Ages of Safety: Evolution of safety management***

Humans have worried about the risks of their environment that could endanger or jeopardize their life or health since the beginning of humanity. However, the interest in studying occupational safety did not emerge until the industrial revolution when production systems emerged and gave rise to new risks and concerns about them. Hale and Hovden (1998) propose three different stages in the evolution of occupational safety management. These three ages show how the understanding of occupational accidents has evolved.

The first one is known as the age of technology, since the main concern was to study possible technology failures that could lead to an accident. At that time, technology did not present such a degree of reliability and efficiency as nowadays. Consequently, safety studies were

focused on developing technical measures to protect machinery, prevent explosions and collapse of structures (Hale & Hovden, 1998). In this period, the Probabilistic Risk Analysis (PRA) and methods such as the fault and error tree, the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), or the Hazard and Operability analysis (HAZOP) were developed. In relation to the conception of accidents, this is mainly defined by Heinrich model (1931). This is a simple linear accident model known as the domino model and explains accidents by simple causal chains.

The second age of safety focused on human factors and was developed from the 70s. In this way, studies based on human error and ergonomics began to appear. Therefore, methods such as the Human Reliability Analysis (HRA) were developed and the selection of personnel, training, or motivation were included within the preventive measures. Subsequently, Reason (1990) proposes an accident model known as the Swiss Cheese model, which is framed in complex linear models. This model, although still based on causal relationships, was more complex and considered the existence of active failures, latent failures, and barriers. However, multiple accidents occurred in this period, such as Three Mile Island accident or the Challenger one, among others, which highlighted the need to look for new models of accidents that could better explain reality.

The third age of safety arrived around the 90s, when the interest changed to system management from an organizational point of view. At that time, the school of thought based on High Reliability Organizations (HRO) became more important. In this way, organizations had become increasingly complex and systemic accident models emerged to respond to the new reality of complex socio-technical systems that functioned dynamically and non-linearly. In these new models, accidents are caused by unexpected combinations of normal actions. Thus, Rasmussen's Hierarchical Model appeared (Rasmussen, 1997), focused on these complex socio-technical systems. New methods such as AcciMAP or Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM) were also developed. In this context, Resilience Engineering was born, which aimed to take a step forward in the existing vision of safety by creating a new school of thought. Within the framework of this new paradigm, Systems-Theoretic Accident Modeling and Processes (STAMP) and Functional Resonance Analysis Method (FRAM) were developed. The latter has been addressed in this thesis.

### ***A new approach to safety management: Resilience Engineering***

*“Resilience Engineering is a paradigm of safety management that focuses on how to help people cope with complexity under pressure to achieve success” (Woods & Hollnagel, 2006).*

Resilience could be defined as the intrinsic capacity of an organization (or system) to adjust its functioning before or after changes and disturbances to continue working in the face of continuous tensions or important mishaps (Hollnagel et al., 2006).

Resilience Engineering was born at the beginning of the 21<sup>st</sup> century and is based on four premises (Hollnagel et al., 2006):

1. The execution conditions are always insufficiently specified or described. Therefore, organizations and workers adapt by making adjustments focused on matching available resources and desired outcome. In addition, these adjustments are approximate because resources and time are limited.
2. Most of the adverse events that occur in complex socio-technical systems cannot be attributed to failures of isolated components, but are due to unexpected combinations as result of performance variability.
3. Safety cannot be limited to a reactive safety focused on probabilities and the analysis of errors, incidents, and accidents. Safety management needs to be proactive and reactive.
4. Safety cannot be isolated from productivity. Both are mutually constraining and it is necessary to find a point of equilibrium between them because they are interdependent.

This new approach breaks with the traditional way of understanding safety (Safety-I) focused on things that go wrong. In this way, the concept of safety (Safety-II) is redefined to focus on things that go well. The new paradigm of Resilience Engineering emphasizes that when things go well in difficult circumstances, it is mainly due to the ability of workers to adapt, that is, their ability to recognize and absorb unexpected changes and events. For this, people who are part of the complex socio-technical systems have to continually make adjustments on what has been devised in order to achieve success in their daily work. However, on some occasions, even if they are few, an incomplete analysis of the current performance conditions that leads to the occurrence of accidents (Hollnagel et al., 2006). Instead of a causal phenomenon, we are going towards an emergent one. The procedures and instructions are incomplete due to complexity and therefore, adjustments are a *sine qua non* condition. Thus, the variability must be seen as something necessary for the functioning of the systems and should not be constrained; it should simply be understood and dampened (Rubio-Romero et al., 2019).

Within the framework of Resilience Engineering, new methods and tools have been developed such as the Functional Resonance Analysis Method (FRAM), which helps to understand the daily performance of the systems and the variability existing in them as a basis for resilience, or the Resilience Assessment Grid (RAG), which allows us to measure how resilient the system performance is. Both have been employed in the present research.

### ***The construction sector and structure building activities***

The construction sector encompasses the set of operations or activities that must be developed to erect a building, an industrial plant, a public infrastructure, or any other analogous system, according to the design or engineering specification that will have been previously made by one or several specialized technicians in this field. This sector has some characteristics that distinguish it from other sectors and that sometimes represent a barrier for the improvement of safety in construction works such as: production process based on projects, high level of subcontracting, transitory nature of labour, labour intensive participation, economic pressures.

Currently, the construction sector has high levels of accidents. In Spain, the construction sector was the activity sector with the highest incidence rate, more than twice the average of the sector indexes (INSSBT, 2017). The world-wide panorama is similar.

In Spain, Council Directive 92/57/EEC of 24<sup>th</sup> June 1992 on the implementation of minimum health and safety requirements at temporary or mobile construction sites was transposed by means of Royal Decree 1627/1997, of 24<sup>th</sup> October, which establishes minimum health and safety provisions in construction works. It determines how the management of health and safety in construction sites should be organized. For this, three essential elements are established:

- **Health and safety study or basic study.** It must be elaborated during the project drafting phase and it contains "useful forecasts and information to carry out the foreseeable future work under proper conditions of health and safety" (INSHT, 2012).
- **Construction phase health and safety plan.** It must be elaborated based on the health and safety study or basic study, developing its content in a more concrete and detailed way. In this document "the contractor will reflect the management of the specific health and safety for the work in question, which will include the coordination of each and every one of the companies and self-employed workers that depend on said contractor" (INSHT, 2012).

- **Health and safety coordinator.** A distinction must be made between the health and safety coordinator in the project phase and the one in the execution phase. They will be responsible, respectively, for the preparation of the health and safety study or basic study and the approval of the construction phase plan before the start of the execution of the work. In addition, the coordinator in the execution phase will be responsible for carrying out the coordination in the works to ensure that both contractors and subcontractors or self-employed workers apply the principles of preventive action during the execution of the works (INSHT, 2012).

Construction sites could be considered socio-technical systems, since they are complex systems where technical and social subsystems are involved, and are strongly influenced by the external environment and present a large number of independent but interrelated agents in a complex way.

So far, the research developed in the construction sector based on Resilience Engineering is scarce (Righi et al., 2015). Tarsio Abreu Saurin could be highlighted as one of the most outstanding authors in the research related to the construction sector and Resilience Engineering. There are also some studies focused on applying the Functional Resonance Analysis Method to different activities related to construction such as waste recycling (Haddad & Rosa, 2015, Rosa et al., 2017, 2015), operations with a crane (Von Buren, 2013) or safety inspections (Saurin, 2016). In this sense, it seems logical to use the FRAM as a starting point to apply Resilience Engineering to the construction sector, since it helps to understand everyday operations. This is necessary to establish measures and actions from the point of view of Resilience Engineering. Harvey et al. (2016) highlight that resilience engineering could help to adopt an adaptive approach to construction safety, which implies advantages such as supporting the ability of workers to anticipate and respond to unexpected events; helping to understand that failures and errors arise from adjustments in the execution of work under pressure; decreasing the propensity to blame; stimulating the increase of investment in risk management; and avoiding focusing all efforts on efficiency and productivity, leaving safety aside.

### ***Indicators: key tools for safety performance management***

Wreathall (2009) states that safety management indicators are: “indirect measures for the aspects identified as important in the underlying safety model(s)”. According to this definition, the indicators directly depend on the safety vision applied by an organization and, therefore, on the models and methods used as a reference, as well as on the safety management

approach. However, in a general way, it could be stated that there are two types of safety indicators widely used in the literature: leading and lagging (Jazayeri & Dadi, 2017). For several decades, these two types of indicators have been analysed by many studies in the field of safety management (Davies et al., 2006; Grabowski et al., 2007; Haas & Yorio, 2016; Herrera, 2012; Hinze et al., 2013; Manuele, 2009; Mengolini & Debarberis, 2008; Rhodes et al., 2008; Toellner, 2001). According to Rubio-Romero et al. (2018), lagging indicators have been used in safety traditionally based on recorded accident ratios or past aspects (Manuele, 2009, Toellner, 2001). These indicators can hardly give enough information to prevent accidents in the future, they are poor indicators because they are based on past performance (Grabowski et al., 2007; Mengolini & Debarberis, 2008). In contrast, leading indicators can be used as predictors, since they are related to the proposed measures to prevent accidents, incidents, or unsafe acts and not accidents or faults that have already occurred. The indicators most used in safety management in construction have been lagging indicators. Essentially, they have focused on measuring the frequency with which undesirable safety outcomes have occurred. However, the use of lagging indicators has been widely discussed in relation to their actual impact on safety management. Lagging indicators in safety present an important limitation since they measure the absence of safety more than the presence of safety (Arezes & Sérgio Miguel, 2003; Lofquist, 2010) and therefore, they are not a direct measure of the level of safety in an organization (Lingard et al., 2013). For this reason, there are numerous studies that propose the use of leading indicators in the construction sector (Guo & Yiu, 2016, Hallowell et al., 2013, Hinze et al., 2013; Rajendran, 2013; Toellner, 2001).

Within the framework of Resilience Engineering, the Leading Indicator Identification Method (LIIM) (Raben, 2017; Raben et al., 2018, 2017) has been recently developed to identify indicators based on daily performance or *work-as-done*. For this purpose, the LIIM relies directly on the FRAM. In the system model obtained with this method, the analysis of which functions have a variability that could affect the desired or expected outcome of the system is proposed. These functions will allow the identification of key leading indicators for the system resilient performance.

## **Objective**

The general objective of this thesis is to study construction activities from the Resilience Engineering perspective, in order to help improve the occupational safety management and monitoring in these activities.

In order to accomplish the general objective, some main objectives have been proposed. They will mark the development of the research, and these in turn, have been broken down into secondary objectives, which will mark the stages to follow throughout its development.

The general objective of the research focuses on the following main objectives:

- 1) Model and analyse the structure building activities based on the Resilience Engineering precepts.
- 2) Design and validate a tool to assess resilience in the safety management in construction activities to facilitate the improvement and monitoring of performance.

To achieve these main objectives, the following secondary objectives have been proposed:

- 1) Model the structural construction works for buildings according to the Resilience Engineering by applying the Functional Resonance Analysis Method (FRAM), identifying the main functions involved in such works.
- 2) Analyse the variability and its influence on performance in the structure building activities.
- 3) Design a tool to assess resilience in safety management in construction activities applying Resilience Assessment Grid (RAG), based on Resilience Engineering precepts.
- 4) Validate the proposed tool to assess resilience in safety management in construction activities through techniques based on expert judgment.

## Methodology

The procedure followed during the developed research so as to achieve the proposed objectives is described below. In this sense, the two main activities carried out are presented.

## **FRAM analysis of the structure building activities**

As a starting point of the research developed in this thesis, we decided to apply the FRAM in order to know how the everyday performance is done in a construction site during the structure phase, what is called *work-as-done*. This allowed us to obtain a model that describes the real execution process of everyday activities according to Resilience Engineering. Based on it, an analysis of variability was performed.

- **Functional Resonance Analysis Method (FRAM)**

FRAM is a method that helps to understand realistically how everyday work is done in complex socio-technical systems. With this change of perspective, efforts are concentrated on understanding the real functioning of the system to improve its capacity to adapt to unexpected events without exceeding the limits of variability. In this way, the focus of attention is on analysing the variability to understand how it originates and how it propagates through the system by the couplings between functions. For this, the following steps proposed by the Hollnagel (2012) method were followed:

- **Step 0: Definition of the purpose of the FRAM analysis**

The FRAM analysis can be used for different purposes. In this way, it can be used with a retrospective approach, applying it to an accident that has taken place, or with a prospective approach, applying it to a risk assessment. It can also be very useful to design or redesign a system. In the present investigation, this former prospective approach has been adopted.

- **Step 1: Identification and description of the functions**

This step of the FRAM analysis is based on the identification and description of all the functions involved in the system under study. This step is crucial because its result is the FRAM model that will be analysed later. The sources of information used in the data collection were those recommended by Hollnagel (2012a) and there were three: review of available documentation, interviews, and observations. The fieldwork consisted of 33 visits to 5 different construction sites, all in the structural phase, during a period of 7 months. In these visits, observations of the task executions were carried out, which were documented with photographs. In addition, semi-structured interviews were conducted during the visits, which were recorded for further analysis. Specifically, a total of 85 workers were interviewed. They had jobs as formwork workers, reinforcing steel workers, crane operators, safety staff, site managers, and supervisors. These workers had an average age of 43 years and an average experience in structure phase works of 16.7 years. Based on the information collected and analysed, all the functions involved in the FRAM model were identified and defined. Each function was

represented by a hexagon and was defined by six aspects or variables: input, output, precondition, resources, control, and time.

- **Step 2: Identification of variability**

Subsequently, the variability of functions was identified by analysing the variability of each function in isolation. The variability of a function can be of external or internal origin or it can be due to couplings with other upstream and downstream functions. This former case was analysed in the next step. Only the internal variability and external variability of each type of function was studied in the identification of the variability. In this sense, it is necessary to consider that the variability depends on the type of functions such as technological functions, with low or no variability; organizational functions, with low frequency variability and great amplitude; and human functions, with high frequency and amplitude variability.

- **Step 3: Aggregation of variability**

This third step was the aggregation of the variability in the performance of the functions. For this purpose, the functions as a whole and the influence of their couplings on variability in performance were studied. In order to do so, the couplings between functions upstream and downstream and how variability was propagated through them were analysed, paying special attention to how variability was amplified or dampened.

- **Step 4: Consequences of the analysis**

As a result of the FRAM analysis, those functions which are critical in the studied system were determined. Obviously, this criticality is considered from the point of view of variability. Therefore, the areas or functions where variability in performance could be generated and spread, affecting the performance of the system, are determined. This can sometimes lead to positive results and, sometimes, to negative results. The types of measures that could be taken as a result of the analysis can be grouped into six major groups: elimination, prevention, protection, facilitation, monitoring, and dampening (Hollnagel, 2012a). The first four are widely known in the framework of safety and health management, as they have traditionally been used to prevent risks and improve safety. However, the two types of measures aimed at monitoring performance with leading indicators and dampening variability are those that coincide most clearly with the safety vision proposed by Resilience Engineering. In this sense, in this research study, we proposed the design of a set of indicators based on the RAG and adapted to the construction sector.

- **Identification of leading indicators based on the FRAM model**

Although the proposal of indicators was not the subject of this thesis, in order to continue advancing in the research carried out and improve the results obtained, an identification of leading indicators was developed. These indicators were identified by applying the Leading Indicator Identification Method (LIIM) (Raben, 2017). This method proposes a procedure to identify leading indicators based on the FRAM method. For this reason, the steps that have to be followed to apply the LIIM method present a certain analogy with the FRAM method. These are summarized below (Raben, 2017):

1. Identification of relevant functions.
2. Clustering of functions in groups.
3. Identification of variability of functions.
4. Identification of couplings between functions upstream and downstream.
5. Identification of leading indicators.
6. Confirmation of leading indicators identified by the experts' point of view.

### **Design and validate a tool to assess resilience in the safety management in construction activities based on the RAG**

This second research activity aimed to apply the RAG in the construction sector to obtain a set of indicators to measure resilience in the performance of safety and health management in construction activities. These indicators were specifically focused on the construction phase plan as the core of safety management at the construction site. The steps followed in the research process were: (i) design of the questionnaire based on the RAG; (ii) validation of the content of the questionnaire by individual aggregates method; (iii) redesign of the questionnaire; and (iv) validation of the new questionnaire by means of the Delphi method. In this process, different methodologies were used and are presented below sequentially:

- **Questionnaire design based on the Resilience Assessment Grid (RAG)**

Firstly, the design of the questionnaire according to the RAG was carried out. As stated above, resilience is something that systems or organizations do, that is, it is a property of systems or organizations. Nevertheless, the capacity or ability of an organization to develop a resilient performance can indeed be measured. Based on this idea, the Resilience Assessment Grid (RAG) is a set of questions to measure the capabilities or abilities of an organization to achieve a resilient performance, in order to manage them (Hollnagel, 2017). These four capacities are called potentials or "cornerstone" of resilience, since they constitute the basis on which the

resilience of an organization is supported. According to Hollnagel (2011), these skills for resilience are:

- Respond: Knowing what to do
- Monitor: Knowing what to look for
- Learn: Knowing what happened
- Anticipate: Knowing what to expect

To design the questionnaire, the main source of information that was used as a reference was the book "Safety-II in Practice: Developing the Resilience Potentials" (Hollnagel, 2017). This book presents the RAG and proposes a set of generic questions, for each of these four potentials, which have to be adapted for each case. In addition, this book includes examples of questions that have been designed for specific organizations in different sectors. These studies have also been used as a reference for the design of the questionnaire indicators. Specifically, the questions designed for the Canadian inner city emergency department (Hunte & Marsden, 2016), the French National Railway Company (SNCF) (Rigaud et al., 2013), the Swedish Civil Aviation Administration (Ljungberg & Lundh, 2013), and the Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA, 2017) were consulted. From these sources of information, and taking into account the specific characteristics of the companies in the construction sector, a set of questions was developed, organized according to the four potentials for resilient performance. These questions were reviewed on 3 successive occasions by 4 experts specialized in the areas of Occupational Health and Safety, Construction, and Resilience Engineering. In this way, an initial proposal for the questionnaire was obtained.

- ***Validation of the questionnaire by individual aggregate method***

In the second stage, the content of the proposed questionnaire was validated using a technique based on expert judgment, such as the individual aggregate method. This method consists of experts assessing the content of each question involved in the questionnaire, in relation to its suitability to the issue under study or construct. Each expert performs this evaluation individually. The main difference of this method with the Delphi Method is that it can be done in a single round. However, it provides less reliability, so it was used to debug the initial questionnaire before submitting the new version for validation by means of the Delphi method.

Corral (2009) recommends the group of experts to be between three and five and to be an odd number. In our case, three experts were selected in the areas of occupational health and safety and construction, who were familiar with the principles and objectives of Resilience

Engineering. These experts were different from those who participated in the initial design process. All of them had obtained a doctorate in engineering or architecture, had more than 10 years of experience in the construction sector and knowledge in Resilience Engineering. The experts had to evaluate different aspects of each of the items of the questionnaire such as coherence, relevance, and clarity and also the sufficiency of the set of questions included in each potential (Escobar-Pérez and Cuervo-Martínez, 2008). For this purpose, a Likert scale of 4 points was used.

- ***Redesign of the questionnaire***

In the third stage, the redesign of the questionnaire was carried out based on the results obtained in the second stage, that is, the scores and the comments of the experts. In this process, the 4 experts who had initially designed the indicators once again participated. Thus, some indicators were revised improving their wording and adaptation to the potential they intended to evaluate. Others were eliminated from the questionnaire. In this way, a new refined version of the questionnaire was obtained.

- ***Validation of the redesigned questionnaire by the Delphi method***

In the fourth stage, the indicators included in the redesigned questionnaire were subjected to a validation process, but this time, the Delphi method was applied. The Delphi method is a qualitative research methodology based on expert judgment. Basically, it involves the application of a questionnaire to a group of experts to express their opinion or judgment on a given issue. Subsequently, the experts review their answers based on the feedback they receive in an iterative process. This process ends when consensus is reached among the responses of all the experts. The experts were selected based on the selection criteria proposed by Hallowell and Gambatese (2010). A total of 17 experts participated evaluating the importance of each question in order to determine if they should be included in the questionnaire or if, on the contrary, they were not important enough to be included in the questionnaire. According to Hollnagel et al. (2011b), a Likert scale of 6 points from excellent to missing was used to measure resilience.

## **Results**

The main results obtained are presented based on the two activities which were developed. Regarding the FRAM analysis, a total of 60 functions were obtained and they were grouped into 6 groups of main activities: formwork, steel reinforcement, concreting, stakeout and verifications, collective protections, and transport of materials. Based on them, the FRAM

model was obtained. In the identification of the external and internal variability of the main sources of variability, the identified sources were: climatic conditions, the plant that supplies the concrete, economic and public administration pressures, maintenance, physiological and psychological factors, and organizational safety culture. In the aggregation of the variability, three aspects of special interest were identified because of their possible influence on the rest of the functions in the model and, therefore, on the performance of the system. Two of these aspects were the functions to decide which elements to transport with the tower crane and to order the concrete. These functions generated a variability that spread throughout the system through its couplings with the other functions. This could seriously affect the performance of the system leading to undesirable results. The third was a set of functions related to safety and dedicated to the installation of collective protections in the construction site. The output of these functions became the preconditions for other functions. Under pressure conditions, it was usual for these functions to be activated without preconditions being available. In other words, some construction tasks were initiated without the protections being installed. This implied a risk for the workers, mainly of fall from height. The conclusions of the analysis established the need to develop specific measures of action aimed mainly at:

- The improvement and monitoring of the use of construction phase plans as a facilitator of safety management.
- The increase of the resilient performance of the whole organization, especially including managers and supervisors, as a means of improving the organizational safety culture.
- The development of leading indicators focused on everyday activities or *work-as-done* that facilitate the making of resilient decisions.
- In-depth analysis of the tasks related to the transport of materials with the crane on site to establish specific measures that improve its planning and management.

Additionally, leading indicators based on the FRAM model were identified using the LIIM method. These candidates for leading indicators were: use the forecast of the actual evolution of the works and other relevant information to set the concrete reception date, prioritize crane operations based on experience and priority daily needs identified and dispose of collective protections for the execution of activities.

Regarding the design of a set of questions in safety management according to RAG, a questionnaire was obtained with 36 items that allow us to determine the extent to which the construction phase plan contributes to a resilient performance in a construction site. These are grouped according to the four potentials or capacities necessary for resilient performance. The experts highlighted some specific indicators as very important because of their impact on

these capacities and on the other indicators as a whole. In relation to the potential to respond, the experts considered essential that the construction phase plan was easy to understand and apply in a practical way. In relation to the potential to monitor, they stressed that the management indicators should be easy to use as well as efficient, in order to properly monitor the performance on the construction site. In relation to the potential to learn, they indicated that clearly establishing which type of events should be reported is essential to strengthen the learning capacity in construction sites. In relation to the potential to anticipate, the experts considered it very important that the people responsible for analysing the potential weaknesses and threats to the resilient performance on the construction site have the necessary experience, capacity, and resources.

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE LA TESIS

## 1.1 Motivación de la Tesis Doctoral

En estas líneas se pretende exponer los motivos que han llevado a elegir y desarrollar el trabajo que hoy se presenta como tesis con la que se opta al grado de Doctor por la Universidad de Málaga.

La construcción es una de las actividades más antiguas que ha llevado a cabo el ser humano. Pese a tratarse de una industria tradicional, no es ajena a esta transformación a nivel mundial que ha experimentado la sociedad en su conjunto y con ella las organizaciones y sistemas de trabajo. Las organizaciones se han convertido en sistemas socio-técnicos fruto de una combinación sinérgica y dinámica de personas, tecnología, entornos, actividades de trabajo, procesos y estructuras organizacionales (Baxter & Sommerville, 2011).

Los avances tecnológicos y la revolución digital han derivado en un aumento de la complejidad en estos sistemas socio-técnicos que ha traído consigo la necesidad de una nueva forma de entender y analizar las organizaciones actuales.

La gestión de la seguridad tampoco se ha mantenido ajena a estos cambios que han ido transformando progresivamente la manera de entender la seguridad y han influenciado una transición entre diferentes enfoques como han sido el tecnológico, el humano y organizacional (Hale & Hovden, 1998). Durante muchos años, e incluso hoy día, la seguridad y salud ha estado marca por un enfoque causal que ha concentrado todos los esfuerzos en encontrar el origen de los accidentes mediante cadenas causales, ya fueran simples o complejas. Sin embargo, esta concepción de las organizaciones como sistemas socio-técnicos cada vez más complejos y constituidos por multitud de partes interrelacionadas, intratables y acopladas, ha conducido a un nuevo entendimiento de la seguridad y salud como una propiedad “emergente” de los sistemas socio-técnicos, es decir, la seguridad ha pasado de entenderse como algo que los sistemas tienen a algo que los sistemas hacen (Hollnagel, 2014). Así, es difícil seguir explicando los accidentes, incidentes y fallos desde un enfoque causal, lo que ha llevado al nacimiento de nuevas metodologías y modelos que permiten abordar la seguridad con una nueva visión conducente a la comprensión de estas nuevas interrelaciones y de una variabilidad cada vez mayor, que puede ser gestionada adecuadamente gracias a la capacidad de adaptación inherente al ser humano (Hollnagel et al., 2006).

En este contexto, son muchos los sectores que están adoptando este nuevo enfoque y que están obteniendo resultados muy positivos. El sector de la construcción aún no se encuentra entre ellos. Sin embargo, hay que considerar que se trata de un sector dinámico y complejo donde existen complicadas estructuras empresariales marcadas por la subcontratación y que los índices de siniestralidad revelan una necesidad de avanzar en la mejora de la gestión de la seguridad en este sector. Hasta el momento los enfoques empleados no han proporcionado los resultados deseados, por lo que explorar nuevos enfoques que dirijan al sector a una mejora real de la seguridad y salud parece una alternativa razonable.

En este sentido, la Ley 32/2006, de 18 de octubre, reguladora de la subcontratación en el Sector de la Construcción en su exposición de motivos indica que “son numerosos los estudios y análisis desarrollados para evaluar las causas de tales índices de siniestralidad en este sector, sin que resulte posible atribuir el origen de esta situación a una causa única, dada su complejidad. Uno de esos factores puede estar relacionado con la utilización de una forma de organización productiva [...] la denominada «subcontratación»”.

Además, la Estrategia Española de Seguridad y Salud en el Trabajo 2015-2020, publicada por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo del Ministerio de Empleo y Seguridad Social (INSHT, 2015), también pone de manifiesto varios puntos clave en este sentido. Por un lado, dentro de los sectores y actividades con mayor riesgo señala al sector de la construcción como el sector con mayor índice de incidencia, superando en más del doble a los índices sectoriales. Además, indica que las actividades de construcción de edificios se incluyen dentro de las actividades que presentan mayor incidencia de los accidentes de trabajo, tanto leves como graves y mortales. Por otro lado, dentro de las prioridades en la mejora de las condiciones de seguridad y salud en el trabajo, destaca como prioritarias aquellas ocupaciones que presentan una alta siniestralidad, como son las que se enmarcan en el sector de la construcción, y reconoce la importancia de desarrollar actuaciones oportunas en cuanto al análisis y evaluación de las causas y factores. Así mismo, entre las principales fortalezas y debilidades del sistema de seguridad y salud en el trabajo, señala que la investigación sigue siendo una de las grandes debilidades del sistema preventivo, ya que hasta ahora su impulso ha sido débil. Por ello, indica que es necesario continuar trabajando en la mejora de la investigación e innovación en este ámbito.

A la importancia del problema tratado, se une la inquietud profesional de la doctorando en cuanto a la seguridad y salud laboral se refiere. Su trayectoria tanto académica como

profesional ha estado ligada a la prevención de riesgos laborales. En sus estudios de Ingeniería Técnica Industrial realizó su proyecto final de carrera sobre el desarrollo de un plan de autoprotección de una empresa de residuos sólidos urbanos. Posteriormente, durante sus estudios de Ingeniería de Organización Industrial curso la asignatura de Seguridad Industrial y nuevamente realizó su proyecto final de carrera en materia de seguridad y salud. En esta ocasión el proyecto abordaba la gestión del riesgo laboral y los factores medioambientales en la construcción de nuevas estructuras ferroviarias. Además, la doctorando ha cursado la formación de Técnico Superior de Prevención de Riesgos Laborales y de Coordinador de Seguridad y Salud en Obras de Construcción. En lo que al ámbito profesional se refiere, inició su contacto con el mundo laboral en una empresa de consultoría y posteriormente trabajó temporalmente en un servicio de prevención ajeno. Además, ha colaborado con la Cátedra de Prevención y Responsabilidad Social Corporativa de la Universidad de Málaga desde su nacimiento en 2009 pasando a ser en Coordinadora Técnica de dicha cátedra en 2012. Esta colaboración con la cátedra le ha permitido ampliar sus conocimientos en seguridad y salud laboral, a la vez que le ha dado la oportunidad de iniciarse en la investigación participando en diferentes proyectos de ámbito nacional e internacional, entre los que destacan dos planes nacionales financiados por el Ministerio de Economía, Industrial y Competitividad y relacionados con la construcción y la seguridad y salud. De hecho la presente tesis se enmarca en uno de estos proyectos que se titula *“Composite Leading Indicators para la mejora de la resiliencia de la seguridad laboral, en las actividades de diseño y ejecución de estructuras”*.

Por todo lo anterior, el presente trabajo de tesis pretende contribuir a la mejora de la seguridad y salud en la construcción mediante el análisis de las tareas de la construcción de edificios asociadas a la fase de estructuras, por ser ésta una de las fases que entraña mayor riesgo, desde una nueva visión sistémica de la seguridad como es la Ingeniería de la Resiliencia. Así como diseñar un instrumento de evaluación de la resiliencia que facilite a las empresas de construcción sentar las bases para el desarrollo de un desempeño resiliente en la obra desde antes del inicio de la ejecución.

## 1.2 Objetivos y preguntas de investigación

El objetivo general de este proyecto es estudiar las actividades de construcción desde el prisma de la Ingeniería de la Resiliencia, a fin de ayudar a mejorar la gestión y el seguimiento de la seguridad laboral en dichas actividades.

La incorporación de esta nueva visión de la seguridad a la construcción puede enriquecer la gestión de la seguridad en las obras de construcción, sentando las bases para alcanzar un desempeño resiliente durante la ejecución, que permita adaptarse a los cambios y eventos inesperados que sucedan.

Se puede decir que la consecución de dicho objetivo general se concreta en el logro de unos objetivos principales que marcarán el desarrollo de la investigación, y éstos a su vez, en unos objetivos secundarios, que marcarán las etapas a seguir durante todo su desarrollo.

El objetivo general de la investigación se concreta en los siguientes objetivos principales:

- 1) Modelar y analizar los trabajos de ejecución de estructuras en edificios basándose en los preceptos de la Ingeniería de la Resiliencia.
- 2) Diseñar y validar un instrumento de evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad de las actividades de construcción para facilitar la mejora y seguimiento del desempeño.

Para alcanzar estos objetivos principales se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- 1) Modelar los trabajos de construcción estructuras en edificios conforme a la Ingeniería de la Resiliencia mediante la aplicación del *Functional Resonance Analysis Method*, identificando las principales funciones implicadas en dichos trabajos.
- 2) Analizar la variabilidad y su influencia en el desempeño de los trabajos de construcción estructuras en edificios.
- 3) Diseñar un instrumento de evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad de las actividades de construcción, en base a los preceptos de la Ingeniería de la Resiliencia mediante el *Resilience Assessment Grid*.
- 4) Validar el instrumento propuesto para la evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad de las actividades de construcción a través de técnicas basadas en el juicio de expertos.

Estos objetivos responden a diferentes preguntas de investigación planteadas que se presentan a continuación:

1. ¿Cómo se ejecutan en el día a día las actividades de construcción de estructuras?
2. ¿Cómo afecta la variabilidad al desempeño de estas actividades?
3. ¿Qué tareas son claves para controlar y amortiguar esa variabilidad?
4. ¿Cómo puede evaluarse la gestión resiliente de la seguridad en las actividades de construcción?
5. ¿Cuáles de las habilidades para el desempeño resiliente deberían empezar a mejorar las empresas que intervienen en las obras de construcción?

### 1.3 Estructura de la Tesis

Se presenta a continuación la estructura del trabajo de tesis. Ésta se organiza en cinco capítulos cuyo contenido se describe en los siguientes párrafos.

En el presente capítulo, es decir, el primer capítulo, se expone la motivación, los objetivos y la estructura de la tesis.

En el segundo capítulo se presentan los antecedentes que ayudan a comprender el estado de la cuestión objeto de estudio en esta tesis. De este modo, se analiza la evolución de la gestión de la seguridad haciendo un recorrido por las edades de la seguridad para pasar a abordar los principales modelos de accidentes. Seguidamente, se introduce la Ingeniería de la Resiliencia como un nuevo enfoque para la gestión de la seguridad. Para ello, se presenta el concepto de resiliencia, se profundiza en los preceptos de la Ingeniería de la Resiliencia y se presenta el *Functional Resonance Analysis Method*, que ha sido desarrollado en el marco de la Ingeniería de la Resiliencia para el modelado de los sistemas socio-técnicos complejos. A continuación, se aborda el sector de la construcción y las actividades de construcción de estructuras en la edificación, incluyendo las principales tipologías de estructuras y analizando los estudios que existen en relación a la aplicación de la Ingeniería de la Resiliencia a dicho sector. Finalmente, se introducen el concepto de indicador y se presentan los principales tipos de indicadores, así como los indicadores empleados en la gestión de la seguridad en construcción y en la resiliencia.

El tercer capítulo está dedicado a la metodología seguida durante toda la investigación. En él se describen los métodos empleados y el proceso de investigación desarrollado para, por un lado, modelar y analizar las actividades de construcción de estructuras, y por otro lado, diseñar y validar un instrumento de evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad en las actividades de construcción. Así, se detallan los pasos seguidos para aplicar el *Functional Resonance Analysis Method*, el *Leading Indicator Identification Method* y también los principios del *Resilience Assessment Grid*, así como los métodos basados en paneles de expertos que se han aplicado para la validación del instrumento de evaluación propuesto y el método para la identificación de indicadores *leading* basados en el FRAM.

En el cuarto capítulo se desarrollan y analizan los resultados obtenidos durante la investigación desarrollada. De este modo, se presenta un modelo de las actividades de construcción de estructuras conforme al *Functional Resonance Analysis Method* y se analiza la variabilidad y su propagación en él. Además se presentan los indicadores *leading* identificados a partir del modelo propuesto mediante el *Leading Indicator Identification Method*. Seguidamente, se presenta el instrumento de evaluación de la resiliencia diseñado conforme al *Resilience Assessment Grid*, describiendo previamente los resultados de la validación mediante paneles de expertos. Para concluir este apartado se incluye un análisis realizado por los expertos en relación a la Ingeniería de la Resiliencia y el sector de la construcción.

En el quinto capítulo se exponen las principales conclusiones obtenidas en la investigación desarrollada en esta tesis.

En el sexto capítulo se presentan las aplicaciones de la investigación, así como sus limitaciones, las futuras líneas de investigación y las aportaciones que se han derivado de este trabajo.

Finalmente, se incluyen las referencias consultadas en el desarrollo de la tesis y un anexo donde se recogen las publicaciones analizadas en la revisión bibliográfica sobre el *Functional Resonance Analysis Method* y el *Resilience Assessment Grid*, las plantillas de apoyo empleadas durante los trabajos de campo y el instrumento de evaluación de la resiliencia diseñado y validado.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción

En este capítulo se describen los antecedentes de la investigación llevada a cabo en el presente trabajo de tesis. Para ello, en primer lugar se presenta la evolución de la gestión de la seguridad y se profundiza en los principales modelos de accidente que han ido surgiendo a lo largo del tiempo. A continuación, se describe la Ingeniería de la Resiliencia presentando el concepto de resiliencia y los principales preceptos de este nuevo paradigma de la seguridad. Seguidamente, se presentan dos métodos de especial relevancia en esta tesis y en el marco de la Ingeniería de la Resiliencia, como son el *Functional Resonance Analysis Method*, que facilita el modelado de sistemas, y el *Resilience Assessment Grid*, que se presenta como un instrumento de medida de la resiliencia. Luego, se aborda el sector de la construcción y las actividades de ejecución de estructuras para edificios, incluyendo el estado de la investigación en el sector en relación a la Ingeniería de la Resiliencia. Finalmente, se analizan los indicadores de gestión de la seguridad en cuanto a su tipología, su uso en el sector de la construcción y su enfoque en el ámbito de la resiliencia.

### 2.2 Edades de la Seguridad: Evolución de la gestión de la seguridad en el trabajo

La preocupación del hombre por los riesgos de su entorno que podrían poner en peligro su vida o su salud ha existido desde el comienzo de la humanidad. Sin embargo, el interés por el estudio de la seguridad y salud en el trabajo no surgió hasta la llegada de la revolución industrial cuando surgieron los sistemas productivos que dieron lugar a la aparición de nuevos riesgos y a la preocupación por ellos. Hale y Hovden (1998) proponen tres etapas diferenciadas en la evolución de la gestión de la seguridad en el entorno laboral. Estas tres edades muestran cómo ha evolucionado la comprensión de los accidentes laborales.

La primera de ellas es conocida como la edad de la tecnología, ya que la principal preocupación era estudiar posibles fallos de la tecnología que podían derivar en un accidente. En aquellos momentos la tecnología no presentaba el grado de fiabilidad y eficiencia de la actualidad. Por ello, los estudios en materia de seguridad se centraban en desarrollar medios técnicos encaminados a la protección de la maquinaria y a evitar

las explosiones y el colapso de las estructuras (Hale & Hovden, 1998). En cuanto a la concepción de los accidentes, ésta queda definida principalmente por el modelo de Heinrich (1931) conocido como el modelo del dominó y que explica los accidentes mediante cadenas de causales simples. En este periodo se desarrolló el análisis probabilístico de riesgos (siglas en inglés PRA) y surgieron métodos como el árbol de fallos y errores, el análisis del modo y efecto de fallos (siglas en inglés FMEA) o el análisis de peligros y de operabilidad (siglas en inglés HAZOP).

La segunda edad de la seguridad se centró en los factores humanos y surgió a partir de los años 70. Estuvo influenciada por el accidente de Three Mile Island que puso de manifiesto las deficiencias de los modelos existentes (Hollnagel, 2014). De este modo, comienzan a surgir estudios basados en el error humano y la ergonomía. Se desarrollaron entonces métodos de análisis de la fiabilidad humana (siglas en inglés HRA) y se incluyeron dentro de las medidas preventivas la selección de personal, la formación o la motivación (Hale & Hovden, 1998). Posteriormente, Reason (1990) propone un modelo de accidentes conocido como modelo del queso suizo. Este modelo, aunque seguía fundamentándose en relaciones causales, era más complejo y consideraba la existencia de los fallos activos, latentes y barreras. Sin embargo, múltiples accidentes ocurridos en este periodo, como el del Challenger, el de Chernobyl o el de los dos Boeing 747 en Tenerife, pusieron de manifiesto la necesidad de buscar nuevos modelos de accidentes que explicaran mejor la realidad (Hollnagel, 2014).

Se pasó entonces a la tercera edad de la seguridad, que llegó en torno a los años 90, cuando el interés se centró en la gestión de sistemas desde un punto de vista organizacional (Hale & Hovden, 1998). Fue entonces cuando cobró mayor importancia la escuela de pensamiento basada en las organizaciones de alta fiabilidad (siglas en inglés HRO). Poco a poco, las organizaciones se habían vuelto cada vez más complejas y surgieron los modelos de accidentes sistémicos para dar respuesta a la nueva realidad de los sistemas socio-técnicos complejos que funcionaban de manera dinámica y no lineal. En estos nuevos modelos, los accidentes son provocados por combinaciones inesperadas de acciones normales. Apareció entonces el modelo de Rasmussen (1997) denominado *Hierarchical Model*, o Modelo Jerárquico, centrado en estos sistemas socio-técnicos complejos. También se desarrollaron nuevos métodos como AcciMAP o *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (CREAM). En este contexto nació la Ingeniería de la Resiliencia que pretendía dar un paso más en la visión existente de la seguridad creando una nueva escuela de pensamiento. Dentro del marco de este nuevo paradigma se desarrollaron el *Systems-Theoretic Accident Modeling and Processes*

(STAMP) y el *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM) que será abordado en esta tesis.

La Figura 1 representa la cronología seguida por estas tres edades de la seguridad de acuerdo con Hollnagel (2010a) quien elaborada dicha figura a partir de la propuesta de Hale y Hovden (1998) para definir las edades de la seguridad, por lo que las fechas de inicio y fin de las diferentes edades pueden variar según el autor consultado (Stadic, 2015; Waterson et al., 2015). Además, si bien es cierto que esta división en tres edades es la más extendida, pueden encontrarse en la bibliografía disponible otros autores (Borys et al., 2009; Harvey et al., 2016) que realizan su propia interpretación y sugieren que podrían distinguirse incluso hasta cinco edades de la seguridad: edad de la tecnología, edad de los factores humanos, edad de los sistemas de gestión, edad de la integración, edad de la cultura y edad de la adaptación.

Así mismo, hay que considerar que todas estas edades se centran en cómo se comprenden los accidentes y qué causas se consideran en su análisis. Sin embargo, el concepto de seguridad se mantiene invariante, ya que se sigue definiendo la seguridad como la ausencia de riesgos o accidentes. La Ingeniería de la Resiliencia pretende incidir en el pensamiento sobre el concepto de seguridad y cambiar su definición para pasar a enfocarla en las cosas que salen bien. Más adelante se abordará detenidamente este nuevo concepto (Hollnagel, 2014).

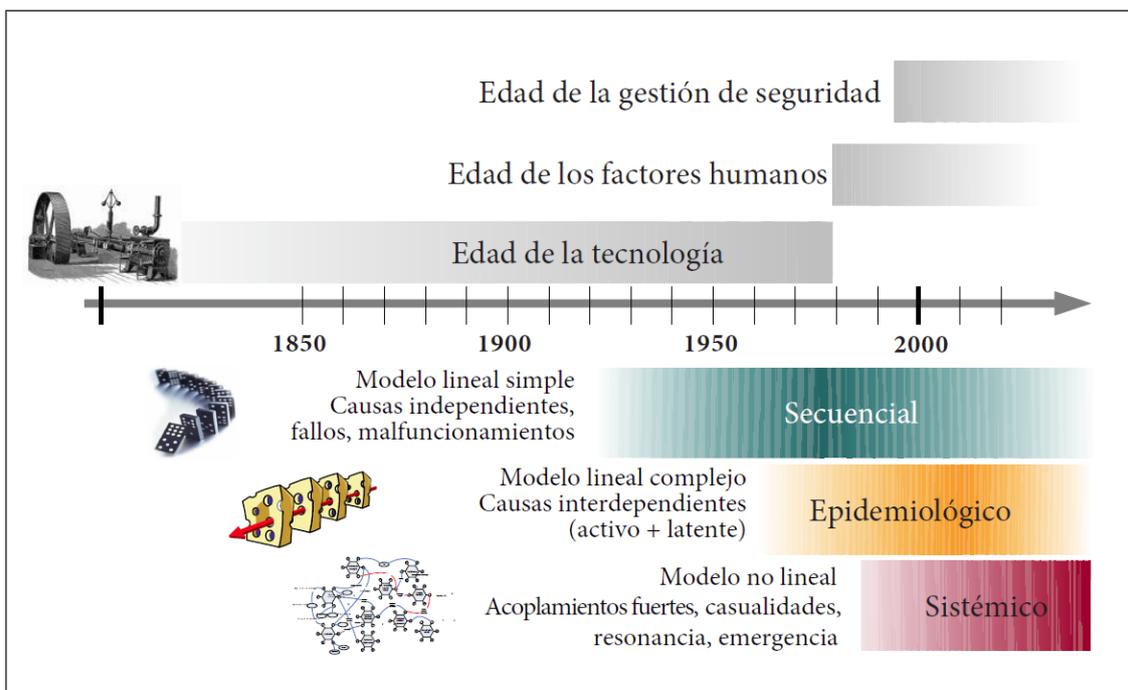


Figura 1. Edades de la Seguridad y Modelos de Accidentes (Hollnagel, 2010a)

Por otro lado, en el recorrido por las edades de la seguridad han ido surgiendo menciones a los modelos de accidentes y a cómo éstos han ido cambiando para adaptarse a la evolución que han sufrido los sistemas y organizaciones en el entorno de trabajo. Esta evolución de los sistemas tiene como consecuencia una evolución en la forma en la que se producen los accidentes, de ahí la necesidad de nuevos modelos que permitan comprender la nueva realidad de los accidentes desde una visión sistémica. En la Figura 1 quedan reflejados, en la parte inferior, los diferentes modelos que han servido para comprender los accidentes a lo largo de las edades de la seguridad. En líneas generales, Hovden et al. (2010) proponen seis razones por las cuales son necesarios los modelos de accidentes:

- *Crean una comprensión común del fenómeno del accidente a través de una representación simplificada compartida de accidentes de la vida real.*
- *Ayudan a estructurar y comunicar problemas de riesgo.*
- *Dan una base para la intersubjetividad, evitando así prejuicios personales con respecto a la causalidad de los accidentes y proporcionando una apertura para una gama más amplia de medidas preventivas.*
- *Guían las investigaciones relacionadas con la recopilación de datos y el análisis de accidentes.*
- *Ayudan a analizar las interrelaciones entre factores y condiciones.*
- *Diferentes modelos de accidentes resaltan diferentes aspectos de procesos, condiciones y causas.*

A continuación, se abordaran los tres grupos principales de modelos de accidentes que resumen las tres edades de la seguridad y se describirán sus principales conceptos. Para ello, se seguirá un orden cronológico comenzando con los modelos lineales simples, pasando a los modelos lineales complejos y finalizando con los modelos complejos no lineales.

A modo de resumen, la Tabla 1 recoge los principios y las diferentes prácticas asociadas a cada uno de estos modelos. Es habitual que todos estos modelos se denominen como modelos de causalidad. No obstante, la Ingeniería de la Resiliencia, en el marco de los modelos sistémicos, elimina las relaciones causales para pasar a considerar que los accidentes emergen de la normalidad. Teniendo en cuenta que el presente trabajo de tesis se enmarca dentro de esta nueva visión, no se ha considerado adecuado titular este apartado como “modelos de causalidad de accidentes” o “modelos causales de

accidentes”, ya que no parece lógico englobar debajo del paraguas de la causalidad algunos modelos sistémicos.

	Principios Básicos	Propósito de investigación	Foco de las recomendaciones
<b>Modelos simples lineales</b>	Causalidad (Individual o múltiples causas).	Encontrar causas específicas y enlaces causa- efecto.	Eliminar causas y enlaces. <b>Mejorar las respuestas.</b>
<b>Modelos complejos lineales</b>	Dependencias ocultas.	Encontrar combinaciones de actos inseguros y condiciones latentes.	Fortalecer barreras y defensas. <b>Mejorar la observación</b> (de indicadores)
<b>Modelos (sistémicos) no lineales</b>	Acoplamientos dinámicos, resonancia funcional.	Encontrar acoplamientos fuertes e interacciones complejas.	Monitorizar y controlar la variabilidad del desempeño. <b>Mejorar la anticipación.</b>

Tabla 1. Los tres grandes modelos de accidentes: principios y propósitos (Hollnagel, 2011a)

Finalmente, antes de iniciar un recorrido más profundo por estos modelos de accidentes cabe puntualizar que estos tres modelos principales no son mutuamente excluyentes, sino que difieren en términos de las situaciones para los que son eficaces.

### 2.2.1 Modelos secuenciales o lineales simples

Los modelos lineales simples también son conocidos como modelos secuenciales, ya que describen el accidente como una sucesión de causas y efectos que ocurren de manera secuencial o lineal. Por consiguiente, es posible ir recorriendo en sentido inverso la cadena lineal de causa-efecto de manera que si se conocen los efectos es posible llegar hasta las causas que los originaron. Para prevenir los accidentes se busca eliminar las causas o cortar los enlaces causa-efecto. Este modelo de accidentes tiene su máximo exponente en la teoría del dominó de Heinrich (1931) que se muestra en la Figura 2.

Heinrich (1931) establece cinco factores representados por cada una de las fichas de dominó: entorno social, fallo humano, acto o condición insegura, accidente y daño o lesión. Efecto que tiene cada uno de estos factores sobre el siguiente es similar al de una ficha de dominó cayendo sobre otra. Por ello, si una ficha de dominó cae, entonces caerán todas las siguientes. Según este planteamiento, se podría evitar el accidente si se elimina uno de estos factores intermedios, ya que así se evitaría que se desencadenara la secuencia de eventos que da lugar a que se produzca el accidente.

Normalmente, se intenta incidir en la eliminación de la tercera ficha, que representa los actos o condiciones inseguras, mediante el uso de barreras. No obstante, en la realidad lo más habitual es que exista más de un factor que contribuye a que se desencadene un accidente.

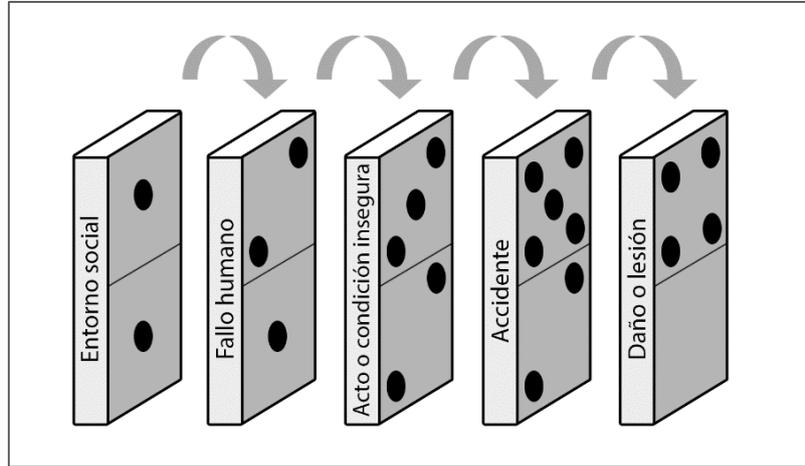


Figura 2. Modelo del Dominó de Heirinch  
(Heinrich, 1931)

Posteriormente, Bird y Germain (1986) propusieron el modelo de causalidad de pérdidas que se muestra en la Figura 3. Este modelo toma el modelo del domino y lo actualiza mediante la introducción de dos nuevos conceptos (Health and Safety Executive, s.f.):

- La influencia de la gestión y el error de la gerencia;
- Las pérdidas, como resultado de un accidente. Éstas pueden ser pérdidas de producción, daños a la propiedad o desperdicio de otros activos, así como lesiones.

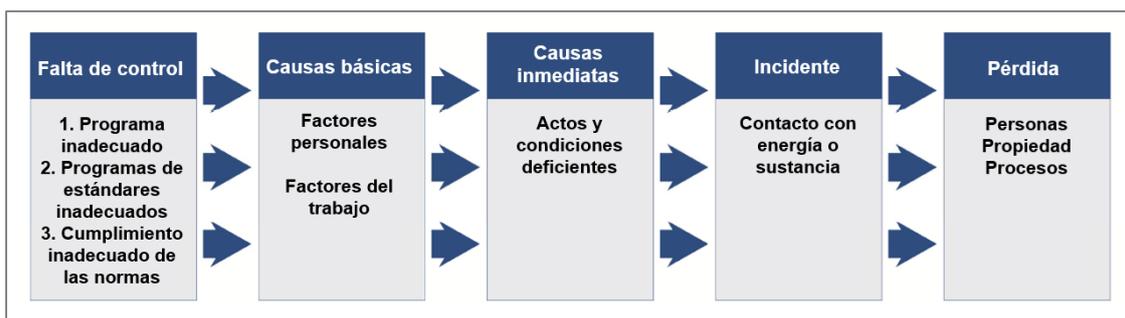


Figura 3. Modelo de Causalidad de Pérdidas de Bird  
(Toft et al., 2012)

Existen otros modelos secuenciales como el modelo de energía (*energy model*) de Haddon (1973) que propone diez estrategias para reducir las pérdidas humanas o de otro tipo; o el modelo de la desviación (*deviation model*) de Kjellén y Larsson (1981) que analiza los accidentes en términos de desviaciones.

### 2.2.2 Modelos epidemiológicos o lineales complejos

Dadas las limitaciones que presentaban los modelos secuenciales para adaptarse a una realidad donde los sistemas eran cada vez más complejos, surge un nuevo tipo de modelos de causalidad. Estos son los modelos lineales complejos o epidemiológicos, donde las relaciones causa-efecto se vuelven complejas y los accidentes son considerados como el resultado de una combinación de fallos activos o actos inseguros y condiciones latentes o condiciones inseguras. Se denominan epidemiológicos en sentido metafórico, ya que se les compara con los patógenos que están latentes en el cuerpo humano y que pueden ser activados por una acción insegura. Así, las insuficiencias de los sistemas o condiciones latentes son las causas base del accidente que se ven activadas por actos inseguros (Arévalo Sarrate, 2016).

En estos modelos continúa existiendo una cadena de eventos secuenciales aunque aparecen múltiples factores causales. Para prevenir los accidentes desde este punto de vista, será necesario encontrar las causas y eliminarlas o fortalecer barreras y defensas que corten la secuencia que conduce al accidente. Destaca especialmente el modelo del queso suizo de Reason (1990) que aparece en la Figura 4.

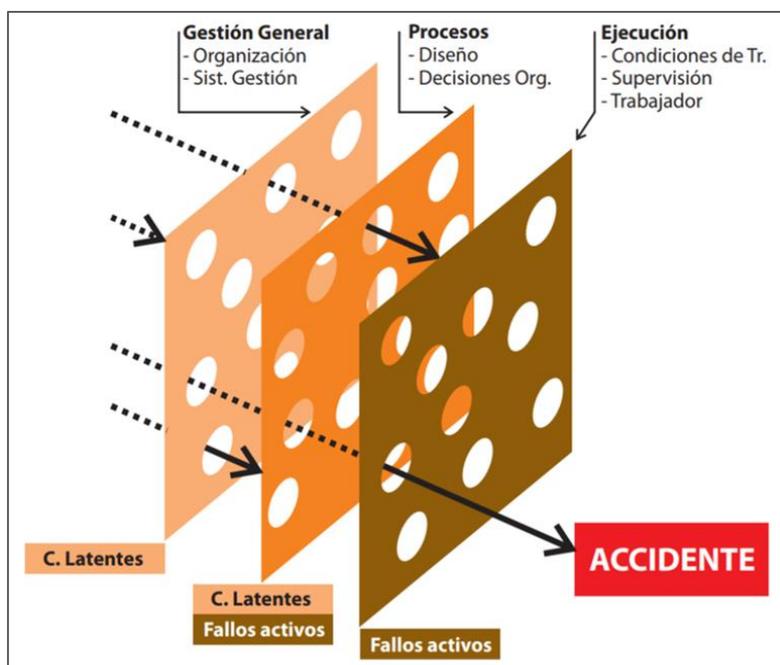


Figura 4. Modelo del Queso Suizo de Reason (Arévalo Sarrate, 2016)

En base a este modelo, Reason (1997) define el accidente como situaciones en las que las condiciones latentes, normalmente derivadas de decisiones de gestión o influencias

culturales, se combinan negativamente con eventos desencadenantes locales, como pueden ser el clima, la localización, etc., y con fallos activos, como errores y/o violaciones de procedimientos, cometidos por individuos o equipos de la organización que ejecutan las operaciones, para producir un accidente.

### **2.2.3 Modelos sistémicos o complejos no lineales**

El medio ambiente de trabajo ha continuado evolucionando y ha cambiado drásticamente de manera que los modelos anteriores ya son no válidos en muchas situaciones. Se observa que algunos accidentes desafían estos modelos (Perrow, 1984). Los sistemas modernos son aún más complejos, interrelacionados y acoplados que antes, por lo que los modelos lineales complejos, que ya se desarrollaron considerando la complejidad de los sistemas, tampoco terminan de adaptarse bien a ellos.

Según Bertalanffy (1976) en estos sistemas *“es necesario estudiar no sólo las partes y procesos aislados, sino también resolver los problemas decisivos hallados en la organización y el orden que los unifican, resultantes de la interacción dinámica de partes y que hacen el diferente comportamiento de éstas cuando se estudian aisladas o dentro de un todo”*. Así, en estos nuevos sistemas los humanos y la tecnología interactúan para alcanzar los resultados deseados, pero estos resultados son fruto de la colaboración mutua y no podrían ser alcanzados de forma aislada por los humanos o por la tecnología. Además hay que considerar que ambos se encuentran integrados en estructuras sociales complejas que, a su vez, están influenciadas por otros factores como son los objetivos organizacionales, las políticas y los elementos culturales, económicos, legales, políticos y ambientales. Así, en estos sistemas socio-técnicos no sirve de nada optimizar la parte técnica o la humana individualmente sino que es necesaria la optimización conjunta de aspectos técnicos y humanos para llegar a resultados satisfactorios. Los modelos sistémicos tienen sus raíces en la teoría de sistemas. La teoría de sistemas incluye los principios, modelos y leyes necesarios para comprender interrelaciones complejas e interdependencias entre los componentes (técnicos, humanos, organizacionales y de gestión) (Qureshi, 2007).

En este contexto, Rasmussen (1997) considera que *“muchos niveles de políticos, gerentes, responsables de seguridad y responsables de planificación están involucrados en el control de la seguridad mediante leyes, reglas e instrucciones que son medios formalizados para el control final de algún proceso físico peligroso. Buscan motivar a los*

trabajadores y operadores, educarlos, guiarlos o restringir su comportamiento mediante el diseño de reglas y equipos, a fin de aumentar la seguridad de su desempeño”. Basándose en esta idea introduce un nuevo marco para la gestión de riesgos que se fundamenta en una estructura jerárquica con diferentes niveles que interactúan de manera dinámica, tal y como muestra la Figura 5.

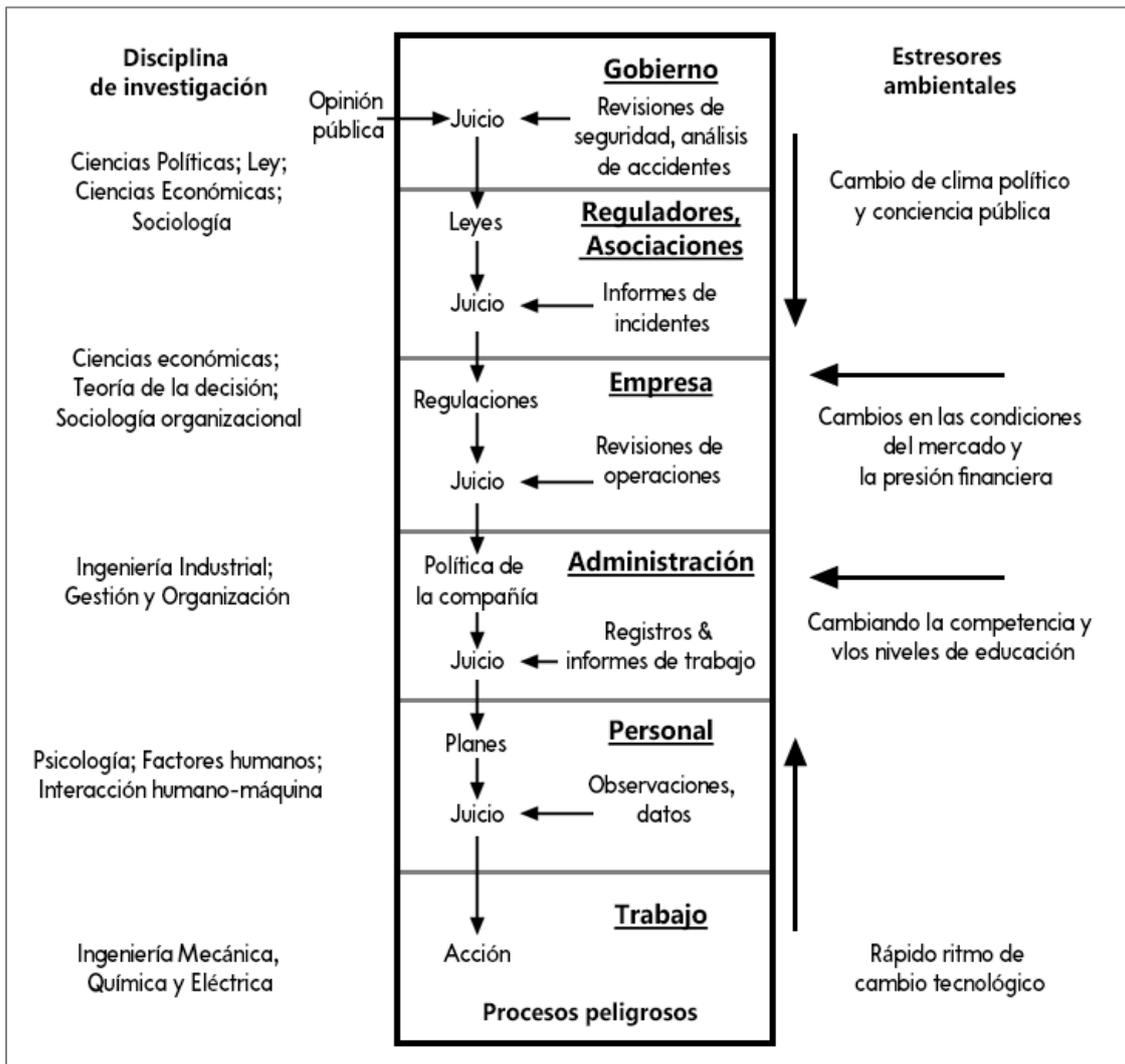


Figura 5. Modelo jerárquico de los sistemas socio-técnicos implicados en la gestión del riesgo (Rasmussen, 1997)

También en el marco de esta concepción sistémica de los modelos surge otro enfoque denominado Ingeniería de Sistemas Cognitivos o *Cognitive Systems Engineering* (siglas en inglés CSE). Este enfoque propone que la mayoría de las tareas manuales en el ámbito del trabajo han sido reemplazadas por tareas cognitivas debido a la introducción de la tecnología. Así, el interés se centra en el análisis del trabajo y del error humano que se enmarca en un contexto de sistemas hombre-máquina. La ingeniería de sistemas cognitivos sugiere que no podemos entender lo que sucede cuando las cosas van mal

sin entender lo que sucede cuando las cosas van bien (Hollnagel & Woods, 2006). Este nuevo enfoque es la antesala de la Ingeniería de la Resiliencia.

Fundamentado en estos principios de la CSE, surge el CREAM. Este modelo describe un conjunto de funciones cognitivas que se pueden utilizar para explicar las acciones erróneas humanas y tiene en cuenta el contexto, tanto interno como externo, que rodea al operador (Hollnagel, 1998).

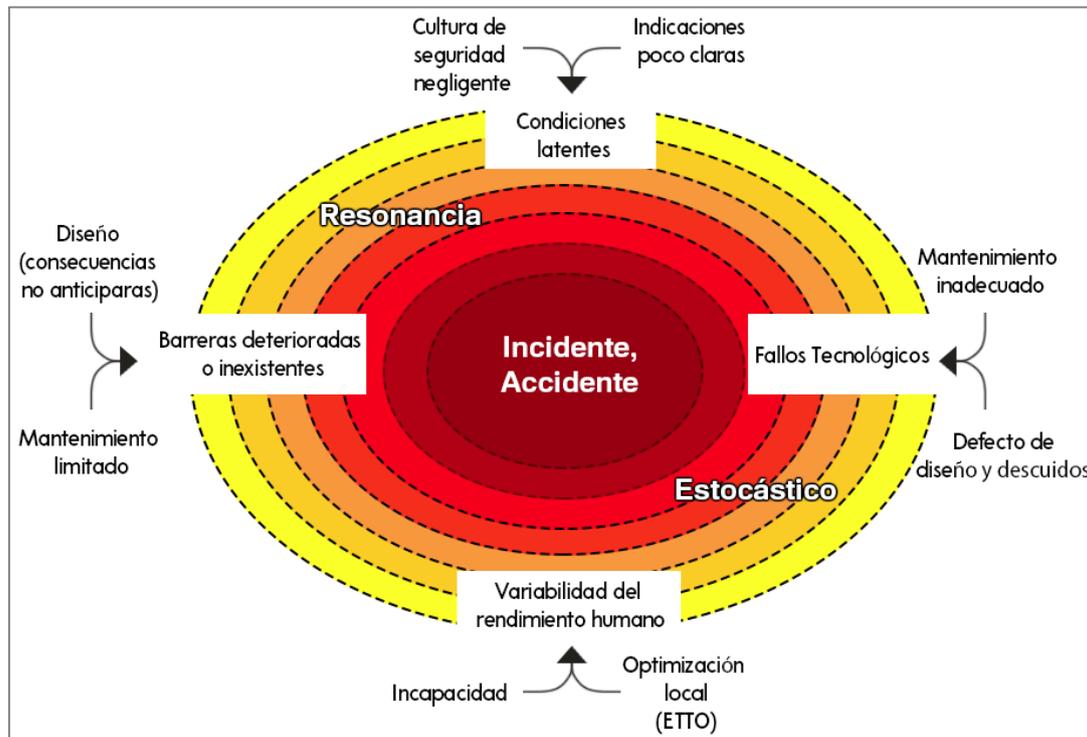


Figura 6. Resonancia funcional como modelo sistémico de accidente (Hollnagel, 2009a)

Posteriormente, nace el nuevo paradigma de la Ingeniería de la Resiliencia que se abordará en el siguiente apartado. En este contexto, se desarrollan el STAMP y el FRAM. Podría decirse que existen algunos conceptos presentes en el CREAM que evocan algunas de las ideas sobre las que se fundamenta el FRAM, también propuesto por Hollnagel (2012a) años después. Este método será aplicado en el desarrollo de la investigación llevada a cabo en la presente tesis, por lo que es descrito detalladamente más adelante. La Figura 6 propuesta por Hollnagel (Hollnagel, 2009a), representa la concepción de la resonancia funcional como modelo de accidentes sistémico sobre el que se sustenta el FRAM. Existen muchos autores que incluyen al FRAM dentro de los nuevos modelos de accidentes sistémicos (Qureshi, 2007). Sin embargo, es importante destacar un matiz relevante sobre el FRAM y es que realmente no es un modelo de accidentes sino un método que te ayuda a modelar la realidad para comprender cómo se realiza el trabajo. En el caso de que el objeto del proceso de modelado sea el análisis

o investigación de un accidente entonces se obtendrá un modelo del accidente, adaptado al caso objeto de estudio (Hollnagel, 2012a). Esta concepción, a priori, resulta muy novedosa porque no constriñe la realidad para intentar encorsetarla en un modelo preconcebido sino que da libertad al experto que aplica el método para adaptar el modelo a la realidad y no al revés. Otro aspecto novedoso del FRAM es que no divide los sistemas en componentes que constituyen partes aisladas que se unen para formar un todo, como hasta ahora proponían algunos modelos sistémicos. El FRAM estudia los sistemas mediante funciones que se llevan a cabo para alcanzar un resultado deseado. En estas funciones pueden intervenir diferentes factores, como los humanos, la tecnología o la propia organización para alcanzar un propósito.

Por otro lado, el STAMP fue propuesto por Levenson (2004) y en él los sistemas socio-técnicos son vistos como sistemas dinámicos que se adaptan continuamente para alcanzar el resultado deseado. La seguridad se estudia como un problema de control. Por tanto, se considera que en los sistemas socio-técnicos la seguridad depende de una estructura de control que debe ser gestionada eficazmente para evitar el accidente. El STAMP presta especial atención al papel que juegan las restricciones en la gestión de la seguridad y considera que cada uno de los niveles que componen un sistema socio-técnico puede ser descrito en términos de niveles de control. Los conceptos básicos en STAMP son restricciones, bucles de control, modelos de procesos y niveles de control (Leveson, 2004).

### **2.3 Un nuevo enfoque de la gestión de la seguridad: Ingeniería de la Resiliencia**

La Ingeniería de la resiliencia es un nuevo paradigma de la gestión de la seguridad que redefine la visión de seguridad para enfocarla en el desempeño diario y las cosas que salen bien. Este cambio de prisma trae consigo una serie de conceptos innovadores que ayudan a entender este nuevo enfoque. Por ello, en este apartado se parte del concepto de resiliencia para poder definir posteriormente la Ingeniería de la Resiliencia. Seguidamente, se explican algunos conceptos claves que conforman la base sobre la que se sustenta la Ingeniería de la Resiliencia, como son *Safety-I* y *Safety-II*, el “trabajo ejecutado” denominado “*work-as-done*”, el “trabajo imaginado” denominado “*work-as-imagined*” o el principio de “Compensación entre Eficiencia y Minuciosidad” denominado “*Efficiency-Thoroughness Trade-Off*”. Para concluir este apartado se presentan el FRAM y el RAG. El primero es un método desarrollado en el marco de la Ingeniería de la

Resiliencia para facilitar la comprensión del trabajo tal y como se desarrolla en la realidad y el segundo es un conjunto de preguntas que permiten evaluar la resiliencia en el desempeño.

### 2.3.1 Concepción de la seguridad: Safety-I y Safety-II

La seguridad tradicionalmente se ha definido como la ausencia de accidentes, incidentes y fallos o como una condición donde el número de accidentes, incidentes y fallos es tan bajo como sea posible. Esta concepción de la seguridad es lo que se conoce como *Safety-I*. Desde su perspectiva la atención se centra en analizar los accidentes, incidentes o fallos mediante relaciones de causalidad. Una vez, encontrado su origen se establecen mecanismos para que no se vuelvan a repetir. Por ello, puede afirmarse que el enfoque empleado al gestionar las cuestiones relacionadas con la seguridad ha sido hasta ahora principalmente reactivo (Hollnagel, 2012b).

En contraposición, los principios de la Ingeniería de la Resiliencia proponen cambiar esta manera de entender la seguridad hacia una nueva perspectiva denominada *Safety-II*. Así, el enfoque reactivo es sustituido por uno proactivo, donde los esfuerzos ya no se concentran en evitar que las cosas vayan mal, sino que ahora el interés es potenciar que las cosas vayan bien.



Figura 7. Relación entre Safety-I y Safety-II  
(Hollnagel, 2014)

Tal y como se muestra en la Figura 7, esto no significa que *Safety-II* se aleje de los resultados adversos, sino que *Safety-II* se preocupa tanto de los resultados adversos como de los resultados exitosos, ya que ambos son fruto de la ejecución diaria. Si se pone el foco de atención en comprender cómo y por qué las cosas salen bien

normalmente y se fortalece el desempeño diario en base a esta comprensión, se estará evitando indirectamente que las cosas vayan mal. *Safety-II* se define como una condición en la que el número de resultados exitosos es lo más alto posible. En este contexto, la seguridad no se entiende como algo que los sistemas tienen sino como algo que los sistemas hacen, es decir, no es una propiedad de los sistemas sino que es una cualidad y dependerá de cómo una organización lleve a cabo una determinada actividad. El interés se centra en comprender el cómo se realizan los trabajos en el día a día y cómo se comporta la variabilidad. Si se logra mantener el desempeño diario dentro de unos límites aceptables se estará consiguiendo que los sistemas sean seguros (Hollnagel, 2014).

	Safety-I	Safety-II
<b>Definición de seguridad</b>	Que el menor número de cosas vayan mal.	Que tantas cosas como sea posible vayan bien.
<b>Principio de gestión de la seguridad</b>	Reactivo, responder cuando algo ocurre o se clasifica como un riesgo inaceptable.	Proactivo, tratando continuamente de anticipar los sucesos que ocurren y controlar/mejorar su variabilidad.
<b>Vista del factor humano en la gestión de la seguridad</b>	Los humanos son vistos predominantemente como una responsabilidad o peligro.	Los humanos son vistos como un recurso necesario para la flexibilidad y resistencia del sistema.
<b>Papel de la variabilidad del rendimiento</b>	Dañina, debe evitarse tanto como sea posible.	Inevitable pero también útil. Debe ser monitoreado y administrado.
<b>Investigación del accidente</b>	Los accidentes son causados por fallos y mal funcionamiento. El propósito de la investigación es identificar las causas.	Las cosas básicamente suceden de la misma manera, independientemente del resultado. El objetivo de una investigación es comprender cómo funcionan las cosas normalmente como base para explicar cómo las cosas a veces salen mal.
<b>Evaluación de riesgos</b>	Los accidentes son causados por fallos y mal funcionamiento. El objetivo de la investigación es identificar causas y factores contribuyentes.	Comprender las condiciones en las que la variabilidad del desempeño puede ser difícil o imposible de supervisar y controlar.

Tabla 2. Comparación entre Safety-I y Safety-II en relación a las prácticas de gestión. (Stadic, 2015)

No obstante, no hay que olvidar que el concepto de “accidente cero” es una utopía y que los “accidentes son normales” en los sistemas socio-técnicos complejos (Perrow, 1984). Por ello, los sistemas deben estar preparados cuando emerjan los fallos o desviaciones para corregirlos y minimizar sus efectos. La Ingeniería de la Resiliencia propone que se trabaje para desarrollar organizaciones resilientes capaces de lidiar con la variabilidad que existe en los sistemas actuales y alcanzar el éxito. En la Tabla 2 se resumen las principales prácticas en la gestión de *Safety-I* y *Safety-II* estableciendo una comparación.

En conclusión, la evolución del concepto de seguridad implica no entender la seguridad como la ausencia de riesgos inaceptables, para entender la seguridad como la capacidad de lograr el éxito, dotándola de un carácter proactivo en vez de reactivo.

### **2.3.2 Concepto de Resiliencia**

Los orígenes de la palabra resiliencia se encuentran en el latín concretamente en la palabra “resilio” que puede traducirse como retroceder repentinamente o saltar para atrás (Montero Martínez, 2011). El término resiliencia se ha empleado en el ámbito de la física en relación a la resistencia de los materiales y su capacidad de recuperar su forma original tras una deformación. También se ha adoptado este término en las ciencias sociales para caracterizar a los individuos que, a pesar de haber sufrido condiciones de adversidad, se desarrollan psicológicamente sanos y exitosos. Actualmente, el diccionario de la Real Academia Española proporciona dos definiciones para el término de resiliencia:

1. f. *Capacidad de adaptación de un ser vivo frente a un agente perturbador o un estado o situación adversos.*
2. f. *Capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido.*

No obstante, el concepto de resiliencia cada vez es más popular y se emplea en multitud de ámbitos como la psicología, la ecología, las catástrofes y emergencias, las organizaciones humanas, la gestión de la seguridad, etc. Según Woods (2015), el concepto de resiliencia ha ido evolucionando de forma que en la actualidad se podría decir que existen diferentes maneras de emplear la palabra resiliencia para referirse a un sistema. Así, este autor establece cuatro conceptos de resiliencia que fueron resumidos por del siguiente modo por Rubio-Romero et al. (2018):

- 1) **Resiliencia como rebote.** Entendiendo a la resiliencia como capacidad para volver al equilibrio tras una disrupciones específicas no considerada dentro del funcionamiento normal.
- 2) **Resiliencia como robustez.** Entendiendo la resiliencia como la capacidad de absorber perturbaciones.
- 3) **Resiliencia como el concepto opuesto a fragilidad.** Entendiendo la resiliencia como la capacidad de adaptarse para hacer frente a los cambios y las sorpresas.

- 4) **Resiliencia como adaptabilidad sostenida.** Entendiendo la resiliencia como la capacidad de adaptarse de manera sostenida en el tiempo, es decir, ser capaz de adaptarse cualquier cambio no solo a algunos en concreto.

En el marco de la Ingeniería de la Resiliencia, Hollnagel (2013) define la resiliencia como "*la capacidad intrínseca de un sistema para ajustar su funcionamiento antes, durante o después de los cambios y perturbaciones, de modo que pueda sostener las operaciones requeridas en condiciones tanto esperadas como inesperadas*". En esta definición, se debe tener en cuenta que la resiliencia no es una propiedad de los sistemas sino más bien una característica de cómo los sistemas llevan a cabo su desempeño diario. No es algo que los sistemas tienen, sino que es algo que los sistemas hacen (Hollnagel et al., 2006). Por ello, la resiliencia es un proceso dinámico más que un estado estático de un sistema. En este sentido, se establece que el desempeño de un sistema es resiliente si puede funcionar como es requerido tanto bajo condiciones esperadas como inesperadas (cambios/perturbaciones/oportunidades). Las habilidades o capacidades que una organización debe tener para alcanzar un desempeño resiliente se denominan potenciales y son cuatro: responder, monitorizar, aprender y anticiparse. Un desempeño resiliente requiere que una organización tenga los potenciales para la resiliencia y que estos potenciales sean continuamente desarrollados, mantenidos y mejorados, dado que la resiliencia es una manifestación de estos potenciales (Hollnagel, 2017).

### 2.3.3 Ingeniería de la Resiliencia

Hovden et al. (2010) realizan un breve, pero muy interesante, resumen de las características esenciales de las principales escuelas que han abordado los aspectos organizativos de la seguridad en el contexto de los sistemas complejos, destacando tres escuelas:

- *La Teoría de Accidentes Normales o Normal Accident Theory (NAT).*  
Perrow (1984) propone que los accidentes son normales e inevitables en algunos sistemas donde incidentes simples y triviales pueden tener consecuencias impredecibles y catastróficas. Se clasifican los sistemas socio-técnicos mediante su grado de interacción y sus acoplamientos. Si el sistema está fuertemente acoplado y es muy interactivo surgen estos accidentes impredecibles. Como solución se propone reducir la complejidad interactiva y el estrecho acoplamiento en el diseño de los lugares de trabajo.

- *La teoría de las Organizaciones de Alta Fiabilidad o High Reliability Organisation (HRO).*

Entiende la seguridad cómo un evento no dinámico. Se fundamenta en el estudio de organizaciones donde se emplean tecnologías complejas y se alcanza el éxito. Sus principales características pueden resumirse en tres: capacitación continua; uso de la redundancia; y numerosas fuentes de información directa. Aunque se produzcan eventos inesperados las HRO rara vez fallan. Esto no tiene por qué estar enfrentado con la NAT porque la HRO se centra en el estudio de casos concretos que no cumplen la definición de sistemas muy acoplados e interactivos (Marais et al., 2004).

- *Ingeniería de la Resiliencia o Resilience Engineering*

Se centra en la capacidad de las organizaciones para hacer frente a lo imprevisto más que en el estudio de fallos y errores y la descomposición de los sistemas en elementos. Se persigue desarrollar herramientas y procesos que ayuden a las organizaciones a incrementar su capacidad de funcionar de manera robusta y flexible. Las principales ideas sobre las que se fundamenta esta teoría son: el aumento de la complejidad de los sistemas los convierte en intratables y poco especificados; las personas son un activo de las organizaciones porque son capaces de adaptarse a las condiciones de desempeño para satisfacer la demanda detectando y corrigiendo las cosas que van mal, incluso las inesperadas; y los sistemas alcanzan un equilibrio entre eficiencia y minuciosidad para satisfacer la demanda. Así, los sistemas son entendidos como un todo que se ajusta y varía dinámicamente. La atención se centra en el lado proactivo de la gestión de la seguridad operacional y la necesidad de realizar los ajustes adecuados en términos de anticipación, actualización de los modelos de riesgo y uso efectivo de los recursos.

En base a todo ello, la Ingeniería de la Resiliencia es un paradigma de gestión de la seguridad que se centra en "*cómo ayudar a las personas a lidiar con la complejidad bajo presión para lograr el éxito*" (Woods & Hollnagel, 2006) y podría definirse como la capacidad intrínseca de una organización (o sistema) para ajustar su funcionamiento antes o después de los cambios y las perturbaciones para continuar trabajando frente a tensiones continuas o contratiempos importantes (Hollnagel et al., 2006).

La Ingeniería de la Resiliencia nace a principios del siglo XXI, concretamente la primera vez que se habló de ella fue en 2004 en un congreso celebrado en Suecia (Hollnagel et al., 2006). Posteriormente, destaca la publicación del libro “*Resilience Engineering: Concepts and Precepts*” en 2006, cuyos autores son Hollnagel, Woods y Levenson. Otros autores han contribuido también al desarrollo de la Ingeniería de la Resiliencia como Sidney Dekker que ha desarrollado una nueva manera de entender el error humano (Dekker, 2017).

Hollnagel et al. (2006) establece que la Ingeniería de la Resiliencia se fundamenta en cuatro premisas:

1. Siempre se especifican o describen las condiciones de actuación de manera insuficiente. Por ello, las organizaciones y los trabajadores se adaptan realizando ajustes enfocados a casar los recursos disponibles y el resultado deseado. Además estos ajustes son aproximados debido a que los recursos y el tiempo son limitados.
2. La mayoría de los eventos adversos que se dan en los sistemas socio-técnicos complejos no pueden atribuirse a fallos de componentes aislados, sino que se deben a combinaciones inesperadas fruto de la variabilidad en la ejecución.
3. La seguridad no puede limitarse a una seguridad de carácter reactivo centrada en probabilidades y en el análisis de errores, incidentes y accidentes. Es necesario que la gestión de la seguridad sea proactiva y reactiva.
4. La seguridad no puede aislarse de la productividad. Ambas se constriñen mutuamente y es necesario encontrar un punto de equilibrio entre ellas porque son interdependientes.

Saurin et al. (2008) sugieren que las principales ideas claves de la Ingeniería de la Resiliencia son: el incremento de la flexibilidad, el aprendizaje tanto de incidentes como del trabajo normal y la atención al estado del sistema en todo momento.

Le Coze (2013) analiza la génesis de la Ingeniería de la Resiliencia y concluye pueden definirse unas principios básicos que constituyen la base sobre la que se sustenta la Ingeniería de la Resiliencia:

- *Primero, variabilidad (en lugar de errores).*
- *Segundo, estudio de las operaciones normales (en lugar del estudio de incidentes de accidentes).*
- *En tercer lugar, el control y el tipo contextual de modelos (en lugar de los estructurales / normativos).*

- Un cuarto es el requisito de "ingeniería" y el historial de evaluación de riesgos.

Este nuevo enfoque rompe con la forma tradicional de entender la seguridad (*Safety-I*) y redefine el concepto de seguridad (*Safety-II*). El nuevo paradigma de la Ingeniería de la Resiliencia hace hincapié en que cuando las cosas van bien en circunstancias difíciles, se debe principalmente a la capacidad de los trabajadores para adaptarse, es decir, su capacidad para reconocer y absorber los cambios y eventos imprevistos. Para ello, las personas que forman parte de los sistemas socio-técnicos complejos deben realizar continuamente ajustes sobre lo que se ha ideado para poder alcanzar el éxito en la ejecución diaria. Sin embargo, en algunas ocasiones, aunque sean pocas, se realiza un análisis incompleto de las condiciones actuales de desempeño que da lugar a que los accidentes emerjan (Hollnagel et al., 2006). Los procedimientos e instrucciones son incompletos debido a la complejidad y por ello, los ajustes son una condición *sine qua non*. Por ello, la variabilidad debe ser vista como algo necesario para el funcionamiento de los sistemas y no debe ser constreñida, simplemente debe ser comprendida y amortiguada (Rubio-Romero et al., 2019). Todas estas ideas se engloban en dos aspectos claves para la Ingeniería de la Resiliencia: los ajustes y la variabilidad.

El primero de ellos se basa en lo que se conoce como el principio de "Compromiso entre Eficiencia-Minuciosidad" denominado en inglés "*Efficiency-Thoroughness Trade-Off*" (ETTO). Los trabajadores en los sistemas socio-técnicos complejos deben realizar constantemente un balance entre minuciosidad y eficiencia logrando un equilibrio que permita alcanzar un resultado suficientemente aceptable. En este sentido, Hollnagel (2009b) destaca que "*es necesario ser eficiente porque los recursos son limitados y en particular porque el tiempo es limitado*", pero por otro lado, "*también es necesario ser minucioso tanto para asegurarnos de que hacemos las cosas de la manera correcta, como para que podamos lograr lo que queremos y evitar consecuencias adversas*". Este principio de ETTO, lo aplica constantemente el ser humano en su vida diaria, no solo en su entorno de trabajo. Sin embargo, ciñéndonos al entorno laboral, algunas de las razones que llevan a los trabajadores a realizar este balance para encontrar un equilibrio entre las condiciones de desempeño y un resultado aceptable son (Hollnagel, 2009b):

- Los recursos y el tiempo disponibles son limitados
- Tendencia implícita de los seres humanos a realizar el mínimo esfuerzo posible para alcanzar un resultado deseado.
- En el desarrollo del trabajo existe la necesidad de preservar una reserva de tiempo y recursos para poder hacer frente a imprevistos.

- Presiones derivadas del resto de personal de la empresa, desde superiores hasta compañeros o incluso subordinados para que el trabajo se realice en un tiempo concreto y de una manera específica.
- Presiones derivadas de la propia organización en su conjunto, destacando el enfrentamiento que surge entre las premisas oficiales, como ejecutar los trabajos de forma segura, y la práctica real, como ejecutar los trabajos en un plazo fijado.
- Prioridades individuales, hábitos de trabajo, ambición...

Por todo ello, para poder alcanzar este equilibrio es necesario que los trabajadores puedan realizar ajustes y tengan cierto margen de variabilidad o maniobra. Una consecuencia de que las condiciones de desempeño no sean casi nunca las ideales es que el trabajo realizado no coincide con el trabajo ideado. Por eso, para la Ingeniería de la Resiliencia es importante diferenciar entre lo que se denomina el “*work-as-done*” o “trabajo realizado”, es decir, la forma habitual de llevar a cabo el trabajo en la realidad del día a día; y el “*work-as-imagined*” o “trabajo ideado”, es decir, la forma previamente ideada según la cual el trabajo debería realizarse. Esta forma “ideal” de realizar el trabajo normalmente es diseñada por trabajadores de la organización o personas que no son los que ejecutan las tareas en sí, como por ejemplo directivos, gerentes, ingenieros, consultores, responsables en distintos niveles jerárquicos... Este trabajo ideado o “ideal” suele reflejarse en procedimientos, instrucciones y normas. Sin embargo, si se observa a los trabajadores cuando llevan a cabo su trabajo, es muy complicado que éstos se ejecuten exactamente y de forma precisa los procedimientos prefijados (Clay-Williams et al., 2015).

En la realidad diaria se realizan variaciones sobre los procedimientos porque las condiciones de desempeño y el entorno en general es cambiante, e incluso a veces imprevisible. Las condiciones de ejecución casi nunca son ideales, lo que implica que para lograr el éxito en el trabajado diario hay que realizar ajustes, que son habituales más que excepcionales (ETTO). Por ello, puede decirse que el motivo de la eficiencia del trabajo humano es su capacidad de anticipación, de adaptación y su flexibilidad. Por eso la variabilidad del rendimiento aparece como otro aspecto clave. Esta variabilidad no debe ser vista como tradicionalmente se ha hecho, es decir con una connotación negativa y un deseo expreso de eliminarla o reducirla al máximo mediante procedimientos. Más bien, debe ser vista con una connotación positiva, ya que permite a los trabajadores realizar ajustes y por tanto es la base del éxito. Por eso, es necesario comprenderla para poder monitorizarla adecuadamente y así conseguir controlarla y mantenerla dentro de los límites deseados (Rubio-Romero et al., 2019).

Hollnagel (2012b) explica como Reason (1979) entiende que error y éxito son dos lados de la misma moneda, y que una adecuada teoría del error necesariamente necesita una mejor comprensión del éxito. Sin embargo, él propone lo opuesto, es decir, que necesitamos comprender el éxito para poder comprender el error.

Para llegar a esta comprensión del éxito, será necesario entender cómo se alcanza éste mediante el desempeño diario. Para ello, el punto de partida será el entender el “trabajo ejecutado” o “*work-as-done*”. La Ingeniería de la Resiliencia propone el método orientado a este objetivo que se presenta en el siguiente apartado.

Hasta ahora la mayor parte de la investigación desarrollada sobre Ingeniería de la Resiliencia se ha centrado mayoritariamente en dos sentidos: el marco teórico y su aplicación sectores de alto riesgo y complejidad como la aviación, incluido el control aéreo, salud, industria química y petroquímica o centrales nucleares, ferrocarriles. En el sector de la construcción son escasos los trabajos encontrados en esta materia y los existentes suelen estar enfocados en el marco teórico y en el desarrollo de herramientas para la gestión de la seguridad (Righi et al., 2015).

### **2.3.4 Modelado de sistemas socio-técnicos complejos: Functional Resonance Analysis Method**

En el contexto de modelos complejos no lineales, los métodos tradicionales de evaluación de riesgos, como ABC, binario, Fine, HAZOP, AMFE, AMFEC, el Árbol de sucesos u otras muchas que quedan recogidas en la obra de Rubio-Romero (2004), pueden ser adecuadas para accidentes que no requieren explicaciones muy elaboradas. Una estructura fija como un árbol no ayuda a representar la concurrencia de posibles eventos ni de acoplamientos dinámicos y efectos como la resonancia. Son incapaces de tener en cuenta como un sistema lentamente o de forma abrupta, puede llegar a ser inestable. Por este motivo, en el marco de los modelos sistémicos o complejos no lineales y de la Ingeniería de la Resiliencia, Hollnagel et al. (2012a) propone un nuevo método cualitativo que permite poder tener en cuenta estas circunstancias, es el *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM). Este método considera que los sistemas son dinámicos, y que pueden pasar de ser estables a inestables, tanto de forma lenta como de golpe, siendo imposible en muchas ocasiones predecir, programar, o anticiparse a los ajustes que serán necesarios realizar. Como hipótesis se parte de que es prácticamente imposible diseñar teniendo en cuenta todo pequeño detalle o toda situación que puede "emerger". Todo el que diseña instrucciones ha tenido

esta experiencia. Así que la esencia es comprender cuando un sistema puede perder su estabilidad dinámica y llegar a ser inestable.

El FRAM asume que los accidentes son el resultado de combinaciones inesperadas (resonancia) de la variabilidad normal, acoplamientos entre funciones que resuenan, pero que tampoco son aleatorias, aunque no se pueda atribuir a una simple combinación lineal de causas enlazadas. La seguridad se consigue entonces monitorizando el sistema y amortiguando la variabilidad entre las funciones del sistema. Por supuesto requiere la habilidad de anticiparse a futuros eventos de forma continua. Debido al medio ambiente, es preciso buscar un compromiso entre lo minucioso y lo eficiente (principio de ETTO) (Hollnagel et al., 2006).

Así, el FRAM es una herramienta para ayudar a gestionar la variabilidad evitando que el sistema se descontrole, es decir, amortiguando la variabilidad. Hay que tener claro que el FRAM no pretende eliminar la variabilidad del sistema, ya que, de acuerdo con la Ingeniería de la Resiliencia, la variabilidad es considerada necesaria para alcanzar el éxito. Por tanto, las medidas que se deriven del análisis FRAM estarán enfocadas a gestionar y manejar adecuadamente la variabilidad en el desempeño para evitar que se produzca la resonancia funcional.

El FRAM caracteriza los sistemas complejos basándose en las funciones que se desempeñan, no en cómo se estructura el sistema. Los límites del sistema son definidos a través de la descripción de las funciones. Como paso previo para poder aplicar correctamente este nuevo método es importante comprender adecuadamente los principios sobre los que se fundamenta el FRAM, ya que de otro modo los resultados no serán los adecuados. Por tanto, hay que pasar del pensamiento basado en *Safety-I* hacia la nueva visión de la seguridad propuesta por *Safety-II*. Concretamente, el FRAM se fundamenta sobre cuatro principios básicos (Hollnagel, 2012a):

- ***El principio de equivalencia***

Este principio hace referencia a que los éxitos y los fallos tienen el mismo origen, por lo que son equivalentes. Ambos proceden del desempeño diario que hace posible que las cosas salgan bien, aunque a veces salen mal. Pero no existe un mecanismo especial para que esto ocurra. Simplemente la variabilidad que existe durante el desempeño diario no es contralada adecuadamente y supera los límites de la variabilidad o límites de ejecución del sistema dando lugar al fallo. Éxitos y fracasos son dos caras de una misma moneda.

- **El principio de los ajustes aproximados**

Este principio está directamente relacionado con el principio de ETTO. Los trabajadores en su desempeño diario realizan ajustes que son aproximados más que precisos, ya que los recursos como el tiempo, la información o la mano de obra son limitados. Por eso, una respuesta o un resultado suficientemente bueno se considera aceptable, raramente los resultados son perfectos o totalmente precisos. Estos ajustes aproximados explican por qué generalmente las cosas van bien, aunque en ocasiones van mal. La propia variabilidad en el desempeño de los sistemas socio-técnicos se debe principalmente a estos ajustes aproximados.

- **El principio de emergencia**

Este principio establece que de la variabilidad del desempeño diario y de los ajustes aproximados emergen tanto resultados aceptables como inaceptables que no pueden ser explicados mediante relaciones de causalidad. La variabilidad de diferentes funciones del sistema se combina de forma inesperada dando lugar a resultados que no son predecibles y que en ocasiones son desproporcionados. Los resultados adversos surgen o emergen del propio funcionamiento del sistema.

- **El principio de resonancia**

El principio de resonancia pone de manifiesto que las funciones que componen un sistema no están aisladas unas de otras, sino que se encuentran conectadas y acopladas entre sí. Por ello, es posible que la variabilidad que emerge del desempeño diario de las funciones se amplifique desproporcionada e inesperadamente en un momento determinado dando lugar al fenómeno de la resonancia funcional y conduciendo a una respuesta inesperada e imprevista del sistema, que puede ser tanto positiva como negativa. Esta resonancia no es totalmente aleatoria sino que está asociada la variabilidad.

Hay que destacar que el FRAM es un método y no un modelo. Esto significa que el FRAM es un método que nos permite modelar un sistema, es decir, obtener un modelo de un sistema para entender cómo funciona. El FRAM no es como los métodos tradicionales de análisis de la seguridad que se basan en un modelo prefijado de cómo ocurren los accidentes. El FRAM no se ciñe a ningún modelo sino que pretende adaptarse al sistema y proporcionar un modelo de cada sistema evitando

condicionamientos, ideas prefijadas y encorsetamientos. No hay que casar un modelo con la realidad sino al revés entender la realidad para crear un modelo que la represente (Hollnagel, 2012a). De este modo, al aplicar el método FRAM inicialmente se crea el modelo, seguidamente, se crean ejemplificaciones denominadas instancias que permiten analizar la variabilidad en el desempeño del sistema y, finalmente, se proponen medidas basadas en los resultados del análisis del modelo.

La aplicación del FRAM a la construcción de estructuras en edificios ha sido una de las actividades principales abordadas en la presente investigación, llegando a ser uno de los ejes centrales entorno a los que se articula este trabajo de tesis. Por este motivo, inicialmente se procedió a realizar una revisión de estado del arte en relación al método FRAM. Para ello, se consultaron las principales bases de datos de publicaciones de carácter científico como son Web of Knowledge, ScienceDirect, Scopus e IEEE Xplore.

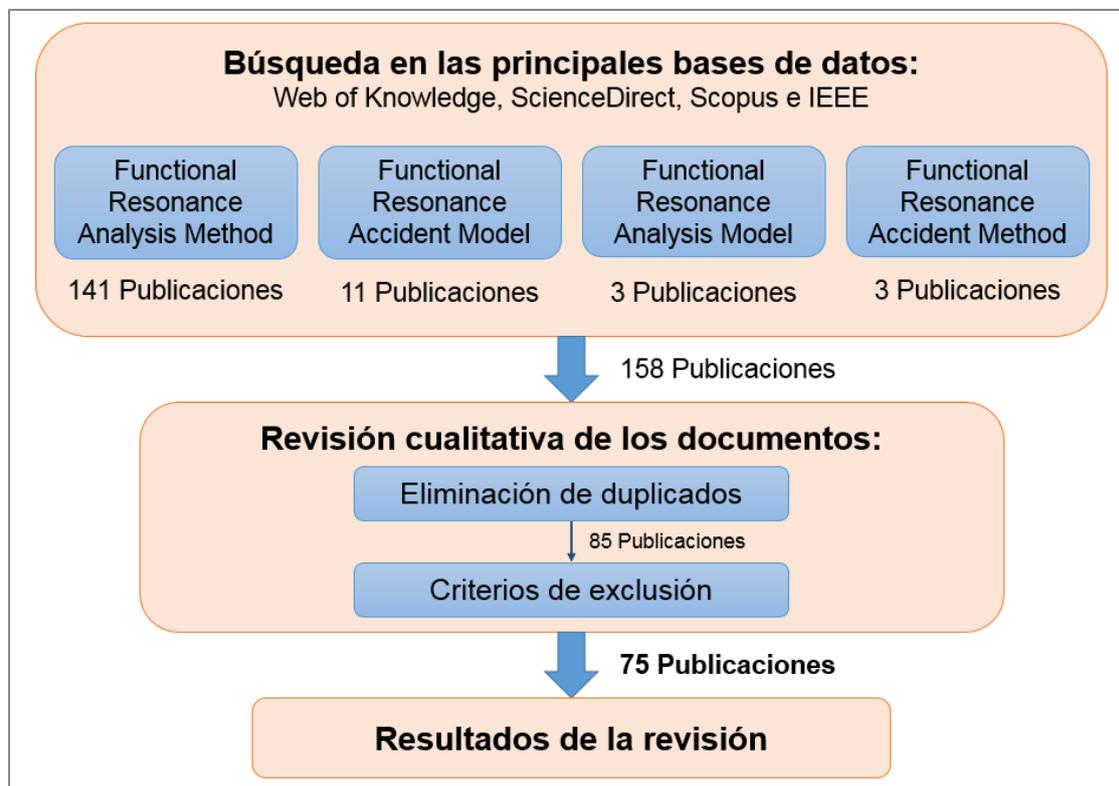


Figura 8. Proceso de revisión sistemática de la literatura sobre FRAM (Elaboración propia)

Como campos de búsqueda en estas bases de datos se emplearon el título, el resumen y las palabras clave de las publicaciones indexadas en ellas. En cuanto a los términos de búsqueda, inicialmente se empleó una única cadena de palabras “*Functional Resonance Analysis Method*”. Sin embargo, durante el proceso de revisión se detectó que existían algunas publicaciones que denominaban al FRAM empleando diferente palabras para componer el acrónimo. Probablemente el motivo sea que antes de que

Hollnagel presentara de forma detallada el método FRAM (Hollnagel, 2012a), ya existían alusiones a dicho método en las cuales el FRAM era denominado como “*Functional Resonance Accident Model*” (Hollnagel, 2004). Por ello, los términos de búsqueda se ampliaron y finalmente se usaron cuatro cadenas de palabras como términos de búsqueda que están reflejadas en la Figura 8. En dicha figura se recoge el proceso de revisión desarrollado, así como las publicaciones resultantes en cada paso. En dicha revisión de la literatura sobre FRAM los criterios de inclusión y exclusión empleados están recogidos en la Tabla 3.

<b>Criterios aplicados en la revisión de la literatura sobre FRAM</b>	
<b>Inclusión</b>	<b>Exclusión</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Publicaciones que aplicaban el FRAM a una actividad o caso de estudio.</li><li>• Publicaciones que proponían un nuevo enfoque del FRAM combinándolo con otros métodos cualitativos o cuantitativos.</li><li>• Publicaciones que proponían nuevos métodos o herramientas basadas en el FRAM.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Publicaciones que no estaban escritas en español o en inglés.</li><li>• Publicaciones que simplemente mencionaban el FRAM como parte de una revisión o análisis de otras cuestiones relacionadas.</li><li>• Publicaciones que mencionaban el FRAM por sus posibilidades de aplicación en algún ámbito pero no profundizaban en su aplicación.</li></ul>

Tabla 3. Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la revisión de la literatura sobre FRAM (Elaboración propia)

Finalmente, se obtuvieron un total de 75 publicaciones que han sido incluidas en el Anexo A. Tal y como se observa en la Figura 9, existe una tendencia creciente en las publicaciones sobre FRAM analizadas desde 2012 hasta 2017. Posiblemente este incremento de publicaciones se deba a que en 2012 Hollnagel publicó un libro donde presenta el FRAM describiendo detalladamente el método e incluyendo diferentes ejemplos de aplicación (Hollnagel, 2012a). En cuanto al número de publicaciones en 2018 y 2019 solamente se han incluidos los documentos disponibles hasta octubre de 2018, por que los valores recogidos en la figura no son representativos del año 2018 completo y menos aún del 2019.

En la Figura 10 se presentan los documentos analizados según el tipo de publicación. En total se encontraron 45 artículos en revistas, 25 publicaciones en congreso, 4 capítulos de libro y 1 libro. Por lo que la publicación predominante fueron los artículos en revistas seguidos de las publicaciones en congresos.

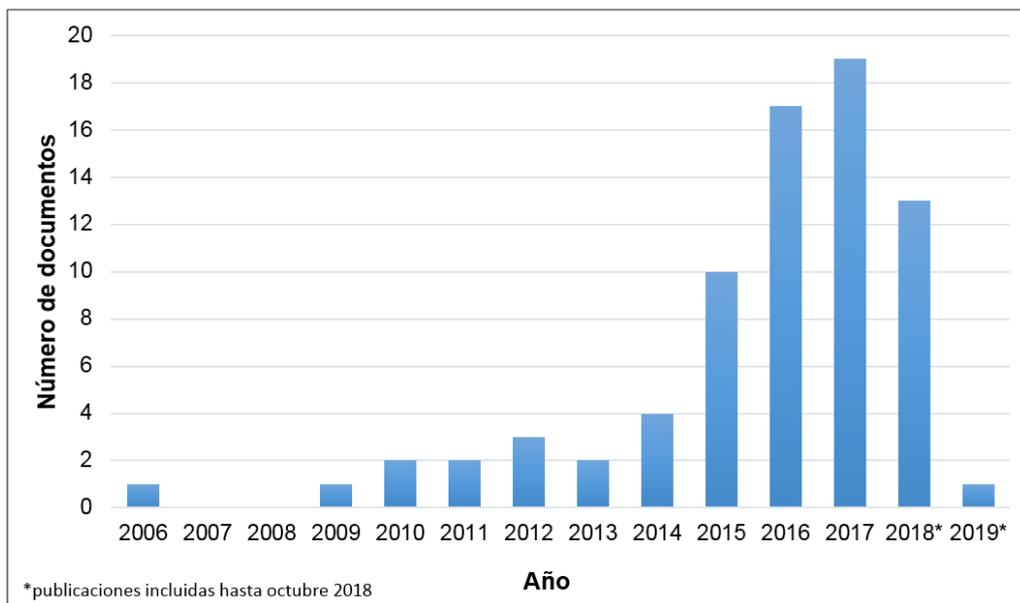


Figura 9. Distribución de documentos sobre FRAM por año (Elaboración propia)

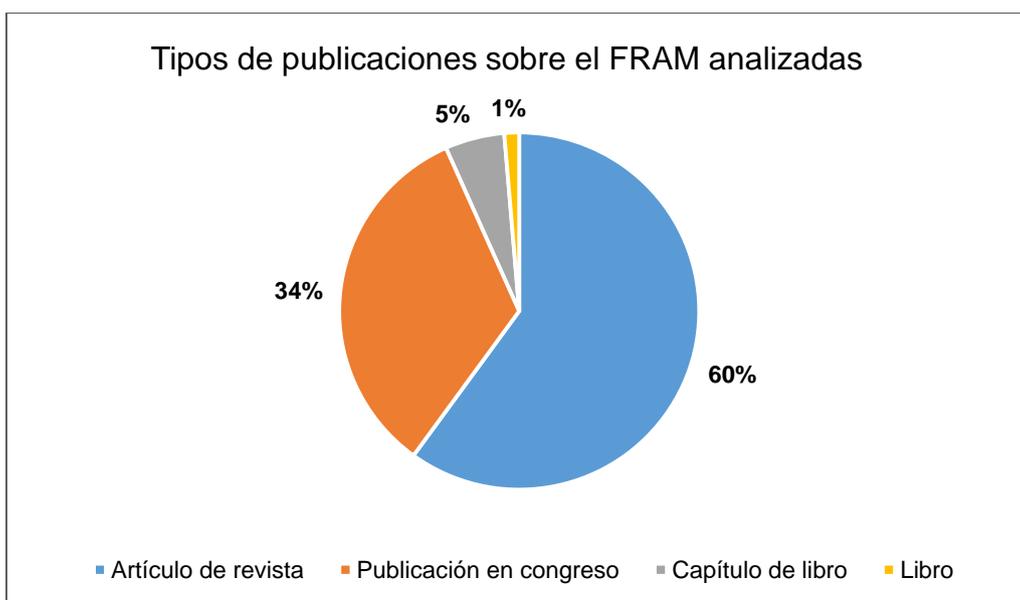


Figura 10. Distribución de documentos sobre FRAM por tipo de publicación (Elaboración propia)

El FRAM ha sido ampliamente aplicado a la asistencia sanitaria y la gestión del tráfico aéreo aunque también ha sido empleado en muchos otros sectores como el marítimo, manufacturero, ferroviario, nuclear, emergencias, construcción, petrolero... tanto para el análisis de accidentes como para evaluar riesgos y redefinir o diseñar directrices y procedimientos. También existen investigaciones centradas en combinar el FRAM con otras metodologías, en su mayoría cuantitativas o semicuantitativas. En general, se puede establecer que las mejoras del FRAM propuestas tienen como objetivo facilitar su aplicación práctica con dos propósitos. Algunos de estos enfoques respaldan el

análisis de todas las vías críticas de propagación de la variabilidad entre funciones que podrían conducir a la aparición de fallos, incidentes o accidentes (Bellini et al., 2017; Duan et al., 2015; Hirose et al., 2016; Patriarca et al., 2017b; Tian et al., 2016; Yang et al., 2017; Zheng et al., 2016; Zheng & Tian, 2015). Otros enfoques pretenden ayudar a comprender los vínculos críticos mientras se relacionan con los diferentes agentes o actores que intervienen en los diferentes niveles jerárquicos del sistema (Bellini et al., 2016; Patriarca et al., 2017a; Patriarca & Bergström, 2017; Rosa et al., 2017, 2015). Sin embargo, destaca que estos autores coinciden en preservar la base teórica de FRAM para modelar sistemas complejos. Así mismo, también se encontraron investigaciones que proponían nuevos métodos o herramientas basados en el FRAM (Bellini et al., 2017, 2016; Patriarca et al., 2018b; Raben, 2017). Finalmente, se destacan algunas publicaciones que comparan el FRAM con otros métodos (Herrera & Woltjer, 2010; Saurin & Sanches, 2014; Smith et al., 2017; Toroody et al., 2016).

Por otro lado, en el caso del sector de la construcción se han desarrollado algunos trabajos que aplican el FRAM en dicho sector aunque no son muy abundantes. En este sentido se han encontrado estudios centrados en la aplicación a la construcción sostenible y el reciclado de residuos provenientes de la construcción, que desarrollan una nueva metodología basada la combinación del FRAM con metodologías de jerarquía analítica de procesos (Haddad & Rosa, 2015; Rosa et al., 2017, 2015). En ellos se encontró que el FRAM proporcionaba observaciones complementarias que no eran halladas mediante los métodos tradicionales. Además, destacan los estudios de Saurin (Saurin, 2016; Saurin & Sanches, 2014) en relación a la Construcción Lean y la Ingeniería de la Resiliencia. Saurin y Sanches (2014) comparan la comprensión de la variabilidad que ofrecen ambos enfoques. Para ello, aplica el FRAM y el Método del Flujo de Valor al caso del ensamblaje de la estructura de acero de un edificio comercial y compara los resultados. Como conclusión, propone el uso conjunto de ambos métodos. Posteriormente, Saurin (2016) aplica el FRAM en construcción *Lean* para modelar cómo reaccionan las empresas de construcción frente a las inspecciones de seguridad, concretamente ante los avisos de prohibición emitidos por una inspección del trabajo. En este sentido, destaca que el FRAM puede ser útil para anticipar el impacto de pequeños cambios en un proyecto de construcción. También, se encontró otra publicación que pretendía mejorar el conocimiento sobre accidentes que son fruto de la improvisación mediante la aplicación del FRAM. Para ello, se analizaron tres accidentes, uno de ellos era de un trabajador en una obra que sufrió una descarga de una hormigonera (Amorim & Pereira, 2015). Finalmente, cabe mencionar la investigación llevada a cabo por Von Buren (2013) en su tesis de maestría, quien empleó

el método FRAM en el modelado de las operaciones de una grúa móvil y comparó un método lineal tradicional con el FRAM al aplicar ambos al análisis de un accidente mortal con la grúa.

Es importante la aplicación del FRAM en el sector de la construcción porque es un punto de partida adecuado para iniciar el camino que conduzca a que la seguridad en la construcción sea vista mediante el nuevo enfoque de la Ingeniería de la Resiliencia. El conocimiento sobre cómo se ejecutan los trabajos, cómo se acoplan las diferentes funciones implicadas y cuáles son los límites de la variabilidad ayudaría a que se empiece a trabajar en la gestión de la seguridad orientada a la resiliencia y al rediseño de procesos, directrices y procedimientos conforme a *Safety-II* para que la ejecución diaria se vea impregnada de esta nueva visión. Para ello, es necesario considerar algunos nuevos supuestos y emplear nuevas herramientas tales como el FRAM.

### **2.3.5 Evaluación del desempeño resiliente: Resilience Assessment Grid (RAG)**

Como se ha puesto de manifiesto, la resiliencia es algo que los sistemas o las organizaciones hacen, es decir, es una propiedad de los sistemas o de las organizaciones. Por lo tanto, no puede ser medida a priori. Sin embargo, la capacidad o habilidad que una organización tiene para desarrollar un desempeño resiliente, sí puede ser medida. Sobre esta idea se fundamenta el *Resilience Assessment Grid (RAG)* que es un conjunto de preguntas para medir las capacidades o habilidades de una organización para lograr un desempeño resiliente con el objetivo de gestionar estas capacidades (Hollnagel, 2017). De esta manera, se consigue un conjunto de preguntas que permiten conocer en un momento dado hasta qué punto una organización está preparada o tiene las capacidades necesarias para ser resiliente y adaptarse a las condiciones de desempeño.

Este conjunto de preguntas se organiza en cuatro grupos que coinciden con las cuatro capacidades o habilidades que los sistemas deben desarrollar para conseguir alcanzar un desempeño resiliente (Hollnagel, 2010b). Estas cuatro capacidades, representadas en la Figura 11, son denominadas potenciales o “cornerstone”, es decir, piedras angulares, ya que constituyen la base sobre la que se sustenta la resiliencia de una organización. Según Hollnagel (2011b), estas habilidades para la resiliencia son:

**Responder: Saber qué hacer**

Ser capaz de responder a la variabilidad, las perturbaciones y las oportunidades tanto cotidianas como imprevistas, ya sea ajustando la manera en que se hacen las cosas o activando respuestas preparadas.

**Monitorizar: Saber qué buscar**

Ser capaz de monitorizar lo que es o podría convertirse en una amenaza a corto plazo. Esta monitorización debe abarcar el propio desempeño del sistema así como los cambios en el entorno.

**Aprender: Saber lo que sucedió**

Poder aprender de la experiencia, en particular aprender de las lecciones correctas de la experiencia correcta.

**Anticipar: Saber qué esperar**

Ser capaz de anticipar los acontecimientos, las amenazas y oportunidades en el futuro, como las posibles interrupciones, condiciones de operación cambiantes, presiones y sus consecuencias.

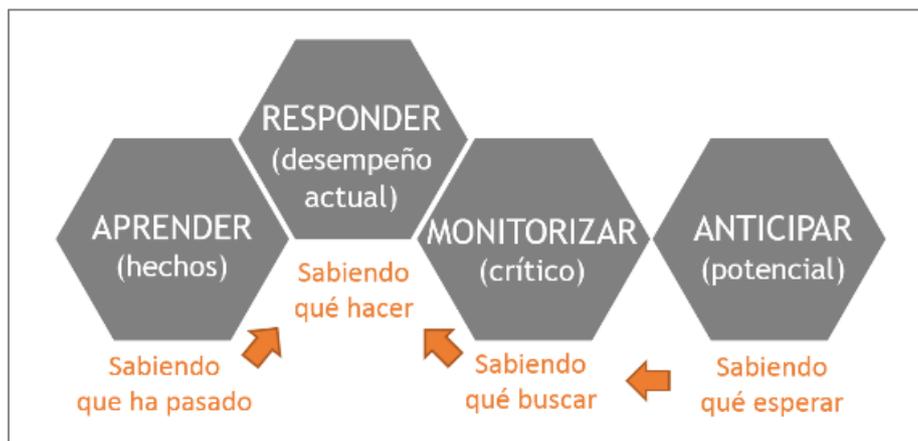


Figura 11. Las cuatro habilidades o potenciales para la Resiliencia.  
(Hollnagel, 2017)

Actualmente, se ha estudiado la aplicación del RAG en diferentes sectores como son las emergencias (Hunte & Marsden, 2016), el sector ferroviario (Rigaud et al., 2013), el tráfico aéreo (Ljungberg & Lundh, 2013; Patriarca et al., 2018c) o la seguridad nuclear (ARPANSA, 2017). Sin embargo, aún no son muy numerosas las publicaciones de carácter científicas en revistas o congresos centradas en su aplicación (Patriarca et al., 2018a).

De este modo, en la revisión bibliográfica llevada a cabo en este sentido tan solo se encontraron 8 publicaciones. Las búsquedas se llevaron a cabo en las principales bases

de datos como son Web of Knowledge, ScienceDirect, Scopus e IEEE Xplore y en ellas se emplearon dos cadenas de palabras diferentes mostradas en la Figura 12 donde se recoge el proceso de revisión de la literatura seguido.

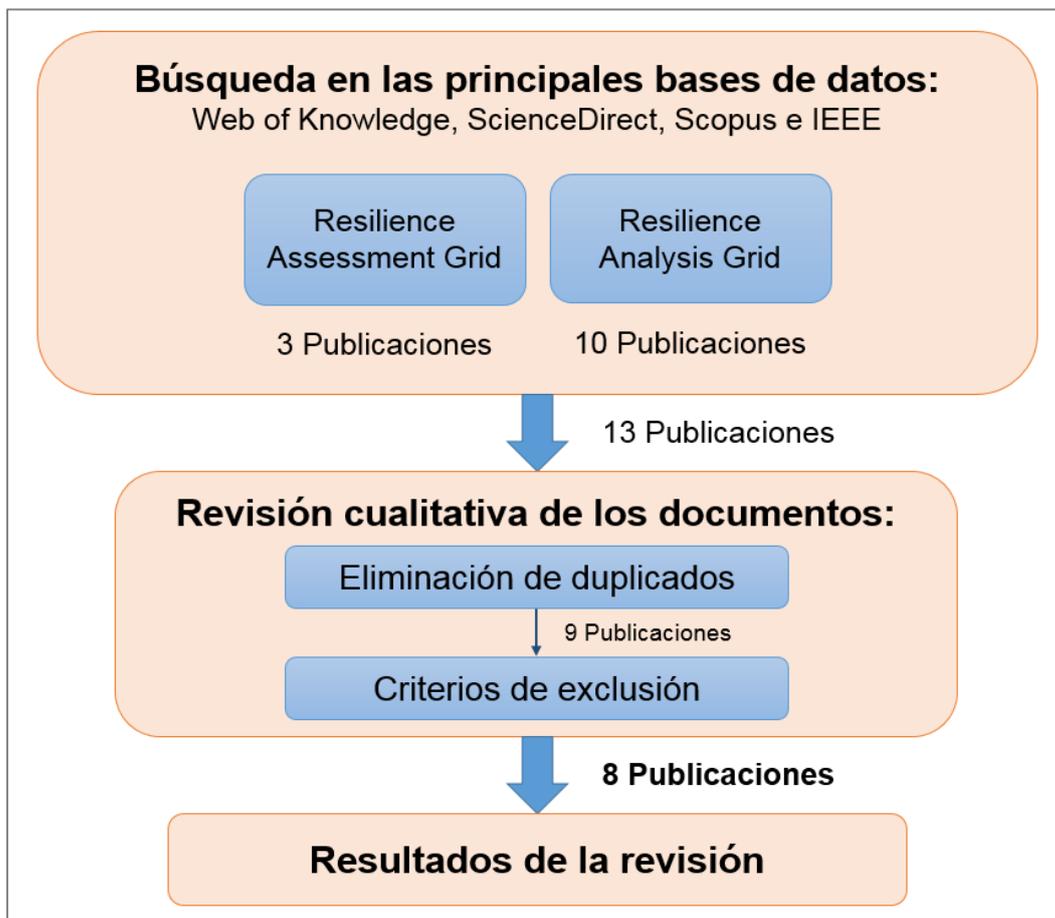


Figura 12. Proceso de revisión sistemática de la literatura sobre RAG (Elaboración propia)

Al igual que en el caso de FRAM, en las primeras menciones al RAG se le denominaba como “Resilience Analysis Grid” (Hollnagel, 2011b), aunque posteriormente pasó a denominarse “Resilience Assessment Grid” (Hollnagel, 2017). Para realizar la revisión se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión presentados en la Tabla 4.

Criterios aplicados en la revisión de la literatura sobre RAG	
Inclusión	Exclusión
<ul style="list-style-type: none"> <li>Publicaciones que aplicaban el RAG a una actividad o caso de estudio</li> <li>Publicaciones que proponían nuevos métodos o herramientas basadas en el RAG.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Publicaciones que simplemente mencionaban se centraban en los potenciales o habilidades para el desempeño resiliente pero no aplicaban el RAG.</li> </ul>

Tabla 4. Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la revisión de la literatura sobre RAG (Elaboración propia)

En las Figura 13 se observa que la mayor parte de las publicaciones indexadas sobre RAG se han publicado a partir desde 2015. De acuerdo con la Figura 14 el tipo de publicación más abundante son los artículos en revistas.

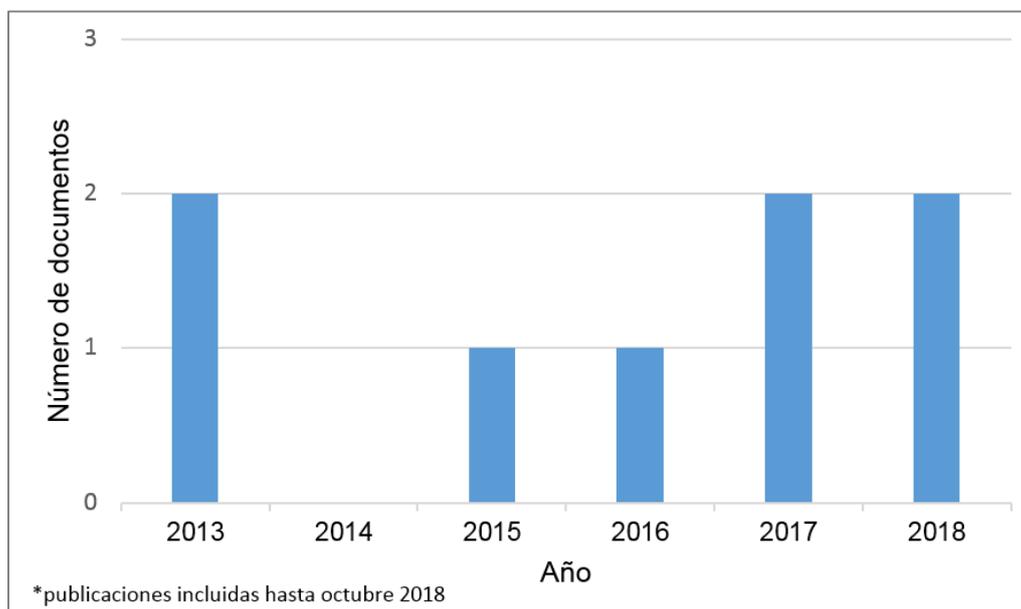


Figura 13. Distribución de documentos sobre RAG por año  
(Elaboración propia)

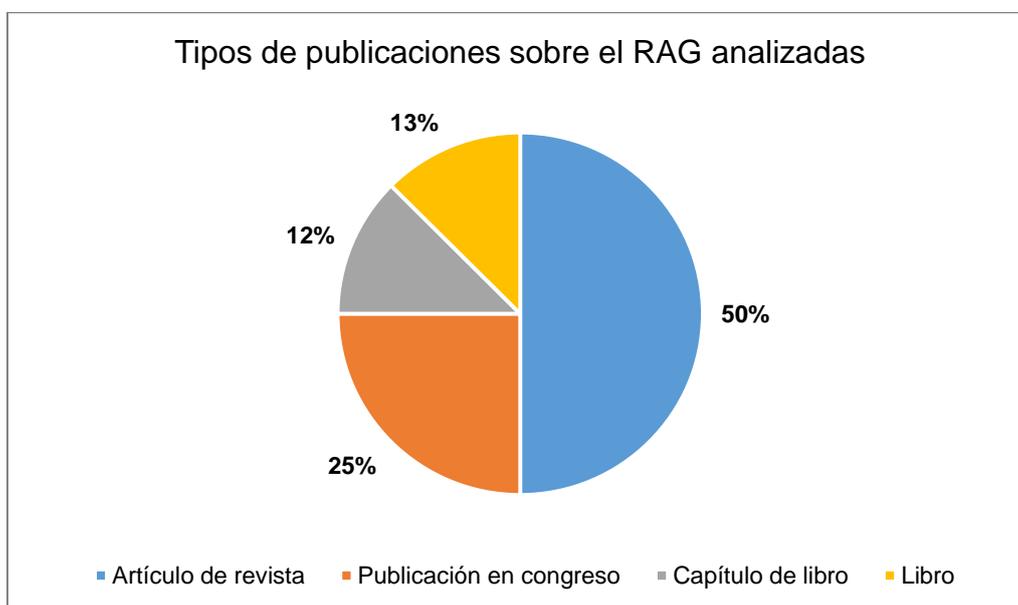


Figura 14. Distribución de documentos sobre FRAM por tipo de publicación  
(Elaboración propia)

Las publicaciones que se encontraron como resultado de la búsqueda están recogidas en el Anexo B. En ellas se observa que el sector donde se aplica con mayor frecuencia el RAG es el sanitario (Darrow & Eseonu, 2017; Falegnami et al., 2018; Hegde et al.,

2015; Patriarca et al., 2018c), aunque también ha sido aplicado en otros sectores como ferroviario, gestión del tráfico aéreo, nuclear, petrolero, emergencias o nuclear.

Además, existe otro trabajo que se ha presentado recientemente en congreso y aún no se encuentra indexado y que destaca por su afinidad con el ámbito de estudio de esta tesis. Este es el trabajo realizado por Peñaloza et al. (2018) que evalúan el sistema de medición del desempeño de seguridad de un proyecto de construcción mediante la evaluación de los potenciales de resiliencia y los aspectos de complejidad que tienen un impacto en el desempeño de seguridad.

El concepto de *Safety-II* es relativamente nuevo y más aún el RAG. Sin embargo, RAG aparece como una herramienta clave para apoyar la gestión resiliente de las organizaciones. Por ello, en el presente trabajo de investigación, desde el prisma de la Ingeniería de la Resiliencia y *Safety-II* se ha desarrollado un indicador de desempeño resiliente para los Planes de Seguridad y Salud basado en el RAG. Para ello, se ha procedido a diseñar y validar un cuestionario que permita medir cómo contribuyen los Planes de Seguridad y Salud al desempeño resiliente en las obras de construcción. A lo largo de este trabajo de tesis se presenta el proceso seguido en la investigación y los resultados obtenidos al respecto.

## **2.4 El sector de la construcción y las actividades de construcción de estructuras en la edificación**

El ser humano ha buscado protegerse de las condiciones ambientales y mejorar su confort desde los inicios de su existencia. Por ello, la construcción es una de las actividades más antiguas que el ser humano ha llevado a cabo. Cuando las personas dejaron de ser nómadas y comenzaron a establecerse en un lugar, los refugios más simples fueron evolucionando hasta dar lugar a grandes construcciones. Esta evolución se ha visto reflejada en el uso de materiales cada vez más duraderos, pasando de emplear ramas, hojas y pieles de animales a utilizar arcilla, piedra y madera que posteriormente fueron sustituidos por ladrillo, metal, hormigón y plástico. Evidentemente, las técnicas empleadas en construcción también han evolucionado notablemente y se han visto influenciadas por el desarrollo de la tecnología que ha dado lugar a máquinas, herramientas y medios auxiliares más sofisticados.

Estos medios y materiales disponibles en cada momento han ido condicionando los tipos de estructuras empleadas. La estructura de un edificio juega un papel esencial, ya que es el esqueleto que lo sostiene. En el marco de la Seguridad y Salud, dentro de las fases

de construcción de un edificio la de construcción de la estructura suele ser una de las más peligrosas. Por ello, es importante seguir continuando avanzando en su análisis y considerar nuevos enfoques que permitan desarrollar una gestión adecuada de estas actividades que derive en una ejecución de los trabajos de la forma más eficiente a la vez que segura.

#### **2.4.1 Caracterización del sector de la construcción**

El sector de la construcción engloba al conjunto de operaciones o actividades que se deben desarrollar para erigir una edificación, una planta industrial, una infraestructura pública o cualquier otro sistema análogo de acuerdo con el diseño o especificación de ingeniería que se habrá realizado previamente por uno o varios técnicos especializados en este campo. Dicho sector presenta algunas características propias que lo diferencian de otros sectores y que en ocasiones suponen una barrera para la mejora de la seguridad y salud en las obras de construcción. Principalmente pueden destacarse cinco de ellas:

- **Proceso productivo basado en proyectos**

La propia naturaleza del sector de la construcción se basa en proyectos y esto trae consigo algunos condicionamientos. Por un lado, hay que considerar que las organizaciones basadas en proyectos están limitadas por el enfoque a corto plazo, ya que se necesitan relaciones de colaboración a largo plazo para desarrollar enfoques sostenibles que realmente mejoren el rendimiento en todos los aspectos (Kuitert et al., 2016) dentro de lo cual queda incluida la seguridad y salud. Por otro lado, cada proyecto es único, singular y de naturaleza compleja y diversa (Arriagada & Alarcón, 2011). Si bien es cierto que podrían establecerse ciertas similitudes entre algunos proyectos, hay que considerar que de las características propias de cada obra, como el emplazamiento o las técnicas constructivas empleadas, deriva la aparición de riesgos ciertos riesgos específicos y singulares vinculados a cada proyecto. En este sentido, puede afirmarse que el entorno de trabajo al que se enfrentan los trabajadores en el sector de la construcción es dinámico, ya que su próximo trabajo podría ser un proyecto de construcción totalmente diferente (Jazayeri & Dadi, 2017). Además, el hecho de que el proceso productivo se base en proyectos tiene como consecuencia una dispersión, desconexión y temporalidad de los centros de trabajo de las empresas constructoras que puede dificultar el flujo de comunicación y la gestión adecuada de la seguridad y salud. Así mismo, podría

afirmarse que de esta naturaleza basada en proyectos emergen muchas de las otras características propias del sector de la construcción que se presentan a continuación.

- **Elevado nivel de subcontratación**

Numerosos autores han puesto de manifiesto los efectos negativos de la subcontratación en la seguridad y salud en el sector de la construcción (Loosemore & Andonakis, 2007; Mayhew & Quinlan, 1997; Yung, 2009). En España los niveles de subcontratación alcanzaron tal magnitud que tuvo que regularse el problema mediante Ley 32/2006, de 18 de octubre, reguladora de la subcontratación en el Sector de la Construcción. En la propia exposición de motivos de dicha Ley se reconoce que “el exceso en las cadenas de subcontratación, especialmente en este sector, además de no aportar ninguno de los elementos positivos desde el punto de vista de la eficiencia empresarial [...] ocasiona, en no pocos casos, la participación de empresas sin una mínima estructura organizativa que permita garantizar que se hallan en condiciones de hacer frente a sus obligaciones de protección de la salud y la seguridad de los trabajadores”. Si bien es cierto que dicha regulación ha permitido, entre otras cosas, limitar los niveles de subcontratación, aunque ésta sigue siendo una de las características destacables del sector por su impacto en la seguridad y salud. Según Manú et al. (2013) se destacan como principales efectos de la subcontratación en el sector de la construcción: la fragmentación de la organización que deriva en la aparición de unidades con interés en conflicto; la ambigüedad en las responsabilidades y relaciones de trabajo difusas; la comunicación inadecuada y falta de trabajo en equipo entre los subcontratistas; la falta de familiarización del personal subcontratado con los problemas de seguridad inherentes a la obra; y diferencias en las culturas organizacionales en relación a la seguridad de los contratistas y subcontratistas.

- **Carácter transitorio de la mano de obra**

Las fluctuaciones en los mercados económicos se reflejan en variaciones considerables en el número, tamaño y tipo de proyectos emprendidos por las organizaciones de construcción a lo largo del tiempo (Raidén & Dainty, 2006). Este hecho unido al citado carácter temporal de los proyectos tiene un efecto directo sobre la mano de obra. Según la Oficina Internacional del Trabajo (OIT, 2001), el sector de la construcción proporciona empleo a trabajadores poco cualificados y de bajo estrato social. Como consecuencia aparece una mano de

obra transitoria que en ocasiones no presenta la experiencia y la especialización necesaria, lo cual tiene un impacto directo en la seguridad y salud en el trabajo.

- **Participación intensiva de mano de obra**

La heterogeneidad y complejidad de los proyectos, la diversidad de tecnologías a emplear y a la gran cantidad de operaciones que hay que realizar para ejecutar las obras tienen dan lugar a una concentración de mano de obra de diferentes subcontratas simultáneamente en un mismo espacio de trabajo. Esto complica la gestión adecuada de la seguridad y salud e incrementa el riesgo derivado de interferencias durante los trabajos.

- **Presiones económicas**

La presión económica en el sector de la construcción deriva en una reducción del presupuesto asignado a los proyectos para fomentar la competitividad en el mercado. Así, esta reducción implica también una reducción en la cuantía económica total asignada a la seguridad y salud. Además, esta presión económica provoca en ciertas ocasiones una presión por parte de los responsables y puesto jerárquicos más elevados en los trabajadores para cumplir los ajustados plazos de entrega. En ocasiones, esto provoca que se anteponga la productividad a la seguridad en la ejecución de los trabajos asumiendo riesgos que podrían evitarse.

Por todo ello, actualmente el sector de la construcción presenta elevados niveles de siniestralidad. Según el último Informe Anual de accidentes de Trabajo en España publicado por el Instituto Nacional de Seguridad, Salud y Bienestar en el Trabajo y que corresponde a los datos de 2016, el sector de la construcción fue el sector de actividad que presentó mayor índice de incidencia, superando en más del doble a la media de los índice sectores (INSSBT, 2017). El panorama a nivel mundial es similar. Según Eurostat, en Europa más de un quinto de los accidentes mortales registrados en el trabajo se producen en el sector de la construcción (Eurostat, 2018). En Estados Unidos las cifras son análogas, según la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional en el año 2016 de 4,693 muertes de trabajadores en la industria privada, 991 o 21.1% se produjeron en la construcción, es decir, una de cada cinco muertes de trabajadores en 2016 se dieron en el sector de la construcción. Dentro de estos accidentes mortales la construcción en Estados Unidos un 38.7% fueron debidos a caídas de altura, es decir, se produjeron 384 accidentes mortales por caída de altura (OSHA, 2018).

En el último informe del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo donde se presentaban los datos de accidentabilidad en el sector de la construcción desglosados por fases, aparecía la fase “estructuras y obras de fábrica” como la más peligrosa de todas las fases del proceso constructivo (INSHT, 2008a). Uno de los principales riesgos durante esta fase es el de caída de altura. En este sentido, López-Alonso et al. (2015) analizaron un total de 178 accidentes en Andalucía y encontraron que la fase de estructuras es en la que se producen mayor número de accidentes, concretamente un 54.49%, a pesar de que la inversión en prevención de riesgos laborales era la mayor que en el resto de las fases debido al coste de las medidas de seguridad y salud.

En base a los datos presentados, parece necesario continuar investigado en materia de seguridad y salud laboral para buscar nuevas fórmulas que permitan mejorar la seguridad y salud en el sector y, por ende, reducir la siniestralidad.

#### **2.4.2 Las actividades de construcción de edificios en España**

En España en el sector de la construcción se engloban todas las actividades económicas referidas a la construcción incluidas en la Sección F de la clasificación del Nacional de Actividades Económicas (CNAE-2009) aprobada por el Real Decreto 475/2007, donde se incluye: promoción inmobiliaria, construcción de edificios, construcción de carreteras y vías férreas, puentes y túneles, construcción de redes, construcción de otros proyectos de ingeniería civil, demolición y preparación de terrenos, instalaciones eléctricas, de fontanería y otras instalaciones en obras de construcción, acabado de edificios y otras actividades de construcción especializada. No obstante, de acuerdo con el Consejo Económico y Social de España (2016) en el sector de la construcción pueden diferenciarse dos subsectores principales: la edificación y la obra civil. Dentro del primero suelen diferenciarse tres segmentos: residencial, no residencial y rehabilitación. El presente trabajo de tesis se enmarca dentro de las actividades de construcción de edificación residencial, especialmente, en la fase de construcción de estructuras.

En España en 2016 las empresas activas en el sector de la construcción eran 367.601, lo que supone una disminución del -2.70% con respecto al año anterior. Tal y como se muestra en la Figura 15 las actividades de construcción de edificios suponían un 36.94% de las actividades principales desarrolladas en el sector de la construcción (Ministerio de Fomento, 2018).



Figura 15. Clasificación de las empresas según la actividad principal (CNAE 2009). Año 2016 (Ministerio de Fomento, 2018)

En relación al número de personas empleadas en el sector de la construcción en 2016 se alcanzó un total de 1.095.710, entre los cuales 874.563 eran asalariados. Concretamente en la actividad de edificios se registraron en ese mismo año un 35.11% del total de personas asalariadas, conforme a la Figura 16 (Ministerio de Fomento, 2018).



Figura 16. Clasificación porcentual de las personas empleadas en el sector de la construcción según los grupos de la actividad principal (Ministerio de Fomento, 2018)

En lo que se refiere al volumen de negocio en actividades de construcción, sin incluir el valor generado por la reventa de bienes y servicios adquiridos para revender el mismo en el estado que se adquirieron, en el año 2016 el volumen total de negocio fueron 190.226,5 millones de euros. En este sentido, el volumen de negocio de la actividad de construcción de edificios fue más del doble del volumen de la ingeniería civil (Ministerio de Fomento, 2018). Como se observa en la Figura 17, dentro de la actividad de edificación, la construcción de edificios residenciales fue mayor que la de edificios no residenciales, aunque si solo se tienen en cuenta las obras nuevas ambos tipos de edificios tuvieron un volumen de negocio similar con 13.931,8 millones de euros en el

caso residencial y 11.314,9 millones de euros en el no residencial (Ministerio de Fomento, 2018).

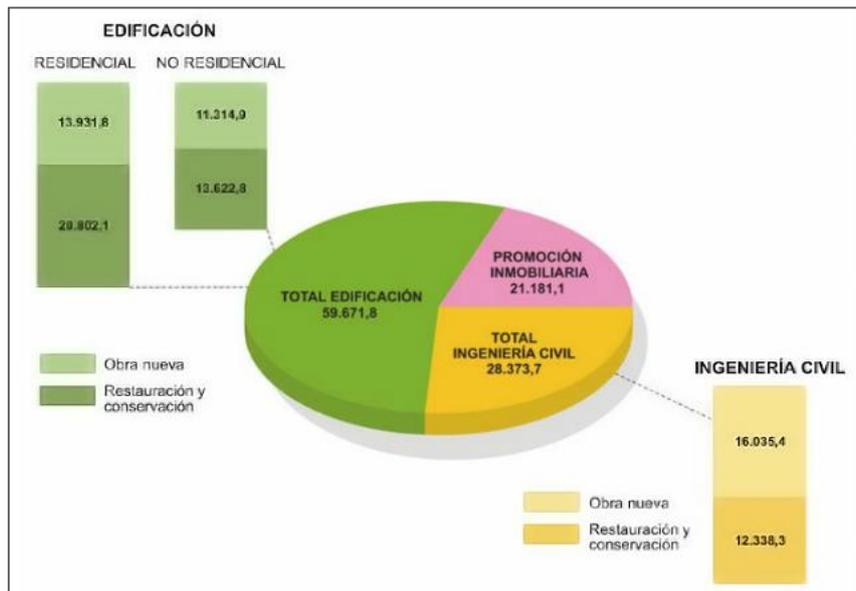


Figura 17. Volumen de negocio en actividades de construcción según tipo de obra. Año 2016 (Millones de euros) (Ministerio de Fomento, 2018)

### 2.4.3 Tipología de las estructuras de hormigón en la construcción de edificios

En la construcción de edificios lo habitual en España es emplear estructuras de hormigón armado para sustentar dichos edificios. Para transformar los materiales en estructuras de hormigón es necesario realizar un conjunto de operaciones utilizando para ello maquinaria, espacios, instalaciones, etc., que serán manejados por operarios. El proceso puede resumirse en tres etapas generales: Cálculo de la estructura y producción de planos, elaboración de elementos de la estructura en fábricas y talleres y transporte a obra y puesta en obra de cimentación y estructuras de hormigón armado, que incluye la ejecución de encofrados, ferralla y trabajos de hormigonado (Fundación Laboral de la Construcción, s.f.). En el presente trabajo de tesis el foco de atención estará en la tercera etapa que es cuando se ejecuta la estructura de hormigón en la obra.

La realización de las estructuras comporta básicamente la construcción de los tres tipos de elementos que la componen: verticales, horizontales e inclinadas.

### **a) Tipos de estructuras verticales**

Los elementos estructurales verticales son los que reciben las cargas de los elementos horizontales y las transmiten a cotas inferiores y en última instancia a través de la cimentación al suelo. Por ejemplo, los muros y los pilares pertenecen a este tipo de elementos (OSALAN, 2007). Así, en la Figura 18 se observan unos pilares como parte de estructura vertical que sostendrá la estructura horizontal de la siguiente planta.



Figura 18. Pilares de hormigón de la estructura vertical  
(Elaboración propia)

### **b) Tipos de estructuras horizontales**

Existen distintos tipos de forjados horizontales, pero en este documento nos centraremos en los más habituales en la construcción de tipo residencial. Además estos forjados se pueden clasificar atendiendo a distintos criterios.

#### **➤ En función de la transmisión de cargas:**

Atendiendo a la transmisión de carga de los forjados se distinguen dos tipos principales de forjados, los unidireccionales y los bidireccionales o reticulares.

- **Forjados unidireccionales**

Este tipo de forjados son los que necesitan apoyos en sus dos extremos, para transmitir las cargas del forjado a través de ellas hasta los pilares y, posteriormente, a la cimentación.

- **Forjados bidireccionales o reticulares**

Los forjados bidireccionales están formados por nervios de hormigón armado colocados formando una retícula ortogonal y son ejecutados “in situ”. Estos forjados pueden clasificarse en dos tipos principales:

- **Aligerados:** donde los elementos resistentes, denominados nervios, se aligeran con elementos de entrevigado que reciben el nombre de casetones.
- **Sin aligerar:** formado por losas armadas en las dos direcciones.

Este último tipo de forjado bidireccional también se denomina de losa armada maciza o de placas macizas de hormigón y no ha sido comúnmente empleado en España, donde fundamentalmente solían emplearse forjados unidireccionales prefabricados con hormigón vertido “in situ” o bien forjados reticulares. No obstante, el aumento del coste de la mano de obra unido a la facilidad constructiva y la durabilidad de los forjados de losa armada maciza y a la reducción de los riesgos laborales que implican, se ha comenzado a incrementar paulatinamente su uso en España (Marí Bernat et al., 2002). No obstante, el uso de estos forjados está mucho más extendido en Europa.

➤ **En función de su sistema de ejecución**

También pueden clasificarse los forjados conforme a su sistema de ejecución, en tal caso pueden distinguirse tres tipos:

- **Forjados “in situ”:** son construidos en su totalidad en la obra.
- **Forjados parcialmente prefabricados:** presentan algunos elementos prefabricados como viguetas o semiviguetas y el hormigón es colocado in situ.
- **Forjados totalmente prefabricados:** únicamente requieren ser montados en la obra.

En la Tabla 5 se incluye un resumen de estas principales tipologías de forjado horizontal incluyendo en diferentes columnas los distintos criterios de clasificación expuestos anteriormente incluyendo los requerimientos de cada uno de ellos junto a una imagen a modo de ejemplo.

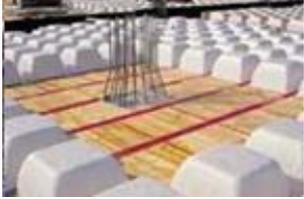
Tipo de forjado según su sistema de ejecución	Tipo de forjado por su sistema de transmisión de cargas	Requerimientos del encofrado	Imagen
Forjados in situ	Losa armada maciza (bidireccional)	Requiere encofrado de planchada completa y cimbrado completo	
	Losa armada aligerada (bidireccional)	Requiere encofrado y cimbrado completo, el aligeramiento puede ser recuperable o no	
Forjados parcialmente prefabricados	Forjados de vida plana o de cuelgue con viguetas (unidireccional)	Requiere encofrado de planchada completa en vidas cimbrado de vidas y a media vigueta (según indicaciones del fabricante)	
	Forjados de vida plana o de cuelgue con semiviguetas (unidireccional)	Requiere encofrado de planchada completa en vidas cimbrado de vidas y a la media vigueta (según indicaciones del fabricante)	
	Forjado con chapa colaborante (chapa grecada)	Solo requiere el apuntalado o cimbrado ya que la misma chapa hace de encofrado perdido	
Forjado totalmente prefabricados	Prelosas nervadas o aligeradas (habitualmente unidireccional)	Solo requieren encofrado y cimbrado de algunas zonas singulares	

Tabla 5. Clasificación de los tipos de forjados horizontales (OSALAN, 2007)

### c) Tipos de estructuras inclinadas

Dentro de este tipo de estructuras se encuentran las losas de las escaleras y la formación de pendientes de cubierta.

La escalera de hormigón armado es un elemento estructural que tiene la función de unir dos forjados a diferentes alturas. La escalera de hormigón se compone de la losa y los peldaños. En la Figura 19 se puede observar la losa de escalera encofrada y armada preparada para hormigonar.



Figura 19. Losas de escalera  
(Elaboración Propia)

Por otro lado, para la construcción de estas estructuras es necesario emplear medios auxiliares que faciliten la ejecución de las mismas. El hormigón es un material moldeable, no tiene forma, por tanto, una de las principales tareas a desarrollar en la ejecución de una estructura de hormigón armado es el molde, lo que llamamos encofrado. Por tanto, la función del encofrado es garantizar la forma del elemento de hormigón que se indican en los planos, la colocación del armado y su recubrimiento y que mantenga su posición durante el vertido y vibrado del hormigón. Asimismo, debe garantizar el buen curado del hormigón, evitar la pérdida de agua durante el proceso de fraguado, así como protegerlo de las temperaturas externas.

Hasta hace poco, el material más utilizado para la realización de encofrados era la madera. Posteriormente, la utilización de nuevos materiales como el aluminio y el plástico han hecho que esta actividad se realice con procesos mucho más estandarizados e industrializados, los cuales tienen como principal ventaja el rápido montaje y desmontaje, reduciendo en gran medida los tiempos de ejecución (Garrido Rodríguez et al., 2011).

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ENCOFRADO				
<b>H -HORIZONTALES</b>	<b>Sistemas de encofrado de forjados horizontales:</b>			
	<b>Según su sistema de ejecución</b>	<b>Según su sistema de transmisión de cargas</b>		
	<b>De forjados prefabricados</b>	<b>Unidireccional</b>	Forjados de semilosas prefabricadas	
	<b>De forjados parcialmente prefabricados</b>	<b>Unidireccional</b>	Forjados de viga plana o de cuelgue con viguetas	
			Forjados de viga plana o de cuelgue con semiviguetas	
	<b>De forjados ejecutados "in situ"</b>	<b>Bidireccional</b>	Forjados de losa maciza de hormigón	
Forjados de losa aligerada de hormigón			De casetón perdido De casetón recuperable	
<b>V -VERTICALES</b>	<b>De Pilares</b>	<b>De sección circular</b>		De chapa
		<b>De sección rectangular</b>		De material desechable
		<b>Para grandes alturas, de sección circular o rectangular</b>	Trepantes y Autotrepantes	
	Deslizantes			
	<b>De Muros</b>	1 cara		
		2 caras		
		<b>Para grandes alturas, se pueden ejecutar</b>	Trepantes y Autotrepantes	
Deslizantes				

Tabla 6. Clasificación de los sistemas de encofrado  
(Garrido Rodríguez et al., 2011)

A la hora de realizar una clasificación de los diferentes sistemas de encofrado que se utilizan actualmente en obras de construcción, se pueden dividir los mismos en dos grandes grupos en función de la posición del elemento que se va a encofrar: elementos horizontales y elementos verticales. En la Tabla 6 se muestra una clasificación de los principales sistemas de encofrado donde quedan reflejados el tipo de elementos de hormigón que permiten construir, es decir, forjados horizontales, pilares o muros, así como las distintas tipologías de estos elementos.

Los sistemas de encofrados horizontales están formados por estructuras auxiliares de tipo provisional, formadas por elementos estándar y de uniones prefabricadas, para carga y aguante de forjados y losas horizontales. Principalmente se emplean este tipo de encofrados para la ejecución de la losa del forjado.

Los sistemas de encofrado vertical se utilizan en la construcción de muros y pilares fundamentalmente. Están formados por un sistema de paneles con elementos de sujeción y pueden ser de madera, acero u otros materiales.

También hay otras clasificaciones de encofrados atendiendo a si pueden recuperarse o no una vez construida la estructura. Se distingue en ese caso entre encofrados recuperables y encofrados perdidos que son aquellos que quedan embebidos en la estructura y, por tanto, no se recupera después del fraguado del hormigón y se utilizan en los elementos horizontales.

#### **2.4.4 La gestión de la seguridad en las obras de construcción: Planes de Seguridad y Salud en el trabajo**

En España la Directiva 92/57/CEE, de 24 de junio, establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud que deben aplicarse en las obras de construcción temporales o móviles fue transpuesta mediante el Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción. En él se determina cómo debe organizarse la gestión preventiva en las obras de construcción. Para ello, establece diferentes figuras y actuaciones que intervienen durante la fase de proyecto y en el desarrollo de la fase de ejecución de la obra (Rubio-Romero & Rubio-Gámez, 2005). Se establecen así tres elementos esenciales para posibilitar dicha gestión:

- Estudio de seguridad y salud o estudio básico de seguridad y salud
- Planes de seguridad y salud en el trabajo
- Coordinador de seguridad y salud

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, actualmente denominado Instituto Nacional de Seguridad, Salud y Bienestar en el Trabajo, en el ejercicio de sus funciones, elaboró una Guía Técnica en la que comenta e interpreta dicho Real Decreto con objeto de facilitar su aplicación. En cuanto, al estudio o estudio básico se establece que debe ser elaborado durante la fase de redacción del proyecto y, como mínimo, debe contener los siguientes epígrafes: memoria, pliego de condiciones, planos, mediciones y presupuesto. Además, debería contener *“las previsiones y las informaciones útiles para efectuar en su día, en las debidas condiciones de seguridad y salud, los previsibles trabajos posteriores”* (INSHT, 2012).

El plan de seguridad y salud deberá ser elaborado en base el estudio o estudio básico desarrollando su contenido de forma más concreta y detallada. Este plan puede definirse como *“el documento o conjunto de documentos elaborados por cada contratista que constituye, en relación con los puestos de trabajo de la obra, el instrumento básico de ordenación de las actividades de identificación y, en su caso, evaluación de los riesgos*

*y planificación de la actividad preventiva”. Además “en este plan de seguridad y salud en el trabajo el contratista reflejará la gestión de la prevención concreta para la obra en cuestión, en el que se incluirá la coordinación de todas y cada una de las empresas y trabajadores autónomos que dependan de dicho contratista” (INSHT, 2012).*

Así, se sitúa al plan de seguridad y salud como eje central de la gestión de la seguridad en la obra durante la ejecución de los trabajos y como punto de encuentro en materia de seguridad y salud para todas las empresas que participen en la obra vinculadas al contratista principal que elabora el plan.

En cuanto a la figura del Coordinador de Seguridad y Salud pueden distinguirse el coordinador en fase de proyecto y en fase ejecución. Estos serán responsables, respectivamente, de la elaboración del estudio o estudio básico de seguridad y salud y de la aprobación del plan de seguridad y salud antes del inicio de la ejecución de la obra. Concretamente, en el caso que nos atañe en esta tesis cobrará importancia el coordinador en materia de seguridad y de salud durante la fase de ejecución de la obra que adquiere las siguientes funciones (INSHT, 2012):

- a) Realizar la coordinación necesaria para que se apliquen adecuadamente los principios generales de prevención y de seguridad. Lo cual incluye la toma de decisiones técnicas y organizativas encaminadas a la planificación de los trabajos que se ejecuten simultáneamente y la estimación de la duración de los distintos trabajos.
- b) Realizar la coordinación necesaria para que garantizar que tanto contratistas como subcontratistas y trabajadores autónomos apliquen los principios de la acción preventiva durante la ejecución de la obra.
- c) Aprobar el plan de seguridad y salud y sus modificaciones
- d) Llevar a cabo la organización de la coordinación de actividades empresariales en la obra.
- e) Realizar la coordinación y ejercer el control necesario para que los métodos de trabajo se apliquen correctamente.
- f) Adoptar las medidas que se requieran para garantizar que solo accedan a la obra las personas autorizadas.

### 2.4.5 El sector de la construcción y la Ingeniería de la Resiliencia

La Ingeniería de la Resiliencia nace orientada a sistemas socio-técnicos complejos, por lo que parece razonable analizar qué es un sistema socio-técnico complejo antes de profundizar en los avances realizados en la aplicación de la Ingeniería de la Resiliencia al sector de la construcción hasta el momento.

El término “sistemas socio-técnicos” fue empleado por primera vez por Emery y Trist (1960) para referirse a sistemas que implicaban una interacción compleja entre humano, máquinas y aspectos ambientales del sistema de trabajo. Actualmente, esta interacción se cumple en la mayoría de los sistemas empresariales (Baxter & Sommerville, 2011).

Las cinco características clave de estos sistemas son (Badham & Clegg, 2000; Baxter & Sommerville, 2011):

- *Deben tener partes interdependientes.*
- *Deben adaptarse y alcanzar objetivos en entornos externos.*
- *Tienen un entorno interno que comprende subsistemas técnicos y sociales separados pero interdependientes.*
- *Sus objetivos se pueden lograr por más de un medio.*
- *Su rendimiento se basa en la optimización conjunta de los subsistemas técnicos y sociales. Centrarse en uno de estos sistemas para excluir al otro es probable que conduzca a un rendimiento y una utilidad del sistema degradados.*

Las obras de construcción cumplen con estas premisas y pueden considerarse sistemas socio-técnicos, ya que son sistemas complejos donde intervienen subsistemas técnicos y sociales, están fuertemente influenciadas por el entorno externo y presentan gran número de agentes independientes pero interrelacionados de forma compleja.

Como se mencionó anteriormente la Ingeniería de la Resiliencia está siendo aplicada en multitud de sectores aunque, por ahora, los estudios centrados en el sector de la construcción son escasos. Podría destacarse a Tarsio Abreu Saurin como uno de los autores más prolíficos en la investigación relacionada con el sector de la construcción y la Ingeniería de la Resiliencia. Así, Saurin et al. (2008) propone la implantación de buenas prácticas de gestión de seguridad en el sector de la construcción basadas en los principios de la Ingeniería de la Resiliencia y su antecesor la CSE. Estas prácticas son: transparencia de procesos, planificación de la seguridad, medición proactiva del rendimiento, investigaciones de accidentes e identificación y monitoreo de las presiones y migraciones de rendimiento basadas en la flexibilidad,

aprendizaje y conciencia. Para ello, aborda el caso de seis empresas de construcción y destaca como la aplicación de estas ideas en el sector de la construcción podría ser beneficiosa.

Saurin junto a otros autores (Saurin et al., 2014, 2013) propone ocho criterios para el diseño y evaluación de sistemas medida de desempeño que serán presentados en el siguiente apartado. Además desarrolla aplicaciones en casos prácticos basados en empresas de construcción analizando el sistema de indicadores de seguridad conforme a los criterios establecidos.

Saurin y Sanches (2014) compara las perspectivas de la Ingeniería de la Resiliencia y la Lean Construction en las actividades de construcción analizando las similitudes y cómo pueden complementarse ambas perspectivas, especialmente desde el punto de vista de la variabilidad, incluyendo un ejemplo centrado en una obra de construcción.

Por otro lado, Harvey et al. (2016) analiza las oportunidades y barreras de la aplicación de la HRO y la Ingeniería de la Resiliencia en el sector de la construcción. Destacando como la Ingeniería de la Resiliencia podría ayudar a que se adoptara un enfoque adaptativo de la seguridad en la construcción favoreciendo la capacidad de anticipación y respuesta de los trabajadores ante eventos inesperados, ayudando a comprender que los fallos y errores surgen de los ajustes en la ejecución de los trabajos bajo presión, disminuyendo la propensión a la culpa, favoreciendo el incremento de la inversión en la gestión de riesgos y evitando que se concentren los esfuerzos en la eficiencia y productividad dejando a un lado la seguridad, entre otras ventajas. Sin embargo, para ello es necesario que se adapten los conceptos propuestos por la ingeniería de la Resiliencia a la red de subcontratistas y a los proyectos de carácter temporal. Por lo que se pone de manifiesto la necesidad de continuar con la investigación en este sentido para superar las barreras que dificultan la aplicación de la Ingeniería de la Resiliencia en este sector. Así, se podría conseguir que se cambie la forma de abordar la seguridad en el sector de la construcción consiguiendo que se alcance una perspectiva adaptativa de la seguridad que requiere compromiso de la gerencia, sensibilidad hacia la primera línea, prioridad en la seguridad, empoderamiento de los empleados y una cultura justa (Harvey et al., 2016).

Tal y como se indicó en el apartado 2.3.4., existen también varios estudios centrados en aplicar la Ingeniería de la Resiliencia en el sector de la construcción mediante el uso del análisis FRAM en diferentes actividades relacionadas con la construcción como el reciclado de residuos (Haddad & Rosa, 2015; Rosa et al., 2017, 2015), las operaciones con grúa (Von Buren, 2013) o las inspecciones de seguridad (Saurin, 2016).

Sin embargo, hasta el momento no son demasiados los estudios llevados a cabo en el marco de la ingeniería de la resiliencia y el sector de la construcción y la mayoría de los que existen se han focalizado en aplicar el FRAM a este sector, lo cual parece lógico como punto de partida para entender la ejecución de los trabajos diarios como base para la implantación de la Ingeniería de la Resiliencia en el sector.

La aplicación de la Ingeniería de la Resiliencia al sector de la construcción es uno de los principales retos identificados en la investigación en este campo (Saurin et al., 2008; Righi et al., 2015; Harvey et al., 2016). Es importante hacer un esfuerzo para entender las características particulares del sector de la construcción y superar las barreras existentes para aplicar la RE en este sector. Dado que, a priori, parece que las ventajas que se obtendrían serían importantes y supondrían un avance en la seguridad y salud y una reducción de los índices de accidentes en este sector.

Así, es necesario dejar atrás la visión de tradicional de la seguridad para centrarse en el desempeño diario, en aumentar la capacidad de adaptación de la mano de obra a los imprevistos y a los fallos y en entender que la seguridad y la producción deben ir de la mano. También es clave reducir la connotación negativa que hasta ahora ha tenido el reporte de accidentes o incidentes por parte de los trabajadores poniendo en valor el acceso a esta información, que ayudaría a conocer los límites de la variabilidad y el desempeño normal y, por ende, mejorar la seguridad y salud en la construcción.

Además, los estudios existentes señalan como la introducción de este nuevo paradigma de la seguridad en la construcción podría traer consigo numerosos beneficios que deriven en la mejora de la gestión de la seguridad en este sector. Por ello, destacan la necesidad de continuar avanzando en la investigación en este sentido. El presente trabajo de tesis pretende dar un paso más en este análisis.

## **2.5 Indicadores: herramientas claves para gestión del desempeño en seguridad**

Desde la antigüedad el ser humano ha tenido la necesidad de comprender su entorno, aprender de él y adaptarse a las condiciones que le rodean. Para conseguir este propósito se ha apoyado en el uso señales o información que le permitiera conocer cómo evolucionan y cambian las condiciones que le rodean para así desarrollar acciones que le permitirán alcanzar esa adaptación y mantenerse dentro de unos límites deseados. En el caso de las empresas, organizaciones y sistemas los indicadores de gestión proporcionan una información esencial para conocer el estado en que se encuentran

y facilitar la toma de decisiones acertadas. Por ello, en este apartado se abordará el concepto de indicador para pasar a profundizar en los principales tipos de indicadores de seguridad y salud, con especial interés en los indicadores *leading*. Seguidamente, se abordarán estos indicadores desde la perspectiva del sector de la construcción y de la Ingeniería de la Resiliencia.

### 2.5.1 Concepto de indicador

La palabra indicador proviene del latín “indicare” que significa “que sirve para entender”. Si se descompone esta palabra se encuentra que está compuesta por el prefijo “in-” que significa “hacia dentro”, la raíz “dicare” que significa “señalar con el dedo” y el sufijo “-dor” que significa “el que realiza la acción”, es decir, el agente.

De forma muy genérica, la Organización Mundial de la Salud (Von Schirnding, 2002) define el concepto de indicador como: *“Una forma de ver el panorama general al mirar una pequeña parte de ella”*

La Comisión Europea propone la siguiente definición de indicador: *“Un indicador es una medida cuantitativa o cualitativa de cuán cerca estamos de alcanzar un objetivo establecido (resultado de política). Nos ayudan a analizar y comparar el rendimiento entre grupos de población o áreas geográficas, y pueden ser útiles para determinar las prioridades de las políticas”* (European Commission, s.f.).

En España, la Asociación Española para la Calidad define un indicador conforme a la norma UNE 66175: 2003 “Guía para la implantación de sistemas de indicadores” como: *“Un dato o un conjunto de datos que nos ayudan a medir objetivamente la evolución del sistema de gestión. [...] Los indicadores son medios, instrumentos o mecanismos para evaluar hasta qué punto o en qué medida se están logrando los objetivos estratégicos”* (Normalización Española, 2003).

Por otro lado, Øien (2001) establece que un indicador es: *“Una variable medible u operacional que puede usarse para describir la condición de un fenómeno o aspecto más amplio de la realidad”*

Podrían seguirse presentando infinidad de definiciones del concepto de indicador, esto se debe a que actualmente el uso de indicadores está ampliamente extendido y son empleados con multitud de propósitos y en infinidad de áreas. Pueden encontrarse indicadores económicos y financieros, demográficos, de desarrollo, de salud, de medio

ambiente, de calidad, de gestión, de siniestralidad, etc. Por ello, existen múltiples definiciones del término indicador según el enfoque con que se aborde este concepto.

Tal y como se desprende de algunas de las definiciones presentadas los indicadores pueden ser empleados por las administraciones públicas, gobiernos u organismos internacionales para definir políticas, metas y objetivos y realizar un seguimiento de su cumplimiento, así como para comunicar o conocer la evolución de una región. No obstante, en el marco del presente proyecto de tesis, se abordarán los indicadores de seguridad encaminados a ayudar a las empresas a mejorar su gestión de la seguridad.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2005) indica que los indicadores de desempeño en seguridad son: *“Medidas observables que proporcionan información sobre un concepto – seguridad - que es difícil de medir.”*

La Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO, 2013) propone la siguiente definición: *“Un parámetro de seguridad basado en datos utilizado para supervisar y evaluar el rendimiento de seguridad”*.

Del análisis de algunas de las múltiples definiciones empleadas para explicar el concepto de indicador, así como de forma más concreta, de indicador de desempeño en seguridad, se desprende que los indicadores proporcionan información, ya sea de carácter cualitativa o cuantitativa, necesaria para conocer la realidad y sustentar la toma las decisiones adecuadas que conduzcan a una gestión eficiente y acertada. De ahí, la importancia de los indicadores como herramienta clave de la gestión.

### **2.5.2 Tipos de indicadores para la gestión de la seguridad**

De manera general podría afirmarse que existen dos tipos de indicadores de seguridad ampliamente utilizados en la literatura y son los indicadores *leading* y *lagging* (Jazayeri & Dadi, 2017) que se presentarán más detenidamente en el siguiente apartado. Sin embargo, hay que considerar que este tema es complejo y no existe un claro acuerdo sobre las definiciones o conceptos exactos que engloban las principales tipologías los indicadores de desempeño en seguridad. Muestra de ello es que en 2009 la revista *Safety Science* publicó un número especial centrado en los indicadores de seguridad. La motivación de este especial fue una publicación enviada a la revista por Andrew Hopkins (2009) que suscitó un debate en la comunidad científica sobre los indicadores de seguridad. En él participaron 25 investigadores y profesionales en gestión de

seguridad que aportaron desde su experiencia distintos puntos de vista al debate (Hale, 2009a).

Edades de la gestión de la seguridad	Comprensión de la Seguridad	Indicadores
<b>Tecnología</b>	Abarca desde la monitorización de fallos técnicos hasta la monitorización continua de la salud	Indicadores relacionados con los fallos técnicos y el estado técnico en tiempo real.
<b>Factores Humanos</b>	Abarca desde los errores humanos hasta el desempeño humano	Indicadores relacionados con errores humanos, falta de juicio, fatiga, desconocimiento de la situación.
<b>Organización y cultura de seguridad</b>	Factores relacionados con lo humano, la tecnología y organización	Indicadores relacionados con los fallos organizacionales: formación, competencia, planificación, coordinación, programa de mantenimiento, diseño, auditorías de sistemas de gestión de la seguridad, evaluación de la cultura de seguridad, estudios de la cultura organizacional.
<b>Complejidad, modelos sistémicos</b>	La seguridad no se puede reducir a factores independientes (evento dinámico en curso)	Indicadores que consideran el sistema como un todo, analizando su variabilidad positiva y negativa. En lugar de un solo indicador, esto requiere la interpretación de un conjunto de indicadores relacionados con el contexto específico. Se emplean cuestionarios relacionados con las capacidades de resiliencia, un conjunto de indicadores representados por el <i>Resilience Assessment Grid</i> (Hollnagel, 2011)

Tabla 7. Edades de la gestión de la seguridad e indicadores de desempeño en seguridad (Herrera, 2012)

En este sentido, Wreathall (2009) aporta un matiz interesante al definir los indicadores gestión de seguridad y salud que explicaría esta divergencia de opiniones. Así, establece que estos indicadores son: *“Medidas indirectas para los aspectos identificados como importantes en el/los modelo/s subyacente/s de seguridad”*.

De acuerdo con esta definición, los indicadores dependen directamente de la visión de la seguridad que se esté aplicando en una organización y, por tanto, de los modelos y métodos vinculados que se empleen como referencia, así como del enfoque del sistema de gestión de la seguridad. Un reflejo claro de esta premisa se encuentra en las dos visiones de la seguridad que se han definido en el marco de la Ingeniería de la Resiliencia, *Safety-I* y *Safety-II*. Como se explicó anteriormente, *Safety-I* se centra en las cosas que van mal y en los modelos de causalidad lineales mientras que *Safety-II* se centra las cosas que van bien y en los modelos sistémicos. De este modo, los indicadores que se construyan bajo estos enfoques diferentes de la seguridad tendrán como objetivo medir cuestiones específicas consideradas clave para la adecuada gestión de la seguridad en base a uno u otro enfoque, es decir, concentraran sus esfuerzos en medir aspectos diferentes considerados determinantes para la gestión de

la seguridad. En este sentido, resulta muy ilustrativa la Tabla 7 elaborada por Herrera (2012) reflejando los diferentes enfoques que tienen los indicadores de seguridad según la definición de seguridad sobre la que se sustenten.

Uno de los primeros estudios que se localizan en la literatura que tratan la incorporación de indicadores en la gestión de seguridad y salud aparecen en los Estados Unidos de la mano de Rockwell (1959) quien identificó las siguientes características de una buena medida del rendimiento de seguridad:

- *Procedimientos inferenciales estadísticos cuantificables y que permiten*
- *Válido o representativo de lo que se va a medir*
- *Proporcione una variabilidad mínima al medir las mismas condiciones*
- *Sensible al cambio en las condiciones ambientales o de comportamiento*
- *El costo de obtener y usar medidas es consistente con los beneficios*
- *Comprendido por los responsables con la responsabilidad de usarlos.*

Por otra parte, los principales propósitos de los indicadores seguridad pueden resumirse en tres (Hale, 2009b):

1. *Monitorizar el nivel de seguridad en un sistema.*
2. *Decidir dónde y cómo actuar si se detecta que se necesita una acción mediante la monitorización anterior.*
3. *Motivar a aquellos en posición de llevar a cabo las medidas necesarias para actuar.*

En cuanto a los aspectos o variables que abordan los indicadores de desempeño en seguridad se destacan (Harms-Ringdahl, 2009):

- *Naturaleza y características de los peligros.*
- *Características de seguridad técnica.*
- *Sistemas de organización de seguridad formales.*
- *Problemas informales de seguridad.*
- *Cuestiones de comunicación y cooperación.*
- *Valores absolutos (evaluados o medidos) o tendencias (los cambios de rendimiento en el tiempo).*
- *Consecuencias económicas y probabilidad para diferentes resultados.*

En relación a la clasificación o tipologías principales de indicadores de desempeño en seguridad el debate se encuentra nuevamente abierto, aunque como se ha indicado al principio de este apartado, podría destacarse por su amplio estudio los indicadores *leading* y *lagging*, abordados en el siguiente apartado. No obstante, a modo de resumen de la literatura existente, Reiman y Pietikainen (2010) establecen seis tipos de indicadores de gestión de la seguridad y posteriormente Herrera (2012) adapta esta

clasificación ampliándola. En dicha Tabla 8 ha sido adaptada a partir de la clasificación propuesta por Herrera (2012) y en ella se presentan los tipos de indicadores incluyendo en una columna la denominación en inglés y justo al lado la traducción propuesta al español, ya que en algunos casos en la bibliografía existente se emplea directamente el término en inglés.

Tipos de indicadores de desempeño en seguridad	
Inglés	Español
Lagging / Leading	Restrospectivos / Prospectivo
Outcome / Activity	Resultado / Actividad
Negative / Positive	Negativos / Positivos
Output / Input	Salida (Productos) / Entrada (Insumos)
Feedback / Monitor / Drive	Retroalimentación / Monitorización / Mando
Process / Personnel	Proceso / Personales
Incident / Barrier	Incidentes / Barreras
Technical factors / Human factors	Factores técnicos / Factores humanos

Tabla 8. Clasificación de los indicadores de desempeño en seguridad  
(Adaptado de: Herrera (2012) y Reiman and Pietikaeinen (2010))

De acuerdo con los comentarios de Herrera (2012) y Reiman y Pietikaeinen (2010), es importante mencionar que aunque las tipologías de indicadores presentadas difieren unas de otras, dado que se han elaborado atendiendo a distintos criterios de clasificación. No obstante, muchos de estos indicadores presentan similitudes en su definición conceptual e incluso podría decirse que se solapan. Si se analizan los diferentes tipos de indicadores prestando atención a su relación temporal con el desempeño se distinguen los indicadores centrados en el desempeño pasado, es decir, en la medida de resultados pasados, efectos o consecuencias como son accidentes, incidentes o cuasi-pérdidas estarían englobados los indicadores de resultado, negativos, de salida y retrospectivos o *lagging*. Estos indicadores han sido utilizados históricamente en seguridad y salud y se han estado enfocados al pasado, es decir, accidentes, sucesos o cosas que ya han ocurrido. Por otro lado, se encuentran los indicadores centrados en medir condiciones, acciones u otros parámetros con el fin de prevenir accidentes, dentro de los cuales se incluirían los indicadores de actividad, positivos, de entrada, de mando y los prospectivos o *leading*.

Los otros tipos de indicadores responderían a enfoques diferentes como sería el propuesto por Hopkins, que se basa en la distinción entre tipos de riesgos y propone los indicadores centrados en el proceso o en las personas. También está el enfoque

propuesto por Vinnem (2010) desarrollado en el marco de los riesgos graves asociados a instalaciones distinguiendo entre indicadores de incidentes o cuasi-perdidas e indicadores de desempeño de barreras. Este sería un ejemplo claro de indicadores que responden a un modelo de accidente como es el del queso suizo de Reason (1990).

### 2.5.3 Indicadores leading y lagging

Desde hace ya unas décadas en el ámbito de la seguridad y salud se viene trabajando en los indicadores *lagging* y *leading*, que se originaron en el ámbito de la economía y fueron adoptados posteriormente en el campo de la seguridad y salud laboral. Por ello, son habituales referencias en la literatura disponible a estos dos tipos de indicadores (Davies et al., 2006; Grabowski et al., 2007; Haas & Yorio, 2016; Herrera, 2012; Hinze et al., 2013; Manuele, 2009; Mengolini & Debarberis, 2008; Rhodes et al., 2008; Toellner, 2001). De acuerdo con Rubio-Romero et al. (2018), los indicadores *lagging* han sido utilizados en la seguridad y salud basados tradicionalmente en ratios de accidentes registrados o aspectos del pasado (Manuele, 2009; Toellner, 2001). Estos indicadores difícilmente pueden dar suficiente información para evitar accidentes en el futuro, son indicadores pobres al estar basados en el desempeño pasado (Grabowski et al., 2007; Mengolini & Debarberis, 2008). En contraste, los indicadores *leading*, pueden usarse como predictores, al tratarse de medidas enlazadas con las medidas tomadas para prevenir accidentes/incidentes/actos inseguros y no con los accidentes/fallos ya ocurridos. Hinze et al. (2013) resumen las características los indicadores *leading* y *lagging* conforme a la Tabla 9.

Indicadores <i>Leading</i>	Indicadores <i>Lagging</i>
Aguas arribas	Aguas abajo
Predictivos	Históricos
Directores	Seguidores
Positivos	Negativos

Tabla 9. Características de los indicadores *leading* y *lagging* (Hinze et al., 2013)

Sin embargo, han sido numerosos los autores que han proporcionado una definición de los indicadores *leading* a lo largo de los años. A modo de ejemplo, se presentan algunas de ellas. Según Grabowski (2007), estos indicadores son “*un tipo de precursor, son condiciones, eventos o medidas que preceden a evento indeseado y que tienen el valor*

*de predecir la llegada de un evento, ya sea un accidente, incidente, cuasi-accidente o estado de seguridad indeseable". De acuerdo con Hinze et al. (2013), son "medidas que no son necesariamente de naturaleza histórica, más bien son usados como predictores de futuros niveles de desempeño seguro". Por otro lado, Øien et al. (2011) los definen como "una forma de monitorización activa utilizada como entrada que es esencial para lograr el resultado de seguridad deseado".*

Para concluir este apartado es importante recordar que los indicadores por sí mismos no proporcionan una mejora de la seguridad, es la calidad de los sistemas de gestión de la seguridad lo realmente importante (Wreathall, 2009). Los indicadores solo proporcionan información sobre el desempeño de una organización, si no se gestiona adecuadamente esta información y se emplea de manera diligente para emprender las acciones necesarias el efecto en el desempeño de la organización será inexistente.

#### **2.5.4 Indicadores para la gestión de la seguridad en construcción**

La seguridad y salud en el trabajo ha sido y continúa siendo un área prioritaria para los representantes políticos, gerentes y trabajadores. Las lesiones y enfermedades profesionales suponen importantes costes humanos y económicos para el accidentado, la empresa y la sociedad (Lebeau et al., 2014). La gestión de la seguridad laboral está ligada a la eficacia y eficiencia y por tanto a la calidad con que se gestiona el propio sistema de gestión de la organización.

Cuando las organizaciones elevan la seguridad y salud laboral a un valor estratégicamente central, inevitablemente deben comprometer considerables inversiones en recursos que les permita medir el desempeño de sus programas en seguridad y salud en el trabajo. Desde la década de los 90 se ha observado a nivel mundial la proliferación de sistemas de gestión en seguridad y salud ocupacional que han potenciado el uso de técnicas y herramientas para la medición de su rendimiento (Robson et al., 2007).

Indicador	Definición del indicador
Índice de Frecuencia	$(\text{N}^\circ \text{ de accidentes durante la jornada laboral con baja} \times 10^6) / (\text{N}^\circ \text{ de trabajadores} \times \text{media del n}^\circ \text{ de horas trabajadas anualmente por trabajador})$
Índice de gravedad	$(\text{N}^\circ \text{ de jornadas perdidas por accidentes laborales} \times 10^3) / (\text{N}^\circ \text{ de trabajadores empleados} \times \text{media del n}^\circ \text{ de horas trabajadas anualmente por trabajador})$
Índice de incidencia	$(\text{N}^\circ \text{ de accidentes con baja} \times 10^5) / (\text{N}^\circ \text{ de trabajadores})$
Duración media de las bajas	$(\text{N}^\circ \text{ de días perdidos por accidentes laborales}) / (\text{No de accidentes con baja})$
Índice de frecuencia acumulado	$(\text{N}^\circ \text{ de accidentes de los 11 meses precedentes} + \text{N}^\circ \text{ de accidentes en el mes}) \times 10^6 / (\text{N}^\circ \text{ total de horas en los 11 meses precedentes} + \text{N}^\circ \text{ total de horas en el mes})$
Índice de gravedad acumulado	$(\text{N}^\circ \text{ de días perdidos en los 11 meses precedentes} + \text{N}^\circ \text{ de días perdidos en el mes}) \times 10^3 / (\text{N}^\circ \text{ de horas al mes})$
Índice total de accidentes	$\text{N}^\circ \text{ total de accidentes en un subgrupo de población estudiado} / \text{N}^\circ \text{ total de accidentes en la población estudiada}$
Índice de accidentes leves	$\text{N}^\circ \text{ total de accidentes leves en un subgrupo de población estudiado} / \text{N}^\circ \text{ total de accidentes leves en la población estudiada}$
Índice de accidentes graves	$\text{N}^\circ \text{ total de accidentes graves en un subgrupo de población estudiado} / \text{N}^\circ \text{ total de accidentes graves en la población estudiada}$
Índice de accidentes mortales	$\text{N}^\circ \text{ total de accidentes mortales en un subgrupo de población estudiado} / \text{N}^\circ \text{ total de accidentes mortales en la población estudiada}$

Tabla 10. Principales indicadores para el análisis de accidentes registrados (López-Arquillos & Rubio-Romero, 2015)

Los indicadores utilizados en seguridad y salud en la construcción tradicionalmente han sido indicadores *lagging*. Estos indicadores se basan en cosas que ya han ocurrido, en aspectos del pasado. Así, se centran en medir la frecuencia con la cual se han producido resultados de seguridad indeseables como un indicador objetivo del desempeño. Por lo tanto, se han desarrollado formas estandarizadas para calcular las tasas de frecuencia (Lingard et al., 2017). En este sentido, López-Arquillos y Rubio-Romero (2015) recogen en la Tabla 10 algunos ejemplos de los indicadores empleados más habitualmente en seguridad y salud y que también han sido ampliamente usados en el sector de la construcción.

En general, este tipo de indicadores son útiles porque son (National Occupational Safety and Health Commission, 1999):

- *Relativamente fáciles de recolectar.*
- *Fácil de entender.*
- *Obviamente están vinculados al desempeño seguro.*
- *Fácil de usar en benchmarking o análisis comparativos.*
- *Es posible usarlos para identificar tendencias.*

Sin embargo, el uso de indicadores *lagging* ha sido ampliamente discutido en relación a su impacto real en la gestión de la seguridad. Los indicadores *lagging* en seguridad y salud presentan una limitación importante dado que miden la ausencia de la seguridad más que la presencia de la seguridad (Arezes & Sérgio Miguel, 2003; Lofquist, 2010) y por lo tanto no son una medida directa del nivel de seguridad en una organización (Lingard et al., 2013). Además hay que considerar que el hecho de que no se hayan producido accidentes en un lugar de trabajo en un periodo concreto no significa necesariamente que ese lugar de trabajo sea más seguro que otro lugar de trabajo en el que se haya producido un accidente en ese mismo período (Cadieux et al., 2006). De hecho, cuando se produce una reducción de riesgos de seguridad y salud en las organizaciones, los indicadores *lagging* se vuelven aún menos útiles (Lingard et al., 2013).

Por este motivo, desde hace ya unos años son numerosos los estudios que proponen el uso de indicadores *leading* en el sector de la construcción (Guo & Yiu, 2016; Hallowell et al., 2013; Hinze et al., 2013; Rajendran, 2013; Toellner, 2001). Dentro de los indicadores *leading* pueden distinguirse indicadores *leading* pasivos y activos. Los pasivos, si bien pueden ser predictivos en alguna medida a nivel macro, no obstante son menos efectivos en el corto plazo que los activos. Hinze et al. (2013) propone como ejemplos sobre indicadores *leading* pasivos para la construcción:

- *Número o porcentaje de encargados y directivos con la formación certificada de seguridad.*
- *Número o porcentaje de trabajadores con la formación certificada de seguridad.*
- *Número o porcentaje de contratistas seleccionados conforme a requisitos de seguridad con carácter previo.*
- *Requerimiento de que cada subcontratista envíe un plan específico para el sitio antes de ser contratado.*
- *Requerimiento de que el director ejecutivo de cada subcontratista emita una carta de compromiso con la seguridad de los trabajadores de la construcción.*

Estos indicadores aunque son buenos indicios de un buen comienzo por parte de las organizaciones, dan poca información para el corto plazo, para el día a día, para poder reforzar la prevención de forma rápida. Estos indicadores pueden usarse como predictores en el medio o largo plazo, y permiten tomar medidas de mejora en ese plazo.

Sin embargo, los indicadores *leading* activos están enfocados a ayudar con los cambios en el corto plazo. En este caso, algunos de los ejemplos propuestos por Hinze et al. (2013) para el sector de la construcción serían:

- *Porcentaje de supervisores o gerentes que han participado en reuniones de seguridad.*
- *Porcentaje de encargados que han participado en reuniones de seguridad en el lugar de trabajo.*
- *Porcentajes de test negativos como resultado de test aleatorios de consumo de drogas.*
- *Número de incidencias reportadas y cerradas por 200.000 h. de exposición de los trabajadores.*
- *Porcentaje de cumplimiento de seguridad en las auditorías de seguridad en el lugar de trabajo.*
- *Agresividad en la promoción de la seguridad en el sitio de trabajo por los contratistas.*
- *Registro de observaciones realizadas para evaluar y determinar la necesidad de introducir cambios en el lugar de trabajo y en los programas de seguridad.*

Como puede observarse, los hay cuantitativos, pero también de naturaleza cualitativa.

En línea con las propuestas de Hinze et al. (2013), Lingard et al. (2017) analizaron los datos sobre el rendimiento de la seguridad en un gran proyecto de construcción de infraestructura en Australia. El análisis examinó las relaciones temporales existentes entre los distintos indicadores de seguridad empleados en este proyecto. El estudio reveló una relación cíclica temporal entre los indicadores y las acciones que se realizan para la gestión de la seguridad en un proyecto de construcción. Los hallazgos de este estudio confirmaron a los indicadores *leading* como indicadores predictivos eficaces. Los indicadores *leading* que emplearon fueron los siguientes:

- *Reuniones de seguridad*
- *Observaciones de seguridad*
- *Inspecciones del lugar de trabajo*
- *Sanciones/infracciones*
- *Auditorías de seguridad y salud ocupacional*
- *Incumplimientos legales*
- *Informes de riesgos*
- *Riesgos cerrados*
- *Inspecciones oficiales de seguridad*
- *Test de alcohol*
- *Test de drogas*
- *Análisis de documentos y métodos de trabajo*

### 2.5.5 Indicadores en la Ingeniería de la Resiliencia

En el marco de la Ingeniería de la Resiliencia, Herrera (2012) va un paso más allá en la clasificación de indicadores presentada previamente, y amplía la tipología de indicadores *lagging* y *leading* incluyendo una categoría nueva de indicadores que podría decirse que se sitúa en la frontera entre dos anteriores. Así, propone un tercer tipo de indicador: los indicadores *current* o actuales. En este sentido, Haas y Yorio (2016) consideran que estos tres indicadores respaldan una "visión sistémica y dinámica de la seguridad organizacional" propuesta por Reiman y Pietikäinen (2010) en la medida en que proporcionan una visión en conjunto sobre cómo los sistemas de gestión de la seguridad funcionan en un determinado punto en el tiempo y proporcionan orientaciones sobre qué aspectos del sistema deben mejorarse. Así, puede establecerse un paralelismo entre la clasificación de indicadores realizada por Reiman y Pietikäinen (2010) como indicadores de feedback, monitor y drive y la de Herrera (2012) basada en indicadores *lagging*, *current* y *leading*.

Posteriormente, Hollnagel (2017) también señala que desde el enfoque de la Ingeniería de la Resiliencia es interesante hacer esa distinción y trabajar con estos tres tipos de indicadores (*lagging*, *current*, *leading*) en vez de los dos clásicos (*lagging*, *leading*), ya que parecen ajustarse mejor al enfoque de emergente de los accidentes de los modelos sistémicos. En ese sentido, afirma que la finalidad de los indicadores de desempeño es "proporcionar una base para conocer cómo una organización, o un proceso, se desempeña". En esta nueva clasificación los tres indicadores podrían describirse del siguiente modo (Hollnagel, 2017):

- **Indicadores *lagging*:** se basan en eventos pasados que ya han ocurrido, por lo que dan información sobre el estado pasado de la organización. Aquí se encontrarían los indicadores clásicos ya mencionados como ratios de accidente o de fallos.
- **Indicadores *current*:** se centran en el instante actual, por lo que dan información sobre el estado de la organización en el presente. Este tipo de indicadores estaría directamente vinculado a la monitorización. Algunos ejemplos de estos indicadores serían los ratios de producción, recursos o inventario.
- **Indicadores *leading*:** se centran en lo que podría ocurrir, es decir, por lo que dan información sobre el estado de la organización en el futuro. Este tipo de indicadores se emplea como predictores. Un ejemplo sería la análisis combinado

de parámetros como el tiempo y los recursos disponibles, procesos críticos, etc. que ayuden a predecir qué puede suceder en la organización.

En cuanto al diseño de sistemas de medida del desempeño en seguridad es destacable la aportación de Saurin et al. (2014) que establecen un conjunto de criterios para evaluar la idoneidad de estos sistemas de indicadores conforme al paradigma de la Ingeniería de la Resiliencia. Según estos autores los sistemas de medida del desempeño en seguridad deben:

- Monitorizar el trabajo normal.
- Ser resilientes.
- Monitorizar riesgos a través de los sistemas socio-técnicos.
- Estar próximos a la monitorización en tiempo real.
- Tener en cuenta el desempeño en otras dimensiones de la organización.
- Conseguir un equilibrio entre integridad y facilidad de uso (en relación al principio de ETTO).

En el marco de la Ingeniería de la Resiliencia, Øien et al. (2010) proponen método para diseñar un conjunto de indicadores que ayuden a las organizaciones a ser resiliente y lidiar adecuadamente con la incertidumbre y los eventos inesperados. Este método se denomina *Resilience based Early Warning Indicators* (REWI) y basa en otro método anterior para el diseño de indicadores *leading* conocido como *Leading Indicators of Organizational Health* (LIOH) (EPRI, 2000; Wreathall, 2001) diseñado por el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica de Estados Unidos (EPRI). El REWI centra en ocho factores que contribuyen al éxito y que son analizados para, en base a ello, identificar indicadores *leading* que faciliten y ayuden a que esos factores contribuyentes al éxito se cumplan.

Por otro lado, cabe destacar el *Leading Indicator Identification Method* (LIIM) (Raben, 2017; Raben et al., 2017; Raben et al., 2018) que ha sido recientemente desarrollado para identificar indicadores basados en el trabajo ejecutado o *work-as-done*. El LIIM presenta dos características destacables desde el punto de vista de la Ingeniería de la Resiliencia, por un lado, no se basa en la detección de errores o eventos no deseados y, por otro lado, pone el foco de atención en el funcionamiento del sistema en su desempeño diario. Así, este método responde al desafío identificado por (Herrera & Hovden, 2008) de identificar indicadores desde un enfoque sistémico que permita integrar las interacciones entre humanos, organizaciones y tecnología. Para ello, el LIIM se apoya directamente el FRAM, presentado en apartados anteriores. Así, a través del

modelo FRAM de un sistema se pasa a analizar qué funciones presentan una variabilidad que podría afectar al resultado deseado o esperado del sistema. De este modo, se amplían las aplicaciones del FRAM más allá de la investigación de accidentes y evaluación de riesgos al convertirlo en una herramienta clave para la identificación de indicadores *leading*. Por ahora son pocos los estudios que han aplicado el método LIIM, ya que ha sido recientemente propuesto. A este respecto, cabe mencionar su aplicación en el sector sanitario mediante la identificación de indicadores *leading* para la toma de muestras de sangre (Raben et al., 2017) y para el proceso de detección de la septicemia (Raben et al., 2018).

## 3 METODOLOGÍA

### 3.1 Introducción

En este capítulo se expone la metodología empleada durante la investigación desarrollada en el presente trabajo de tesis. En primer lugar, se presenta el *Functional Resonance Analysis Method* que ha sido empleado para el modelado y análisis de los trabajos asociados a la fase de construcción de la estructura un edificio. Seguidamente, se describe un método de identificación de indicadores *leading* basado en el FRAM. Así mismo, se presenta el procedimiento seguido en el transcurso de la investigación y la caracterización de los trabajadores que han participado en las entrevistas durante la toma de datos. En segundo lugar, se describe el proceso de diseño y validación un cuestionario desarrollado conforme a la Ingeniería de la Resiliencia. Éste está centrado en los planes de seguridad y salud y su contribución al desempeño resiliente en la ejecución. En el proceso de validación de dicho cuestionario se han aplicado el método de Agregados Individuales y el método Delphi. Además se ha incluido una descripción de las etapas que se han ido abordando en esa parte de la investigación incluyendo los criterios de selección del panel de expertos y sus características.

### 3.2 Metodología para el análisis FRAM de las actividades de construcción de la estructura de un edificio

En este apartado se desarrolla el método FRAM indicando cada uno de los pasos que deben seguirse para su correcta aplicación. Luego, se presenta un método de identificación de indicadores *leading* basado en el FRAM que se denomina "*Leading Indicator Identification Method*". Posteriormente, se describe el proceso de investigación seguido en el presente trabajo de tesis para aplicar el método FRAM a las actividades de construcción de la estructura de un edificio. Se describen así las herramientas empleadas en el proceso, como el FRAM Model Visualizer, y las técnicas de investigación utilizadas, como las entrevistas y observaciones desarrolladas mediante trabajos de campo. Además, se detalla la caracterización de los trabajadores que participaron en las entrevistas.

### 3.2.1 Functional Resonance Analysis Method (FRAM)

Tal y como se indicó en el capítulo 2, el FRAM es un método cualitativo que se enmarca dentro de la nueva visión de la seguridad definida por la Ingeniería de la Resiliencia. El FRAM es un método que ayuda a comprender cómo se lleva a cabo la ejecución del trabajo diario en los sistemas socio-técnicos complejos. Con este cambio de prisma se concentran los esfuerzos en entender el funcionamiento real del sistema para mejorar la capacidad del mismo para adaptarse a los eventos imprevistos sin sobrepasar los límites de la variabilidad. Así, el foco de atención está en analizar la variabilidad para entender cómo se origina y cómo se propaga por el sistema a través de los acoplamientos entre funciones. Para poder realizar el análisis FRAM de un sistema o conjunto de actividades, hay que seguir una serie de pasos ordenadamente. Estos se presentan a continuación en base a la descripción de Hollnagel (2012a):

- **Paso 0: Definición del propósito del análisis FRAM**

El análisis FRAM puede utilizarse con diferentes propósitos. De este modo, puede emplearse con un enfoque retrospectivo aplicándolo a un accidente sucedido, con un enfoque prospectivo aplicándolo a una evaluación de riesgos o también puede ser muy útil cuando se desea crear, implantar o rediseñar un sistema. La Figura 20 refleja los principales propósitos con los que se puede aplicar el FRAM.

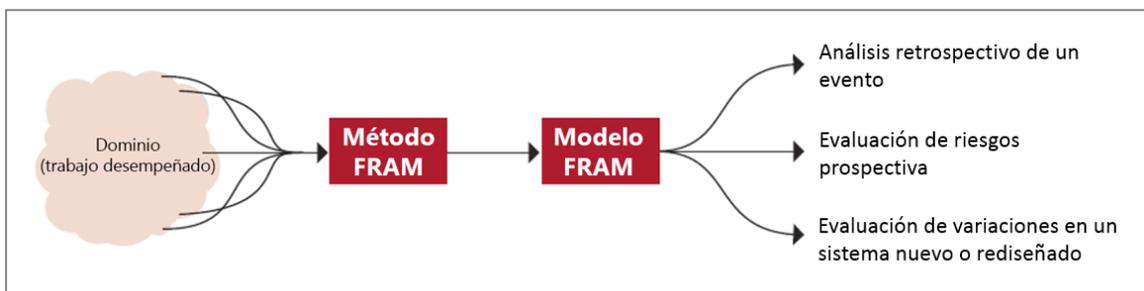


Figura 20. Tres aplicaciones del FRAM  
(Hollnagel et al., 2014)

- **Paso 1: Identificación y descripción de las funciones**

El primer paso del método FRAM es clave porque tras su realización se obtendrá el modelo FRAM que será analizado posteriormente. Las fuentes de información que se recomienda emplear para la toma de datos son tres: documentación, entrevistas y observaciones. Este paso del análisis FRAM se basa en la identificación y descripción de todas las funciones que componen el sistema que se desea estudiar. Una función es una actividad o conjunto de actividades que es necesario llevar a cabo para obtener un resultado. Cada función está representada mediante un hexágono y está definida o

caracterizada por seis aspectos o variables representados en la Figura 21, en la cual se han empleado las iniciales en inglés de cada aspecto (Hollnagel, 2012a):

- **Entrada** (I=Input): Es un cambio de estado en el sistema. Puede representar materia, energía o información. Es lo que activa la función, es decir, representa aquello que inicia una función.
- **Salida** (O=Output): Es el resultado de la función. Puede representar materia, energía, información o un cambio de estado.
- **Precondiciones** (P=Preconditions): Son condiciones que deben ser verificadas, antes de que una función sea llevada a cabo.
- **Recursos** (R=Resources): Es algo que se necesita o se consume mientras se realiza una función. Puede representar materia, energía, información, software, herramientas, mano de obra, habilidades... Dentro de los recursos se incluyen las condiciones de ejecución.
- **Control** (C=Control): Es lo que supervisa o regula una función para obtener la salida deseada. El control puede producirse mediante un plan, un programa, un procedimiento, un conjunto de directrices o instrucciones, un algoritmo...
- **Tiempo** (T=Time): Representa las diversas maneras en las que el tiempo o las relaciones temporales pueden afectar a cómo se lleva a cabo una función.

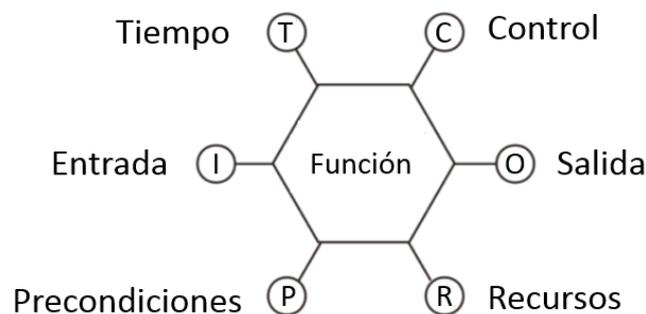


Figura 21. Los seis aspectos que definen una función (Hollnagel, 2012a)

Para definir adecuadamente las funciones del sistema debe distinguirse entre:

- **Funciones de primer plano** ("foreground functions"): Estas funciones son relevantes porque existe o puede existir variabilidad en su salida.
- **Funciones de fondo** ("background functions"): Estas funciones marcan los límites del sistema que se está estudiando y no presentan variabilidad.

- **Paso 2: Identificación de la variabilidad**

En este paso se identificará la variabilidad de las funciones mediante el análisis de la variabilidad de cada función, o más bien, de la variabilidad de la salida de la función. En este sentido, hay tener en cuenta que la variabilidad dependerá del tipo de funciones que se estén analizando. Así, puede establecerse otra clasificación para las funciones:

- **Funciones tecnológicas:** son realizadas por máquinas o están relacionadas con los sistemas de información y presentan una variabilidad baja o nula.
- **Funciones organizacionales:** son las que desempeña la propia organización o sistema y presentan variabilidad. Aunque en este caso se considera que la variabilidad es de baja frecuencia y gran amplitud, por lo que cambian despacio.
- **Funciones humanas:** son llevadas a cabo por los propios trabajadores o personas implicadas en una organización y presentan mucha variabilidad. Estas es de alta frecuencia y amplitud, ya que los trabajadores deben responder a los cambios rápidamente realizando ajustes.

La variabilidad de una función puede ser de origen externo, interno o puede ser debida a los acoplamientos con otras funciones aguas arriba. Este último caso, se analizará en el siguiente paso. En la identificación de la variabilidad se analizará solo la variabilidad interna y la variabilidad externa de cada tipo de función. A continuación, será necesario caracterizar la variabilidad del desempeño. Para ello, existe una solución elaborada y una solución simple. En la solución elaborada la variabilidad de la salida debe describirse mediante diversas variables como son: **tiempo y duración, fuerza, distancia y dirección, objeto incorrecto y secuencia**. No obstante, existe una solución simplificada donde la variabilidad de la salida de la función se caracteriza con respecto a dos variables: **temporalidad y precisión**. La temporalidad hace referencia a si la salida de la función se produjo en el momento en que debía hacerlo. La precisión hace referencia a si la salida de la función se ajusta exactamente a lo esperado o deseado (Hollnagel, 2012a).

- **Paso 3: Agregación de la variabilidad**

Este tercer paso consiste en la agregación de la variabilidad en el desempeño. En este paso se analizarán las funciones teniendo en cuenta su posición dentro del modelo FRAM y la propagación de su variabilidad. De este modo, se considerarán:

- **Funciones aguas arriba** (“upstream functions”): Dada una función concreta las funciones aguas arriba serán todas aquellas que se realizaron antes que ella en una instanciación concreta.
- **Funciones aguas abajo** (“downstreams functions”): Similarmente, para una función concreta las funciones aguas abajo serán todas aquellas que se realizaron después que ella en una instanciación concreta.

Aunque a priori, no se puede determinar qué funciones se realizaran antes que otras, ya que éste no es un modelo secuencial o lineal. Cuando se realizan instanciaciones, es decir, ejemplos o particularizaciones del modelo para un escenario específico, es cuando aparecen estas relaciones temporales.

En el método FRAM la variabilidad de la salida de una función se representa mediante acoplamientos aguas arriba y aguas abajo en vez de mediante las relaciones causa-efecto tradicionales. En este tercer paso se analizarán esos acoplamientos entre funciones aguas arriba y aguas abajo y cómo se propaga la variabilidad, prestando especial atención a cómo se amplifica o amortigua dicha la variabilidad. Así, se estudiarán las funciones en conjunto y la influencia de los acoplamientos entre ellas en la variabilidad en el desempeño.

- **Paso 4: Consecuencias del análisis**

Como resultado del análisis FRAM se determinará qué funciones son críticas en el sistema estudiado. Evidentemente esta criticidad se considera desde el punto de vista de la variabilidad. Por lo tanto, lo que se determina es en qué áreas o funciones podría generarse y propagarse la variabilidad afectando al desempeño del sistema. Esto a veces puede conducir a resultados positivos y otras veces a resultados negativos. Los tipos de medidas que se podrían tomar como consecuencia del análisis pueden englobarse en seis grandes grupos: eliminación, prevención, protección, facilitación, monitorización y amortiguación. Las cuatro primeras son ampliamente conocidas en el marco de la gestión de la seguridad, ya que han sido tradicionalmente empleadas para combatir los riesgos y mejorar la seguridad. Sin embargo, los dos últimos tipos de medidas encaminadas a monitorizar el desempeño con indicadores *leading* y amortiguar la variabilidad son las que coinciden de forma más clara con la visión de la seguridad propuesta por la Ingeniería de la Resiliencia. Hay que considerar que ésta no pretende centrarse en evitar que las cosas vayan mal, sino más bien ayudar a que las cosas vayan bien. Por lo tanto, los propósitos de seguridad y productividad se vuelven sinérgicos en lugar de antagónicos, de acuerdo con el pensamiento de la ingeniería de la resiliencia (Hollnagel, 2012a).

Dado el enfoque de la presente investigación, es de especial relevancia la monitorización. Ésta se centra en el uso de indicadores, pero no los indicadores reactivos o *lagging* que tradicionalmente se han empleado, sino indicadores proactivos o *leading* que permitan conocer el estado del sistema y de los puntos críticos para poder gestionar la variabilidad y actuar para evitar que se produzca la resonancia funcional. Para conseguirlo, es importante conocer muy bien el funcionamiento del sistema. Por eso, el FRAM se vislumbra como herramienta clave para conocer cómo funcionan los sistemas realmente en su desempeño diario y así poder establecer indicadores significativos que ayuden a conocer el estado real del sistema en sus puntos clave donde la variabilidad podría descontrolarse. Precisamente en este último tipo de medidas es donde se centra el trabajo de investigación recogido en la presente tesis.

### 3.2.2 Método de Identificación de Indicadores Leading

El Método de Identificación de Indicadores *Leading* (LIIM) propone un procedimiento para poder identificar indicadores *leading* utilizando el método FRAM. Por este motivo, los pasos que deben seguirse para aplicar el método LIIM presentan una cierta analogía con el método FRAM. Estos quedan resumidos a continuación (Raben, 2017):

#### 1. Identificación de las funciones relevantes.

Consiste en desarrollar un modelo FRAM en base a la información obtenida mediante entrevistas, observaciones y análisis de la documentación. Este paso es equivalente al paso 1 del método FRAM.

#### 2. Agrupación de las funciones.

Este paso es una de las novedades que introduce el método LIIM con respecto al FRAM. Antes de analizar la variabilidad se deben definir grupos de actividades o tareas principales que engloban a diferentes funciones que pueden ser vistas como subtareas que al ejecutarse contribuyen a alcanzar un resultado global o una tarea principal.

#### 3. Identificación de la variabilidad de las funciones.

Se analiza la variabilidad individual de cada función. Este paso es análogo al paso 2 del FRAM descrito anteriormente.

#### 4. Identificación de los acoplamientos entre funciones aguas arriba y aguas abajo.

Se analizan los acoplamientos aguas arriba y aguas abajo entre funciones. Este paso es similar al paso 3 del FRAM.

### 5. Identificación de los indicadores *leading*.

Este paso y el siguiente son propios del método LIIM. Para proceder a identificar los indicadores *leading* o los candidatos a indicadores *leading* se identifican las funciones que presentan más frecuentemente variabilidad que se propaga por los acoplamientos aguas arriba y aguas abajo.

### 6. Confirmación de los indicadores *leading* identificados mediante el punto de vista de expertos.

Para concluir, se somete a la evaluación de expertos los candidatos identificados para proponer indicadores *leading*. También es necesario revisar los eventos adversos que hayan ocurrido en el pasado en el sistema estudiado para verificar la relevancia de estos candidatos a indicadores *leading* identificados.

### 3.2.3 Proceso de investigación para la aplicación del FRAM a la construcción de la estructura de un edificio

Como punto de partida de la investigación desarrollada en el presente trabajo de tesis, se decidió aplicar el FRAM con el fin de conocer cómo se desarrolla el trabajo diario en las obras de construcción durante la fase de estructuras, lo que se denomina trabajo ejecutado o “*work-as-done*”. Esto permitirá obtener un modelo de la ejecución de estos trabajos conforme a la Ingeniería de la Resiliencia.

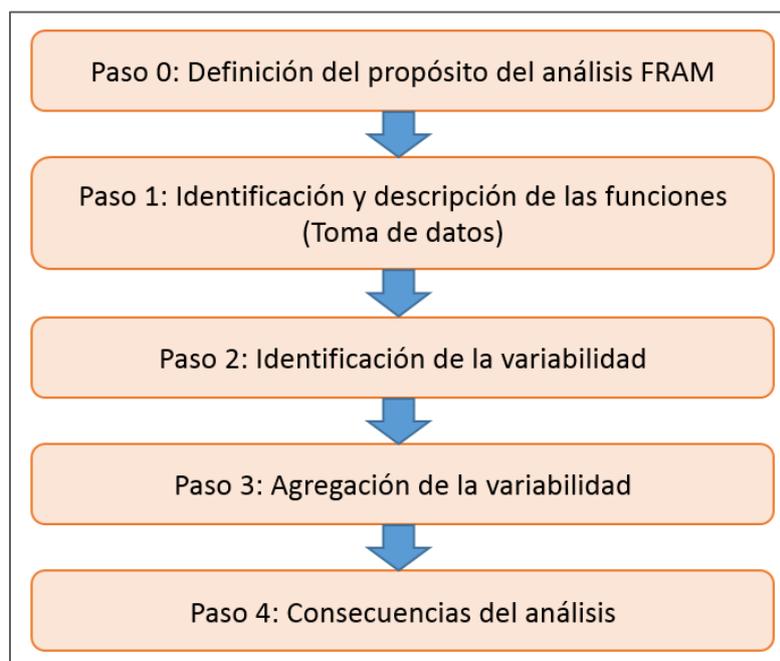


Figura 22. Pasos para aplicar el método FRAM (Elaboración propia)

Tal y como se ha venido poniendo de manifiesto en este trabajo, conocer el desempeño real del sistema o de la organización es un buen punto de partida para proponer medidas que realmente sean eficaces conforme a esta nueva visión de la seguridad. Dicho de otro modo, es importante poner el foco de atención en las cosas que van bien. Por ello, el FRAM es una de las herramientas desarrolladas en el marco de la Ingeniería de la Resiliencia más idóneas para este propósito, ya que se centra en entender cómo se alcanza el éxito diariamente. En la Figura 22 se recogen los pasos seguidos en el proceso de investigación llevado a cabo para realizar el análisis de las actividades de construcción de la estructura de un edificio conforme al método FRAM descrito en el apartado anterior.

En el primer paso, para identificar y definir adecuadamente las funciones conforme a la ejecución real de los trabajos de construcción de estructuras es necesario realizar una toma de datos mediante trabajos de campo. Tres empresas de construcción han estado colaborando en la investigación y han permitido que se realicen visitas a las obras de construcción de distintos edificios en la provincia de Málaga.

De acuerdo a la descripción proporcionada anteriormente del primer paso del método FRAM, se han realizado dos tareas principales:

- Análisis de la documentación disponible.
- Trabajos de campo basados en entrevistas y observaciones.

Para el análisis documental se revisaron diferentes documentos de interés como son:

- Normativa vigente y documentos del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo con especial interés en la Guía Técnica del Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción (INSHT, 2012) y las Notas Técnicas disponibles al respecto (INSHT, 2009a, 2009b, 2008b, 2008c, 2008d, 198X)
- Guías y manuales centrados en la construcción de estructuras (Garrido Rodríguez et al., 2011; Marí Bernat et al., 2002; OSALAN, 2009, 2007).
- Diferentes páginas webs de interés en la materia (Alsina, s.f.; Construmática, s.f.; Fundación Laboral de la Construcción, s.f.; PERI, s.f.; ULMA, s.f.).
- Un total de 30 planes de seguridad y salud de obras de construcción fueron revisados analizando similitudes y diferencias.

Los trabajos de campo consistieron en la realización de un total de 33 visitas a 5 obras de construcción diferentes, todas ellas en fase de estructura, durante un periodo de 7 meses. En estas visitas se llevaron a cabo observaciones de los trabajos, los cuales

fueron documentados con fotografías, y entrevistas in situ, las cuales fueron grabadas para su posterior análisis. En la Tabla 11 se resumen las principales características de estas obras incluyendo el número de visitas y de entrevistas realizadas en cada una de ellas.

Empresa /Obra	Nº plantas del edificio	Presupuesto de ejecución material	Presupuesto seguridad y salud	Plazo de Ejecución	Nº de trabajadores en la obra	Nº de visitas y entrevistas
<b>Empresa 1 Obra 1</b>	2 Bloques, cada uno con 2 plantas sótano + 1 planta baja comercial + 7 plantas de viviendas (135 viviendas)	11.544.691 €	160.580 €	20 meses	65 trabajadores de media	14 visitas y 27 entrevistas
<b>Empresa 1 Obra 2</b>	6 Bloques de viviendas plurifamiliares con 1 planta sótano + 3 plantas de viviendas (72 viviendas)	9.934.987 €	118.221 €	18 meses	45 trabajadores de media y 90 en punta de producción	3 visitas y 9 entrevistas
<b>Empresa 1 Obra 3</b>	4 Bloques de viviendas plurifamiliares con 1 planta sótano + 3 plantas de viviendas (47 viviendas)	5.866.157 €	89.728 €	15 meses	44 trabajadores de media y 100 en punta de producción	3 visitas y 11 entrevistas
<b>Empresa 2 Obra 4</b>	1 Bloque con 3 Plantas sótano + 1 planta comercial + 10 plantas de viviendas (110 viviendas)	8.084.490 €	207.771 €	24 meses	30 trabajadores de media	10 visitas y 23 entrevistas
<b>Empresa 3 Obra 5</b>	4 plantas centro educativo	4.841.614 €	47.894 €	16 meses	25 trabajadores de media y 30 en punta de producción	3 visitas y 15 entrevistas

Tabla 11. Caracterización de las obras visitas durante los trabajos de campo (Elaboración propia)

Como paso previo a la realización de los trabajos de campo, se elaboraron dos plantillas con el objeto de facilitar el proceso de recogida de información. Una plantilla serviría de apoyo para realizar las entrevistas y la otra para llevar a cabo las observaciones. Ambas plantillas están disponibles en el Anexo C del presente trabajo.

En relación a las consideraciones éticas y la protección de datos se garantizó el anonimato a todos los entrevistados. De hecho, en las grabaciones no se registró ninguna información de carácter personal que permitiera identificar al trabajador a posteriori. Además, la participación en las entrevistas era de carácter voluntario. Así mismo, al inicio de las entrevistas se le pedía al trabajador su autorización para grabar la conversación. Para fomentar su participación y que se expresaran libremente y con sinceridad, se garantizó a los trabajadores que sus empresas no tendrían acceso a los audios grabados.

Las entrevistas fueron semi-estructuradas, es decir, estandarizadas y abiertas para que el entrevistado pudiera describir su trabajo diario autónomamente. Para elaborar las preguntas que se incluirían en las entrevistas se usaron como principales fuentes de información diferentes publicaciones sobre FRAM que incluían orientaciones o ejemplos de preguntas que podrían emplearse para la toma de datos del FRAM como son los trabajos de Studic (2015), Pickup et al. (2017), Hollnagel et al. (2014), Clay-Williams et al. (2015) y Alberty et al. (2016).

La plantilla preparada para las entrevistas fue empleada por el entrevistador para no olvidar ningún aspecto clave en la entrevista. Si durante la descripción del trabajo el entrevistado no mencionaba alguna información relevante para definir las funciones del modelo FRAM, el entrevistador preguntaba sobre ella. Por lo tanto, las preguntas formuladas durante cada entrevista podían variar según el relato de las tareas realizado por el entrevistado.

Inicialmente, se preparó también un modelo extendido de la plantilla de las entrevistas que incluía un texto de referencia para que los entrevistadores tuvieran unas directrices sobre qué debían decir en cada una de las partes de la entrevista. La estructura seguida en las entrevistas fue la siguiente:

### **1. Introducción de la entrevista**

Inicialmente, se procedió a contextualizar las entrevistas de forma breve con el objetivo de presentar al entrevistado el marco en el cuál las entrevistas eran desarrolladas. El texto de referencia que se preparó con este propósito fue el siguiente:

*Buenos días, soy un/a investigador/a de la Universidad de Málaga. Actualmente estamos realizando un estudio sobre la construcción de estructuras de hormigón en edificios. El objetivo de este estudio es conocer cómo se realizan realmente estos trabajos para poder determinar cuáles son los puntos o tareas críticas e introducir posibles mejoras en ellos.*

*Por eso, es fundamental poder hablar con los trabajadores que realizan diariamente estos trabajos, porque lo que realmente busco es conocer cómo se hace el trabajo en la realidad, en el día a día.*

*Así, te agradezco tu colaboración, ya que todo lo que puedas contarme sobre cómo haces tu trabajo es de gran valor e importancia.*

## 2. Permiso para la grabación

Seguidamente, se solicitó al trabajador su autorización para grabar la entrevista y se le informó de que ninguna dato de carácter personal sería registrado en ella:

*Me gustaría que me dieras tu autorización para grabar esta entrevista. Te garantizo la confidencialidad de tus opiniones y de la información que me proporciones. Así mismo, te indico que en ningún momento de la investigación se mencionaran o se hará uso de tus datos personales. Todas las grabaciones se registraran de forma anónima. Por lo que no se te pide que indiques tus datos personales en ella, simplemente te asignaremos un número que será el XX. ¿Me das tu autorización para grabar la entrevista? Antes de empezar, ¿tienes alguna pregunta para mí?*

## 3. Datos demográficos

Para comenzar la toma de datos, se recogió alguna información que permitiera caracterizar al trabajador demográficamente. Las preguntas empleadas para ello se presentan en la plantilla de las entrevistas incluida en el Anexo C.

## 4. Preguntas de apoyo para la entrevista

A continuación, se pidió al entrevistado que describiera las actividades que normalmente realiza. Se emplearon durante esta parte de la entrevista preguntas de apoyo que pueden ser consultadas en el Anexo C, en la plantilla de las entrevistas. Estas preguntas fueron redactadas de forma genérica y como apoyo para no olvidar abordar información importante para definir los aspectos de las funciones. Sin embargo, estas preguntas podían ser formuladas de forma diferente para adaptarse a las tareas concretas que el entrevistado estaba describiendo y al vocabulario idóneo de acuerdo al perfil del entrevistado.

## 5. Posibilidades de mejora de la ejecución de los trabajos

Para concluir, se le preguntó al entrevistado si consideraba que se podía mejorar la forma de realizar las tareas descritas considerando que no existieran limitaciones de tiempo o presupuesto.

Para la selección de estos entrevistados se tuvieron en cuenta las recomendaciones incluidas en la guía desarrollada por Hollnagel et al. (2014), quienes indican que las mejores fuentes de información son los trabajadores que realizan las propias actividades objeto de estudio. Por este motivo, tan solo un jefe de obra fue entrevistado. La primera

entrevista realizada tuvo mayor duración en relación a las demás, ya que sirvió para analizar algunas de las principales diferencias entre la descripción teórica de los trabajos y la realidad. Esta entrevista se llevó a cabo con un encargado de los encofradores con más de 45 años de experiencia. Concretamente, se entrevistaron a un total de 85 trabajadores que tenían trabajos como encofradores, ferrallistas, operadores de grúa, personal de salud y seguridad y jefe de obra, de acuerdo con la Tabla 12. La duración media de todas estas entrevistas fueron 10 minutos y 3 segundos.

Puesto de trabajo	Número de entrevistas realizadas
Encargado de los encofradores	4
Oficial de primera encofrado	21
Encofrador	15
Encargado de los ferrallistas	2
Oficial de primera de ferralla	3
Ferrallista	21
Personal de Seguridad y Salud	12
Operario de replanteo	2
Operador de Grúa	2
Operario de máquina de bombeo	1
Encargado	1
Jefe de obra	1
<b>TOTAL</b>	<b>85</b>

Tabla 12. Distribución de las entrevistas realizadas por puesto de trabajo  
(Elaboración propia)

En las Figuras 23 y 24 se presentan las edades de los trabajadores y la experiencia en su puesto de trabajo actual. Estos trabajadores presentaban una media de edad de 43 años y una experiencia media en trabajos en fase de estructura de 16.7 años. Muchos de ellos presentaban aún una experiencia mayor en el sector, dado que antes de trabajar en construcción de estructuras habían trabajado en otras actividades de construcción como albañilería. Incluso uno de los trabajadores incluidos en el personal de seguridad y salud había adquirido recientemente ese puesto, por lo que presentaba poca experiencia en él, sin embargo, había estado trabajando más de tres años como encofrador.

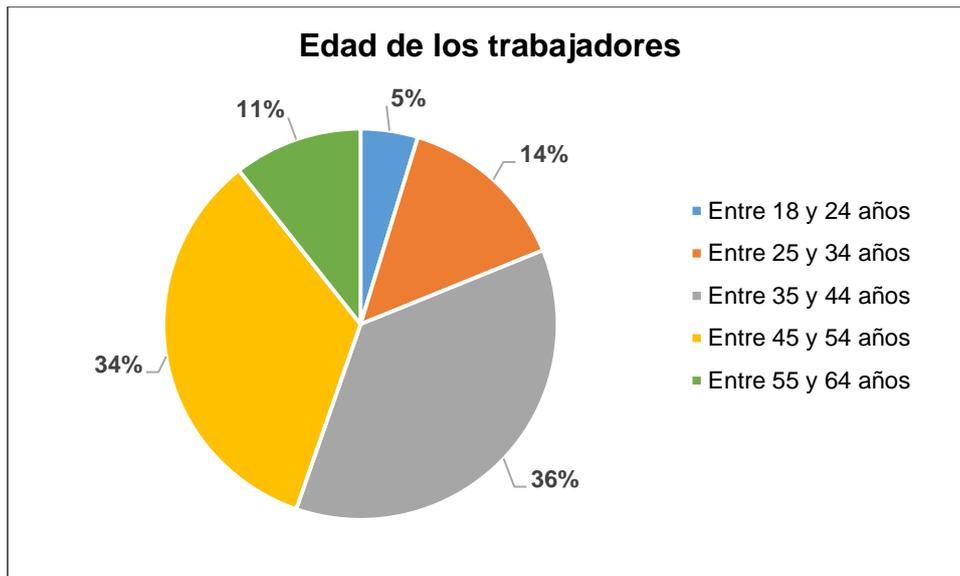


Figura 23. Distribución de los trabajadores entrevistados según la edad (Elaboración propia)

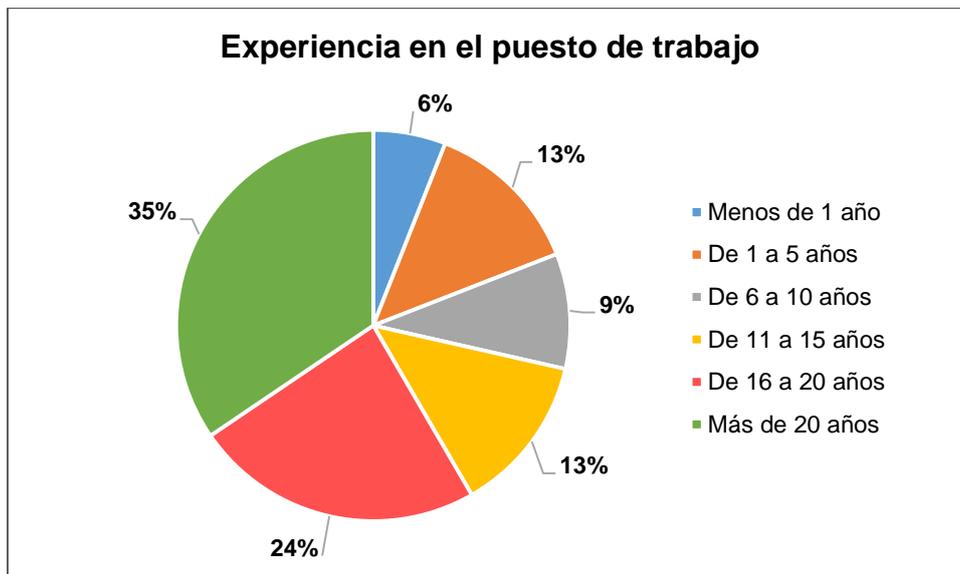


Figura 24. Distribución de los trabajadores entrevistados según su antigüedad en el puesto de trabajo (Elaboración propia)

En relación a las observaciones, la plantilla fue empleada como guía para recordar los puntos clave que debían ser observados, así como para registrar los tipos de tareas que se estaban observando. Todas las observaciones fueron documentadas con fotografías. A modo de ejemplo se incluyen algunas de estas fotografías en las Figuras 25 y 26. Concretamente, la Figura 25 muestra la tarea de encofrado de un pilar y la Figura 26 presenta el proceso de montaje del mecano empleado para el encofrado del forjado.



Figura 25. Fotografías de la tarea de encofrado de un pilar tomadas durante las observaciones realizadas en los trabajos de campo (Elaboración propia)

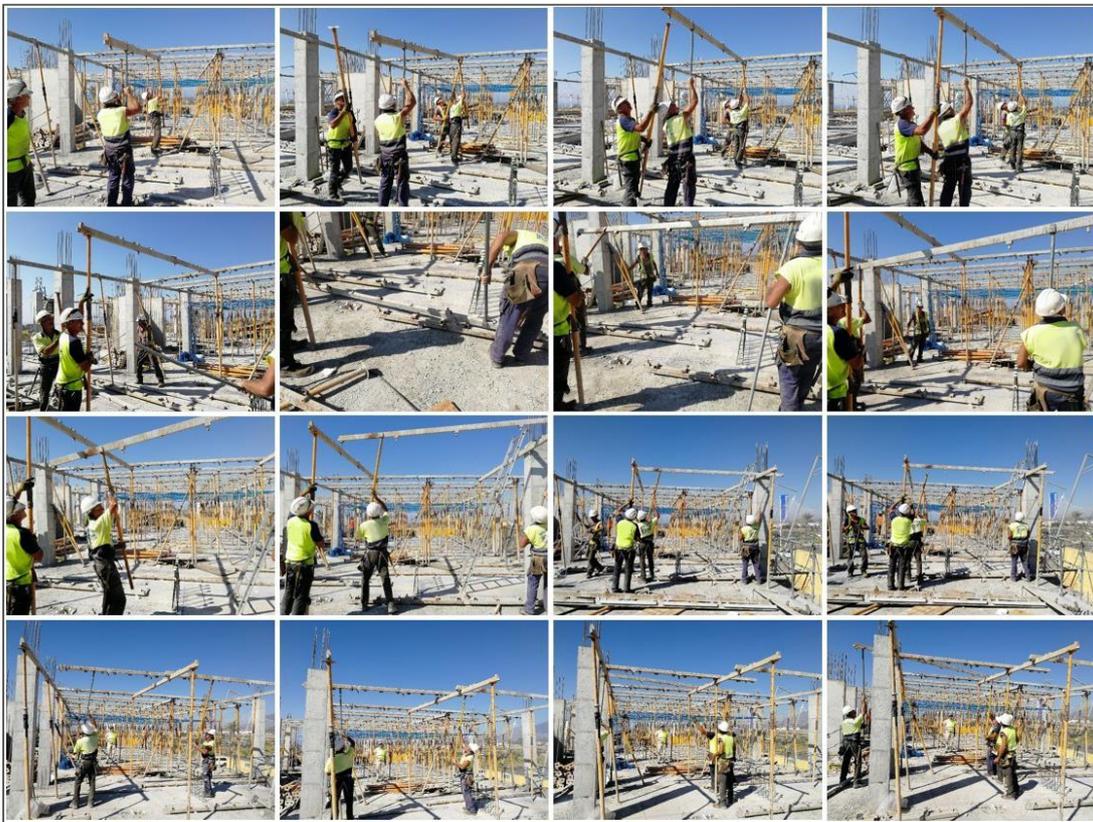


Figura 26. Fotografías de la tarea de montaje del mecano tomadas durante las observaciones realizadas en los trabajos de campo (Elaboración propia)

Una vez recopilada y analizada toda la información, se procedió a identificar y definir cada una de las funciones del modelo FRAM. Para ello, todas las entrevistas fueron transcritas y se analizó la información que contenían en relación a cada tarea o actividad para ir definiendo cada uno de los aspectos de cada función. En este sentido, a partir del texto de cada entrevista se fueron completando las tablas que describen cada función. De acuerdo a los campos que aparecen en la parte izquierda de la Figura 27.

A partir de esas tablas, se empleó el *FRAM Model Visualiser* (FMV), concretamente la versión 0.4.1, para elaborar el modelo FRAM. El FMV es un software diseñado específicamente para facilitar el uso del FRAM para modelar los sistemas socio-técnicos complejos. Este software permite la creación del modelo y su visualización de forma cómoda. En la Figura 27 se incluye una imagen de la ventana principal del FMV, en ella se distinguen dos áreas o espacios diferenciados.

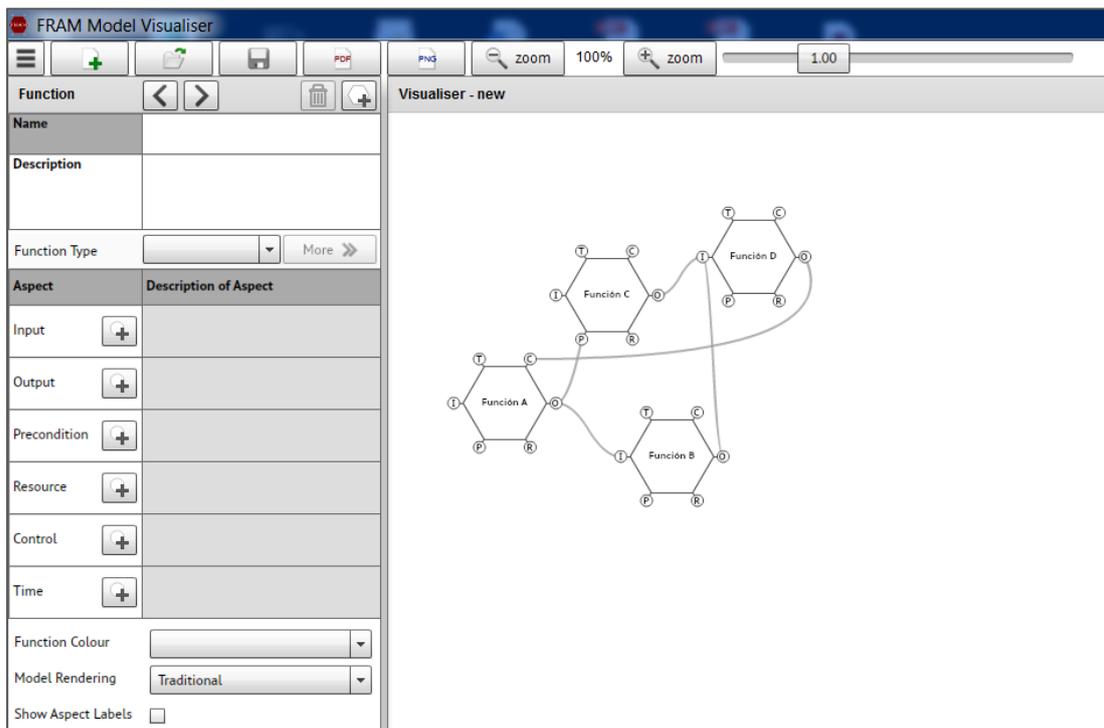


Figura 27. Ventana principal del FRAM Model Visualiser  
(Elaboración propia)

El área de la derecha está destinada a la visualización del modelo que se está creando. Conforme se van definiendo las funciones y sus aspectos, la representación gráfica mediante hexágonos aparece en esta zona. Además se van creando las conexiones o acoplamientos entre funciones mediante líneas al ir definiendo los aspectos de cada función. El área de la izquierda está destinada a la definición textual de las funciones y los aspectos. Para ello, se dispone de diferentes espacios para la descripción de la función, la descripción de los aspectos, la elección del tipo de función, la definición del color de la función y otras opciones para definir el tipo de visualización que se desea obtener.

La aplicación del FRAM a los trabajos realizados en el sector de la construcción permitirá alejarnos del “trabajo como se imagina” (*“work-as-imagined”*), es decir, del trabajo descrito cómo teóricamente debería realizarse, para acercarnos y comprender el “trabajo cómo se hace” (*“work-as-done”*), es decir, el trabajo descrito tal y como realmente se

realiza. El foco de atención durante el análisis estará en la variabilidad en vez de en relaciones de causalidad. Para ello, se siguieron cada uno de los pasos detallados anteriormente en este capítulo. Los resultados obtenidos quedan recogidos en el siguiente apartado.

De manera adicional, tras finalizar el análisis FRAM, y con el propósito de profundizar en los resultados obtenidos, se llevó a cabo una identificación de indicadores *leading* a partir del modelo FRAM. Para ello, se tuvieron en cuenta las recomendaciones del método LIIM. Por este motivo, previamente en el primer paso del método FRAM se agruparon las funciones del modelo en tareas principales. Así, se facilita la posterior identificación de indicadores *leading* para los trabajos de construcción de estructuras.

### **3.3 Metodología para el diseño y validación de un instrumento de evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad de las actividades de construcción mediante el RAG**

A continuación, se presentan los principales métodos empleados en el diseño y validación de un instrumento de evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad en las actividades de construcción. La fase de diseño de dicho instrumento se ha centrado en el desarrollo de un cuestionario basado en el *Resilience Assessment Grid*. Para ello, se han desarrollado un conjunto de preguntas que permiten medir las habilidades o potenciales para el desempeño resiliente. Posteriormente, se ha procedido a validar estas preguntas empleando, en primer lugar, el método de Agregados Individuales y, en segundo lugar, el método Delphi. En adelante, se presentan estos métodos y se describen las etapas que han guiado el proceso de investigación seguido para obtener un conjunto de preguntas que evalúan la contribución de los planes de seguridad y salud al desempeño resiliente durante la ejecución de los trabajos en obra.

#### **3.3.1 Resilience Assessment Grid (RAG)**

Hollnagel (2017) afirma que *“la Ingeniería de la Resiliencia parte de la descripción de las características de las funciones de un sistema y la búsqueda de maneras para mejorar la habilidad de ese sistema para responder, monitorizar, aprender y anticipar”*. En línea con esta idea, en el apartado anterior la investigación se centró en el análisis de las funciones y ahora se pondrá el foco de atención durante la investigación en las

habilidades para la resiliencia con el fin de mejorarlas. Como se describió en más extensamente en el capítulo 2, el RAG es *“es una metodología que mide cómo de bien una organización está desempeñando las cuatro habilidades principales para la resiliencia, denominadas como la habilidad de responder, monitorizar, aprender y anticipar”* (Ljungberg & Lundh, 2013) y que *“proporciona cuatro conjuntos de preguntas de diagnóstico y formativas que pueden ser adaptadas a cualquier organización”* (Hollnagel, 2017).

Como parte de la investigación realizada en esta tesis, se ha desarrollado un cuestionario basado en el RAG que permite evaluar cómo los planes de seguridad y salud contribuyen al desempeño resiliente durante la ejecución de los trabajos en la obra. Se pretende que éste sea el punto de partida para comenzar aplicar la Ingeniería de la Resiliencia al sector de la construcción sentando las bases para el fortalecimiento de las cuatro habilidades para la resiliencia. Después del diseño del cuestionario su contenido ha sido validado mediante dos técnicas basadas en paneles de expertos que se describen en los siguientes apartados. Finalmente, se ha elaborado una plantilla para facilitar la aplicación práctica del cuestionario. Dicha plantilla se encuentra disponible para su consulta en el Anexo D.

### 3.3.2 Método de Agregados Individuales

El Método de Agregados Individuales es un método para la obtención de juicios de expertos. Éste método consiste en que cada uno de los expertos lleve a cabo una evaluación del contenido de cada uno de los ítems que conforma un cuestionario en relación a su adecuación a la cuestión objeto de estudio o constructo. Cada uno de los expertos realiza esta evaluación de forma individual sin que exista comunicación entre ellos ni que puedan intercambiar opiniones. De este modo, se evitan sesgos por conflictos de opiniones o presiones entre expertos (INSHT, 1996). En este caso el proceso se realiza en una sola vuelta o ronda. Ésta es una de las principales diferencias de este método con el Método Delphi, que lo convierte en un método aún más simple de aplicar y económico en cuanto a tiempo. Como desventaja frente al Método Delphi se podría destacar que el Método Delphi proporciona mayor nivel de interacción entre los expertos y por tanto, mayor fiabilidad.

En la Figura 28 se presentan los pasos o etapas propuesta por Michalus et al. (2015) para la aplicación del Método de Agregados Individuales.

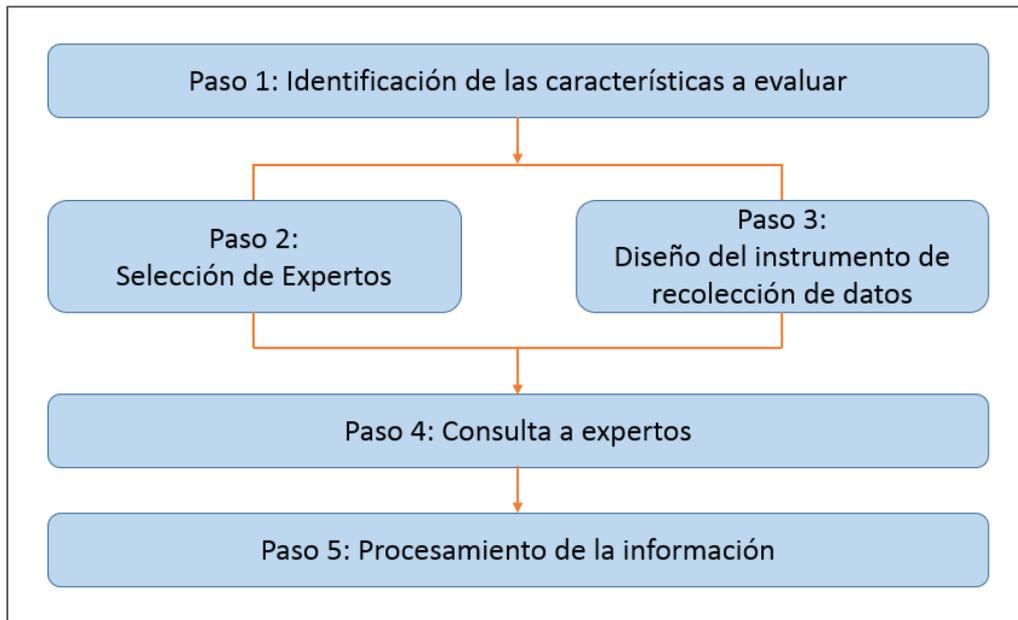


Figura 28. Procedimiento para la aplicación del método de agregados individuales.  
(Michalus et al., 2015)

En el diseño del instrumento de recolección de datos, los criterios de evaluación del contenido de los ítems del cuestionario se centraron en las cuatro categorías propuestas por Escobar-Pérez y Cuervo-Martínez (2008):

- *Suficiencia*: los ítems que pertenecen a una misma dimensión o variable bastan para obtener la medición de ésta. En este caso solo se evalúa el conjunto de los ítems en general y no cada uno de ellos.
- *Claridad*: el ítem se comprende fácilmente, es decir, su sintáctica y semántica son adecuadas.
- *Coherencia*: el ítem tiene relación lógica con la dimensión o indicador que está midiendo.
- *Relevancia*: el ítem es esencial o significativo, es decir, debe ser incluido.

### 3.3.3 Método Delphi

El método Delphi es una metodología de investigación cualitativa basada en el juicio de expertos que es ampliamente empleada en distintas áreas de conocimiento. Este método se fundamenta en el dicho “Dos cabezas son mejor que una” y se aplica a problemas o cuestiones donde no existe un conocimiento exacto disponible (Dalkey, 1969). Linstone y Turoff (1975) ponen de manifiesto la adecuación del Método Delphi para lidiar con problemas complejos aportando la siguiente definición: “es un método para estructurar un proceso de comunicación grupal de modo que el proceso sea

*efectivo al permitir que un grupo de individuos, como un todo, enfrente un problema complejo*". Por otro lado, Hasson et al. (2000) destacan en la definición del método su carácter iterativo y la obtención de un consenso grupal al definirlo como: *"una técnica de facilitación grupal, que es un proceso iterativo de múltiples etapas, diseñado para transformar la opinión en consenso grupal"*.

Básicamente, el Método Delphi consiste en la aplicación de un cuestionario a un grupo de expertos previamente seleccionados para que muestren su opinión o juicio sobre un problema determinado. Estos expertos deben contestar el cuestionario de forma individual. Posteriormente, mediante un proceso iterativo, los expertos deben volver a contestar las preguntas del cuestionario modificando su respuesta si lo consideran necesario en base a la realimentación que reciben sobre las respuestas de todos los expertos en rondas anteriores. Esta realimentación o *"feedback"* se lleva a cabo proporcionando a los expertos algunos estadísticos descriptivos que les permiten conocer la respuesta grupal a cada pregunta. De este modo, se evitan discusiones o confrontaciones entre los expertos, a la vez que se permite que puedan compartir sus opiniones entre ellos (INSHT, 1996). En cada ronda los expertos podrán aportar sus comentarios en caso de que no estén de acuerdo en converger con la respuesta grupal. Este proceso de iteración finaliza cuando se alcanza el consenso entre las respuestas de todos los expertos, aunque siempre es necesario realizar al menos dos rondas.

### **3.3.4 Proceso de investigación para el diseño del cuestionario basado en el RAG**

En el caso de la presente investigación se pretende adaptar el RAG al sector de la construcción considerando sus características propias. En línea con lo expuesto en este trabajo el plan de seguridad y salud debe ser el eje de la gestión de la seguridad en la obra y organiza la ejecución de los trabajos en la obra. Éste contiene toda la información relevante en materia de seguridad y salud, como por ejemplo la evaluación de riesgos, los procedimientos de trabajo o la planificación de la actividad preventiva. Además, no solo se centra en el contratista, sino que implica a todas las subcontratas y autónomos.

En contraposición, y de manera sorprendente, los resultados del análisis FRAM presentados en el siguiente capítulo confirmaron que, en la realidad de la ejecución diaria de los trabajos en la construcción, este documento no se emplea para nada ni se consulta. Simplemente es considerado como un mero requisito administrativo.

Por todo ello, la presente investigación se ha orientado a mejorar los planes de seguridad y salud en la construcción para que ayuden a sentar las bases para un

desempeño resiliente en la ejecución de los trabajos de construcción. Se ha tomado como referencia el RAG, adaptando el conjunto de preguntas al caso específico de los planes de seguridad y salud. Así se pretende evaluar cómo los planes de seguridad y salud contribuyen a la resiliencia.

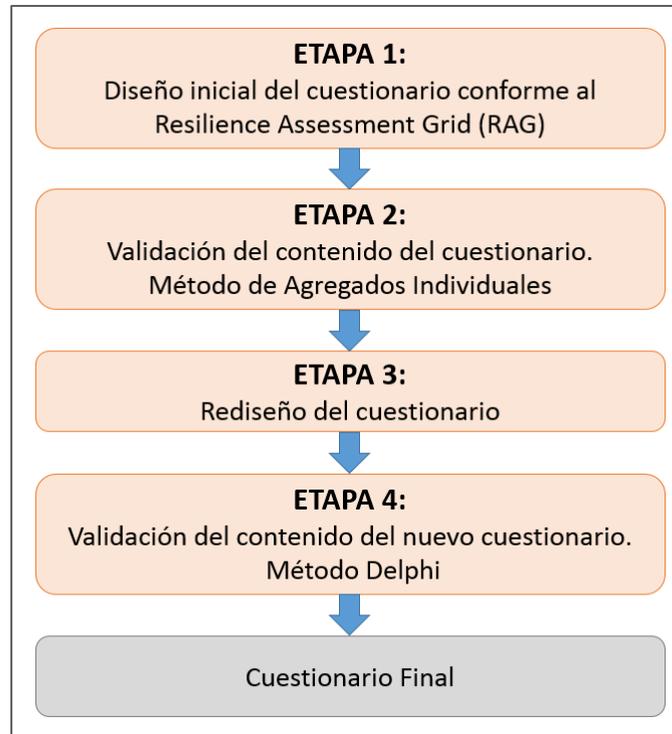


Figura 29. Etapas del proceso de investigación para el diseño y validación del cuestionario para los planes de seguridad y salud basado en el RAG.  
(Elaboración propia)

En la Figura 29 se muestra el proceso de investigación desarrollado que estuvo compuesto por cuatro etapas. En la primera etapa, centrada en el diseño del cuestionario basado en el RAG, la principal fuente de información que se empleó como referencia fue el libro *“Safety-II in Practice: Developing the Resilience Potentials”* (Hollnagel, 2017). En dicho libro, Hollnagel presenta el concepto de *Safety-II* desde el marco de la Ingeniería de la Resiliencia y propone una nueva forma de gestión de la seguridad. Para ello, presenta el RAG como un instrumento que permite evaluar los cuatro potenciales o habilidades (responder, monitorizar, aprender y anticipar) que las organizaciones deben desarrollar para tener un desempeño resiliente. Para cada uno de estos cuatro potenciales propone unas preguntas genéricas orientativas que deben particularizarse para cada caso.

Además, este libro incluye ejemplos de preguntas que han sido diseñadas para organizaciones concretas de diferentes sectores. Estos trabajos también han sido empleados como referencia para el diseño de las preguntas que conforman el

cuestionario diseñado en el presente trabajo. Concretamente, se consultaron las preguntas diseñadas para el Departamento de Emergencias de la ciudad de Canadá (Hunte & Marsden, 2016), la Compañía Nacional de Ferrocarriles de Francia (SNCF) (Rigaud et al., 2013), la Administración de Aviación Civil Sueca (Ljungberg & Lundh, 2013) y la Agencia de Seguridad Nuclear y Protección contra la Radiación de Australia (ARPANSA, 2017).

A partir de estas fuentes de información, y considerando las características específicas de las empresas del sector de la construcción, se desarrolló un conjunto de ítems organizados en cuatro dimensiones o grupos que se corresponden con cada uno de los potenciales: responder, monitorizar, aprender y anticipar. Estos ítems fueron revisados en 3 ocasiones sucesivas por 4 expertos especializados en las áreas de Seguridad y Salud Ocupacional, Construcción e Ingeniería de Resiliencia. De este modo, se obtuvo una propuesta inicial para el cuestionario.

El resto de etapas estuvieron orientadas a la validación del cuestionario. En el planteamiento del proceso de investigación a seguir, se tuvo en consideración la dificultad que entrañaba el diseño y validación de un cuestionario basado en los principios de Ingeniería de la Resiliencia y el RAG, por su reciente incorporación como marco conceptual de la seguridad, su escasa difusión en España y su ruptura con el paradigma imperante. Por estas razones, se decidió realizar una validación inicial del cuestionario mediante un método que fuera sencillo de aplicar, requiriera poco tiempo y reducido número de expertos. En base a estas características el método de agregados individuales fue seleccionado. Así, sería posible obtener un nuevo cuestionario que incorporara los cambios que previsiblemente aflorarían tras la evaluación inicial. Posteriormente, se aplicaría un método de mayor envergadura como es el método Delphi, en el cual se contaría con mayor número de expertos. Se consideró que si se aplicaba directamente el método Delphi, posiblemente no habría sido posible alcanzar un resultado adecuado inicialmente y habría sido complicado llevarlo a cabo una segunda vez por cuestiones de disponibilidad de los expertos. A continuación, ambos métodos son presentados de forma más extensa.

De este modo, en la segunda etapa, se procedió a validar el contenido del cuestionario propuesto aplicando una técnica basada en el juicio de expertos como es el método Agregados Individuales. Corral (2009) recomienda que el grupo de expertos tenga entre tres y cinco y sea un número impar. En nuestro caso, se seleccionaron tres expertos en las áreas de salud y seguridad ocupacional y construcción, que estaban familiarizados con los principios y objetivos de Ingeniería de la Resiliencia. Estos expertos fueron

diferentes de aquellos que participaron en el proceso de diseño inicial. Todos ellos habían obtenido un doctorado en ingeniería o arquitectura, tenían más de 10 años de experiencia en el sector de la construcción y conocimientos en Ingeniería de Resiliencia. Los expertos tuvieron que evaluar diferentes aspectos de cada uno de los ítem del cuestionario como son la *coherencia*, la *relevancia* y la *claridad* y además la *suficiencia* de los ítems incluidos en cada potencial (Escobar-Pérez & Cuervo-Martínez, 2008). Para este propósito, se utilizó una escala Likert de 4 puntos cuyo significado era el siguiente: 1. No cumple con los criterios; 2. Nivel bajo; 3. Nivel moderado y 4. Nivel alto.

CATEGORÍA	CALIFICACIÓN	INDICADOR
<b>SUFICIENCIA</b> Los ítems que pertenecen a una misma dimensión bastan para obtener la medición de ésta. En este caso solo se evalúa el conjunto de los ítems en general y no cada uno de ellos.	<b>1. No cumple con el criterio</b>	Los ítems no son suficientes para medir la dimensión
	<b>2. Bajo nivel</b>	Los ítems miden algún aspecto de la dimensión pero no corresponden con la dimensión total
	<b>3. Moderado nivel</b>	Se deben incrementar algunos ítems para poder evaluar la dimensión completamente.
	<b>4. Alto nivel</b>	Los ítems son suficientes
<b>CLARIDAD</b> El ítem se comprende fácilmente, es decir, su sintáctica y semántica son adecuadas.	<b>1. No cumple con el criterio</b>	El ítem no es claro
	<b>2. Bajo nivel</b>	El ítem requiere bastantes modificaciones o una modificación muy grande en el uso de las palabras de acuerdo con su significado o por la ordenación de las mismas.
	<b>3. Moderado nivel</b>	Se requiere una modificación muy específica de algunos de los términos del ítem.
	<b>4. Alto nivel</b>	El ítem es claro, tiene semántica y sintaxis adecuada.
<b>COHERENCIA</b> El ítem tiene relación lógica con la dimensión o indicador que está midiendo.	<b>1. No cumple con el criterio</b>	El ítem no tiene relación lógica con la dimensión
	<b>2. Bajo nivel</b>	El ítem tiene una relación tangencial con la dimensión.
	<b>3. Moderado nivel</b>	El ítem tiene una relación moderada con la dimensión que está midiendo.
	<b>4. Alto nivel</b>	El ítem se encuentra completamente relacionado con la dimensión que está midiendo.
<b>RELEVANCIA</b> El ítem es esencial o significativo, es decir, debe ser incluido.	<b>1. No cumple con el criterio</b>	El ítem puede ser eliminado sin que se vea afectada la medición de la dimensión
	<b>2. Bajo nivel</b>	El ítem tiene alguna relevancia, pero otro ítem puede estar incluyendo lo que mide éste.
	<b>3. Moderado nivel</b>	El ítem es relativamente importante.
	<b>4. Alto nivel</b>	El ítem es muy relevante y debe ser incluido.

Tabla 13. Descripción de las categorías empleadas para evaluar el contenido del cuestionario. (Escobar-Pérez and Cuervo-Martínez, 2008)

Estas evaluaciones fueron realizadas de forma individual por cada experto y, para evitar el sesgo entre ellos el proceso de evaluación, se llevó a cabo mediante email. Para garantizar que las evaluaciones se llevaran a cabo de manera adecuada, se les proporcionó cierta información adicional a los expertos. De esta forma, se les envió un documento donde se resumían los principales aspectos clave de la Ingeniería de la Resiliencia, de los conceptos de *Safety-I* y *Safety-II* y del RAG y una plantilla en Excell para recopilar sus respuestas. En ella se incluyeron aclaraciones sobre el significado de cada una de las variables o aspectos analizados y de cada valor de la escala de Likert empleada, éstas se presentan en la Tabla 13.

Una vez que se recibieron todas las evaluaciones de los expertos mediante email, se procedió al análisis de las respuestas. En base a los comentarios de Corral de Franco (2009) sobre el método de agregados individuales, se establecieron los siguientes criterios para el análisis de los tres aspectos evaluados para cada ítem, es decir, *coherencia, relevancia y claridad*:

- i. Si un ítem había obtenido una puntuación favorable de todos los expertos, es decir, puntuaciones de 3 o 4 en todos los aspectos evaluados, quedaba incluido en el cuestionario.
- ii. Si un ítem había obtenido una puntuación desfavorable de todos los expertos, es decir, puntuaciones de 1 o 2 en todos los aspectos evaluados, quedaba excluido del cuestionario.
- iii. Si un ítem presentaba una coincidencia parcial entre los expertos, es decir, que solo alguno de los expertos había asignado a dicho ítem en alguno de los aspectos evaluados una puntuación de 1 o 2, debía ser revisado, reformulado o eliminado, si es necesario.

Para el análisis de la *suficiencia* los criterios aplicados fueron los siguientes:

- i. Si una dimensión o potencial había obtenido una puntuación favorable de todos los expertos, es decir, puntuaciones de 3 o 4, se consideró que los ítems incluidos para evaluar dicho potencial eran suficientes.
- ii. Si una dimensión o potencial había obtenido una puntuación desfavorable de todos los expertos, es decir, puntuaciones de 1 o 2, se consideró que los ítems incluidos para evaluar dicho potencial eran insuficientes.
- iii. Si una dimensión o potencial presentaba una coincidencia parcial entre los expertos, es decir, que solo alguno de los expertos había asignado una puntuación de 1 o 2, se consideró que los ítems incluidos para evaluar dicho potencial eran insuficientes.

En la tercera etapa, se llevó a cabo el rediseño del cuestionario en base a los resultados obtenidos en la segunda etapa, es decir, las puntuaciones y los comentarios de los expertos. En dicho proceso participaron de nuevo los 4 expertos que habían diseñado inicialmente las preguntas o ítems. Así, algunos ítems fueron revisados mejorando su redacción y adecuación al potencial que pretendían evaluar. Otros fueron eliminados del cuestionario. De este modo, se obtuvo una nueva versión depurada del cuestionario.

Número de Criterio	Descripción
<b>Criterio 1</b>	Ser autor principal o secundario en al menos tres artículos en revistas con revisión por pares
<b>Criterio 2</b>	Ser invitado a presentar una conferencia
<b>Criterio 3</b>	Ser miembro o presidente de un comité nacionalmente reconocido
<b>Criterio 4</b>	Tener al menos 5 años de experiencia profesional relacionada con la industria de la construcción
<b>Criterio 5</b>	Ser miembro de una institución acreditada de educación superior
<b>Criterio 6</b>	Ser escritor o editor de un libro o capítulo de libro sobre el tema objeto de estudio
<b>Criterio 7</b>	Estar en posesión de un título avanzado en el campo de la ingeniería civil, arquitectura u otros campos relacionados (como mínimo de nivel equivalente a bachillerato)
<b>Criterio 8</b>	Estar registrado como profesional

Tabla 14. Criterios de selección de los expertos en el Método Delphi  
(Adaptado de: Hallowell & Gambatese, 2010)

En la cuarta etapa, se procedió a validar los ítems incluidos en el cuestionario rediseñado pero en esta ocasión se aplicó el Método Delphi. Para ello, se tuvieron en cuenta las recomendaciones realizadas por Hasson et al. (2000), Okoli y Pawloski (2004) y Hallowell y Gambatese (2010). Dado que el objeto de la investigación y diseño del cuestionario y habían sido definidos en etapas anteriores de la investigación en curso, se procedió directamente a la selección de los expertos que conformarían el panel de expertos. Para ello, se establecieron unos criterios de selección basados en los criterios de cualificación de los panelistas propuestos por Hallowell y Gambatese (2010) que quedan recogidos en la Tabla 14. Los expertos seleccionados para participar en el Método Delphi debían cumplir al menos de cuatro de esos criterios.

Una vez establecidos los criterios se seleccionaron los expertos que cumplían los requisitos fijados. En relación al número necesario de expertos para el panel existen diferentes recomendaciones al respecto. Malla y Zabala (1978) sitúan así el número ideal de expertos entre 15 y 20, para León y Montero (2003) el número está entre 10 y 30, y para Gordon (2014) entre 15 y 35. Otros autores indican que el número suficiente de expertos podría ser menor, por ejemplo, Hallowell y Gambatese (2010) recomiendan entre 8 y 12. En el presente trabajo de investigación se decidió emplear 17 expertos para favorecer el rigor y la validez de los resultados obtenidos en mediante el panel. En este sentido, en la Tabla 15 se recogen las características de los expertos seleccionados en relación a su formación, su sector profesional y experiencia laboral.

Experto	Ámbito	Sector profesional	Años de experiencia	Titulación académica	Otra formación relevante
1	Administración Pública	Construcción y PRL	35	Arquitectura	TSPRL y CSYS
2	Empresa	Construcción y PRL	24	Arquitectura	TSPRL y CSYS
3	Universidad y Empresa	Construcción, instalaciones y proyectos	20	Doctor en Ingeniería Industrial	TSPRL
4	Universidad	Proyectos de ingeniería y gestión integrada de proyectos	15	Doctor en Ingeniería Industrial	TSPRL
5	Empresa Pública	PRL y medio ambiente	18	Ingeniería Industrial	TSPRL y CSYS
6	Administración Pública y Empresa	PRL, construcción, coordinación de Seguridad y Salud	19	Ingeniería Industrial	TSPRL y CSYS
7	Universidad	PRL, construcción y sistemas de gestión	10	Doctor en Ingeniería Industrial	TSPRL y CSYS
8	Universidad	PRL y gestión en el ámbito de la construcción	10	Doctor en Arquitectura	TSPRL y CSYS
9	Universidad	Construcción y PRL	20	Doctor en Arquitectura	TSPRL y CSYS
10	Universidad y Empresa	PRL, Construcción y Peritaje	20	Ciencias del Trabajo	TSPRL
11	Empresa Pública	PRL y medio ambiente	15	Ingeniería Química	TSPRL
12	Universidad, Administración Pública y Empresa	Proyectos de ingeniería, seguridad y PRL	36	Doctor Ingeniería Industrial	TSPRL
13	Empresa	Construcción y PRL	17	Ingeniería Química	TSPRL y CSYS
14	Empresa	Construcción y PRL	12	Ingeniería Química	TSPRL y CSYS
15	Universidad y Empresa	PRL, construcción y coordinación de Seguridad y Salud	15	Doctor Ingeniería Industrial	TSPRL y CSYS
16	Universidad y Empresa	PRL, instalaciones y construcción	23	Doctor Ingeniería Industrial	TSPRL y CSYS
17	Administración Pública	PRL, protección civil y medio ambiente	24	Ingeniería Industrial	TSPRL

PRL=Prevención de Riesgos Laborales; TSPRL=Técnico Superior en Prevención de Riesgos Laborales; CSYS=Coordinador de Seguridad y Salud en obras de construcción

Tabla 15. Características del panel de expertos participantes en el Método Delphi (Elaboración propia)

En la Tabla 16 se muestran los criterios que satisfacen cada uno de los expertos para su inclusión en el panel. En resumen, las características más importantes sobre la cualificación de los expertos que componen el panel pueden resumirse del siguiente modo:

- Existen 8 expertos que poseen el título de Doctor, 3 expertos poseen titulaciones de Diplomatura Universitaria y los demás tienen una titulación universitaria de Licenciado.
- Existen 3 expertos que son Profesores Titulares de Universidad, 2 expertos que son Profesores Asociados de Universidad, 1 experto es Profesor Contratado de Universidad, 1 experto es Profesor Ayudante Doctor y 1 experto es Contratada Postdoctoral de Universidad.
- El panel de expertos ha producido más de 40 publicaciones en revistas con revisión por pares en temas relacionados con la Seguridad y Salud, la Construcción y los Sistemas de Gestión.
- El panel de expertos ha producido más de 11 libros o capítulos de libro relacionados con la Seguridad y Salud, la Construcción y los Sistemas de Gestión.
- El panel de expertos acumula 333 años de experiencia relacionada con la Seguridad y Salud, la Construcción y los Sistemas de Gestión.

Experto	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Criterio 6	Criterio 7	Criterio 8
01				x	x		x	x
02		x		x			x	x
03				x	x	x	x	x
04	x	x		x	x	x	x	x
05		x		x			x	x
06		x		x			x	x
07	x			x	x	x	x	
08	x			x	x	x	x	
09	x	x		x	x	x	x	x
10		x		x	x	x	x	
11		x		x		x	x	
12		x		x	x		x	x
13		x		x			x	x
14				x	x		x	x
15	x			x	x		x	x
16	x	x		x	x	x	x	x
17				x		x	x	x

Tabla 16. Criterios del panel de expertos participantes en el Método Delphi  
 (Elaboración propia)

Estos expertos debían evaluar la importancia de cada uno de los ítems con el objeto de determinar si debían ser incluidos en el cuestionario o si, por el contrario, no eran suficientemente importantes para incluirlos en el cuestionario. Para lo cual, emplearían una escala Likert de 5 puntos: 1. Nada importante; 2. Poco importante; 3. Moderadamente importante; 4. Importante y 5. Muy importante.

Adicionalmente, se incluyó un apartado final en el método Delphi. Hollnagel (2017) establece que las preguntas del cuestionario deben estar adaptadas a las características específicas de una organización y de la actividad que esta realiza. Mediante el cuestionario basado en el RAG se podrán establecer las líneas de acción necesarias y la dirección hacia donde se debe avanzar para dar lugar al cambio de *Safety-I* a *Safety-II*. Por ello, el objetivo de este apartado adicional era determinar, dado el contexto actual del sector construcción, cuál de los cuatro potenciales para la resiliencia era más relevante para las empresas que intervenían en una obra. Esto servirá de base para saber por dónde deben empezar estas empresas a trabajar para iniciar su proceso de cambio. Los expertos debían repartir un presupuesto de 100 puntos entre los cuatro potenciales para la resiliencia: responder, monitorizar, aprender y evaluar, conforme a los que se había organizado el cuestionario anterior. Ninguno de los potenciales podría recibir una puntuación nula, ya que todos son necesarios en mayor o menor medida para que una organización o empresa alcance el desempeño resiliente.

Para medir el consenso o la convergencia de las respuestas de los expertos y saber cuándo había sido alcanzado, se empleó un estadístico basado en la mediana conforme al criterio propuesto por Hallowell y Gambatese (2010) que consideran que la desviación absoluta, aunque no es un estadístico comúnmente utilizado para reflejar la variación en un grupo de datos, es adecuado en este caso porque contribuye de forma importante a reducir el sesgo entre las opiniones de los expertos. Así, la desviación absoluta fue empleada para determinar el consenso, siendo calculada conforme a la siguiente fórmula (Hallowell, 2008):

$$\text{Desviación absoluta} = \text{Desviación Media de la Mediana} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{ij} - Me(X_j)| \quad (1)$$

donde:

$n$  = número de expertos

$x_{ij}$  = El valor de la respuesta del experto  $i$  al ítem  $j$

$Me(X_j)$  = Mediana de las respuestas de los expertos al ítem  $j$

El consenso sería alcanzado cuando el valor de la desviación absoluta fuera menor que 1/10 del rango de posibles respuestas (Hallowell & Gambatese, 2010). En el caso de la validación del presente cuestionario el panel de expertos empleó una escala Likert de 5 puntos por lo que la desviación absoluta debía ser menor que 0.5. En el caso del apartado adicional en el cuál los expertos disponían de un presupuesto de 100 puntos la el valor de la desviación absoluta debía ser menor que 10.

Para facilitar el procesamiento de las respuestas de los expertos se administró el cuestionario empleando una herramienta para la realización de encuestas en línea como es el LimeSurvey, específicamente la versión 1.92. En la plantilla que se preparó a través de dicha herramienta se incluyó un texto explicativo con el objetivo del panel de expertos y el proceso que debían seguir para responder adecuadamente el cuestionario.

Una vez, seleccionados los expertos, establecidos los criterios de convergencia de las respuestas y preparada la plantilla se procedió a iniciar las rondas de respuestas del método Delphi. En el proceso iterativo, para la realimentación a los expertos con las respuestas del conjunto de expertos se proporcionaron dos estadísticos, la mediana y la desviación absoluta. De este modo, a partir de la segunda ronda los expertos volverían a valorar los ítems del cuestionario en función de estos estadísticos y de sus respuestas en rondas anteriores hasta que el consenso fuera alcanzado.

De este modo, una vez finalizado el método Delphi se obtuvo una versión final del cuestionario. Para su aplicación en una obra en concreto un grupo de trabajadores deberá contestar las preguntas del cuestionario. De acuerdo con Hollnagel (2017), para que el cuestionario sea útil la escala empleada para las respuestas no debe ser binaria (Sí o No) sino que es recomendable emplear una escala Likert. Por este motivo, para el cuestionario final obtenido en esta investigación se emplea una escala Likert de 6 de acuerdo con la propuesta de Hollnagel et al. (2011b):

- **Excelente:** el sistema en general cumple y excede los criterios abordados por un ítem específico
- **Satisfactorio:** el sistema cumple completamente todos los criterios razonables abordados por un ítem específico
- **Aceptable:** el sistema cumple los criterios nominales abordados por el un ítem específico
- **Inaceptable:** el sistema no cumple con los criterios nominales abordados por un ítem específico
- **Deficiente:** no hay capacidad suficiente para cumplir los criterios abordados por un ítem específico
- **Ausente:** no hay capacidad alguna para abordar el ítem específico

Este cuestionario obtenido es una herramienta para que las empresas puedan realizar una evaluación para conocer hasta qué punto el plan de seguridad y salud contribuirá al desempeño resiliente durante la fase de ejecución. Dado que el carácter cambiante de los trabajos y tareas que deben llevarse a cabo en la ejecución de una obra de construcción de un edificio, el plan de seguridad y salud debe ser un documento vivo

que se adapte a la realidad de la obra. Así, este cuestionario debe ser aplicado periódicamente, la primera vez antes del inicio de la ejecución de la obra. Se pretende que esta evaluación del plan de seguridad y salud contribuya a la mejora de este documento, que debe ser la base de la planificación de los trabajos en una obra, y que sirva para guiar a las empresas en el proceso de cambio que implica pasar del concepto de *Safety-I* a *Safety-II*. En un sector como el de la construcción, es complicado llevar a cabo este proceso y se requiere tiempo hasta que se consiga aplicar realmente *Safety-II*. Por eso, para establecer un punto de partida y determinar por dónde empezar, los expertos valoraron qué potenciales a su juicio eran más relevantes en el contexto de la obra. Así, se empezaría el proceso de cambio o transición trabajando primero en aquellos potenciales que resultaran con mayor peso.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Introducción

Se exponen a continuación los resultados de la investigación desarrollada en la presente tesis doctoral. Para este propósito se presentan dos apartados diferenciados que se corresponden con las dos actividades principales llevadas a cabo para alcanzar los objetivos principales planteados. Por un lado, se describen los resultados obtenidos tras analizar los trabajos de construcción de la estructura de un edificio mediante el método FRAM. Para ello, se presentan las funciones identificadas, el modelo FRAM resultante y el análisis de la variabilidad. Luego, se presentan indicadores *leading* identificados a partir de las funciones del modelo FRAM. Por otro lado, se recogen los resultados del diseño y validación de un cuestionario para evaluar la contribución a la resiliencia de los planes de seguridad y salud en obras. Para lo cual, se detallan los resultados alcanzados tras la aplicación del método de agregados individuales y del método Delphi.

### 4.2 Análisis FRAM de las actividades de construcción de la estructura de un edificio

A continuación, se describen los resultados obtenidos en el proceso de investigación llevado a cabo para aplicar el análisis FRAM a la fase de construcción de la estructura de un edificio conforme a cada uno de los pasos descritos en la metodología. Fruto de ello, se obtuvo un modelo de las actividades implicadas en dicha fase que se presenta en este apartado. Además se realizó una identificación de posibles indicadores *leading* que podrían definirse en base al FRAM.

#### 4.2.1 Definición del propósito del análisis FRAM

El primer paso consistió en definir el propósito del estudio. El objetivo fue conocer cómo se desarrolla el trabajo diario en la construcción de una estructura de hormigón de un edificio. Específicamente, el presente estudio se centró en las actividades desarrolladas desde que se finaliza la cimentación hasta que se completa la estructura de un edificio. El tipo de forjado que se analizó fue un forjado in situ de placas macizas de hormigón. Además el edificio una vez construido tendría uso residencial y no presentaría voladizos u otras estructuras especiales.

#### 4.2.2 Identificación y descripción de las funciones

Para la identificación y la descripción de las funciones fue necesario llevar a cabo una toma de datos previa. Se realizaron 33 visitas a obras de construcción en las que se observó la ejecución de los trabajos in situ. Durante estas visitas se llevaron a cabo 85 entrevistas a trabajadores de distintos puestos de trabajo implicados en el proceso constructivo. A partir de esta información y de la revisión bibliográfica de la documentación disponible, se obtuvo una descripción del “trabajo ejecutado” o “*work-as-done*”. Seguidamente se procedió a la identificación de funciones que componían el modelo obteniendo un total de 60 funciones. En el proceso de construcción de la estructura de un edificio se involucran diferentes tipos trabajos y actividades. Por ello, las funciones del modelo FRAM se agruparon en 6 grupos. Cada grupo se correspondía con tareas principales relevantes para el proceso constructivo. Las funciones dentro de cada grupo se correspondían con actividades necesarias para alcanzar el propósito de la tarea principal. Dentro de estas tareas principales del proceso constructivo se distinguió entre las operaciones de encofrado, ferralla y hormigonado. Además, por su relevancia en dicho proceso se diferenciaron de forma específica las actividades de replanteo y verificaciones, las actividades relacionadas con el transporte de materiales con la grúa torre y las actividades relacionadas con la seguridad, centradas básicamente en el montaje y desmontaje de protecciones colectivas. A cada grupo de actividades se le asignó un color. En la Tabla 17 se recoge la codificación de colores empleada. En general, en cada color o grupo de funciones interviene de manera predominante un puesto de trabajo específico que está vinculado a la ejecución de la tarea principal.

Color de las funciones	Descripción de los grupos de funciones
Naranja	Actividades relacionadas con el <b>encofrado</b> .
Azul	Actividades relacionadas con la <b>ferralla</b> .
Verde	Actividades relacionadas con el <b>hormigonado</b> .
Rosa	Actividades relacionadas con el <b>replanteo y verificaciones</b> .
Rojo	Actividades relacionadas con las <b>protecciones colectivas</b> .
Morado	Actividades relacionadas con el <b>transporte de materiales con la grúa torre</b> .

Tabla 17. Codificación de las funciones del modelo FRAM por colores y actividades  
(Elaboración propia)

En la Tabla 18 se presentan las funciones que integran cada grupo de actividades a excepción de la función finalizar cimentación que es una función de fondo o background, ya que el resto del proceso constructivo antes de iniciar la fase de estructura está fuera del alcance de modelo. Las actividades relacionadas con las tareas de encofrado, tanto vertical como horizontal, son de color naranja. Los encofradores realizan esta actividad, ya que son los encargados de montar los moldes que sostienen el hormigón húmedo

para la construcción de estructuras de hormigón. Se incluyen por tanto en este tipo de actividad diferentes tareas o funciones como el montaje y desmontaje del mecano, el encofrado y desencofrado de pilares o la limpieza y preparación de las placas de encofrado.

El color azul es empleado para representar las tareas relacionadas con la ferralla. Los ferrallistas construyen armaduras metálicas con barras de acero para proporcionar resistencia adicional a la estructura de hormigón armado. Se incluyen dentro de esta actividad tareas como el montaje de la ferralla para la planta, la elaboración in situ de las armaduras, el grifado de las armaduras de espera o el cosido de las armaduras de pilares a las armaduras de espera.

Las funciones en color verde son actividades relacionadas con el hormigonado como son el vertido, el vibrado o el alisado del hormigón. Estas actividades también son llevadas a cabo principalmente por los encofradores, aunque dentro de ellas hay algunas relacionadas con el pedido del hormigón y su transporte que no son realizadas por ellos, sino por otros trabajadores como el encargado o el transportista del hormigón.

Tal y como se indicó, existen otras tareas necesarias para desarrollar el proceso de construcción correctamente como son las operaciones de replanteo y verificación. Estas tareas incluyen actividades como la verificación del forjado de la planta, el replanteo de los pilares o del forjado. Usualmente, estas actividades son llevadas a cabo por el jefe de obra, el encargado de obra o incluso el arquitecto que diseñó el edificio. El color asignado a estas operaciones fue el rosa.

Así mismo, son importantes las tareas relacionadas con las protecciones colectivas. Éstas se centran principalmente en el montaje y desmontaje de protecciones colectivas, como sistemas de redes de seguridad tipo V, redes para huecos, redes bajo forjado o líneas de vida. Estas actividades son llevadas a cabo por el personal de seguridad y salud y están marcadas en rojo.

Finalmente, el color morado representa las actividades vinculadas a la grúa torre. La mayoría de estas actividades son llevadas a cabo por el operador de la grúa y están relacionadas con el transporte de materiales dentro de la obra.

Una vez identificadas todas las funciones se obtuvo el modelo FRAM que se presenta en la Figura 30. Las funciones que aparecen representadas con un cuadrado gris en vez con un hexágono, son funciones de fondo o foreground, El resto de las funciones son de primer plano o background. La variabilidad de estas funciones de primer plano es la que se estudió detenidamente en los siguientes pasos del método FRAM.

Encofrado	Ferralla	Hormigonado	Replanteo y verificaciones	Protecciones colectivas	Transporte de materiales con la grúa torre
Colocar separadores	Elaborar armaduras	Verter el hormigón de los pilares o muros del ascensor	Replantar pilares	Instalar línea de vida	Decidir qué transportar con la Grúa Torre
Preparar paneles encofrado	Colocar armaduras muros del ascensor	Colocar vibrador	Replantar ferralla de la planta	Montar redes bajo forjado	Realizar acopio de materiales
Colocar paneles de encofrado	Colocar armaduras de los pilares	Vibrar el hormigón de los pilares y muros	Verificar el forjado de la planta	Montar redes en huecos	Transportar elementos para su puesta o desmontaje en obra
Aplomar y apuntalar el encofrado de pilares y muros del ascensor	Grifar las armaduras de los pilares	Llenar el cangilón de hormigón	Elaborar proyecto de obra	Instalar barandillas en el entablado	Realizar coordinación con el gruísta
Desencofrar pilares y muros del ascensor	Montar el forjado de la planta	Dejar fraguar el hormigón		Colocar sistema de redes de seguridad tipo V	Tener experiencia en el manejo grúa y conocer los trabajos de obra
Decidir iniciar montaje del mecano	Agregar la ferralla que falte	Verter el hormigón del forjado		Montar redes verticales de fachada	Realizar comprobaciones de la grúa
Montar el mecano		Vibrar el hormigón del forjado		Realizar prueba de carga	
Decidir iniciar el montaje de los tableros y tabicas		Alisar el hormigón del forjado		Desinstalar línea de vida	
Colocar tableros y tabicas		Encargar el hormigón		Colocar elementos para protecciones colectivas	
Realizar remates de huecos con tableros		Recibir el hormigón en la obra		Trasladar barandillas del entablado al forjado	
Desmontar parte del mecano		Tener experiencia para preveer la evolución de los trabajos en la obra		Desmontar redes bajo forjado	
Desmontar totalmente el mecano		Posicionar el camión hormigonera para el vertido		Contratar personal de seguridad en la obra	
Tener experiencia adecuada para decidir la ejecución de trabajos		Disponer de camión bomba para el vertido			
		Verter hormigón en el camión bomba			
		Dejar curar el hormigón de la planta			
		Recoger probetas para control de calidad			
		Realizar control de calidad del hormigón			
		Dejar fraguar el hormigón de la planta			

Tabla 18. Funciones del modelo FRAM agrupadas por actividades  
 (Elaboración propia)



#### 4.2.3 Identificación de la variabilidad

El siguiente paso fue caracterizar la variabilidad potencial, tanto interna como externa. La mayor parte de las funciones identificadas en el paso anterior eran de tipo humano y por definición, estas funciones presentan una variabilidad alta. A modo, de resumen se han incluido en la Tabla 19 las principales fuentes de variabilidad para las funciones implicadas en la fase de construcción de la estructura de un edificio. Estas fuentes de variabilidad se han organizado conforme a los tres tipos de funciones existentes.

Funciones	Posibles fuentes externas de variabilidad	Posibles fuentes internas de variabilidad
<b>Tecnológicas</b>	Condiciones ambientales de funcionamiento	Mantenimiento
<b>Humanas</b>	Condiciones climáticas, Planta de hormigón	Fisiológicos (efectos del trabajo al aire libre y altas demandas físicas) Psicológicos (carga de trabajo y estrés)
<b>Organizacionales</b>	Presiones económicas, Administraciones públicas	Cultura organizacional de seguridad

Tabla 19. Identificación de la variabilidad externa e interna en la fase de estructuras (Elaboración propia)

Al analizar la variabilidad externa, se ha encontrado que una fuente de variabilidad importante son las condiciones climáticas. Por ejemplo, en el caso de fuertes lluvias o vientos, las condiciones ambientales de operación exceden las especificaciones de diseño para la grúa. Esta situación da lugar a la paralización de los trabajos y, por consiguiente a la aparición de retrasos, así como problemas en la disponibilidad de recursos, como el hormigón. Otra situación que podría afectar a la ejecución de los trabajos son las condiciones climáticas extremas. Sin embargo, las obras estudiadas estaban situadas en la provincia de Málaga donde, debido a la influencia del mar, las temperaturas mínimas en invierno son muy suaves y las máximas en verano moderadas con precipitaciones escasas. Por ello, no es habitual alcanzar temperaturas extremas. No obstante, cuando se producen lluvias, aunque no sean muy fuertes, suelen pararse los trabajos con mayor frecuencia que en otros puntos de España. En este sentido uno de los trabajadores comentó en las entrevistas: *“En Andalucía no estamos acostumbrados al agua, nos origina mucho retraso ya que no estamos acostumbrados, no estamos preparados, en nada que caen dos gotas pues ya dejamos de trabajar, nos vamos, porque no estamos acostumbrados. Yo he estado tres meses trabajando en Bilbao y los tres meses ha estado lloviendo a mares [...] y allí no he parado de trabajar,*

*hay trabajos que no se pueden hacer pero otros sí*". Todo ello deriva en un incremento de la carga de trabajo y la presión de tiempo para los trabajadores.

Otra fuente de retrasos y, por tanto de variabilidad, son los retrasos en la entrega del hormigón en la obra. Estos se deben principalmente a que la planta no puede atender la demanda existente. Aunque también podrían afectar cuestiones de tráfico, esto es habitual en Málaga.

Además, hay presión para lograr realizar los trabajos en el tiempo exigido por el contratista principal. Por un lado, existen presiones económicas que surgen de la fecha de entrega acordada entre el contratista principal y el promotor. Normalmente, se incluye en los contratos una compensación de grandes cantidades de dinero por parte del contratista al promotor por cada día de retraso. Por otro lado, es habitual que una obra esté planificada para ejecutarse en un periodo de tiempo determinado y que se exija acabarla antes de la fecha de entrega fijada. Incluso la administración pública puede aumentar la presión debido a la demora en la concesión de las licencias necesarias para comenzar el trabajo, ya que, en tal caso, la planificación inicial se suele mantener.

En cuanto a la variabilidad interna, también fue alta para las funciones humanas. Es una situación común en los sitios de construcción que los trabajadores estén expuestos a carga de trabajo y presión del tiempo. Esto podría causar estrés y fatiga. Además, los trabajadores desempeñan su actividad en el exterior y esto tiene efectos fisiológicos en su cuerpo, como estrés térmico, enfriamiento o problemas de salud. A lo que hay que añadir que su trabajo tiene altas demandas físicas. Además el nivel de experiencia y las habilidades para desempeñar sus tareas también influyen en la variabilidad.

Igualmente, la cultura organizacional de seguridad afecta a la variabilidad. Es cierto que es un tema ampliamente estudiado y las empresas de construcción han mejorado la preocupación por la seguridad. Sin embargo, los trabajadores de seguridad y salud reportaron en las entrevistas que los trabajadores desmontan habitualmente las barandillas para hacer su trabajo y luego no las vuelven a colocar en su lugar. Uno de estos trabajadores indicó: *"el problema más común es que te quitan las protecciones, o sea, lo que tu pones te lo quitan, eso es algo que está totalmente prohibido pero la gente no hace caso a eso. Lo que tú pones al día siguiente llegas y está quitado"*. Por un lado, los trabajadores no deberían modificar las protecciones colectivas. Por otro lado, los trabajadores no consideran que sea su responsabilidad, lo cual es erróneo. A esto hay que sumar que la instalación de las protecciones colectivas y su mantenimiento son subcontratados por el contratista principal y los recursos humanos asignados son escasos.

También podría aparecer variabilidad por la falta de mantenimiento de la maquinaria que se emplea en la obra como la grúa torre.

La Tabla 20 muestra como ejemplo el análisis de la variabilidad de la función “encargar el hormigón”, describiendo su salida en términos de tiempo y precisión. Este procedimiento de análisis fue desarrollado con todas las funciones del modelo.

Encargar el hormigón	
Salida de la Función	Variabilidad de la salida
Se establece una fecha de entrega del hormigón adelantada con respecto a la evolución de los trabajos	Demasiado pronto
Se establece una fecha de entrega del hormigón retrasada con respecto a la evolución de los trabajos	Demasiado tarde
Se encarga el tipo de hormigón equivocado	Imprecisa
Se encarga una cantidad de hormigón insuficiente	Imprecisa

Tabla 20. Análisis de la variabilidad de la función “encargar el hormigón”  
(Elaboración propia)

#### 4.2.4 Agregación de la variabilidad

Una vez definidas las funciones y analizada la variabilidad externa e interna, se pasó a analizar la variabilidad en conjunto de todas las funciones que componen el sistema, es decir, cómo se influyen unas a otras en lo que a la ejecución de los trabajos se refiere. Lo que se pretende es evaluar las consecuencias de la propagación de la variabilidad y cómo esta afecta a los resultados del sistema. En el análisis de la variabilidad y su propagación a través de los acoplamientos de las funciones aguas arriba y aguas abajo, se encontraron tres aspectos de especial interés por su posible influencia en el resto de funciones del modelo y, por tanto, en el desempeño del sistema. Dos de ellos eran funciones y el tercero era un conjunto de funciones vinculadas a la seguridad y salud y dedicadas a la instalación de las protecciones colectivas en la obra.

Concretamente estas dos funciones fueron:

- Decidir qué elementos transportar con la grúa torre
- Encargar el hormigón

La variabilidad de estas funciones podía propagarse y amplificarse a través del resto del sistema. Por ello, se describe a continuación cómo dicha variabilidad puede afectar a la variabilidad del resto de funciones y al desempeño del sistema en su conjunto.

Función	Salida de la función	Aspecto de la función aguas abajo	Función aguas abajo
Encargar el hormigón	Fecha de entrega del hormigón	Control	Decidir qué elementos transportar con la grúa torre
		Tiempo	Recibir del hormigón en la obra
		Tiempo	Verificar el forjado de la planta
		Tiempo	Disponer de camión bomba para el vertido

Tabla 21. Análisis de los acoplamientos aguas abajo de la función de “encargar el hormigón” (Elaboración propia)

La función “encargar el hormigón” es una función que no está conectada con demasiadas funciones y, aparentemente, podría pasar desapercibida. Sin embargo, tiene un gran impacto en la forma en la que se ejecutan las demás funciones. Normalmente el hormigón se encarga entre una semana y unos días antes de su puesta en obra, dependiendo del volumen de pedidos que suele tener la planta a la que se le solicita el hormigón y de la cantidad de hormigón que se requiera, es decir, de qué es lo que se va a hormigonar. Para el día de la recepción del hormigón en la obra todos los trabajos deben estar finalizados. De este modo, si la fecha fijada para que se entregue el hormigón en la obra es demasiado pronto, es decir, si la fecha de recepción del hormigón está demasiado adelantada con respecto a la evolución de los trabajos, puede originar una variabilidad que se propaga por todo el modelo FRAM. Así, surge presión para acabar los trabajos a tiempo para la fecha de entrega del hormigón. Esto conlleva un incremento del estrés y de la carga de trabajo para los trabajadores, tanto de encofrado como de ferralla. En consecuencia, las salidas de muchas otras funciones pueden ser imprecisas o incluso algunas se podrían omitir.

Para entender cómo se propaga esta variabilidad se deben analizar sus acoplamientos en el modelo FRAM. Tal y como se observa en la Tabla 21, la salida de la función “encargar el hormigón” conecta con cuatro funciones. Para tres de estas funciones, dicha salida determina el tiempo o el momento en el que deben realizarse: “recibir el hormigón en la obra”, “disponer de camión bomba para el vertido” y “verificar el forjado de la planta”. Su acoplamiento con esta última es el más relevante. Así, la función la “verificar el forjado” de la planta propaga la variabilidad aguas arriba, ya que dicha verificación debe ser realizada el día antes de la fecha de recepción del hormigón en la obra. Para esto, todas las funciones anteriores deben completarse a tiempo antes de ese día. Con frecuencia, esto lleva a compensaciones (principio de ETTO) en la forma en que se ejecutan todas las funciones aguas arriba. Los trabajadores deben ser menos

minuciosos en la ejecución de los trabajos para lograr ser efectivos y conseguir que todo esté preparado para el día de la entrega del hormigón. Para conseguirlo toman atajos y omiten partes del proceso que no sean estrictamente necesarias. La consecuencia es que la minuciosidad se sacrifica en favor de la eficiencia, el problema es que, si el sacrificio es grande, puede verse comprometida la seguridad. En estas condiciones es frecuente que los trabajos se inicien aunque las protecciones colectivas no estén preparadas o que los propios trabajadores no las usen aunque estén disponibles.

La función “recibir el hormigón”, que también esta acoplada con “encargar el hormigón”, propaga la variabilidad aguas abajo. En este caso si se recibe el hormigón demasiado tarde ninguna de las demás funciones aguas abajo podrán ejecutarse. Sin embargo, no es habitual fijar una fecha de entrega del hormigón muy retrasada. Es mucho más habitual el caso anteriormente descrito. Si bien es cierto, la función “recibir el hormigón” suele generar retrasos por su propia variabilidad interna y originar que el hormigón se reciba en la obra más tarde de lo esperado, aunque normalmente suele recibirse a lo largo del día fijado para la recepción. Esto derivaría en horas extras de los trabajadores que no pueden abandonar su puesto de trabajo hasta que el vertido del hormigón de toda la planta se finalice.

La función “encargar el hormigón” además tiene su salida conectada con la función “decidir qué transportar con la grúa torre” mediante el aspecto de control. De este modo, la forma en que se decida emplear la grúa estará influenciada por la fecha en la que todos los trabajos deban estar finalizados. Al inicio de este apartado se indicó que la variabilidad de esta función también era de especial interés en cuanto a la consecución del resultado deseado. Por ello, se analizarán sus acoplamientos con más profundidad.

En ese sentido, la función “decidir qué transportar con la grúa torre” esta acoplada con muchas funciones aguas abajo. La grúa facilita la disponibilidad de los recursos para llevar a cabo las diferentes actividades en la obra y es empleada para el montaje de distintos elementos como armaduras o sistemas de redes. En teoría, el encargado debería tomar las decisiones relativas a qué elementos transportar, ya sea para su acopio o su puesta o desmontaje en obra. En la práctica, el encargado proporciona algunas indicaciones al operador de la grúa, pero la toma de decisiones en el trabajo diario es realizada por dicho operador. Éste está sometido a las demandas de todas las cuadrillas de encofradores y ferrallistas que están trabajando simultáneamente en la obra. Si los materiales y elementos que ellos emplean para realizar su trabajo como moldes de encofrado, elementos del mecano, armaduras, barras de ferralla... no están disponibles, las funciones no pueden iniciarse porque necesitan esos recursos.

Función	Salida de la función	Aspecto de la función aguas abajo	Función aguas abajo	Salida de la función aguas abajo	Aspecto de la siguiente función aguas abajo	Siguiente función aguas abajo
<b>Decidir qué transportar con la grúa torre</b>	Decisión de transportar materiales y otros recursos elegidos para su acopio	Entrada	Realizar acopio de materiales y otros recursos	Materiales acopiados	Recurso	Elaborar las armaduras
					Recurso	Montar el mecano
					Recurso	Colocar tableros y tabicas
					Recurso	Instalar barandillas en el entablado
					Recurso	Montar el forjado de la planta
					Control	Decidir iniciar la colocación de tableros y tabicas
			Control	Realizar acopio de materiales y otros recursos*		
	Control	Transportar elementos para su puesta o desmontaje en obra*				
	Decisión de transportar elementos elegidos para su puesta o desmontaje en obra	Entrada	Transportar elementos para su puesta o desmontaje en obra	Grúa transporta elementos para su puesta o desmontaje	Recurso	Colocar armaduras de los pilares
					Recurso	Colocar armaduras de los muros del ascensor
					Recurso	Colocar paneles de encofrado
					Recurso	Verter el hormigón de los pilares o muros del ascensor
					Recurso	Desencofrar pilares y muros del ascensor
					Recurso	Colocar sistema de redes de seguridad tipo V
Control			Realizar acopio de materiales*			
Control	Transportar elementos para su puesta o desmontaje en obra*					
		Realizar coordinación con el gruísta*	Coordinación con el gruísta			

\* La función <Realizar coordinación el gruísta> tiene dos entradas que la activan que son las salidas de la función <Decidir qué elementos transportar con la grúa torre>, por ello aparece repetida en la tabla. A su vez, su salida “Coordinación con el gruísta” está conectada mediante el aspecto de control con las dos funciones < Realizar acopio de materiales y otros recursos> y <Transportar elementos para su puesta o desmontaje en obra>. Así, siempre que la función <Decidir qué elementos transportar con la grúa torre> se active, independientemente de la que cuál sea la salida resultante, se activará a continuación la función <Realizar coordinación el gruísta>. Sin embargo, solo una de las funciones < Realizar acopio de materiales y otros recursos> y <Transportar elementos para su puesta o desmontaje en obra> se activará y en ella la función <Realizar coordinación el gruísta> actuará como control.

Tabla 22. Análisis de los acoplamientos de las funciones aguas arriba y aguas abajo relacionadas con el transporte de materiales, recursos, y elementos por la grúa torre  
(Elaboración propia)

Consecuentemente, se originarían retrasos en la ejecución de la obra. Por esa razón, las decisiones del operador de grúa juegan un papel esencial y pueden aumentar significativamente el estrés, la carga de trabajo y las disputas laborales.

En cuanto su análisis en el modelo, la salida de la función “decidir qué transportar con la grúa torre” se encuentra conectada con las funciones “realizar acopio de materiales”, “transportar elementos para su puesta o desmontaje en obra” y “realizar coordinación con el gruista”, tal y como se observa en la Tabla 22.

Es de especial interés su conexión con dos de estas funciones, que son “realizar acopio de materiales” y “transportar elementos para su puesta o desmontaje en obra”. En el caso de “realizar coordinación con el gruista” esta función proporciona el control sobre las otras dos para que se ejecuten de la manera adecuada, requiriendo la coordinación del operador de grúa con otro trabajador de la obra que recibe los materiales que van a acopiarse o los elementos que van a montarse o desmontarse de la obra. Sin embargo, en cuanto al análisis de la propagación de la variabilidad, y considerando su efecto en el desempeño del sistema, la influencia de las otras dos funciones es mayor.

Si se analiza con detenimiento esta citada Tabla 22 puede observarse que, a través de estas funciones, se conecta a la función “decidir qué elementos transportar con la grúa torre” con funciones relacionadas con la ferralla, como “montar el forjado de la planta”, con funciones relacionadas con el encofrado, como “colocar paneles de encofrado”, o con funciones relacionadas con las protecciones colectivas, como “colocar sistema de redes de seguridad tipo V”. De este modo, esas dos funciones crean un camino para que la salida de la función “decidir qué elementos transportar con la grúa torre” tenga un impacto en la variabilidad de prácticamente todos los tipos de trabajos que se ejecutan en la obra, ya que a su vez esas dos funciones proporcionan los recursos necesarios para la ejecución de un número importante de funciones del modelo que también han quedado recogidas en la Tabla 22, en las dos últimas columnas. De este modo, si no se decide de forma precisa y a tiempo qué transportar con la grúa otras funciones del sistema no podrán ejecutarse.

A todo ello hay que sumarle que, como ya se indicó anteriormente, esta función está acoplada aguas arriba con la función “encargar el hormigón” que puede generar una variabilidad que se agrega a la de la propia función “decidir qué elementos transportar”, ya que la salida de la primera es un control de la segunda. Esto puede derivar en falta de precisión en las salidas de todas estas funciones que se han comentado que se sitúan aguas abajo de la función. Todo ello es peligroso porque podría provocar la falta

de coordinación con el gruísta o la caída de materiales que no se aseguren correctamente antes de su transporte.

Por último, queda por abordar el tercer aspecto de interés mencionado al principio de este apartado. Éste hacía referencia a un grupo de funciones que se muestran en la Tabla 23 y que están relacionadas con la instalación de las protecciones colectivas.

<b>Función</b>	<b>Salida de la función</b>	<b>Aspecto de la función aguas abajo</b>	<b>Función aguas abajo</b>
Instalar línea de vida	Línea de vida instalada	Precondición	Decidir iniciar el montaje de los tableros y tabicas
Montar redes bajo forjado	Redes bajo forjado colocadas	Precondición	Decidir iniciar el montaje de los tableros y tabicas
Montar redes en huecos	Redes colocadas en huecos	Precondición	Replantear el forjado de la planta
Instalar barandillas en el entablado	Barandillas colocadas	Precondición	Replantear el forjado de la planta
		Entrada	Desinstalar la línea de vida
Colocar sistema de redes de seguridad tipo V	Sistema de redes de seguridad tipo V colocado	Precondición	Verter el hormigón de los pilares o muros del ascensor
Trasladar barandillas del entablado al forjado	Barandillas colocadas en el forjado	Precondición	Replantear los pilares
Montar redes verticales de fachada	Redes verticales de fachada colocadas	Precondición	Desmontar parte del mecano (desencofrado)

Tabla 23. Análisis de los acoplamientos aguas abajo de las funciones relacionadas con las protecciones colectivas (Elaboración propia)

La ejecución de estas funciones está orientada a garantizar la seguridad de los trabajadores en la obra. Las salidas de estas funciones son precondiciones de otras funciones relacionadas con la ejecución de los trabajos de estructura. Debido a la influencia de algunas de las fuentes de variabilidad descritas anteriormente, y que son habituales en la obra, puede incrementarse la presión y la carga de trabajo. La consecuencia sería que estas precondiciones podrían no cumplirse antes de que una función se active. Así, se da lugar a que los trabajos se ejecuten sin los medios de protección necesarios. En el caso de las redes verticales de fachada, incluso se podría poner en peligro a personas ajenas a la obra que circulen en las inmediaciones de éstas debido a la caída de objetos en el proceso de desencofrado. Cabe mencionar que esta operación de desencofrado fue considerada por muchos de los trabajadores

entrevistados como una de las peligrosas, especialmente cuando las obras se ubican en zonas céntricas de la ciudad. Esto se debe a que la retirada de los tableros se realiza sin escalera y dejándolos caer directamente.

Además, hay otros dos factores que deben ser considerados. Por un lado, todas estas funciones, y las demás funciones de color rojo relacionadas con la seguridad, tienen como recurso a un grupo de trabajadores responsables del montaje y desmontaje de las protecciones colectivas. En adelante se hará referencia a ellos como el personal de seguridad y salud. Sin embargo, dicho personal es limitado, por lo que le resulta complicado seguir el ritmo cambiante de la ejecución de los trabajos en la obra. Es habitual que se produzcan cambios en la planificación de los trabajos y que se ejecuten tareas diferentes a las previstas para así amortiguar retrasos que generan otras tareas que no pueden ejecutarse por falta de recursos. El personal de seguridad y salud debe ir por delante en la ejecución de las tareas en la obra para que todas las protecciones colectivas estén instaladas antes de iniciar una tarea. En muchas ocasiones, esto resulta complicado. Por otro lado, existe una dificultad añadida debido a que algunos trabajadores desmontan las protecciones colectivas para desempeñar su trabajo y no las colocan de nuevo. Esta situación ya ha sido comentada anteriormente. El resultado de todo lo expuesto es que no siempre se trabaja en las condiciones de seguridad necesarias para realizar las tareas de forma segura.

#### **4.2.5 Consecuencias del análisis**

Como consecuencia del análisis FRAM de las tareas desarrolladas en la fase de construcción de la estructura de un edificio, a continuación se presentan los principales puntos clave que se han encontrado. Así, es recomendable desarrollar medidas específicas de actuación encaminadas principalmente a la mejora de las deficiencias halladas y/o el control en cada caso:

- **Plan de salud y seguridad en el trabajo**

El análisis del "trabajo ejecutado" ha demostrado que el plan de salud y seguridad no suele emplearse nunca en la realidad diaria de la obra. De hecho, no existe ninguna función o aspecto en el modelo FRAM que haga referencia al mismo. Además, cabe poner de manifiesto que en las entrevistas se preguntó expresamente por ello y los propios trabajadores, incluido el personal de seguridad y salud, confirmaron este hecho. En teoría, el plan de salud y seguridad es la clave para asegurar una ejecución adecuada

de las tareas y una buena gestión de seguridad y salud en las obras de construcción. Por ello, este documento debería ajustarse perfectamente a la realidad.

El plan también debería facilitar la toma de decisiones y el control de las actividades. Sin embargo, se ha encontrado que el “trabajo imaginado” y el “trabajo ejecutado” no coinciden. El plan de salud y seguridad nunca se usa y es simplemente un requisito administrativo para obtener la licencia para iniciar los trabajos de construcción en la obra. De hecho, se han revisado más de 30 planes de obras reales proporcionados por empresas colaboradoras y ninguno de ellos incluía las técnicas y procedimientos de trabajo ajustados a la realidad de la obra para la que habían sido elaborados. Más bien, lo que se incluía en ellos era una descripción de técnicas y procedimientos genérica sin adaptarse al caso específico. De igual modo, ninguno de ellos fue modificado cuando las condiciones de trabajo, las técnicas productivas o los procedimientos de trabajo cambiaron. Si realmente se empleara el plan de seguridad y salud como un documento vivo y adaptado a la realidad de la obra se podrían obtener grandes beneficios. El plan de seguridad y salud podría contribuir a la realización de una toma de decisiones y un control resiliente. Así, ayudaría a mejorar algunas de las cuestiones planteadas en la agregación de la variabilidad como la toma de decisiones relativas a cuándo debe encargarse el hormigón, la planificación de los trabajos con la grúa o la decisión de iniciar los trabajos sin las protecciones colectivas instaladas.

En ese sentido, la mejora de los planes de seguridad y salud repercutiría también de forma directa en la gestión de la seguridad en la obra. Si los planes de seguridad y salud contribuyesen a la mejora del desempeño resiliente podrían influir en la cultura de seguridad de la organización. De este modo, los planes podrían dar lugar a una mejora del dilema planteado al respecto de las protecciones colectivas que en muchas ocasiones son desmontadas por los trabajadores o no son empleadas por los trabajadores aunque estén disponibles.

- **Funciones mayoritariamente de tipo humano**

Como se mencionó anteriormente en los resultados de la identificación de la variabilidad, la mayoría de las funciones que aparecen en el modelo FRAM son de tipo humano. Por ello, son realizadas directamente por los trabajadores que hacen uso de sus habilidades, conocimientos y experiencia para adoptar estrategias que les permitan hacer frente a la variabilidad, logrando un desempeño resiliente. Sin embargo, de manera general y, en base a las entrevistas llevadas a cabo en la toma de datos previa a la elaboración del modelo, muchos trabajadores dan prioridad a la productividad por encima de la seguridad, aunque se la suya propia. Aparentemente no se debe a falta de formación

en seguridad, ya que todos han sido informados y formados al respecto, sino más bien la presión de tiempo y la carga de trabajo que les llevan a asumir riesgos para poder alcanzar los objetivos de producción.

Este problema también presenta una componente organizacional que debe ser mejorada. A este respecto, a través de las entrevistas a los trabajadores alguno comentó que la seguridad y la producción eran un problema porque si no cumplía con las medidas de seguridad pero alcanzaba los objetivos de producción lo máximo que podría ocurrirle es que el responsable de seguridad le expulsara de la obra. En tal caso, el jefe de su subcontrata lo mandaría a otra obra a trabajar. Sin embargo, si cumplía con todas las medidas de seguridad pero no alcanzaba los objetivos de producción entonces lo despedirían de su empresa. Por tanto, afirmaba que a veces debía asumir riesgos si quería desempeñar su trabajo según el ritmo fijado. Es importante que se mejore el desempeño resiliente de todos los trabajadores que integran las diferentes organizaciones que intervienen en la obra, no solo se les puede exigir el cambio a los trabajadores responsables de la ejecución de los trabajos. Es clave que los trabajadores que desarrollan otras funciones en la organización, como directivas o de gestión, también desarrollen habilidades para la resiliencia. Ese es el único camino para que la organización en su conjunto sea resiliente y así, se mejore la cultura organizacional de seguridad.

- **Ausencia de indicadores *leading* centrados en el trabajo diario**

Por último, las empresas visitadas no poseen indicadores *leading* enfocados a la monitorización del trabajo diario y las operaciones exitosas. Los indicadores que se emplean en la gestión de la seguridad en las empresas visitadas son fundamentalmente de tipo *lagging*. Este hecho, no es de extrañar, ya que aunque la tendencia está cambiando, tradicionalmente son el tipo de indicadores que se han venido empleando en el sector basados en ratios de accidentes y frecuencias, tal y como se indicó en los antecedentes de esta tesis. Aunque hay que mencionar que estas empresas cuentan con sistemas de gestión integrados, incluyendo la seguridad y salud, donde incluyen indicadores de otros tipos. Sin embargo, los indicadores que emplean no son en tiempo real o próximos a ello, sino todo lo contrario, es decir, el tiempo que transcurre desde que la información es recopilada hasta que es analizada y se obtienen los resultados es amplio. Por ello, su información no permite detectar desviaciones o señales que ayuden a anticipar los fallos en la ejecución. Así mismo, no existe una comunicación directa de esta información a los trabajadores.

En el transcurso del trabajo de investigación, en relación al desarrollo de estos nuevos indicadores alguno de los participantes comentó “el papel lo soporta todo”. La idea propuesta por la Ingeniería de la Resiliencia es totalmente lo opuesto a eso. En el desarrollo de nuevos indicadores *leading* para la resiliencia es importante tener en cuenta que deben ser fáciles de entender y de medir. También deben ser útiles, ya que el objetivo no es sobrecargar al sistema con más documentos o con indicadores inefectivos, lo que se pretende es la mejora del desempeño resiliente.

- **Trabajos con la grúa**

Aunque ya se ha mencionado anteriormente en este apartado los trabajos con la grúa, por su importancia en el desempeño del sistema, se recomienda llevar a cabo un análisis más en profundidad del proceso de toma de decisiones y del desempeño diario que llevan a cabo los operadores de grúa. Este análisis debería ir encaminado a proponer mejoras enfocadas al desempeño resiliente en base a los resultados que se obtengan. Algunas posibilidades podrían ser implicar en mayor medida a los responsables y encargados, desarrollar directrices para la planificación de estos trabajos y mejorar las habilidades para la resiliencia, es decir, la capacidad de responder, monitorizar, aprender y anticipar de los operadores de grúa.

En este sentido algunos trabajadores, entre ellos los operadores de grúa pero también trabajadores de otros puestos de trabajo, indicaron en las entrevistas que el operador de la grúa tenía dificultades para suministrar materiales y dar soporte a todas las actividades que requerían la grúa. Por este motivo, aparecían conflictos y era frecuente recurrir al encargado para evitar que la situación se complicara aún más. Además algún trabajador comentó que hace unos años, cuando el sector de la construcción estaba en auge antes de la crisis, los operadores de grúa recibían sobornos por parte de los trabajadores de las subcontratas para dar prioridad a las necesidades de esos trabajadores en cuanto a la disponibilidad de la grúa. Es importante dejar claro que esta afirmación se basa en testimonios de trabajadores y que ellos indicaron que estas prácticas ya no se llevaban a cabo debido a que los sueldos en el sector de la construcción había descendido notablemente. Sin embargo, es importante verificar que esto no ocurre y vigilar que, en el caso de que haya ocurrido, no vuelva a suceder. Estos comportamientos no son compatibles con el desempeño resiliente de las obras de construcción.

La investigación desarrollada en esta tesis en las siguientes etapas se ha visto marcada por los resultados encontrados tras el análisis FRAM. En base a ellos, se han definido la otra actividad principal del proyecto encaminada a la mejora de la gestión de la

seguridad en las obras de construcción a través de la contribución de los planes de seguridad y salud al desempeño resiliente.

#### 4.2.6 Identificación de indicadores leading a partir del modelo FRAM

En este apartado se pretende dar un paso más en la investigación realizada en línea con los resultados obtenidos en el apartado anterior. Para ello, se llevará a cabo una identificación de indicadores *leading* enfocados a la mejora de la resiliencia en el desempeño diario de las tareas de construcción de estructuras. Estos indicadores serán identificados en base al modelo FRAM propuesto según las directrices fijadas por el Método de Identificación de Indicadores *Leading* o *Leading Indicator Identification Method* (LIIM) (Raben, 2017) presentado en la metodología. La propuesta de indicadores no era objeto de esta tesis, por lo que a partir de los indicadores que se identifiquen, será necesario continuar trabajando para confirmar su relevancia mediante la consulta a expertos y la revisión de eventos adversos registrados.

Según Raben et al. (2017) la identificación de los indicadores *leading* se basa en la identificación de las funciones que a menudo son afectadas por la variabilidad, que a su vez se propaga afectando a otras funciones. En la presente investigación estas funciones han sido identificadas y presentadas detalladamente en el apartado 4.2.4. Concretamente estas funciones son “encargar el hormigón” y “decidir qué transportar con la grúa”. Ambas funciones estaban sujetas a una variabilidad que se propaga por el sistema. En el caso de la primera esta variabilidad se propagaba aguas arriba y en el caso de la segunda aguas abajo. Además se identificaron un grupo de funciones relacionadas con la instalación de protecciones colectivas que actuaban como precondiciones de otras funciones y que frecuentemente eran omitidas o se realizaban demasiado tarde. En este caso, es importante destacar que estas funciones eran precondiciones de diversas funciones relacionadas con la mayoría de los grupos o tareas principales como son: “decidir iniciar el montaje de los tableros y tabicas”, “replantear el forjado de la planta”, “verter el hormigón de los pilares o muros del ascensor”, “replantear los pilares y desmontar parte del mecano”. Para evitar desviaciones o accidentes en los trabajos, ninguna de esas funciones debería activarse sin que las protecciones colectivas estén instaladas.

Por otro lado, hay que considerar que los indicadores *leading* que se propongan a partir del FRAM deben ser medidos e implementados en el lugar de trabajo, en este caso la obra, y que deben presentar una correlación con la aparición de resultados no deseados.

Además, estos indicadores describirán factores implícitos en el proceso de ejecución de los trabajos como podrían ser acciones intuitivas realizadas por los trabajadores. En consecuencia se complica la definición de indicadores medibles. Esta dificultad puede abordarse empleando medidas cualitativas en la definición de los indicadores (Raben et al., 2018).

En base a todo ello, la Tabla 24 recoge los indicadores *leading* identificados a partir del modelo FRAM propuesto.

Indicadores	
Funciones	Definición de indicadores leading
<b>Usar la previsión de la evolución real de los trabajos y otra información relevante para fijar la fecha de recepción del hormigón</b>	Evaluación cualitativa de qué información es empleada para encargar el hormigón.
	Evaluación cualitativa de la previsión de la evolución de la ejecución de los trabajos que de forma inmediata se realizarán en la obra.
	Evaluación cualitativa del tiempo desde que se encarga el hormigón hasta que es puesto en obra en relación a la carga de trabajo.
<b>Priorizar los trabajos que se realizan con la grúa en base a la experiencia y las necesidades diarias de actuación identificadas</b>	Evaluación cualitativa de qué información es empleada para priorizar el transporte de materiales.
	Evaluación cualitativa de los criterios empleados para priorizar el transporte de materiales.
	Duración del tiempo desde que una actividad está preparada para iniciarse hasta que recibe los materiales que necesita para su ejecución.
<b>Disponer de las protecciones colectivas para la ejecución de actividades</b>	Evaluación cuantitativa de las funciones que se activaron cuando las protecciones colectivas estaban montadas.
	Evaluación cuantitativa de las protecciones colectivas que tuvieron que volver a montarse porque habían sido retiradas.
	Evaluación cualitativa de la información recibida por el personal responsable del montaje de las protecciones colectivas sobre cambios inmediatos en la ejecución de los trabajos.

Tabla 24. Indicadores Leading identificados a partir del FRAM (Elaboración propia)

### **4.3 Diseño y validación de un instrumento de evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad de las actividades de construcción mediante el RAG**

En este se presentan los principales resultados obtenidos en cada una de las etapas descritas en la metodología para lograr el diseño de un cuestionario que permita evaluar la contribución de los planes de seguridad y salud al desempeño resiliente de las empresas que intervienen en la ejecución de la obra.

#### **4.3.1 Diseño del cuestionario basado en el RAG**

En la primera etapa, un total de 4 expertos participaron en el proceso de diseño inicial del cuestionario para los planes de seguridad y salud centrado en el RAG. Inicialmente, en base a las fuentes empleadas como referencia y citadas en el apartado de metodología, se propusieron un total de 68 ítems. Concretamente, 22 para el potencial de responder, 19 para el potencial de monitorizar, 15 para el potencial de aprender y 12 para el potencial de anticiparse. Partiendo de esta lista inicial se llevaron a cabo 3 revisiones sucesivas de los ítems propuestos. A través de este proceso de revisión los ítems fueron modificados, eliminados o agrupados en base a las opiniones y experiencia de los expertos. En consecuencia, tras varios meses de trabajo se obtuvo una propuesta inicial para el cuestionario compuesto por 44 ítems agrupados de acuerdo a los cuatro potenciales o habilidades para la resiliencia del siguiente modo: 12 para el potencial de responder, 11 para el potencial de monitorizar, 10 para el potencial de aprender y 11 para el potencial de anticiparse.

#### **4.3.2 Resultados del método de Agregados Individuales**

En la segunda etapa, se aplicó el método de agregados individuales para validar el contenido del cuestionario. Participaron en este proceso 3 expertos que evaluaron los ítems atendiendo a cuatro categorías o variables: suficiencia, claridad, coherencia y relevancia. A modo de ejemplo se presentan en la Tabla 25 los resultados obtenidos en la validación de los ítems incluidos en el potencial de aprender.

Ítems en el potencial de APRENDER	Aspectos evaluados por los expertos												
	Experto 1				Experto 2				Experto 3				
	CO	R	CL	S	CO	R	CL	S	CO	R	CL	S	
01	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	
02	3	3	4		4	4	4		4	4	3		4
03	4	4	3		4	4	4		4	4	3		4
<b>04</b>	3	<b>2</b>	4		4	4	4		4	3	4		4
05	4	4	4		4	4	4		4	3	4		4
06	3	3	4		4	4	4		4	4	3		4
07	4	4	4		3	4	4		4	4	3		4
08	4	4	4		4	4	4		4	4	3		4
09	4	4	4		4	4	4		4	3	4		4
10	4	4	4		4	4	4		4	3	4		4

CO=Coherencia; R=Relevancia; CL= Claridad; S=Suficiencia.

Tabla 25. Resultados de la validación de los expertos de los ítems incluidos en el potencial de aprender mediante el método de agregados individuales (Elaboración propia)

En la tercera etapa, tras aplicar el método de agregados individuales se procedió a realizar el análisis de los resultados obtenidos que implicó el rediseño del cuestionario sometido a validación. Tal y como se indicó en el apartado de metodología, si un ítem obtenía un valor de puntuación de 1 o 2 por alguno de los expertos, éste debía ser revisado, reformulado o eliminado. Continuando con el ejemplo del potencial de aprender, en la Tabla 25 aparece el ítem número 4 sombreado, ya que obtuvo una puntuación de 2, en cuanto a su relevancia por el experto 1. Por este motivo, se procedió a modificarlo para mejorar su significado y así su relación con la capacidad de aprender, en base a los comentarios y recomendaciones realizadas por el experto 1 en el área de observaciones. El ítem fue redactado de forma diferente con el objetivo de que reflejara adecuadamente lo que realmente se pretendía expresar cuando fue diseñado. A continuación, se describe el proceso seguido. Inicialmente, el ítem estaba redactado tal y como se muestra:

*En el Plan de Seguridad y Salud se establecen criterios para controlar que el tiempo desde que se informa sobre un incidente (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) hasta que se genera una respuesta es aceptable.*

Después del rediseño, el ítem quedó redactado del siguiente modo:

*En el Plan de Seguridad y Salud se establecen criterios para controlar que el tiempo, desde que se informa sobre un incidente (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) hasta que dicha información es analizada y se aprende de ella, es aceptable.*

Similarmente, se analizaron las evaluaciones de los expertos de los ítems incluidos en los demás potenciales y se procedió a rediseñar o eliminar los que tuvieron una puntuación de 2 o 1 teniendo en consideración todas las observaciones que los expertos realizaron durante la evaluación. En resumen, en el potencial de responder dos ítems fueron eliminados y uno fue modificado; en el potencial de monitorizar un ítem fue eliminado y dos fueron modificados, en el potencial de aprender un ítem fue modificado; en el potencial de anticipar cinco ítems fueron eliminados y cuatro de ellos modificados. Como se desprende estos resultados los ítems de la habilidad o potencial de anticipar fueron los que presentaron mayores dificultades para su diseño. Esto se debió a que es complicado conseguir que el plan de seguridad y salud influya positivamente a esta habilidad, puesto que las obras tienen una duración limitada y la anticipación a veces se da más a largo plazo. Finalmente, se obtuvo un nuevo cuestionario rediseñado que contenía diez ítems para evaluar los potenciales de responder, monitorizar y aprender y seis para el potencial de anticiparse.

#### **4.3.3 Resultados del método Delphi**

En la cuarta etapa, tras el proceso de selección de los expertos mediante los criterios presentados en el capítulo de metodología se obtuvo un panel formado por 17 expertos que participaron en el método Delphi. Los expertos debían validar los ítems incluidos en el cuestionario rediseñado. Fue necesario realizar tres rondas del método Delphi para alcanzar el consenso entre los expertos sobre la importancia de los ítems para ser incluidos en el cuestionario. Concretamente, el consenso se alcanzó durante la segunda ronda para casi todos los ítems del cuestionario de dos. Uno de ellos estaba incluido el potencial de aprender y el otro en el de monitorizar. En esos casos, el consenso se alcanzó en la tercera ronda. Gracias a que se había realizado una validación previa mediante el método de agregados individuales los resultados fueron muy positivos. Ningún ítem obtuvo una puntuación de 2 o inferior. En consecuencia, ninguno de los ítems del cuestionario fue eliminado. Conforme a la dinámica seguida en este apartado de anterior, en la Tabla 26 se presentan, a modo de ejemplo, los resultados de las tres rondas del panel de expertos del método Delphi para el potencial de aprender.

Nº Item	1ª RONDA		2ª RONDA		3ª RONDA	
	Mediana	Desviación Absoluta	Mediana	Desviación Absoluta	Mediana	Desviación Absoluta
01	5	0.71	5	0.47	-	-
02	4	0.76	4	0.29	-	-
03	4	0.53	4	0.53	4	0.29
04	4	0.65	4	0.41	-	-
05	4	0.65	4	0.24	-	-
06	4	0.47	-	-	-	-
07	4	0.82	4	0.24	-	-
08	4	0.71	4	0.35	-	-
09	4	0.53	4	0.29	-	-
10	4	0.47	-	-	-	-

Tabla 26. Resultados de los ítems incluidos en el potencial de aprender en las tres rondas del panel de expertos del método Delphi  
(Elaboración propia)

La Tabla 27 muestra la distribución de los 36 ítems que componen el cuestionario final obtenido para evaluar en qué medida los planes de seguridad y salud contribuyen al desempeño resiliente en una obra de construcción.

	Dimensiones o grupos de ítems en el cuestionario	Número de ítems
<b>Potenciales para la resiliencia</b>	Responder	10
	Monitorizar	10
	Aprender	10
	Anticipar	6

Tabla 27. Distribución de los ítems del cuestionario en cada uno de las dimensiones o potenciales para la resiliencia  
(Elaboración propia)

A continuación se presentan de forma detallada los ítems finales del cuestionario por cada potencial.

Respecto al potencial de responder, los expertos consideraron que el octavo ítem centrado en que el plan de seguridad y salud sea fácil de entender y aplicar de forma práctica. Es habitual encontrar planes muy extensos y complicados que dificultan su puesta en práctica y con ello la capacidad de mantener una respuesta adecuada en todo momento. En cuanto a los demás ítems, todos fueron considerados importantes para que las organizaciones que intervienen en la obra pueden dar una respuesta resiliente que conduzca a un resultado satisfactorio. Así, entre los ítems del potencial de responder incluidos en la Tabla 28, se incluyeron aspectos que debían incluirse en los planes de seguridad y salud para sentar las bases de un desempeño resiliente como son cuestiones referentes a los riesgos que deben ser identificados y evaluados, tanto si son frecuentes como inesperados; a las medidas, acciones y respuestas que deben

generarse ante cada uno de estos riesgos; a las actualizaciones del plan de seguridad y salud; a incluir los recursos disponibles para trabajar en condiciones de alta carga de trabajo y presión; al fomento de que subcontratistas y autónomos puedan proponer revisiones del plan para que los métodos de trabajo en él incluidos sean realistas; a la inclusión de sistemas de comunicación y coordinación; a permitir a los trabajadores realizar ajuste; y a la revisión del plan de seguridad y salud adecuada por parte del coordinador. Uno de los expertos indicó que para conseguir una respuesta resiliente “se debe de potenciar durante la ejecución de las obras la obligatoriedad de sesiones informativas respecto de las medidas previstas en el plan de seguridad y salud e interactuar con los diferentes contratistas, subcontratistas y trabajadores respecto a los métodos de trabajo previstos y organización obra”, cuestiones que actualmente se realizan la mayoría de las obras.

Nº	ITEMS DEL CUESTIONARIO PARA EVALUAR EN QUÉ MEDIDA LOS PLANES DE SEGURIDAD Y SALUD CONTRIBUYEN AL POTENCIAL DE RESPONDER
R01	En el Plan de Seguridad y Salud se identifican y evalúan los riesgos y sucesos críticos, tanto frecuentes como inesperados.
R02	En el Plan de Seguridad y Salud se detallan las medidas y acciones que deben implantarse para evitar estos riesgos o sucesos críticos y las respuestas que deben llevarse a cabo en caso de que se materialicen.
R03	El Plan de Seguridad y Salud incluye la planificación de los métodos concretos de trabajo que realmente se pondrán en práctica.
R04	El Plan de Seguridad y Salud se actualiza conforme a los cambios en la planificación de las operaciones que realmente se ejecutan.
R05	El Plan de Seguridad y Salud recoge los recursos disponibles (personal, equipos, materiales...) para mantener la capacidad de ejecutar los trabajos de forma segura en condiciones de presión o alto volumen de trabajo.
R06	Se fomenta que los subcontratistas y trabajadores autónomos propongan revisiones del plan para que éste se ajuste a los recursos y métodos que realmente serán empleados.
R07	El Plan de Seguridad y Salud recoge los sistemas de comunicación y coordinación entre contratistas, subcontratistas y trabajadores autónomos para facilitar un desempeño eficaz de los trabajos.
R08	El Plan de Seguridad y Salud es fácil de entender y se emplea en la práctica en la ejecución de los trabajos.
R09	El Plan de Seguridad y Salud permite a los trabajadores ajustar sus acciones según consideren apropiado.
R10	El Coordinador de Seguridad y Salud antes de aprobar el Plan de Seguridad y Salud verifica adecuadamente que el contenido del plan se adapta a la realidad de la obra que va a ejecutarse.

Tabla 28. Items del cuestionario final para el potencial de responder  
(Elaboración propia)

En cuanto al potencial de monitorizar todos los ítems desarrollados están recogidos en la Tabla 29. Los expertos coincidieron en señalar como muy importante al octavo ítem. Por ello, para poder monitorizar apropiadamente el desempeño en la obra los

indicadores deben ser fáciles de usar a la par que eficientes. Esta monitorización es esencial, ya que todos los potenciales están interrelacionados y si no se conoce qué ocurre en el desempeño diario será difícil desarrollar una respuesta, un aprendizaje y una anticipación resiliente. De la evaluación de los expertos también se desprende que consideran moderadamente importante el uso de indicadores reactivos en la obra. Lo cual es consistente con la visión de la Ingeniería de la Resiliencia que apuesta por poner en valor a los indicadores proactivos frente a los reactivos. Con respecto al resto de ítems, éstos fueron valorados como importantes y en ellos abarcaban la definición de métodos para la monitorización; la definición de indicadores coherentes; la revisión regular de estos indicadores para que sean realistas; el uso de indicadores proactivos válidos y fiables; la frecuencia adecuada de mediciones; y la existencia de un retraso asumible entre medición y obtención de resultados. Con respecto a todo ello, uno de los expertos indicó *“considero que debe ser muy importante la definición y uso de indicadores de monitorización en el plan de seguridad”* y otro que era *“fundamental en el plan de seguridad y salud”* revisar los indicadores periódicamente.

Nº	ITEMS DEL CUESTIONARIO PARA EVALUAR EN QUÉ MEDIDA LOS PLANES DE SEGURIDAD Y SALUD CONTRIBUYEN AL POTENCIAL DE MONITORIZAR
M01	En Plan de Seguridad y Salud se definen métodos e indicadores para monitorizar adecuadamente la ejecución de los trabajos.
M02	Si se definen indicadores de seguridad, éstos son coherentes con los trabajos que realmente se realizan en la obra.
M03	Se establecen en el Plan de Seguridad y Salud procedimientos y criterios para realizar la revisión regular y adecuada de los indicadores para se sigan adaptando a la realidad.
M04	En el Plan de Seguridad y Salud se planifica el uso de indicadores proactivos (Ejemplos: porcentaje de reuniones de planificación previas a la ejecución de tareas o número de acciones de promoción de la seguridad)
M05	En el Plan de Seguridad y Salud se planifica el uso de indicadores reactivos (Ejemplo: índice de accidentes o lesiones)
M06	Los indicadores proactivos son válidos y fiables
M07	El período cubierto por los indicadores reactivos es apropiado.
M08	Los indicadores son fáciles de usar a la vez que eficientes.
M09	La frecuencia de las mediciones de los indicadores es apropiada en el Plan de Seguridad y Salud.
M10	El retraso entre la medición y el análisis de los resultados de los indicadores es aceptable.

Tabla 29. Ítems del cuestionario final para el potencial de monitorizar  
(Elaboración propia)

En relación al potencial de aprender, cuyos ítems se presentan en la Tabla 30, los expertos estimaron que establecer de forma clara qué tipo de sucesos deben ser reportados es esencial para fortalecer la capacidad de aprendizaje en las obras de construcción, ya que dieron al primer ítem la calificación de muy importante. Todos los

demás ítems fueron considerados importantes y proponían garantizar la investigación de incidentes; el desarrollo de protocolos el reporte de incidentes; el control del tiempo de análisis y aprendizaje de estos incidentes; la disposición de medios suficientes para ello; el estímulo para fomentar el reporte; el aprendizaje tanto del éxito como del fracaso; las reuniones periódicas para abordar ambos; y un procedimiento formal para recopilar, procesar y aprender de toda la información recibida. De manera general, uno de los expertos destacó *“desde mi punto de vista, aprender para saber responder es la base de la resiliencia”*.

Nº	ITEMS DEL CUESTIONARIO PARA EVALUAR EN QUÉ MEDIDA LOS PLANES DE SEGURIDAD Y SALUD CONTRIBUYEN AL POTENCIAL DE APRENDER
AP01	En el Plan de Seguridad y Salud se establece claramente sobre qué tipo de incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) debe informarse.
AP02	En el Plan de Seguridad y Salud se establecen criterios que garanticen que la información de los de incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) se investigan adecuadamente.
AP03	En el Plan de Seguridad y Salud se establecen protocolos para que se informe sobre estos de incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) a todas las organizaciones implicadas en la obra.
AP04	En el Plan de Seguridad y Salud se establecen criterios para controlar que el tiempo desde que se informa sobre un incidente (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) hasta que dicha información es analizada y se aprende de ella es aceptable.
AP05	En el Plan de Seguridad y Salud de definen los recursos suficientes para que se puedan escribir reportes o informes sobre estos incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles).
AP06	En el Plan de Seguridad y Salud de definen mecanismos para motivar a los empleados para que comuniquen los incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles).
AP07	En el Plan de Seguridad y Salud se definen mecanismos para aprender de las cosas que van bien, así como de las que van mal.
AP08	En el Plan de Seguridad y Salud se planifican reuniones periódicas en las que intervienen todos los agentes de la obra para aprender no solo de las cosas que han ido mal, sino también de las que han ido bien.
AP09	En el Plan de Seguridad y Salud existen un procedimiento formal para la recopilación, clasificación y análisis de toda la información y datos recibidos (informes, indicadores...).
AP10	En el Plan de Seguridad y Salud existe un procedimiento formal para aprender de esta información (desarrollo de nuevos procedimientos, formación, rediseño, reorganización...).

Tabla 30. Ítems del cuestionario final para el potencial de aprender  
(Elaboración propia)

En la referente a los ítems del potencial de anticipar recogidos en la Tabla 31, el hecho de que las personas responsables de analizar las potenciales debilidades y amenazas para el desempeño resiliente en la obra posean la experiencia, capacidad y recursos necesarios, fue considerado por los expertos como muy importante. El resto de ítems

fueron valorados como importantes y en ellos se planteaba evaluar si el plan de seguridad y salud abordaba las amenazas u debilidades: estableciendo una sistemática para adelantarse a ellas; permitiendo que los trabajadores de todas las empresas aportaran información en ese sentido; creando cauces de comunicación para difundir esta información; y proporcionando mecanismos para mantener la capacidad de detección y de reflejarlo en el plan de seguridad y salud. En este sentido, uno de los expertos comentó que *“la opción anticipar es la más difícil”*.

Nº	ITEMS DEL CUESTIONARIO PARA EVALUAR EN QUÉ MEDIDA LOS PLANES DE SEGURIDAD Y SALUD CONTRIBUYEN AL POTENCIAL DE ANTICIPAR
AN01	En el Plan de Seguridad y Salud se establece una sistemática para adelantarse a posibles debilidades y amenazas relacionadas con la seguridad.
AN02	Las personas que llevan a cabo este análisis de potenciales debilidades y amenazas tienen la experiencia, capacidad y recursos necesarios para ello.
AN03	En el Plan de Seguridad y Salud se establecen sistemas para garantizar que cualquier trabajador de las diferentes empresas intervinientes en la obra pueda aportar de forma sencilla cualquier información relacionada con las debilidades y amenazas de seguridad potenciales o anticipadas.
AN04	Además de recoger esa información conforme al ítem anterior, en el Plan de Seguridad y Salud se establecen los cauces de comunicación para que esta información sobre potenciales amenazas y debilidades sea transmitida y compartida adecuadamente a todo el personal que interviene en la obra.
AN05	En el Plan de Seguridad y Salud se definen mecanismos para el desarrollo y el mantenimiento de la capacidad para identificar las amenazas futuras para la seguridad, la calidad y el rendimiento operacional.
AN06	Existen mecanismos definidos para que las amenazas y oportunidades detectadas se transmitan o reflejen en futuros Planes de Seguridad y Salud.

Tabla 31. Items del cuestionario final para el potencial de anticipar  
(Elaboración propia)

Además, en relación a todos los potenciales en conjunto y al cuestionario propuesto para conseguir que el plan de seguridad y salud apoye el desempeño resiliente en la obra, uno de los expertos estableció que *“con la visión de plan de seguridad y salud a futuro, practico y eficiente es difícil mantener los criterios actuales”*. A este respecto muchos otros comentaron que para alcanzar la implantación de las premisas de la Ingeniería de la Resiliencia, el salto que debe dar el sector de la construcción en general, y los planes de seguridad y salud, en particular es grande.

Adicionalmente, en el método Delphi desarrollado con el panel de expertos se incluyó una última pregunta fuera del cuestionario propuesto. Ésta consistía en que los expertos valoraran, considerando el estado actual de las obras de construcción en España, debían indicar qué potenciales eran más relevantes para comenzar a actuar sobre ellos. Así, debía repartir 100 puntos entre todos los potenciales. El resultado obtenido se recoge en la Tabla 32. En este caso el consenso se alcanzó en la segunda ronda.

Potenciales para el desempeño resiliente	Media	Mediana	Desviación Absoluta
Responder	22.06	20.00	5.00
Monitorizar	22.06	20.00	5.00
Aprender	34.12	30.00	7.06
Anticiparse	21.76	20.00	4.71

Tabla 32. Valoración de la relevancia de los potenciales para la resiliencia en las obras de construcción

En relación con estos resultados presentados cabe mencionar el comentario de uno de los expertos que indicó que *“un punto importante es la formación de los trabajadores. El aprendizaje y entrenamiento de los trabajadores y empresas debe ser un foco de trabajo importante.”*

Finalmente, se obtuvo un cuestionario compuesto por los 36 ítems diseñados que serían evaluados mediante una escala Likert de 6 puntos desde Excelente (6) hasta Ausente (1) para evaluar la contribución de los planes de seguridad y salud a la gestión resiliente. Dicho cuestionario se presenta en el Anexo D.

#### **4.3.4 Análisis de los expertos sobre la Ingeniería de la Resiliencia y el sector de la construcción.**

Finalmente, una vez realizado el método Delphi los expertos llevaron a cabo un debate sobre el Plan de Seguridad y Salud y las posibles limitaciones o barreras para poner en práctica en concepto de *Safety-II* y de la Ingeniería de la Resiliencia en el sector de la construcción.

En relación los planes de seguridad y salud los expertos destacaron que solían elaborarse como un requisito legal y administrativo pero que realmente no se utilizaban en la práctica, ya que no son un documento operativo. Concretamente, algunos de los expertos indicaron:

*“Es un mamotreto que pesa mucho que está en una estantería y luego la realidad en la obra es distinta”*

*“Es un requisito administrativo, burocrático al final”*

*“Los planes no es que sirvan para mucho, pero vamos entre otras cosas definen quien es quien lo firma y quien es la persona que es responsable”*

Además, añadieron como posibles causas de esto la propia exigencia legal y la Administración, que daban lugar a que el Plan fuera así, y el Estudio Básico de Seguridad y Salud o Estudio de Seguridad y Salud. El Plan de Seguridad y Salud debe

basarse en el contenido del Estudio de Seguridad y Salud o Estudio Básico de Seguridad y Salud, según el caso, que se elaboran durante la fase de proyecto. Sin embargo, estos Estudios no se elaboran adecuadamente y no reflejan la realidad de la obra. Este hecho propicia que, posteriormente, el propio Plan de Seguridad y Salud tampoco la refleje. Un experto explicó concretamente:

*“La construcción nos olvidamos muchas veces de que parte toda del Estudio Básico de Seguridad y Salud. Hablamos del Plan de Seguridad y Salud pero no hablamos del Estudio básico. El Estudio Básico muchas veces no sirve para nada, para nada. Y para colmo de que no sirve para nada es copiado por el contratista, porque es el contratista quien lo hace, no es el coordinador de seguridad y salud, es el contratista, que muchas veces nos olvidamos de este punto. Es él quien tiene que saber cómo tiene que ser la obra y cómo se va a ejecutar esa obra. Él y sus subcontratistas tienen que saberlo, tiene que ponerse de acuerdo con sus subcontratistas para saber cómo realizan la obra. Entonces partimos de que eso está mal muchas veces porque simplemente lo que hacen es un expediente administrativo.”*

Así, los expertos destacaron que, actualmente, la forma de elaborar un Plan de Seguridad y Salud se basa en un “plan tipo” en el cual se cambian algunos parámetros indicativos de la obra como pueden ser el emplazamiento, la dirección de obra y poco más. Se revisa que estén las partes que deben estar y listo. Realmente, no se particulariza para cada obra sino que se incluyen procedimientos totalmente genéricos. Algunos expertos comentaron a este respecto que:

*“El corta-pega es grandísimo”*

*“Realmente a los Planes de Seguridad y Salud se les cambia la denominación de quién es el autor del proyecto, cuál es el emplazamiento, y el resto del contenido es exactamente el mismo.”*

*“Porque todas las obras son de hoy para mañana, es decir, mañana tiene que empezar la obra y tiene que tener un estudio de seguridad, y mañana tiene que aprobarlo el coordinador”*

Por este motivo, los expertos pusieron de manifiesto que en el caso de obras muy singulares es cuando mejores planes de seguridad se desarrollan, porque el “plan tipo” que normalmente se emplea no sirve para esos casos y se desarrolla uno particular. En este sentido, uno de los expertos comentó un caso concreto de una obra singular que tuvieron y cómo realizaron el Plan de Seguridad y Salud:

*“Nosotros redujimos. Como va y como lo vamos a hacer. Esto es lo que vamos a hacer.”*

Ese debería ser el espíritu o propósito del Plan de Seguridad y Salud. Por eso, en relación al cuestionario propuesto sobre qué debe tener un Plan de Seguridad y Salud para ayudar al desempeño resiliente en una obra de construcción, uno de los expertos indicó:

*“El plan de seguridad que se presenta es hacerlo vivo [...] es decir, no sé, voy a montar mi encofrado, y lo voy a montar, lo vamos a decidir, entre los trabajadores cualificados que se supone que tendría que haber, y los técnicos de seguridad y personal de producción.”*

Los demás expertos coincidieron en señalar que así deberían ser los Planes de Seguridad y Salud y otro experto añadió al respecto que:

*“El Plan de Seguridad y Salud sí debe que abarcar la totalidad de la obra, pero de la obra real. No de esa obra que han copiado de allí malamente, sino que deben de estudiarla realmente los contratistas, que muchas veces lo único que hacen simplemente es copiar y pegar el estudio básico, entonces eso no sirve para nada.”*

Así, en relación a cómo debe realizarse la planificación que se refleja en el Plan de Seguridad y Salud coincidían en que inicialmente debe abarcar la planificación de la vida de la obra pero que a la vez, al ser un documento vivo, esta planificación a largo plazo debe irse materializando en una planificación concreta a corto plazo mediante reuniones periódicas. Si el Plan se queda simplemente en una planificación a largo plazo y no se va revisando y actualizando pierde eficacia y operatividad, ya que la propia obra va cambiando con respecto a lo que inicialmente estaba previsto:

*“Yo tengo que hacer planificaciones a más corto plazo para que yo sepa la semana que viene que es lo que voy a hacer, para que yo sepa cuáles son mis riesgos en la semana que viene. Si nos vamos a planificaciones solo a largo plazo va a fracasar siempre.”*

*“Pero si quieres una planificación real no puedes planificar cada 6 meses. Por eso están los sistemas nuevos de planificación. Te tienes que reunir, aunque sea media hora, semanalmente, adquirir compromisos de las personas para la semana siguiente. Porque para temas de producción lo hacen.”*

*“Las cosas se pueden hacer bien y rápido, pero bien organizadas.”*

Por otro lado, se abordó la figura del Coordinador de Seguridad y Salud:

*“El coordinador no puede aprobar cualquier cosa. El coordinador, no lo olvidemos, debe de estudiar el plan de seguridad y salud y ponerse de acuerdo, hablar y dialogar con el contratista para ver si eso que está contando es correcto o no es correcto. No una simple evaluación. No. Debería haber un intento de que se pusieran de acuerdo todas las partes sobre “Cómo vas a hacer esto”. Pues contratista, subcontratista, etc.”*

*“Entonces un buen coordinador creo que es una figura clave en el proceso, no como vigilante, sino el que puede incentivar mil cosas.”*

En este sentido, algunos expertos indicaron que los Coordinadores de Seguridad y Salud están sometidos a presiones derivadas del promotor. Al final estas presiones limitan la eficacia de su trabajo.

*“El coordinador está muy supeditado al promotor que es el que paga, evidentemente, y si tú le paras un tajo el promotor te echa.”*

*“Llegas a una obra y estás viendo un riesgo grave e inminente, y dices, pare usted la obra que se va a matar, que eso no es correcto. Le hago el parte de que paren la obra. Cuando llego a mi despacho me encuentro un fax, “queda está usted despedido” por el abogado de la empresa. Integración. Doy a conocimiento a la inspección de trabajo ¿sabés lo que hace la inspección de trabajo? Dinero. Lo único que hizo allí fue poner una multa por tema de ilegales que había trabajado. No se preocupó en absoluto de la prevención de riesgos laborales.”*

Además, están sometidos a presiones económicas derivadas del propio mercado laboral. La figura de los Coordinadores de Seguridad y Salud recibe una retribución económica baja que va en perjuicio de la seguridad, ya que deben tener muchas obras para poder alcanzar un buen salario. Esto repercute de forma directa en la dedicación que el Coordinador puede dar a cada obra y por ende en la seguridad de la obra en sí:

*“¿Está valorado económicamente el trabajo de coordinador? Porque si tú necesitas para poder vivir dignamente 20 obras, tampoco le podemos pedir al coordinador una dedicación... Entonces claro, están fallando muchas cosas básicas que es difícil, difícilísimo...”*

Sobre la regulación concreta del Coordinador de Seguridad y Salud en España se destacó la trasposición que se hizo de la directiva europea, que quizás, tenga una repercusión en la baja calidad de los planes. Actualmente existen dos coordinadores,

uno en fase de proyecto y otro en ejecución, sería positivo favorecer que existiera una sola persona responsable desde que nace hasta que se finaliza la ejecución del proyecto:

*“Lo que en España se inventó, cuando hicimos la transición de la normativa (directiva europea), no es tanto los documentos sino los dos coordinadores, en la fase de proyecto y de la fase de ejecución [...] Entonces lo que tiene que haber es un documento, con una persona responsable de toda la vida del proyecto. Desde que se diseña hasta que se ejecuta [...] que la misma persona que está analizando los proyectos en la fase de diseño, esté trabajando en esos procedimientos reales que se van a llevar a cabo [...] en Inglaterra no hay dos coordinadores, es el mismo coordinador es el que tiene que llevar la obra.”*

Esto favorecería que el Plan de Seguridad y Salud se adaptara mejor a la realidad, ya que es frecuente que durante la fase de proyecto no se piense en la seguridad, lo cual no debería ser así.

*“Tú has proyectado algo, tendrás que saber cómo tienes que protegerlo [...] integrar un proyecto que sea realizable, pero realizable en materiales, en ejecución y en Seguridad y Salud, y después eso tendrá una redacción”*

Si durante la fase de proyecto hay un responsable que será también el responsable durante la ejecución es muy probable que existiera coherencia y adecuación entre lo proyectado y lo planificado. Además, esa persona favorecería que la seguridad y salud tomara un papel más relevante en la fase de proyecto.

En el debate entre los expertos uno de ellos abordó otra la figura en la obra, la del recurso preventivo. Puso de manifiesto que se tiende a culpar en muchas ocasiones a esta figura cuando se producen incidentes o accidentes. Esto debe evitarse, ya que el recurso preventivo no tiene ni la capacitación ni los medios para evitar todas las desviaciones que pueden surgir en la ejecución de los trabajos.

*“[...] se está echando mucha culpa al recurso preventivo. Para todo echamos mano del recurso preventivo y el recurso preventivo es un señor que no tiene cualificación ninguna, y tiene que llevar todo para adelante. Tendría que haber un coordinador, que hubiera un señor en la empresa responsable.”*

Por otro lado, los expertos destacaron como otro problema importante la integración de la seguridad y salud, ya que está no se está realizando adecuadamente.

*“En cada una de las decisiones que se tome [...] tiene que haber integración.”*

Dentro de las limitaciones o barreras para llevar a cabo el cambio de *Safety-I* a *Safety-II* destacaron:

*“La barrera legal es uno de los grandes problemas en esto”*

La legislación dificulta la adaptación real a cada caso porque existe un cierto temor a hacer algo diferente hasta lo que ahora se venía haciendo. Se tiende a realizar un documentación excesiva, rígida y poco realista para evitar posibles problemas legales y repercusiones judiciales en caso de que se llegue a juicio.

Otra de las barreras es la formación de los trabajadores en el sector de la construcción:

*“Tenemos una obra diferente a otra obra, diferente a otra obra, con lo cual necesitan más formación y es al contrario. Tienes en las fábricas a gente mucho más formada cuando es sistemático y tienes a gente menos formada cuando es más variable.”*

*“No hay capacidad, no hay aprendizaje real, y yo creo que ese es uno de los aspectos que hay que mejorar y uno de los indicadores que hay que integrar para realmente medir ese grado de aprendizaje y entrenamiento.”*

*“Para que sepan reaccionar necesitan una formación que en construcción es, ya no formación en seguridad, sino formación en procedimientos constructivos y formación básica de cómo actuar en situaciones normales.”*

En este sentido un experto indicó que no se interpretó correctamente la directiva europea en su transposición que ha derivado en que la formación del trabajador en España se centra más en un aspecto teórico que en el aspecto práctico y en dotar al trabajador de habilidades reales y prácticas para el desempeño de su trabajo:

*“Yo siempre he considerado que la directiva europea tuvo una transposición, sobre todo, a nivel de traducción, difícil y mal hecha [...] porque aquí se habla normalmente de la información y formación del trabajador, mientras que la directiva no hablaba de eso. Hablaba de learning and training, aprender y entrenamiento. Y eso es justamente lo que aquí nunca, desde el año 89, se ha hecho. Aprender y entrenar. Y sigue sin hacerse.”*

También se puso de manifiesto que en España falta cultura de seguridad en general en España y es importante cambiar esto para tener una base sólida sobre la que trabajar seguridad y salud en el trabajo. Primero se debe tener una cultura de seguridad en nuestra propia vida particular:

*“Yo creo que partimos de que tenemos los españoles de hoy, tendrán muy mala cultura preventiva desde que nacemos. La bicicleta. Los niños menores de 16 años con casco. ¿Cuántos niños menores de 16 años vemos con casco en la bicicleta con su padre al lado? Si no cambiamos la estructura desde ahí abajo, yo creo que el problema siempre lo vamos a seguir teniendo.”*

En cuanto al uso de indicadores *leading* en las obras de construcción un experto comentó que:

*“La autoridad legal tiene muy interesado el uso de indicadores tradicionales y no estos.”*

Por ello, las empresas en el sector de la construcción tienden a emplear únicamente indicadores *lagging* basados en ratios.

Para concluir, resulta importante destacar que los expertos consideran que ni siquiera *Safety-I* se está aplicando correctamente en el sector de la construcción y es aún un problema no resuelto. Entonces, ¿cómo se va a pasar a *Safety-II*? Parece necesario un cambio de mentalidad radical y que esta nueva orientación de la seguridad se vea reflejada en la legislación. De otro modo, los expertos ven complicado el cambio hacia este nuevo paradigma.

A modo de resumen, a continuación se presentan los principales aspectos clave que se abordaron en el debate:

- El Plan de Seguridad y Salud actualmente no es operativo ni real. Se debe evolucionar hacia un Plan de Seguridad y Salud que sea un documento vivo, que se adapte a la realidad de cada obra y que incluya la planificación a corto plazo.
- Debería existir una figura responsable de la seguridad tanto durante la fase de diseño como en la de ejecución, ya sea unificando la figura del coordinador en fase de proyecto y de ejecución o introduciendo una nueva figura.
- En cuanto a la figura del Coordinador de Seguridad y Salud, es necesario modificar su regulación legal para intentar protegerlo eliminando o minimizando su dependencia del promotor, empoderándolo y mejorando su retribución económica para que esto no sea una limitación que afecte a la seguridad.
- Hay que favorecer la integración de la Seguridad y Salud tanto en el diseño como en la actividad diaria, así como implicar de forma activa a todos los agentes que participan en la obra.
- La formación debe reorientarse y centrarse en los aspectos prácticos que doten al trabajador de capacitación real para abordar el trabajo diario.

- Para abordar el problema de la seguridad en su raíz, se debería fomentar una mejora en la cultura de seguridad en general, en la vida diaria y cotidiana.
- Entre las principales barreras para aplicar la Ingeniería de la Resiliencia y cambiar la visión de la seguridad hacia *Safety-II* en el sector de la construcción destacan el marco legal actual y la formación de los trabajadores.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## 5 CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones (en español)

En el presente trabajo de tesis se ha profundizado en la gestión de la seguridad en el sector de la construcción desde la perspectiva de la Ingeniería de la Resiliencia. Este nuevo paradigma de la seguridad se centra en fortalecer el desempeño diario. Para ello, se ha comenzado desarrollando un análisis basado en el *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM) de las actividades de construcción de la estructura de un edificio. En base a los resultados del modelo obtenido, se han identificado posibles indicadores *leading* y se ha diseñado y validado un cuestionario de evaluación de la resiliencia en la gestión de la seguridad de las actividades de construcción mediante el *Resilience Assessment Grid* (RAG). A continuación se exponen las principales conclusiones que se desprenden de esta investigación.

En relación al FRAM, el proceso de investigación desarrollado revela su potencial para proporcionar una perspectiva diferente del desempeño de las organizaciones, poniendo el foco de atención en aspectos que hasta ahora pasaban desapercibidos con las metodologías habitualmente empleadas. Esta afirmación se apoya en los resultados obtenidos a partir del modelo propuesto para las actividades de construcción de estructuras, los cuales revelan la importancia de la toma de decisiones en la organización de los trabajos vinculados a la grúa y en la determinación de la fecha de entrega del hormigón, así como conclusiones más habituales como el papel secundario al que quedan relegadas frecuentemente las protecciones colectivas debido a la presión y la carga de trabajo y el olvido en el que cae el plan de seguridad y salud que debería ser el eje de la gestión de la seguridad en la obra.

Además, en el primer paso del método, durante la realización de las entrevistas de la toma de datos se encontró que, el hecho de preguntar directamente a los trabajadores que ejecutan las tareas en la obra, les hace sentirse relevantes al darle voz a sus opiniones. Por ello, el FRAM fomenta la implicación de los trabajadores en el proceso de gestión del desempeño poniendo en valor su papel dentro de la organización. A su vez, acerca la perspectiva de aquellos situados en la parte alta de la pirámide jerárquica como son directores, responsables de gestión e incluso consultores a una visión mucho más realista de cómo se lleva a cabo el desempeño de la organización, lo cual puede emplearse como una información valiosa en la mejora de la gestión de la seguridad y en el desarrollo de procedimientos más eficaces.

Otras de las bondades atribuibles al FRAM es que su aplicación a la gestión de la seguridad en los sistemas socio-técnicos complejos va más allá del desarrollo de un modelo que permita un nuevo entendimiento de la ejecución de los trabajos, que no es poco. Tal y como se ha visto en el presente trabajo, el FRAM puede emplearse para identificar posibles indicadores *leading* que faciliten la monitorización de los trabajos, fortaleciendo el feedback de las organizaciones sobre su desempeño e incrementando las posibilidades de aprendizaje, la capacidad de respuesta ante eventos adversos y la mejora de la gestión de la seguridad en conjunto. Podría decirse que el FRAM es un método reciente nace formalmente en 2012, por lo que es de esperar que aún surjan nuevas aplicaciones del FRAM encaminadas a explotar el potencial que ofrece para su aplicación a la gestión de la seguridad.

En cuanto a los inconvenientes del FRAM en su aplicación en el modelado de sistemas socio-técnicos complejos, principalmente se destaca la dificultad en el análisis de la variabilidad, tanto externa e interna como aguas arriba y aguas abajo, especialmente cuando el propósito del análisis tiene carácter prospectivo y el número de funciones que integran el modelo del sistema es elevado, tal y como ocurre en el trabajo presentado en esta tesis. Por un lado, la salida de cada la función puede verse influenciada por diferentes fuentes de variabilidad endógena y exógena que pueden originar diversos efectos en el desempeño de la función. A ello hay que sumarle la gran cantidad de acoplamientos entre funciones que genera multitud de caminos posibles para la propagación de la variabilidad. Como resultado, se obtiene una complicada red de posibilidades en cuanto a los escenarios que podrían plantarse. Por otro lado, existe cierta subjetividad implícita en el análisis de la variabilidad que únicamente puede ser paliada mediante la experiencia en el modelado con este método y la verificación de los resultados con los propios trabajadores implicados en la ejecución diaria, que constituyen una fuente inestimable de conocimiento sobre el desempeño del sistema.

En relación al RAG, como metodología de evaluación del desempeño resiliente, constituye una herramienta esencial para introducir a las organizaciones en la Ingeniería de la Resiliencia de una forma práctica y efectiva. En general, el RAG permite conocer el estado de la organización en lo que ha resiliencia se refiere y establecer metas, objetivos y acciones de mejora concretas que refuercen las habilidades para la resiliencia. En particular, el cuestionario elaborado es un punto de partida para que la planificación y organización de una obra se establezca de forma que se favorezca el desempeño resiliente en la ejecución de las actividades a través del plan de seguridad y salud.

De la consulta a expertos realizada en la validación del cuestionario se concluye que existen barreras de entrada para la Ingeniería de la Resiliencia en el sector de la construcción principalmente motivadas por la resistencia al cambio, la concentración de organizaciones diferentes en un mismo entorno de trabajo temporal y único, la presión económica en la ejecución de los trabajos y el propio marco legal. Para saltar estas barreras se considera necesario que los responsables de la gestión en las diferentes organizaciones que intervienen en la obra tomen conciencia de las virtudes de la Ingeniería de la resiliencia y que sean ellos el motor que impulse un cambio que atraviese todos los niveles de la organización hasta llegar a los trabajadores de primera línea, acercándolos a todos una visión común en la gestión resiliente del desempeño en seguridad y salud.

Desde una perspectiva global cabe subrayar que en el transcurso de la investigación realizada en esta tesis se ha encontrado una dificultad manifiesta en el proceso de transición de la concepción de la seguridad tradicional, o *Safety-I*, hacia la nueva concepción de la seguridad propuesta por la Ingeniería de Resiliencia, o *Safety-II*, que supone una ruptura epistemológica con el paradigma imperante. Una vez entendidos y asimilados los conceptos e ideas que componen esta nueva visión, es necesario continuar cultivándolos para que arraiguen en nuestros procesos cognitivos superiores como son el pensamiento, el lenguaje y la inteligencia. Es habitual encontrarse inmerso en un análisis, en el marco de la Ingeniería de la Resiliencia, y descubrir que, en el proceso mental de percepción y asociación de ideas, involuntariamente se ha derivado en la aplicación de premisas y planteamientos tradicionales no acordes con el escenario de análisis establecido. Esto mismo ocurre con el lenguaje empleado en la expresión de los razonamientos y conclusiones alcanzados. Podría considerarse que no es un caso aislado el aquí descrito. En el desarrollo de esta investigación se ha asistido a congresos en la materia donde algunos expertos, con una amplia trayectoria consolidada en la gestión de la seguridad, han puesto de manifiesto este proceso de transformación del pensamiento al que han tenido que enfrentarse, el cual que les ha requerido tiempo y esfuerzo para poder vencer la predisposición al empleo de conceptos tradicionales enraizados históricamente al entendimiento de la seguridad. Sin embargo, una vez superado ese esfuerzo, y en base a la investigación realizada, se considera que la Ingeniería de la Resiliencia y *Safety-II* presentan un gran potencial para avanzar desde un enfoque proactivo en la gestión de la seguridad en el sector de la construcción.

## **5.2 Conclusiones (en inglés)**

This doctoral thesis has presented a deep analysis in safety management in the construction sector from a Resilience Engineering perspective. This new safety paradigm focuses on promoting daily performance. To do so, the first step has been the development of an analysis based on the *Functional Resonance Analysis Method* (FRAM) of the building activities of the structure of a building. Based on the results of the obtained model, a candidate for leading indicators have been identified and an assessment questionnaire on the management resilience of safety in building activities has been designed by means of the Resilience Assessment Grid (RAG). The main conclusions of this research are listed below.

As regards the FRAM, the implemented research process reveals its potential to provide a different perspective of the performance of corporations, focusing in aspects which were left out of the scope until now with the methodologies which were commonly being used. This statement is based on the results obtained from the proposed model for the structure construction activities, which reveal the relevance of the decision making processes in the organization of the tasks linked to the crane and to the establishment of the delivery date of the concrete, as well as more common conclusions as the secondary role usually given to collective protection due to pressure and workload and the lack of relevance of the construction phase health and safety plan, which should be the main health and safety axis onsite but with is often cast to oblivion.

Besides, in the first step of the method, during the implementation of the data collection questionnaires, we found out that the fact of directly asking the workers who carry out the tasks onsite makes them feel relevant, as their opinions are given a voice. Due to this, the FRAM promotes the involvement of the workers in the performance management process, valuing their role in the organization. At the same time, it brings closer the perspective of those on the top of the hierarchy as managers or consultants to a more realistic view of how the actual performance of the organization takes place. This can turn into very valuable information for the improvement of safety management and for the development of more efficient procedures.

Another benefit attributable to FRAM is that its application to the safety management in complex socio-technical systems goes beyond the development of a model that allows a new understanding of the daily performance, which is not negligible. As seen in this study, FRAM can be used to identify candidate leading indicator that facilitate the monitoring of work performance, strengthening the performance feedback at the organization and increasing the chances of learning, the capacity to respond to adverse

events and the improvement of safety management as a whole. It could be stated that FRAM is a recent method that was formally proposed in 2012, so it is to be expected that new FRAM applications will emerge to exploit the potential it offers for its application to safety management.

In relation to the disadvantages of the FRAM when applied for modelling complex social and technical systems, the difficulty to analyse the variability, both internal and external, and upstream and downstream are worth being mentioned. This happens particularly when the purpose of the analysis has a prospective nature and if there is a high number of functions in the system, as in the case of the work presented in this doctoral thesis. On the one hand, the output of each function can be affected by several endogenous and exogenous variability sources which can trigger several effects in the performance of the function. We also have to add to this the large number of couplings among functions generating several possible ways for spreading variability. As a result, a complex network of possibilities as regards possible scenarios is obtained. On the other hand, there is some implicit subjectivity in the analysis of the variability which can just be solved by using our experience in modelling with this method and through the verification of the results with the workers involved in their daily execution, which constitute a valuable source of knowledge on the performance of the system.

As regards RAG, as the assessment methodology for the resilience performance, it is an essential tool to introduce companies into Resilience Engineering in a practical and efficient way. In general, the RAG allows us to find out the status of the organization as regards resilience and to establish specific goals, objectives, and improvement actions to reinforce resilience abilities. In particular, the prepared questionnaire is a starting point to establish the planning and organization of any work in such a way that it favours a resilient performance regarding the execution of the activities through the construction phase health and safety plan.

After consulting it with experts based on the validation of the questionnaire, we can conclude that there are input barriers for Resilience Engineering in the construction sector which are mainly based on the resistance to change, on the concentration of different organization in a sole and temporal worksite, on the economic pressure for the execution of the works, and on the legal framework. To overcome these barriers, we consider necessary to raise awareness among the individuals responsible for the management in the different organizations which take part in the work regarding the virtues of Resilience Engineering. They need to be the main driver of a change which

needs to cover all levels of the organization up to the first line workers, bringing all of them together around a common view on resilient management of safety performance.

From a global perspective, we can highlight the fact that during the research for this doctoral thesis, we found a significant difficulty when moving from the idea of traditional safety or Safety-I towards the new idea of safety proposed by Resilience Engineering or Safety-II, which entails an epistemologic rupture with the governing paradigm. Once the concepts and ideas of this new vision have been understood and digested, we need to go on cultivating them to make them grow in our upper cognitive processes, as thoughts, language, and intelligence. Something very usual when implementing an analysis in the Resilience Engineering framework is to discover that, during the mental process of idea perception and association, we have involuntarily derived into the application of traditional procedures and ideas which do not match the established analysis scenario. This also occurs with the language used for expressing the obtained reasoning and conclusions. We could consider that the case described here is not an isolated case. During the implementation of this research, we have attended some conferences on the topic where some experts with an established career in safety management, have mentioned this thought transformation process which they had to face and which required time and effort to fight the natural disposition to use historically deep rooted traditional concepts regarding safety. However, once this effort has been overcome, and based on the implemented research, we consider Resilience Engineering and Safety-II to present a large potential to make progress from a proactive approach to the management of safety in the construction sector.

## 6 APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN, LIMITACIONES, FUTURAS LÍNEAS Y APORTACIONES

### 6.1 Aplicación de la investigación

La investigación desarrollada en el presente trabajo de tesis presenta un alto potencial en lo que a su aplicabilidad en las empresas de construcción se refiere. Así mismo, se considera que podría contribuir de manera significativa a la mejora de la gestión de la seguridad en las obras de construcción. No obstante, para ello se requiere un esfuerzo notable del conjunto de empresas que intervienen en las obras de construcción para enfrentarse al reto transformar su visión de la seguridad evolucionando desde el enfoque basado en *Safety-I* hacia el de *Safety-II*. Para las empresas que se decanten por implantar esta visión proactiva de la seguridad, la investigación aquí presentada puede suponer un importante punto de apoyo para iniciar la transición hacia *Safety-II*. De forma específica, los resultados de este trabajo de tesis pueden ser aplicados por las empresas implicadas en las obras de construcción para:

- Mejorar la comprensión de la ejecución real de los trabajos de construcción de estructuras en edificación.
- Definir objetivos y medidas que favorezcan la gestión resiliente de la seguridad en la obra.
- Monitorizar de forma proactiva la ejecución de las actividades de construcción de estructuras en la obra.
- Rediseñar y mejorar el contenido de los planes de seguridad y salud empleando como directrices las cuestiones planteadas en el cuestionario basado en el RAG.
- Fomentar y potenciar la utilización real y efectiva de los planes de seguridad y salud en las obras de construcción.
- Evaluar la evolución en el tiempo de la resiliencia en la gestión de la seguridad, así como la efectividad de las medias implantadas.

### 6.2 Limitaciones de la investigación

Las principales limitaciones de la presente investigación quedan resumidas en este apartado. En cuanto al análisis FRAM de los trabajos de la fase de estructura podrían señalarse varias limitaciones. En relación al modelo presentado, éste se centra en la construcción de estructuras mediante forjado de losa maciza. Por lo tanto, para otro tipo de forjados como por ejemplo el forjado reticular aligerado sería necesario modificar el

modelo. Las principales diferencias estarían relacionadas con la puesta en obra de los casetones y la ferralla. Así, las operaciones relacionadas con el hormigón, el encofrado, la grúa o el montaje de las protecciones colectivas serían prácticamente las mismas.

Por otro lado, en la ejecución de los trabajos de campo han existido limitaciones en cuanto al tiempo y la disponibilidad de las obras en fase de estructura. Si bien es cierto que hay que destacar la predisposición para colaborar de las empresas que han participado en el estudio, se encontraron problemas para visitar las obras de acuerdo a la planificación inicial de la investigación. Por ello, fue necesario retrasar las visitas hasta que existieran obras que estuvieran en fase de estructura. Además, el tiempo disponible para entrevistar a los trabajadores fue limitado. Las entrevistas se realizaron en las obras y durante la jornada laboral, por lo que los trabajadores no podían ausentarse demasiado tiempo de su puesto de trabajo. Sin embargo, esta limitación intentó paliarse incrementando el número de entrevistas realizadas para garantizar que toda la información necesaria era recopilada.

Además, las obras estudiadas estaban todas ubicadas en la provincia de Málaga, por lo que pueden existir diferencias con respecto a otras zonas del territorio español, y por supuesto a nivel internacional. Esto afectaría a diferentes aspectos del análisis como la identificación de la variabilidad y su propagación. Por ejemplo, en otras zonas las condiciones ambientales pueden variar afectando de forma diferente a la ejecución de las funciones. Así mismo, los problemas derivados del suministro de hormigón, ya sea por la planta o por el tráfico, pueden diferir de los planteados en este estudio. También hay que considerar que el FRAM pretende reflejar la ejecución real de los trabajos así que probablemente existirán diferencias con otras empresas que organicen sus trabajos de forma diferente. Aunque estas limitaciones son inherentes al propio modelo FRAM.

En cuanto al cuestionario diseñado conforme al RAG para la evaluar la resiliencia en la gestión de la seguridad de las actividades de construcción mediante los planes de seguridad y salud, se deben destacar las dificultades encontradas durante el desarrollo del cuestionario debido a la falta de estudios previos centrados en el sector de la construcción y el RAG. De este modo, para el desarrollo de preguntas no se encontraron referencias publicadas que se relacionaran directamente con el sector de la construcción o los planes de seguridad y salud. Tan solo una publicación en congreso fue hallada en este sentido e incluía únicamente algunas cuestiones sobre la habilidad de responder (Peñaloza et al., 2018). Además, durante el desarrollo de la investigación se puso de manifiesto la dificultad de implantar la herramienta diseñada en las empresas de construcción en general. De acuerdo con la impresión transmitida por los expertos, podría

decirse que las empresas del sector tienden a ver la seguridad desde el punto de vista de *Safety-I* apoyadas en el marco legal existente. También hay que considerar que en la actualidad, los planes de seguridad y salud que se elaboran no suelen caracterizarse por su facilidad de implantación y su carácter proactivo. Así, las cuestiones propuestas para evaluar el contenido de los planes de seguridad y salud y su contribución a la gestión resiliente de la seguridad se alejan notablemente de la realidad actual. Por todo ello, es necesario un esfuerzo de las empresas para comenzar a trabajar en este sentido. Para ello, pueden apoyarse en herramientas como la desarrollada en esta tesis para mejorar la gestión de la seguridad en la obra. De este modo, las cuestiones que se incluyen en el cuestionario pueden ser empleadas como directrices para dotar a los planes de seguridad y salud de un carácter eminentemente práctico y proactivo.

### 6.3 Futuras líneas de investigación

A continuación se presentan algunas de las futuras líneas de investigación relacionadas con el trabajo desarrollado en esta tesis y que son propuestas para seguir avanzado en la investigación centrada gestión de la seguridad en el sector de la construcción desde el prisma de la Ingeniería de la Resiliencia:

- Analizar la relevancia de los indicadores *leading* identificados mediante consultas a expertos, trabajos de campo y el análisis de eventos pasados, determinando su correlación con la aparición de resultados no deseados, su impacto en la gestión de la seguridad y su contribución al desempeño resiliente.
- Aplicar de manera continuada en el tiempo el instrumento de evaluación de la resiliencia diseñado y evaluar el impacto en la gestión resiliente de la seguridad en las obras de construcción. Para ello, puede realizarse un estudio de casos.
- Estudiar la toma de decisiones resilientes de los trabajadores de la construcción al hacer frente a la variabilidad con el fin de comprender las diferentes estrategias empleadas para evitar resultados no deseados. Para alcanzar este objetivo pueden aplicarse metodologías centradas en el análisis de incidentes pasados, como el Método de Decisión Crítica, que permitan identificar eventos, tanto previsibles como imprevisibles.
- Analizar en profundidad el desempeño diario de los operadores de grúa mediante un análisis FRAM y proponer medidas orientadas a la mejora de la planificación y organización de las operaciones con la grúa en las actividades de construcción.

## 6.4 Aportaciones

Algunos de los resultados de esta tesis doctoral se han sido incluidos en las siguientes publicaciones:

- Rubio-Romero, J. C., Pardo-Ferreira, M.C., De la Varga-Salto, J., & Galindo-Reyes, F. (2018). Composite leading indicator to assess the resilience engineering in occupational health & safety in municipal solid waste management companies. *Safety science*, 108, 161-172. Factor de impacto 2017: 2.835 Q1 en el área de Operation Research & Management Science 16/83; Q2 en el área Engineering, Industrial 12/47.
- Rubio-Romero, J.C., Pardo-Ferreira, M.C., Martínez-Rojas, M., López-Arquillos, A., Suarez-Cebador, M. (2019) Resilience Engineering: Concepts of the New Paradigm. In: Ortiz Á., Andrés Romano C., Poler R., García-Sabater J.P. (eds) *Engineering Digital Transformation. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*, 133-140. Springer, Cham.
- Pardo-Ferreira, M. C., Rubio-Romero, J. C., & Martínez-Rojas, M. (2018). Applying Resilience Engineering to improve Safety Management in a Construction Site: Design and Validation of a Questionnaire. *World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 12(10), 1. Indexada en International Science Index (ISI).
- Pardo-Ferreira M.C., Martínez-Rojas M., Salguero-Caparros F., Rubio-Romero J.C. (2018). Evolution of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) through the combination with other methods. *Proceeding 12th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XXII Congreso de Ingeniería de Organización*.
- Pardo-Ferreira, M.C., Rubio-Romero, J.C. (2018). Applying FRAM to the construction of concrete structures. *12th International Workshop on the Functional Resonance Analysis Method (FRAM)*.
- Rubio-Romero, J.C., Pardo-Ferreira, M.C., Martínez-Rojas, M., López-Arquillos, A. (2017). New approach to safety management in the construction sector. *ORP*

Journal. 2017. Monográfico abstracts ORP 2017. ISSN 2385-3832 / 84-86546-08-7. Indexada en Latindex y Dialnet.

- Pardo-Ferreira, M.C., López-Arquillos, Martínez-Rojas, M., Rubio-Romero, J.C. (2017). Resilience Engineering y su aplicación al sector de la construcción: un nuevo reto de investigación. Actas de la X Jornada Anual de Prevención y Responsabilidad Social Corporativa.
- Pardo-Ferreira, M.C., Martínez-Rojas, M., Salguero-Caparrós, F., Rubio-Romero, J.C. (2018). Resilience Analysis Grid (RAG) una nueva herramienta para la mejora de la seguridad en las organizaciones del siglo XXI. Actas de la IX Jornada Anual de Prevención y Responsabilidad Social Corporativa.
- Carrillo-Castrillo, J. A., Rubio-Romero, J. C., & Pardo-Ferreira, M. C. (2018, March). Tower crane safety: Organizational preventive measures vs. technical conditions. In Occupational Safety and Hygiene VI: Proceedings of the 6th International Symposium on Occupation Safety and Hygiene (SHO 2018), March 26-27, 2018, Guimarães, Portugal. CRC Press. Taylor and Francis Group. ISBN 9781351008877.
- Pardo-Ferreira, M.C., Martínez-Rojas, M., López-Arquillos, Salguero-Caparrós, F., Rubio-Romero, J.C. (2018) Qualitative analysis of reports on occupational accidents related to the construction of concrete structures. Proceedings book. International Symposium on Occupational Safety and Hygiene. SHO 2018. ISBN 978-989-98203-8-8.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## REFERENCIAS

- Albery, S., Borys, D. & Tepe, S., 2016. Advantages for risk assessment: Evaluating learnings from question sets inspired by the FRAM and the risk matrix in a manufacturing environment. *Safety Science* 89, 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.06.005>
- Alsina, n.d. Alsina Encofrados [WWW Document]. Alsina soluciones en encofrados. URL <https://www.alsina.com/> (accessed 10.16.17).
- Amorim, A.G. & Pereira, C.M.N.A., 2015. Improvisation at workplace and accident causation - an exploratory study, in: Ahram, T and Karwowski, W and Schmorow, D. (Ed.), 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics and the Affiliated Conferences, AHFE 2015, *Procedia Manufacturing*. pp. 1804–1811. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.219>
- Anvarifar, F., Voorendt, M.Z., Zevenbergen, C. & Thissen, W., 2017. An application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to risk analysis of multifunctional flood defences in the Netherlands. *Reliability Engineering & System Safety* 158, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.004>
- Apneseth, K., Wahl, A. & Hollnagel, E., 2013. Measuring resilience in integrated planning, in: *Oil and Gas, Technology and Humans: Assessing the Human Factors of Technological Change*. Ashgate Publishing Ltd, pp. 129–145.
- Arévalo Sarrate, C., 2016. Metodología y técnicas analíticas para la investigación de accidentes de trabajo. Instituto Regional de Seguridad y Salud en el Trabajo, Madrid.
- Arezes, P.M. & Sérgio Miguel, A., 2003. The role of safety culture in safety performance measurement. *Measuring Business Excellence* 7, 20–28. <https://doi.org/10.1108/13683040310509287>
- ARPANSA, 2017. Regulatory Guide Holistic Safety - Sample Questions (No. REG-COM-SUP-240V v1.1). Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA).
- Arriagada, R. & Alarcón, L., 2011. La organización en sitio y las oportunidades de gestionar conocimiento en las empresas de construcción. *Revista de la construcción* 10, 86–98. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2011000300009>
- Badham, R. & Clegg, C., 2000. Sociotechnical Theory. *Handbook of Ergonomics*. W. Karwowski. New York, John Wiley.

- Baxter, G. & Sommerville, I., 2011. Socio-technical systems: From design methods to systems engineering. *Interacting with Computers* 23, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.07.003>
- Bellini, E., Ceravolo, P. & Nesi, P., 2017. Quantify resilience enhancement of UTS through exploiting Connected Community and Internet of Everything emerging technologies. *ACM Transactions on Internet Technology* 9. <https://doi.org/10.1145/3137572>
- Bellini, E., Nesi, P., Pantaleo, G. & Venturi, A., 2016. Functional resonance analysis method based-decision support tool for urban transport system resilience management, in: *Smart Cities Conference (ISC2), 2016 IEEE International*. pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ISC2.2016.7580833>
- Belmonte, F., Schoen, W., Heurley, L. & Capel, R., 2011. Interdisciplinary safety analysis of complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: An application to railway traffic supervision. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 237–249. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.09.006>
- Bertalanffy, L.V., 1976. *Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. Fondo de Cultura Económica.
- Bird, F.E. & Germain, G.L., 1986. *Practical loss control leadership*. International Loss Control Institute, Loganville, Georgia.
- Bjerga, T.T., Aven, T. & Zio, E., 2016. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering & System Safety* 156, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.08.004>
- Borys, D., Else, D. & Leggett, S., 2009. The fifth age of safety: The adaptive age. *Journal of Health Services Research and Policy* 1, 19–27.
- Bridges, K.E., Corballis, P.M. & Hollnagel, E., 2018. “Failure-to-Identify” Hunting Incidents: A Resilience Engineering Approach. *Human Factors* 60, 141–159. <https://doi.org/10.1177/0018720817743851>
- Cabrera Aguilera, M.V., Bastos da Fonseca, B., Ferris, T.K., Vidal, M.C.R. & Carvalho, P.V.R. de, 2016. Modelling performance variabilities in oil spill response to improve system resilience. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 41, 18–30. <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2016.02.018>
- Cabrera, M.V., Vidal, M.C.R., Ferris, T.K. & De Carvalho, P.V.R., 2014. Modeling oil spill defense system using Functional Resonance Analysis method. Presented at the *Process Safety Spotlights 2014 - Topical Conference at the 2014 AIChE Spring Meeting and 10th Global Congress on Process Safety*, pp. 602–609.

- Cadieux, J., Roy, M. & Desmarais, L., 2006. A preliminary validation of a new measure of occupational health and safety. *Journal of Safety Research* 37, 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2006.04.008>
- Carvalho, P.V.R., 2011. The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 1482–1498. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.05.009>
- Clarke, L.J., Macfarlane, G.J., Penesis, I., Duffy, J.T., Matsubara, S. & Ballantyne, R.J., 2017. A risk assessment of a novel bulk cargo ship-to-ship transfer operation using the functional resonance analysis method, in: *Proceedings of the ASME 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2017, VOL 3B*.
- Clay-Williams, R., Hounsgaard, J. & Hollnagel, E., 2015. Where the rubber meets the road: using FRAM to align work-as-imagined with work-as-done when implementing clinical guidelines. *Implementation Science* 10, 125. <https://doi.org/10.1186/s13012-015-0317-y>
- Consejo Económico y Social de España, 2016. El papel del sector de la construcción en el crecimiento económico: competitividad, cohesión y calidad de vida, 1ª. ed, Colección Informes. Consejo Económico y Social, Madrid.
- Construmática, n.d. Estructuras | Construpedia, enciclopedia construcción [WWW Document]. Construmática. Metaportal de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. URL <https://www.construmatica.com/construpedia/Estructuras> (accessed 10.16.17).
- Corral, Y.J., 2009. Validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación para la recolección de datos 19, 228–247.
- Costantino, F., Gravio, G.D. & Tronci, M., 2018. Environmental audit improvements in industrial systems through FRAM. *IFAC-PapersOnLine* 51, 1155–1161. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.434>
- Dalkey, N.C., 1969. The Delphi method: An experimental study of group opinion (No. RM-5888-PR). RAND CORP SANTA MONICA CALIF.
- Danczyk, J., Wollocko, A., Farry, M. & Voshell, M., 2016. Investigating performance variability of processing, exploitation, and dissemination using a socio-technical systems analysis approach, in: *Proceedings Volume 9831, Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR VII*. <https://doi.org/10.1117/12.2223804>

- Darrow, L. & Eseonu, C.I., 2017. Development of a resilience analysis grid survey tool for healthcare. Presented at the 67th Annual Conference and Expo of the Institute of Industrial Engineers 2017, pp. 1163–1168.
- Davies, J., Finlay, M., McLenaghan, T. & Wilson, D., 2006. Key risk indicators—their role in operational risk management and measurement. ARM and RiskBusiness International, Prague 1–32.
- De Felice, F., Zomparelli, F. & Petrillo, A., 2017. Functional human reliability analysis: A systems engineering perspective, in: CEUR Workshop Proceedings. Presented at the 3rd INCOSE Italia Conference on Systems Engineering, CIISE 2017, pp. 23–29.
- de Vries, L., 2017. Work as Done? Understanding the Practice of Sociotechnical Work in the Maritime Domain. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 11, 270–295. <https://doi.org/10.1177/1555343417707664>
- Dekker, S., 2017. *The Field Guide to Understanding “Human Error.”* CRC Press, London.
- Duan, G., Tian, J. & Wu, J., 2015. Extended FRAM by Integrating with Model Checking to Effectively Explore Hazard Evolution. *Mathematical Problems in Engineering* 2015, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/196107>
- Emery, F.E. & Trist, E.L., 1960. Socio-technical systems, in: *Management Science Models and Techniques*. Pergamon, Oxford, UK, pp. 83–97.
- EPRI, 2000. *Guidelines for Trial Use of Leading Indicators of Human Performance: The Human Performance Assistance Package*. Electric Power Research Institute.
- Escobar-Pérez, J. & Cuervo-Martínez, A., 2008. Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. *Avances en medición* 6, 27–36.
- European Commission, n.d. Indicators - Public Health - European Commission [WWW Document]. Public Health. URL [/health/tobacco/indicators\\_en](http://health/tobacco/indicators_en) (accessed 4.28.18).
- Eurostat, 2018. Accidents at work statistics [WWW Document]. URL [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Accidents\\_at\\_work\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Accidents_at_work_statistics) (accessed 8.23.18).
- Falegnami, A., Bilotta, F., Pugliese, F., Costantino, F., Gravio, G.D., Tronci, M. & Patriarca, R., 2018. A multicountry comparative survey about organizational resilience in anaesthesia. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*. <https://doi.org/10.1111/jep.13054>
- Fukuda, K., Sawaragi, T., Horiguchi, Y. & Nakanishi, H., 2016. Applying Systemic Accident Model to Learn from Near-Miss Incidents of Train Maneuvering and Operation. *IFAC-PapersOnLine* 49, 543–548. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.619>

- Fundación Laboral de la Construcción, n.d. Diccionario de la Construcción [WWW Document]. Diccionario de la Construcción. URL <http://www.diccionariodelaconstruccion.com> (accessed 2.15.18).
- Furniss, D., Curzon, P. & Blandford, A., 2016. Using FRAM beyond safety: a case study to explore how sociotechnical systems can flourish or stall. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 17, 507–532. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2016.1155238>
- Garrido Rodríguez, M., Bartolomé Alonso, M., Arévalo Sarrate, C., Charro Blanco, L. & Pascual del Valle, J.P., 2011. Sistemas de encofrado: análisis de soluciones técnicas y recomendaciones de buenas prácticas preventivas. Fundación Agustín de Betancourt de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Gattola, V., Patriarca, R., Tomasi, G. & Tronci, M., 2018. Functional resonance in industrial operations: A case study in a manufacturing plant, in: 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018. pp. 927–932. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.489>
- Gordon, T.J., 2014. The Delphi method AC/UNU Millennium Project, Futures research methodology.
- Grabowski, M., Ayyalasomayajula, P., Merrick, J. & Mccafferty, D., 2007. Accident precursors and safety nets: leading indicators of tanker operations safety. *Maritime Policy & Management* 34, 405–425. <https://doi.org/10.1080/03088830701585084>
- Guo, B.H.W. & Yiu, T.W., 2016. Developing Leading Indicators to Monitor the Safety Conditions of Construction Projects. *Journal of Management in Engineering* 32, 04015016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000376](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000376)
- Haas, E.J. & Yorio, P., 2016. Exploring the state of health and safety management system performance measurement in mining organizations. *Safety Science* 83, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.009>
- Haddad, A.N. & Rosa, L.V., 2015. Construction sustainability evaluation using AHP and FRAM methods, in: IIE Annual Conference. Proceedings. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), p. 556.
- Haddon, W., 1973. Energy damage and the ten countermeasure strategies. *Human Factors* 15, 355–366. <https://doi.org/10.1177/001872087301500407>
- Hale, A., 2009a. Special Issue on Process Safety Indicators. *Safety Science* 47, 459. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.07.016>
- Hale, A., 2009b. Why safety performance indicators? *Safety Science, Process Safety Indicators / SRAE 2006* 47, 479–480. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.07.018>

- Hale, A.R. & Hovden, J., 1998. Management and culture: the third age of safety. A review of approaches to organizational aspects of safety, health and environment, in: Occupational Injury: Risk, Prevention and Intervention. London, pp. 129–165.
- Hallowell, M.R., 2008. A formal model of construction safety and health risk management (Doctoral Thesis). Oregon State University.
- Hallowell, M.R. & Gambatese, J.A., 2010. Qualitative Research: Application of the Delphi Method to CEM Research. *Journal of Construction Engineering and Management* 136, 99–107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000137)
- Hallowell, M.R., Hinze, J.W., Baud, K.C. & Wehle, A., 2013. Proactive Construction Safety Control: Measuring, Monitoring, and Responding to Safety Leading Indicators. *Journal of Construction Engineering and Management* 139, 04013010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000730](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000730)
- Harms-Ringdahl, L., 2009. Dimensions in safety indicators. *Safety Science, Process Safety Indicators / SRAE* 2006 47, 481–482. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.07.019>
- Harvey, E.J., Waterson, P. & Dainty, A.R.J., 2016. Applying HRO and resilience engineering to construction: Barriers and opportunities. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.08.019>
- Hasson, F., 2000. Research guidelines for the Delphi survey technique. *Journal of Advanced Nursing* 8. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.2000.01567.x>
- Hasson, F., Keeney, S. & McKenna, H., 2000. Research guidelines for the Delphi survey technique. *Journal of Advanced Nursing* 32, 1008–1015. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.2000.t01-1-01567.x>
- Health and Safety Executive, n.d. Accident Aetiology [WWW Document]. Health & safety management lecturing resource for quarrying related degree courses. URL <http://www.hse.gov.uk/quarries/education/index.htm> (accessed 10.7.18).
- Hegde, S., Hettinger, A.Z., Fairbanks, R.J., Wreathall, J., Wears, R.L. & Bisantz, A.M., 2015. Knowledge elicitation for resilience engineering in health care. Presented at the Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, pp. 175–179. <https://doi.org/10.1177/1541931215591036>
- Heinrich, H.W., 1931. *Industrial accident prevention: a scientific approach*. McGraw-Hill, New York.
- Herrera, I.A., 2012. Proactive safety performance indicators (Thesis Doctoral). Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk.

- Herrera, I.A., Hollnagel, E. & Håbrekke, S., 2010. Proposing safety performance indicators for helicopter offshore on the Norwegian Continental Shelf. Presented at the 10th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management 2010, PSAM 2010, pp. 2389–2398.
- Herrera, I.A. & Hovden, J., 2008. Leading indicators applied to maintenance in the framework of resilience engineering: A conceptual approach, in: The 3rd Resilience Engineering Symposium. Antibes Juan Les Pins, France, p. 30.
- Herrera, I.A. & Woltjer, R., 2010. Comparing a multi-linear (STEP) and systemic (FRAM) method for accident analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 95, 1269–1275. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.06.003>
- Hinze, J., Thurman, S. & Wehle, A., 2013. Leading indicators of construction safety performance. *Safety Science* 51, 23–28. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2012.05.016>
- Hirose, T., Sawaragi, T. & Horiguchi, Y., 2016. Safety Analysis of Aviation Flight-Deck Procedures Using Systemic Accident Model, in: IFAC-PapersOnLine. Elsevier, pp. 19–24. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2016.10.455>
- Hollnagel, E., 2017. *Safety-II in Practice: Developing the Resilience Potentials*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315201023>
- Hollnagel, E., 2014. *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Hollnagel, E., 2013. Prologue: the scope of resilience engineering, in: *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Hollnagel, E., 2012a. *FRAM: The Functional Resonance Analysis Method: Modelling Complex Socio-technical Systems*. CRC Press.
- Hollnagel, E., 2012b. A tale of two safeties. *Nuclear Safety and Simulation* 4, 1–9.
- Hollnagel, E., 2011a. Understanding Accidents, or How (Not) to Learn from the Past.
- Hollnagel, E., 2011b. Epilogue: RAG-The Resilience Analysis Grid, in: *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*. Ashgate Publishing, Ltd., pp. 275–296.
- Hollnagel, E., 2010a. On How (Not) To Learn from Accidents.
- Hollnagel, E., 2010b. How resilient is your organisation? An introduction to the resilience analysis grid (RAG), in: *Sustainable Transformation: Building a Resilient Organization*. Toronto, Canada.
- Hollnagel, E., 2009a. Barreras y prevención de accidentes. Editorial Modus Laborandi.
- Hollnagel, E., 2009b. The ETTO principle: efficiency-thoroughness trade-off: why things that go right sometimes go wrong. Ashgate.
- Hollnagel, E., 2004. *Barriers and accident prevention*. Ashgate.
- Hollnagel, E., 1998. *Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)*. Elsevier.

- Hollnagel, E. & Fujita, Y., 2013. The Fukushima disaster-systemic failures as the lack of resilience. *Nuclear Engineering and Technology* 45, 13–20.  
<https://doi.org/10.5516/NET.03.2011.078>
- Hollnagel, E., Hounsgaard, J. & Colligan, L., 2014. *FRAM - the Functional Resonance Analysis Method: a handbook for the practical use of the method*. Centre for Quality, Region of Southern Denmark, Middelfart.
- Hollnagel, E. & Woods, D.D., 2006. *Joint cognitive systems: Foundations of cognitive systems engineering*. CRC Press.
- Hollnagel, E., Woods, D.D. & Leveson, N., 2006. *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Hopkins, A., 2009. Thinking about process safety indicators. *Safety science, Process Safety Indicators / SRAE 2006* 47, 460–465.  
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.12.006>
- Hovden, J., Albrechtsen, E. & Herrera, I.A., 2010. Is there a need for new theories, models and approaches to occupational accident prevention? *Safety Science, Papers selected from the fourth international conference Working on Safety (WOS2008) 'Prevention of Occupational Accidents in a Changing Work Environment'*, September 30th – October 3rd, 2008, Crete, Greece 48, 950–956.  
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.06.002>
- Hunte, G. & Marsden, J., 2016. *Engineering resilience in an urban emergency department, Part 2*.
- ICAO, 2013. *Safety management manual (SMM), Third Edition*. ed. International Civil Aviation Organization, Montreal.
- INSHT, 2015. *Estrategia Española de Seguridad y Salud en el Trabajo 2015-2020*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- INSHT, 2012. *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a las obras de construcción*.
- INSHT, 2009a. *Nota Técnica de Prevención 835. Encofrado vertical. Muros a dos caras, pilares, muros a una cara (II)*.
- INSHT, 2009b. *Nota Técnica de Prevención 834. Encofrado vertical. Muros a dos caras, pilares, muros a una cara (I)*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- INSHT, 2008a. *Análisis cualitativo de la mortalidad por Accidente de trabajo en España: 2005-2007*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Madrid.
- INSHT, 2008b. *Nota Técnica de Prevención 816. Encofrado horizontal: protecciones individuales contra caídas de altura*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

- INSHT, 2008c. Nota Técnica de Prevención 804. Encofrado horizontal: protecciones colectivas (II). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- INSHT, 2008d. Nota Técnica de Prevención 803. Encofrado horizontal: protecciones colectivas (I). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- INSHT, 1996. NTP 401: Fiabilidad humana: métodos de cuantificación, juicio de expertos. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- INSHT, 198X. Nota Técnica de Prevención 123. Barandillas.
- INSSBT, 2017. Informe anual de accidentes de trabajo en España 2016. Instituto Nacional de Seguridad, Salud y Bienestar en el Trabajo, Madrid.
- Jazayeri, E. & Dadi, G.B., 2017. Construction Safety Management Systems and Methods of Safety Performance Measurement: A Review. *Journal of Safety Engineering* 6, 15–28. <https://doi.org/10.5923/j.safety.20170602.01>
- Jensen, A. & Aven, T., 2017. Hazard/threat identification: Using functional resonance analysis method in conjunction with the Anticipatory Failure Determination method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O-Journal of Risk and Reliability* 231, 383–389. <https://doi.org/10.1177/1748006X17698067>
- Kjellen, U. & Larsson, T.J., 1981. Investigating accidents and reducing risks—A dynamic approach. *Journal of occupational accidents* 3, 129–140.
- Kuitert, L., Volker, L. & Hermans, M., 2016. Safeguarding public values by project-based construction clients: Leads for future research, in: *Proceedings of the 32nd Annual ARCOM Conference: ARCOM 2016. Association of Researchers in Construction Management (ARCOM)*, pp. 145–154.
- Laugaland, K., Aase, K. & Waring, J., 2014. Hospital discharge of the elderly—an observational case study of functions, variability and performance-shaping factors. *BMC Health Services Research* 14, 365. <https://doi.org/10.1186/1472-6963-14-365>
- Le Coze, J.C., 2013. New models for new times. An anti-dualist move. *Safety Science* 59, 200–218. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.05.010>
- Lebeau, M., Duguay, P. & Boucher, A., 2014. Costs of occupational injuries and diseases in Québec. *Journal of safety research* 50, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2014.04.002>
- Lee, J. & Chung, H., 2018. A new methodology for accident analysis with human and system interaction based on FRAM: Case studies in maritime domain. *Safety Science* 109, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.011>
- León, O.G. & Montero, I., 2003. *Métodos de investigación en psicología y educación*. McGraw-Hill Interamericana.

- Leveson, N., 2004. A new accident model for engineering safer systems. *Safety Science* 42, 237–270. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X)
- Lingard, H., Hallowell, M., Salas, R. & Pirzadeh, P., 2017. Leading or lagging? Temporal analysis of safety indicators on a large infrastructure construction project. *Safety science* 91, 206–220. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.08.020>
- Lingard, H., Wakefield, R. & Blismas, N., 2013. If you cannot measure it, you cannot improve it: Measuring health and safety performance in the construction industry, in: *The 19th Triennial CIB World Building Congress*. Queensland University of Technology, Brisbane, Queensland, Australia.
- Linstone, H.A. & Turoff, M., 1975. *Delphi method: techniques and applications*. Addison-Wesley.
- Liu, F. & Tian, J., 2017. Dynamic analysis of FRAM: A case study of accident investigation, in: *2017 Second International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE)*. Presented at the 2017 2nd International Conference on Reliability Systems Engineering, ICRSE 2017, IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICRSE.2017.8030763>
- Ljungberg, D. & Lundh, V., 2013. Resilience Engineering within ATM - Development, adaption, and application of the Resilience Analysis Grid (RAG) (No. LiU-ITN-TEK-G--013/080--SE). Department of Science and Technology Linköping University.
- Lofquist, E.A., 2010. The art of measuring nothing: The paradox of measuring safety in a changing civil aviation industry using traditional safety metrics. *Safety Science* 48, 1520–1529. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.05.006>
- Loosemore, M. & Andonakis, N., 2007. Barriers to implementing OHS reforms—The experiences of small subcontractors in the Australian Construction Industry. *International Journal of Project Management* 25, 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.01.015>
- López-Alonso, M., Ibarrondo-Dávila, P. & Rubio-Gámez, M.C., 2015. Análisis de los costes de prevención en obras de construcción. *Informes de la Construcción* 67, 055. <https://doi.org/10.3989/ic.13.062>
- López-Arquillos, A. & Rubio-Romero, J.C., 2015. Proposed indicators of prevention through design in construction projects. *Revista de la Construcción. Journal of Construction* 14, 58–64.
- Macchi, L., Oedewald, P., Rø Eitrheim, M.H. & Axelsson, C., 2012. Understanding maintenance activities in a macrocognitive work system. Presented at the ACM International Conference Proceeding Series, pp. 52–57. <https://doi.org/10.1145/2448136.2448147>

- Malla, F.G. & Zabala, I., 1978. Previsión del futuro en la empresa: el método Delphi. *Estudios Empresariales* 13–24.
- Manu, P., Ankrah, N., Proverbs, D. & Suresh, S., 2013. Mitigating the health and safety influence of subcontracting in construction: The approach of main contractors. *International Journal of Project Management* 31, 1017–1026. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.11.011>
- Manuele, F.A., 2009. Leading & lagging indicators. *Professional Safety* 54, 28.
- Marais, K., Dulac, N. & Leveson, N., 2004. Beyond normal accidents and high reliability organizations: The need for an alternative approach to safety in complex systems, in: *Engineering Systems Division Symposium*. MIT Cambridge, MA, pp. 1–16.
- Marí Bernat, A., Ortega, H., Ariel Pérez, G. & Sáiz García, S., 2002. Recomendaciones para el proyecto y construcción de placas macizas de hormigón “in situ” para forjados.
- Masys, A. J. (2018). Radicalization and Recruitment: A Systems Approach to Understanding Violent Extremism—New Developments Through FRAM, in: *Systems Research for Real-World Challenges*, IGI Global, pp. 322-348.
- Mayhew, C. & Quinlan, M., 1997. Subcontracting and occupational health and safety in the residential building industry. *Industrial Relations Journal* 28, 192–205.
- McNab, D., Freestone, J., Black, C., Carson-Stevens, A. & Bowie, P., 2018. Participatory design of an improvement intervention for the primary care management of possible sepsis using the Functional Resonance Analysis Method. *BMC Medicine* 16. <https://doi.org/10.1186/s12916-018-1164-x>
- Melanson, A. & Nadeau, S., 2016. Managing OHS in complex and unpredictable manufacturing systems: Can FRAM bring agility?, in: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. pp. 341–348. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41697-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41697-7_30)
- Mengolini, A. & Debarberis, L., 2008. Effectiveness evaluation methodology for safety processes to enhance organisational culture in hazardous installations. *Journal of Hazardous Materials* 155, 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.078>
- Michalus, J.C., Castro, S., Ariel, W. & Hernández Pérez, G., 2015. Método de expertos para la evaluación ex-ante de una solución organizativa. *Visión de futuro* 19, 0–0.
- Ministerio de Fomento, 2018. Estructura de la construcción 2016. Dirección General de Programación Económica y Presupuestos, Ministerio de Fomento de España.

- Montero Martínez, R., 2011. Ingeniería de la Resiliencia: nueva tendencia en la gestión de la Seguridad Laboral. Seguridad y salud en el trabajo 13–19.
- Myneni, S., McGinnis, D., Almoosa, K., Cohen, T., Patel, B. & Patel, V.L., 2016. Effective Use of Clinical Decision Support in Critical Care: Using Risk Assessment Framework for Evaluation of a Computerized Weaning Protocol, in: Advances in Healthcare Informatics and Analytics. Springer, Cham, pp. 217–232. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23294-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23294-2_10)
- National Occupational Safety and Health Commission, 1999. OHS Performance Measurement in the Construction Industry: Development of PPIs.
- Normalización Española, 2003. UNE 66175:2003. Sistemas de gestión de la calidad. Guía para la implantación de sistemas de indicadores.
- OECD, 2005. Guidance on safety performance indicators: Guidance for industry, public authorities and communities for developing SPI programmes related to chemical accident prevention, preparedness and response, Series on chemical accidents. Organization for Economic Co-operation and Development, Paris.
- Øien, K., 2001. Risk indicators as a tool for risk control. Reliability Engineering & System Safety 74, 129–145. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00067-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00067-9)
- Øien, K., Massaiu, S., Tinmannsvik, R.K. & Størseth, F., 2010. Development of early warning indicators based on resilience engineering, in: Submitted to PSAM10, International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference. pp. 7–11.
- Øien, K., Utne, I.B. & Herrera, I.A., 2011. Building safety indicators: Part 1—theoretical foundation. Safety science 49, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.05.012>
- OIT, 2001. La industria de la construcción en el siglo XXI: su imagen, perspectivas de empleo y necesidades en materia de calificaciones, Informe para el debate de la Reunión tripartita sobre la industria de la construcción en el siglo XXI: su imagen, perspectivas de empleo y necesidades en materia de calificaciones. Oficina Internacional del Trabajo, Ginebra, Suiza.
- Okoli, C. & Pawlowski, S.D., 2004. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. Information & Management 42, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002>
- OSALAN, 2009. Seguridad Práctica en la Construcción, 2009th ed. OSALAN.
- OSALAN, 2007. Guía práctica de encofrados. Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborales.
- OSHA, 2018. Commonly Used Statistics [WWW Document]. URL <https://www.osha.gov/oshstats/commonstats.html> (accessed 8.23.18).

- Patriarca, R. & Bergström, J., 2017. Modelling complexity in everyday operations: functional resonance in maritime mooring at quay. *Cognition, Technology & Work* 19. <https://doi.org/10.1007/s10111-017-0426-2>
- Patriarca, R., Bergström, J. & Di Gravio, G., 2017a. Defining the functional resonance analysis space: Combining Abstraction Hierarchy and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety* 165, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.032>
- Patriarca, R., Bergström, J., Di Gravio, G. & Costantino, F., 2018a. Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. *Safety Science* 102, 79–100. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.005>
- Patriarca, R., Di Gravio, G. & Costantino, F., 2018b. MyFRAM: An open tool support for the functional resonance analysis method. Presented at the 2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety, ICSRS 2017, pp. 439–443. <https://doi.org/10.1109/ICSRS.2017.8272861>
- Patriarca, R., Di Gravio, G. & Costantino, F., 2017b. A Monte Carlo evolution of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to assess performance variability in complex systems. *Safety Science* 91, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.07.016>
- Patriarca, R., Di Gravio, G. & Costantino, F., 2016. Resilience engineering to assess risks for the air traffic management system: A new systemic method. *International Journal of Reliability and Safety* 10, 323–345. <https://doi.org/10.1504/IJRS.2016.10005344>
- Patriarca, R., Di Gravio, G., Costantino, F., Falegnami, A. & Bilotta, F., 2018c. An Analytic Framework to Assess Organizational Resilience. *Safety and Health at Work* 9, 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.10.005>
- Patriarca, R., Di Gravio, G., Costantino, F. & Tronci, M., 2017c. The Functional Resonance Analysis Method for a systemic risk based environmental auditing in a sinter plant: A semi-quantitative approach. *Environmental Impact Assessment Review* 63, 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.12.002>
- Patriarca, R., Falegnami, A., Costantino, F. & Bilotta, F., 2018d. Resilience engineering for socio-technical risk analysis: Application in neuro-surgery. *Reliability Engineering and System Safety* 180, 321–335. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.08.001>
- Patriarca, R., Gianluca, D.P., Giulio, D.G. & Francesco, C., 2018e. FRAM for Systemic Accident Analysis: A Matrix Representation of Functional Resonance. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* 25. <https://doi.org/10.1142/S0218539318500018>

- Pazell, S., Burgess-Limerick, R. & Horberry, T., 2016. Application of functional resonance analysis method to sustain human-centered design practice in road construction. Presented at the Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, pp. 875–879. <https://doi.org/10.1177/1541931213601200>
- Peñaloza, G.A., Formoso, C.T. & Saurin, T.A., 2018. Assessment of safety performance measurement systems: an exploratory study from the resilience engineering and complexity perspectives, in: Proceedings of the Joint CIB W099 and TG59 Conference Coping with the Complexity of Safety, Health, and Wellbeing in Construction. Brazil.
- PERI, n.d. PERI Productos [WWW Document]. Peri España. URL <https://www.peri.es/products-overview.html> (accessed 10.16.17).
- Perrow, C., 1984. Normal accidents: Living with high risk systems. New York: Basic Books.
- Pickup, L., Atkinson, S., Hollnagel, E., Bowie, P., Gray, S., Rawlinson, S. & Forrester, K., 2017. Blood sampling - Two sides to the story. *Applied Ergonomics* 59, 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.08.027>
- Praetorius, G., Graziano, A., Schröder-Hinrichs, J.-U. & Baldauf, M., 2017. FRAM in FSA—Introducing a Function-Based Approach to the Formal Safety Assessment Framework, in: Stanton N., Landry S., Di Bucchianico G., V.A. (Ed.), *Dvances in Human Aspects of Transportation. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol 484. Springer, Cham. Springer, Cham, pp. 399–411. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41682-3\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41682-3_34)
- Praetorius, G., Hollnagel, E. & Dahlman, J., 2015. Modelling Vessel Traffic Service to understand resilience in everyday operations. *Reliability Engineering & System Safety* 141, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.020>
- Praetorius, G. & Kataria, A., 2016. Resilience and complexity in a maritime service supply chain’s everyday operation, in: *Service Supply Chain Systems: A Systems Engineering Approach*. pp. 121–137.
- Qureshi, Z.H., 2007. A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Socio-Technical Systems, in: Proceedings of the Twelfth Australian Workshop on Safety Critical Systems and Software and Safety-Related Programmable Systems. Australia, pp. 47–59.
- Raben, D.C., 2017. Identification of leading indicators in healthcare processes – developing a method (Doctoral Thesis). University of Southern Denmark.
- Raben, D.C., Bogh, S.B., Viskum, B., Mikkelsen, K.L. & Hollnagel, E., 2018. Learn from what goes right: A demonstration of a new systematic method for identification of

- leading indicators in healthcare. *Reliability Engineering & System Safety* 169, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.08.019>
- Raben, D.C., Bogh, S.B., Viskum, B., Mikkelsen, K.L. & Hollnagel, E., 2017. Proposing leading indicators for blood sampling: application of a method based on the principles of resilient healthcare. *Cognition, Technology & Work* 19, 809–817. <https://doi.org/10.1007/s10111-017-0437-z>
- Raben, D.C., Viskum, B., Mikkelsen, K.L., Hounsgaard, J., Bogh, S.B. & Hollnagel, E., 2018. Application of a non-linear model to understand healthcare processes: using the functional resonance analysis method on a case study of the early detection of sepsis. *Reliability Engineering and System Safety* 177, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.04.023>
- Ragosta, M., Martinie, C., Palanque, P., Navarre, D. & Suján, M.A., 2015. Concept maps for integrating modeling techniques for the analysis and re-design of partly-autonomous interactive systems. Presented at the Proceedings of 5th International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems, ATACCS 2015, pp. 41–52. <https://doi.org/10.1145/2899361.2899366>
- Raidén, A.B. & Dainty, A.R.J., 2006. Human resource development in construction organisations: An example of a “chaordic” learning organisation? *The Learning Organization* 13, 63–79. <https://doi.org/10.1108/09696470610639130>
- Rajendran, S., 2013. Enhancing Construction Worker Safety Performance Using Leading Indicators. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 18, 45–51. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000137)
- Rasmussen, J., 1997. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety science* 27, 183–213. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(97\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(97)00052-0)
- Reason, J., 1997. *Managing the risks of organizational accidents*. Ahsgate.
- Reason, J., 1990. *Human error*. Cambridge university press.
- Reason, J., 1979. Actions not as planned: The price of automatization, in: *Aspects of Consciousness*. Academic Press, pp. 1–67.
- Reiman, T. & Pietikainen, E., 2010. Indicators of safety culture - selection and utilization of leading safety performance indicators (No. SSM--2010-07). Swedish Radiation Safety Authority.
- Rhodes, D.H., Valerdi, R. & Roedler, G.J., 2008. Systems engineering leading indicators for assessing program and technical effectiveness. *Systems Engineering* 12, 21–35. <https://doi.org/10.1002/sys.20105>
- Rigaud, E., Neveu, C., Duvenci-Langa, S., Obrist, M.-N. & Rigaud, S., 2013. Proposition of an organisational resilience assessment framework dedicated to railway traffic

- management, in: Rail Human Factors: Supporting Reliability, Safety and Cost Reduction. Taylor & Francis, pp. 112–120.
- Righi, A.W., Saurin, T.A. & Wachs, P., 2015. A systematic literature review of resilience engineering: Research areas and a research agenda proposal. *Reliability Engineering & System Safety* 141, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.007>
- Robson, L.S., Clarke, J.A., Cullen, K., Bielecky, A., Severin, C., Bigelow, P.L., Irvin, E., Culyer, A. & Mahood, Q., 2007. The effectiveness of occupational health and safety management system interventions: a systematic review. *Safety Science* 45, 329–353. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2006.07.003>
- Rockwell, T.H., 1959. Safety performance measurement. *Journal of Industrial Engineering* 10, 12–16.
- Rosa, L.V., Franca, J.E.M., Haddad, A.N. & Carvalho, P.V.R., 2017. A Resilience Engineering Approach for Sustainable Safety in Green Construction. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 5, 480–495. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0174>
- Rosa, L.V., Haddad, A.N. & de Carvalho, P.V.R., 2015. Assessing risk in sustainable construction using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM). *Cognition, Technology & Work* 17, 559–573. <https://doi.org/10.1007/s10111-015-0337-z>
- Ross, A., Sherriff, A., Kidd, J., Gnich, W., Anderson, J., Deas, L. & Macpherson, L., 2018. A systems approach using the functional resonance analysis method to support fluoride varnish application for children attending general dental practice. *Applied Ergonomics* 68, 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.005>
- Rubio-Romero, J.C., 2004. Métodos de evaluación de riesgos laborales. Ediciones Díaz de Santos.
- Rubio-Romero, J.C., Pardo-Ferreira, M.C., De la Varga-Salto, J. & Galindo-Reyes, F., 2018. Composite leading indicator to assess the resilience engineering in occupational health & safety in municipal solid waste management companies. *Safety Science* 108, 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.014>
- Rubio-Romero, J.C., Pardo-Ferreira, M.C., Rojas, M.M., López-Arquillos, A. & Suarez-Cebador, M., 2019. Resilience Engineering: Concepts of the New Paradigm, in: *Engineering Digital Transformation*. Springer, pp. 133–140.
- Saurin, T.A., 2016. The FRAM as a tool for modelling variability propagation in lean construction, in: 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction. Boston, MA, USA, p. Sect. 11 pp. 3-12.

- Saurin, T.A., Famá, C.C. & Formoso, C.T., 2013. Principles for designing health and safety performance measurement systems: insights from resilience engineering. *Production* 23, 387–401. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132012005000072>
- Saurin, T.A., Formoso, C.T. & Cambraia, F.B., 2008. An analysis of construction safety best practices from a cognitive systems engineering perspective. *Safety Science* 46, 1169–1183. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2007.07.007>
- Saurin, T.A., Formoso, C.T. & Famá, C., 2014. Criteria for assessing safety performance measurement systems: insights from resilience engineering, in: *Resilience Engineering in Practice: Becoming Resilient*. Ashgate, pp. 63–78.
- Saurin, T.A. & Sanches, R.C., 2014. Lean construction and resilience engineering: Complementary perspectives of variability. Presented at the 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Understanding and Improving Project Based Production, IGLC 2014, pp. 61–71.
- Sawaragi, T., 2016. Human-System Co-Creative Design of Resilience. *IFAC-PapersOnLine*, 13th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems HMS 2016 49, 468–473. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.630>
- Schafer, D., Abdelhamid, T.S., Mitropoulos, P. & Mrozowski, T., 2009. Resilience engineering: A new approach for safety management, in: *Building a Sustainable Future - Proceedings of the 2009 Construction Research Congress*. pp. 766–775. [https://doi.org/10.1061/41020\(339\)78](https://doi.org/10.1061/41020(339)78)
- Shirali, G.A., Ebrahipour, V. & Salahi, L.M., 2014. Proactive risk assessment to identify emergent risks using functional resonance analysis method (FRAM): A case study in an oil process unit. *Iran Occupational Health* 10.
- Smith, D., Veitch, B., Khan, F. & Taylor, R., 2017. Understanding industrial safety: Comparing Fault tree, Bayesian network, and FRAM approaches. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 45, 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.11.016>
- Studic, M., 2015. Developing a framework for Total Apron Safety Management PhD. Imperial College London.
- Studic, M., Majumdar, A., Schuster, W. & Ochieng, W.Y., 2017. A systemic modelling of ground handling services using the functional resonance analysis method. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 74, 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.004>
- Sujan, M.A. & Felici, M., 2012. Combining failure mode and functional resonance analyses in healthcare settings. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in*

- Bioinformatics) 7612 LNCS, 364–375. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33678-2\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33678-2_31)
- Tan, L., Liu, B., Wang, S. & Ling, D., 2017. Modeling the software development process as a socio-technical system based on FRAM to facilitate the risk analysis and software defects prevention. Presented at the 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2017.
- Tian, J., Wu, J., Yang, Q. & Zhao, T., 2016. FRAMA: A safety assessment approach based on Functional Resonance Analysis Method. *Safety Science* 85, 41–52. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2016.01.002>
- Toellner, J., 2001. Improving safety & health performance: identifying & measuring leading indicators. *Professional Safety* 46, 42.
- Toft, Y., Dell, G., Klockner, K.K. & Hutton, A., 2012. Models of Causation: Safety, In Health and Safety Professionals Alliance, The core body of knowledge for generalist OHS professionals. Safety Institute of Australia, Tullamarine, VIC.
- Torody, A.B., Abaei, M.M. & Gholamnia, R., 2016. Conceptual compression discussion on a multi-linear (FTA) and systematic (FRAM) method in an offshore operation's accident modeling. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 22, 532–540. <https://doi.org/10.1080/10803548.2016.1157399>
- Tveiten, C.K., 2013. Resilient planning of modification projects in high risk systems: The implications of using the functional resonance analysis method for risk assessments, in: *Oil and Gas, Technology and Humans: Assessing the Human Factors of Technological Change*. pp. 147–168.
- ULMA, n.d. Sistemas de encofrado metálicos y de madera [WWW Document]. ULMA Encofrados y Andamios para la construcción. URL <https://www.ulmaconstruction.es/es-es/encofrados> (accessed 10.16.17).
- Vieira, L.C. & Saurin, T.A., 2018. Environmental disaster analysis: Case study using the functional resonance analysis method. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 23, 373–383. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018147114>
- Vinnem, J.E., 2010. Risk indicators for major hazards on offshore installations. *Safety Science* 48, 770–787. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.02.015>
- Von Buren, H.F., 2013. Análise de acidentes com guindastes móveis utilizando o método FRAM (Functional Resonance Analysis Method) (MSc Thesis). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Von Schirnding, Y., 2002. Health in sustainable development planning: the role of indicators. World Health Organization, Geneva.
- Wachs, P., Righi, A.W. & Saurin, T.A., 2019. The Functional Resonance Analysis Method as a Debriefing Tool in Scenario-Based-Training, in: Bagnara, S.,

- Tartaglia, R., Albolino, S., Alexander, T., Fujita, Y. (Eds.), Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018), Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer International Publishing, pp. 132–138.
- Waefler, T., Kohli, B. & Cerny, N., 2016. Functional resonances in complex sociotechnical systems - Industrial planning from a systemic point of view. Presented at the 7th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics, IMCIC 2016 and 7th International Conference on Society and Information Technologies, ICSIT 2016 - Proceedings, pp. 232–237.
- Waterson, P., Robertson, M.M., Cooke, N.J., Militello, L., Roth, E. & Stanton, N.A., 2015. Defining the methodological challenges and opportunities for an effective science of sociotechnical systems and safety. *Ergonomics* 58, 565–599. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1015622>
- Woods, D.D., 2015. Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering. *Reliability Engineering & System Safety* 141, 5–9. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.018>
- Woods, D.D. & Hollnagel, E., 2006. Prologue: resilience engineering concepts, in: *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate, pp. 13–18.
- Wreathall, J., 2009. Leading? Lagging? Whatever! *Safety Science, Process Safety Indicators / SRAE* 2006 47, 493–494. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.07.031>
- Wreathall, J., 2001. Final Report on Leading Indicators of Human Performance. Electric Power Research Institute and the US Department of Energy.
- Wu, J., Tian, J. & Zhao, T., 2015. Research on socio-technical system functional variability based on functional resonance accident model, in: *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems - Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2015*. pp. 49–56.
- Yang, Q. & Tian, J., 2015. Model-based safety assessment using FRAM for complex systems. Presented at the Safety and Reliability of Complex Engineered Systems - Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2015, pp. 3967–3974.
- Yang, Q., Tian, J. & Zhao, T., 2017. Safety is an emergent property: Illustrating functional resonance in Air Traffic Management with formal verification. *SAFETY SCIENCE* 93, 162–177. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.12.006>
- Yung, P., 2009. Institutional arrangements and construction safety in China: an empirical examination. *Construction Management and Economics* 27, 439–450. <https://doi.org/10.1080/01446190902855633>

- Zheng, Z. & Tian, J., 2015. Bridging the gap between FRAM and safety practice by applying FSM and model checking, in: 2015 First International Conference on Reliability Systems Engineering, ICRSE. IEEE, pp. 1–6.  
<https://doi.org/10.1109/ICRSE.2015.7366488>
- Zheng, Z., Tian, J. & Zhao, T., 2016. Refining operation guidelines with model-checking-aided FRAM to improve manufacturing processes: a case study for aeroengine blade forging. *Cognition, Technology & Work* 18, 777–791.  
<https://doi.org/10.1007/s10111-016-0391-1>

## ANEXOS



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**ANEXO A: Publicaciones analizadas en la revisión bibliográfica sobre el  
Functional Resonance Analysis Method**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Referencia	Tipo de publicación	Propósito de la publicación	Caso de aplicación	Sector del caso de aplicación
Albery et al., 2016	Artículo de revista	Evaluar si las dificultades asociadas a los métodos de evaluación de riesgos lineales pueden mitigarse mediante otro tipo de métodos como el FRAM	Aplica el FRAM a una fábrica de manufactura de alfombras	Manufactura
Amorim & Pereira, 2015	Publicación en congreso	Mejorar la comprensión de accidentes que ocurrieron fruto de la improvisación	Aplica el FRAM a tres accidentes en operaciones de mantenimiento de aviones, en la construcción de un edificio y en un taller de zapatos	Aviación/ construcción/ manufactura
Anvarifar et al., 2017	Artículo de revista	Realizar un análisis del riesgo de las defensas contra inundaciones mediante el FRAM	Aplica el FRAM a las defensas multifuncionales contra inundaciones en los Países Bajos	Emergencias (inundaciones)
Bellini et al., 2016	Publicación en congreso	Presentar una herramienta innovadora y una solución capaces de integrar la evaluación de la resiliencia y el modelado con el Sistemas de Soporte a la Decisión Impulsados por la Evidencia en una poderosa forma de planificación, preparación, absorción, recuperación y adaptación en sistemas de transporte urbano en particular y para infraestructuras críticas en general	Aplica la herramienta propuesta (ResilienceDS) basada en FRAM, redes bayesianas y procesos de jerarquía analítica a la gestión de una operación de rescate genérica	Emergencias
Bellini et al., 2017	Artículo de revista	Investigar y cuantificar la mejora de la resiliencia de los sistemas de transporte urbano mediante la adopción de tecnología emergente como internet de las cosas y la nueva tendencia de la comunidad conectada	Aplica el enfoque propuesto basado en FRAM y la lógica difusa a los sistemas de transporte urbano y la comunidad conectada en el escenario de inundación repentina	Sistemas de transporte urbano
Belmonte et al., 2011	Artículo de revista	Evaluar el impacto de la automatización en un subsistema de supervisión del tráfico ferroviario	Aplica el FRAM a un caso de supervisión de mantenimiento ferroviario	Ferroviario
Bjerga et al., 2016	Artículo de revista	Analizar el FRAM y el STAMP en relación al tratamiento de la incertidumbre y de las sorpresas potenciales en los sistemas socio-técnicos	Aplica ambos métodos un caso en el que se produce una perturbación importante en la red eléctrica europea	Redes eléctricas
Bridges et al., 2018	Artículo de revista	Comprender que factores pueden dar lugar a que los cazadores identifiquen erróneamente un ciervo	Aplica el FRAM a la caza de ciervos	Caza
Cabrera Aguilera et al., 2016	Artículo de revista	Describir y analizar la respuesta de los centros de defensa ambiental ante derrames de petróleo para identificar restricciones y conflictos de las prácticas actuales.	Aplica el FRAM al caso de las operaciones de los servicios de respuesta en accidentes por derrame de petróleo	Emergencias
Cabrera et al., 2014	Publicación en congreso	Modelar la variabilidad del rendimiento en la respuesta a derrames de petróleo de un centro de defensa ambiental	Aplica el FRAM al caso de las operaciones de los servicios de respuesta en accidentes por derrame de petróleo	Emergencias (Derrame de petróleo)

Referencia	Tipo de publicación	Propósito de la publicación	Caso de aplicación	Sector del caso de aplicación
Carvalho, 2011	Artículo de revista	Comprender como sucede una colisión en el aire bajo condiciones normales de variabilidad	Aplica el FRAM a un accidente aéreo entre dos aviones	Gestión del tráfico aéreo
Clarke et al., 2017	Publicación en congreso	Aplicar el FRAM para desarrollar recomendaciones de diseño y cumplir con los objetivos de gestión de seguridad del Código Internacional de Seguridad para los transbordadores de puerto flotantes	Aplica el FRAM a los transbordadores de puerto flotante para el transbordo de productos a granel	Operaciones marítimas
Clay-Williams et al., 2015	Artículo de revista	Investigar si el FRAM puede aplicarse al diseño de directrices para identificar elementos del proceso que podrían impedir una correcta implementación	Aplica el FRAM para analizar dos borradores de directrices de unidades de cuidados intensivos	Asistencia sanitaria
Costantino et al., 2018	Artículo de revista	Aplicar el FRAM a las auditorías ambientales en una planta de sinterización para identificar las funciones clave en relación a los niveles de emisiones	Aplica el FRAM combinado con el método Monte Carlo a la conversión de hierro en acero en altos hornos	Auditoría Ambiental
Danczyk et al., 2016	Publicación en congreso	Estudiar la evolución del procesamiento, la explotación y la difusión de información en base a las necesidades del ejército	Aplicar el FRAM a procesos de recolección de datos que apoyan las misiones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento	Sistemas de información y fuerzas armadas
De Felice et al., 2017	Publicación en congreso	Proponer un método para evaluar la variabilidad de la probabilidad error humano en sistemas complejos basado en el FRAM y en el Análisis de la Fiabilidad Humana	Aplica el enfoque propuesto a las actividades de gestión de emergencias en una planta petroquímica que recicla aceite usado	Petrochemical
De Vries, 2017	Artículo de revista	Analizar la contribución de los operadores del servicio de tráfico marítimo mediante el análisis FRAM	Aplica el FRAM a los pilotos y operadores del servicio de tráfico de embarcaciones	Marítimo
Duan et al., 2015	Artículo de revista	Mejorar el FRAM para explorar los posibles caminos en la evolución de los peligros mediante la integración con un modelo de verificación	Aplica el enfoque propuesto al accidente aéreo del Scandinavian Airlines Flight 686	Gestión del tráfico aéreo
Fukuda et al., 2016	Artículo de revista	Propone un método para el análisis de las operaciones y maniobras de los trenes basado en el FRAM y las <i>common performance conditions</i> (CPCs)	Aplica el enfoque propuesto a un incidente en las tareas de operación y maniobra de los trenes	Ferrovioario
Furniss et al., 2016	Artículo de revista	Explorar las diferentes actividades implicadas en el trabajo de los factores humanos que participan en un proyecto	Aplica el FRAM a la organización del trabajo de los profesionales que participan en las diferentes actividades de un proyecto	Gestión de proyectos

Referencia	Tipo de publicación	Propósito de la publicación	Caso de aplicación	Sector del caso de aplicación
Gattola et al., 2018	Publicación en congreso	Aplicar el FRAM a una planta de manufactura	Aplica el FRAM combinado con el método Monte Carlo a las operaciones de forjado en una empresa metalúrgica que produce accesorios para herramientas eléctricas	Manufactura
Haddad & Rosa, 2015	Publicación en congreso	Aplicar el FRAM y la Jerarquía Analítica de Procesos para la evaluación de la sostenibilidad en la construcción	Aplica el enfoque propuesto al proceso de reutilización de residuos de construcción en obra de una empresa de construcción en Rio de Janeiro	Construcción sostenible
Herrera & Woltjer, 2010	Artículo de revista	Comparar el método <i>Sequentially Timed Events Plotting</i> (STEP) con el FRAM	Aplica ambos métodos un incidente en el aterrizaje de un avión	Gestión del tráfico aéreo
Herrera et al., 2010	Publicación en congreso	Proponer indicadores leading para los helicópteros en alta mar	Aplica varios métodos, entre ellos el FRAM, para proponer indicadores	Operaciones en alta mar
Hirose et al., 2016	Publicación en congreso	Combinar el FRAM y una adaptación del CREAM mediante la lógica difusa (FuzzyCREAM) para hacer el análisis FRAM más objetivo y cuantificable	Aplica el enfoque propuesto al accidente aéreo American Airline flight 965	Gestión del tráfico aéreo
Hollnagel & Fujita, 2013	Artículo de revista	Presentar un análisis del desastre de Fukushima desde la perspectiva de la Ingeniería de la Resiliencia	Aplica el FRAM al desastre de Fukushima.	Nuclear
Hollnagel, 2012b	Libro	Presenta y describe detalladamente el método FRAM para modelar cómo los sistemas socio-técnicos complejos funcionan	Incluye tres ejemplos de aplicación del FRAM a una cirugía, a accidente del Herald de Free Enterprise y al proceso de solicitud de un préstamo bancario	Asistencia sanitaria, marítimo y financiero
Jensen & Aven, 2017	Publicación en congreso	Presentar un nuevo método de identificación de peligros y amenazas que combine el FRAM y <i>Anticipatory Failure Determination</i>	Aplica el FRAM al emplazamiento de instalaciones	

Referencia	Tipo de publicación	Propósito de la publicación	Caso de aplicación	Sector del caso de aplicación
Laugaland et al., 2014	Artículo de revista	Examinar el proceso de alta de pacientes mediante el FRAM para identificar interdependencias y factores que influyen en el rendimiento	Aplica al FRAM al caso del alta de pacientes ancianos en un hospital de atención primaria	Asistencia sanitaria
Lee & Chung, 2018	Artículo de revista	Proponer una nueva metodología para el análisis de accidentes con interacciones hombre-sistema basado en el FRAM	Aplica la nueva metodología al naufragio del Herald de Free Enterprise	Marítimo
Liu & Tian, 2017	Publicación en congreso	Desarrollar el FRAM como un modelo dinámico al combinarlo con un método de análisis de sistemas para lograr un análisis basado en el orden temporal	Aplica el enfoque propuesto a un accidente de tráfico ferroviario	Ferrovionario
Macchi et al., 2012	Publicación en congreso	Analizar las actividades de mantenimiento mediante tres métodos: <i>Organisational Core Task modelling</i> , FRAM y análisis de compensaciones y conflictos objetivos	Aplica tres métodos, entre ellos el FRAM a las actividades de mantenimiento en una planta nuclear	Nuclear
Masys, 2018	Capítulo de libro	Utilizar el FRAM para analizar cómo se llevan a cabo las actividades de radicalización y dónde y cómo se pueden diseñar estrategias de intervención para interferir con el proceso de radicalización	Aplica el FRAM a las actividades de radicalización del terrorismo islámico	Terrorismo
McNab et al., 2018	Artículo de revista	Mejorar la comprensión de cómo se identifican y gestionan los pacientes con una enfermedad grave que podrían tener septicemia	Aplica el FRAM a la identificación y gestión de la septicemia en pacientes con una enfermedad grave	Asistencia sanitaria
Melanson & Nadeau, 2016	Artículo de revista	Aplicar el FRAM a la gestión de riesgos emergentes en el entorno de fabricación	Aplica el FRAM a las operaciones de ensamble del chasis de vehículos por soldadores	Manufactura
Myneni et al., 2016	Capítulo de libro	Aplicar y validar el uso del FRAM para evaluar el uso de protocolos informatizados de destete	Aplica el FRAM a protocolos informatizados de destete	Asistencia sanitaria
Patriarca & Bergström, 2017	Artículo de revista	Modelar la complejidad de las operaciones diarias de amarre en los muelle mediante el FRAM	Aplica el FRAM combinado con marco de Abstracción/Agencia basado en el modelo de Rasmussen a las operaciones de amarre en los muelles	Marítimo
Patriarca et al., 2016	Artículo de revista	Presentar un enfoque innovador basado en la combinación de FRAM y el método Monte Carlo con un enfoque semi-cualitativo	Aplica el enfoque propuesto a proceso de fabricación de acero	Auditoría Ambiental

Referencia	Tipo de publicación	Propósito de la publicación	Caso de aplicación	Sector del caso de aplicación
Patriarca et al., 2017	Artículo de revista	Explorar los beneficios que surgen de la combinación del FRAM con un marco de Abstracción/Agencia basado en el modelo de Rasmussen	Aplica el enfoque propuesto a un incidente ferroviario	Ferrovionario
Patriarca et al., 2017a	Artículo de revista	Desarrollar una evolución del método FRAM en una perspectiva semicuantitativa, utilizando un enfoque probabilístico basado en la simulación de Monte Carlo para definir funciones críticas	Aplica el enfoque propuesto a la operación de incursión en pista de aviones	Gestión del tráfico aéreo
Patriarca et al., 2017b	Artículo de revista	Presentar una herramienta de tecnología informática para desarrollar el análisis FRAM denominada myFRAM.	Desarrolla una herramienta de apoyo al análisis FRAM	
Patriarca et al., 2018	Artículo de revista	Proponer un nuevo enfoque del FRAM combinandolo con el método Monte Carlo y la <i>Abstraction/Agency Framework</i>	Aplica el enfoque propuesto a procedimientos de anestesia perioperatorios para la neurocirugía	Asistencia sanitaria
Patriarca et al., 2018	Artículo de revista	Facilitar el análisis de accidentes con FRAM reduciendo la complejidad de la representación mediante una Matriz de Análisis de Resiliencia (RAM)	Aplica el FRAM al accidente del Vuelo 1493 de USAir	Gestión del tráfico aéreo
Pazell et al., 2016	Publicación en congreso	Aplicar el FRAM para estudiar el diseño predictivo y centrado en el hombre en la construcción de carreteras	Aplica el FRAM al caso de los camiones de asfalto en la construcción de carreteras.	Construcción de infraestructuras
Pickup et al., 2017	Artículo de revista	Analizar la variabilidad que existe en el proceso de extracción y análisis de muestras de sangre	Aplica el FRAM al proceso de extracción y análisis de muestras de sangre en cuatro hospitales	Asistencia sanitaria
Praetorius & Kataria, 2016	Capítulo de libro	Analizar el diseño y el impacto en la cadena de suministro del servicio marítimo	Aplica el FRAM al caso de la cadena de suministro del servicio de tráfico de embarcaciones	Servicio de tráfico de embarcaciones

Referencia	Tipo de publicación	Propósito de la publicación	Caso de aplicación	Sector del caso de aplicación
Praetorius et al., 2015	Artículo de revista	Explorar las operaciones diarias del sistema de servicio de tráfico marítimo para obtener información sobre cómo contribuyen a los movimientos de tráfico seguros y eficientes	Aplica el FRAM a las operaciones diarias de gestión del tráfico marítimo	Marítimo
Praetorius et al., 2017	Artículo de revista	Introducir el FRAM para enriquecer la Evaluación Formal de la Seguridad (FSA) a través de opiniones de expertos	Aplica el FRAM y el árbol de causas a un estudio piloto para evitar colisiones	Marítimo
Raben et al., 2017	Artículo de revista	Demostrar la utilidad de un Método de Identificación de Indicadores Leading mediante un caso de estudio de identificación de indicadores para la toma de muestras de sangre	Aplica un método de identificación de indicadores <i>leading</i> basado en el FRAM a la toma de muestras de sangre en un departamento de bioquímica clínica	Asistencia sanitaria
Raben et al., 2018	Artículo de revista	Comprender cómo los sistemas de asistencia sanitaria funcionan mediante el análisis FRAM	Aplica el FRAM a la detección temprana de septicemia en una sala médica y sala de emergencias de un hospital	Asistencia sanitaria
Raben et al., 2018	Artículo de revista	Desarrollar un método para la identificación de indicadores <i>leading</i>	Propone un método basado en el FRAM y lo aplica a la detección temprana de septicemia	Asistencia sanitaria
Ragosta et al., 2015	Publicación en congreso	Proponer un multi-modelo basado en FRAM, en <i>Human centered Assessment and Modelling to Support Task Engineering for Resilient Systems (HAMSTERS)</i> y en <i>Interactive Cooperative Objects (ICO)</i> .	Aplica el modelo propuesto a un estudio de caso relacionado con el cambio de ruta de la aeronave debido a condiciones climáticas adversas	Gestión del tráfico aéreo
Rosa et al., 2015	Artículo de revista	Utilizar el FRAM combinado con la Jerarquía Analítica de Procesos para realizar evaluaciones de riesgo ocupacional desde una nueva perspectiva	Aplica el enfoque propuesto a un caso basado en la reutilización del hormigón demolido por una empresa de construcción en Rio de Janeiro	Construcción sostenible
Rosa et al., 2017	Artículo de revista	Demostrar un enfoque alternativo a la evaluación de riesgos que se ajuste al enfoque de seguridad sostenible en la industria de la construcción verde usando el FRAM junto a la Jerarquía Analítica de Procesos	Aplica el método propuesto al reciclaje de residuos de hormigón durante la modernización del estadio Maracanã en Río de Janeiro	Construcción sostenible

Referencia	Tipo de publicación	Propósito de la publicación	Caso de aplicación	Sector del caso de aplicación
Ross et al., 2018	Artículo de revista	Identificar y comprender el contexto para aplicar fluoruro de sodio y mejorar el funcionamiento e incrementar su aplicación.	Aplica el FRAM al caso de la aplicación de fluoruro de sodio para prevenir caries infantiles	Asistencia sanitaria
Saurin & Sanches, 2014a	Publicación en congreso	Comparación de las perspectivas de la variabilidad de la Construcción Lean y la Ingeniería de la Resiliencia	Aplica el FRAM y el mapa del flujo de valor al ensamblaje de la estructura de acero de un edificio comercial y los compara	Construcción
Saurin, 2016	Publicación en congreso	Discutir cómo el FRAM puede ser útil para modelar la propagación de la variabilidad entre funciones en la construcción Lean	Aplica el FRAM a las inspecciones de seguridad	Construcción
Sawaragi, 2016	Publicación en congreso	Comprender posibles colapsos en una serie de procedimientos operativos debido a las condiciones variables de en la cabina de los pilotos mediante FRAM	Aplica el FRAM al accidente aéreo ocurrido en Columbia en 1995	Gestión del tráfico aéreo
Schafer et al., 2009	Publicación en congreso	Explorar la aplicación de la Ingeniería de la Resiliencia a la gestión de la seguridad en construcción	Aplica el FRAM en un escenario de construcción	Construcción
Shirali et al., 2014	Artículo de revista	Identificar riesgos emergentes en una refinería de petróleo mediante al FRAM	Aplica al FRAM a una unidad de proceso en una refinería de petróleo	Industria petrolera
Smith et al., 2017	Artículo de revista	Comparar tres enfoques de análisis de accidentes: árbol de fallos, FRAM y redes bayesianas	Aplica los tres métodos a un sistema de control de propano	Industrial
Studic et al., 2017	Artículo de revista	Proponer un marco de Gestión Total de la Seguridad para el personal de tierra del área de estacionamiento de los aviones basado en el FRAM, la Teoría Fundamentada y <i>Goals-Means Task Analysis</i> (GMTA).	Aplica el FRAM a un incidente ocurrido en los servicios de tierra de un aeropuerto	Aeropuertos
Sujan & Felici, 2012	Artículo de revista	Investigar la posible combinación del Análisis de Modo y Efecto de Fallos con el FRAM	Aplica el enfoque propuesto al transporte de pacientes mediante el servicio de ambulancias de un hospital	Asistencia sanitaria
Tan et al., 2017	Publicación en congreso	Estudiar el proceso de desarrollo del software y los defectos introducidos a través de él. Se presenta un estudio de caso de un programa de ingeniería real.	Aplica el FRAM al caso de estudio de un software de ingeniería real	Desarrollo de software
Tian et al., 2016	Artículo de revista	Desarrollar un enfoque basado en el FRAM denominado <i>FRAM-based analysis</i> (FRAMA) que emplea verificación de modelos y herramientas de análisis de procesos	Aplica el enfoque propuesto al accidente del ferry Herald de Free Enterprise	Marítimo

Referencia	Tipo de publicación	Propósito de la publicación	Caso de aplicación	Sector del caso de aplicación
Toroody et al., 2016	Artículo de revista	Comparar FRAM y árbol de causas como métodos de la evaluación de riesgos para los sistemas complejos	Análisis de un caso de operaciones de elevación de estructuras de soporte en alta mar	Operaciones en alta mar
Tveiten, 2013	Capítulo de libro	Identificar la variabilidad de rendimiento potencial en la planificación de modificaciones en una instalación de petróleo mediante FRAM	Aplica el FRAM a la planificación de modificaciones en una plataforma de petróleo en alta mar en fase de desarrollo	Industria petrolera
Vieira & Saurin, 2018	Artículo de revista	Reanalizar un desastre medioambiental mediante el FRAM	Aplica el FRAM a un desastre medioambiental en un río	Emergencias (Desastre medioambiental)
Wachs et al., 2019	Publicación en congreso	Discutir el uso del FRAM como una herramienta de interrogatorio en la Capacitación Basada en Escenarios	Aplica el FRAM durante una sesión de formación para electricistas para simulación	Redes eléctricas
Waepler et al., 2016	Publicación en congreso	Modelar un sistema de planificación, programación y control mediante el FRAM	Aplica el FRAM al sistema de planificación, programación y control industrial de una PYME	Manufactura
Wu et al., 2015	Publicación en congreso	Proponer un modelo extendido de variabilidad funcional basado en el FRAM	Aplica el modelo propuesto a un incidente en una cirugía	Asistencia sanitaria
Yang & Tian, 2015	Publicación en congreso	Proponer un nuevo enfoque del FRAM para la evaluación de la seguridad basado en la verificación de modelos	Aplica el enfoque propuesto al aterrizaje de aviones	Gestión del tráfico aéreo
Yang et al., 2017	Artículo de revista	Proponer un nuevo enfoque del FRAM utilizando la verificación formal como herramienta de apoyo	Aplica el enfoque propuesto a la advertencia de altitud mínima segura utilizada en gestión del tráfico aéreo	Gestión del tráfico aéreo
Zheng & Tian, 2015	Publicación en congreso	Propone un nuevo enfoque del FRAM al combinarlo con la verificación de modelos para hacer más efectivo el análisis de accidentes con FRAM	Aplica el enfoque propuesto al accidente del ferry Herald de Free Enterprise	Marítimo
Zheng et al., 2016	Artículo de revista	Proponer un nuevo enfoque del FRAM al combinarlo con la verificación formal y las máquinas de estado finitos para redefinir directrices de operación	Aplica el enfoque propuesto al proceso de forjado de las paletas de un motor aeronáutico	Manufactura

**ANEXO B: Publicaciones analizadas en la revisión bibliográfica sobre el  
Resilience Assessment Grid**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Referencia	Tipo de publicación	Propósito de la publicación	Caso de aplicación	Sector del caso de aplicación
Falegnami et al., 2018	Artículo de revista	Testar un cuestionario basado en el el Proceso de Jerarquía Analítica y el RAG (AHP-RAG) para medir la resiliencia de los anestesiistas, mediante una encuesta a través de diferentes países.	Aplica el RAG a los anestesiistas	Sanidad
Apneseth et al., 2013	Capítulo de libro	Desarrollar de una nueva herramienta basada en RAG y utilizarla para evaluar el impacto del proceso de Planificación Integrada (IPL) en la capacidad de recuperación de una empresa	Aplica el RAG en una empresa de la industria de petróleo y gas en alta mar	Industria petrolera
Rigaud et al., 2013	Publicación en congreso	Describir un proceso dedicado al desarrollo de indicadores de desempeño de seguridad para procesos socio-técnicos ferroviarios	Aplica el RAG a la gestión del tráfico ferroviario	Ferroviano
Hollnagel, 2017	Publicación en congreso	Introducir el RAG como un enfoque para la gestión de <i>Safety-II</i> , describir sus principios y cómo puede ser empleado para desarrollar los potenciales para resiliencia	Incluye cuatro ejemplos de aplicación del RAG en el departamento de emergencias de una ciudad, en una empresa pública ferroviaria, en la gestión del tráfico aéreo y en una agencia de seguridad nuclear	Emergencias/ ferroviario/ gestión del tráfico aéreo/ nuclear
Patriarca et al., 2018c	Artículo de revista	Definir un marco analítico semicuantitativo para medir la resiliencia organizacional en sistemas sociotécnicos complejos, combinando el RAG y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP-RAG)	Aplica el RAG a los anestesiistas	Sanidad
Darrow & Eseonu, 2017	Artículo de revista	Mejorar la comprensión de la relación entre la resiliencia individual y organizacional mediante la adaptación de los atributos y capacidades de los sistemas resilientes a la configuración de la atención médica.	Aplica el RAG a los médicos	Sanidad
Patriarca et al., 2016	Artículo de revista	Desarrollar un nuevo método denominado RAG-SAT basado en el RAG y <i>State Assessment Tool</i> , para combinar los principios de <i>Safety-I</i> y <i>Safety-II</i>	Aplica el RAG a la gestión del Tráfico Aéreo	Gestión del Tráfico Aéreo
Hegde et al., 2015	Artículo de revista	Aplicar la Técnica de Incidentes Críticos y el Método de Decisión Crítica con un guión basado en el RAG para analizar las capacidades de una organización resiliente: monitorizar, anticipar, responder y aprender	Aplica el RAG a los médicos y enfermeros	Sanidad



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## **ANEXO C: Plantillas para los trabajos de campo**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

## GUIÓN PARA LAS ENTREVISTAS

### 1. Introducción

### 2. Permiso para la grabación

### 3. Datos demográficos

- ¿Cuántos años tienes?
- ¿Cuál es tu puesto de trabajo actualmente?
- ¿Cuánto tiempo llevas en él?
- ¿Qué tareas realizas?
- ¿Cuál es tu experiencia laboral anterior?

### 4. Preguntas de apoyo para la entrevista

Una vez que se ha terminado la cimentación y se va a iniciar la fase de estructura, ¿qué es lo primero que haces? ¿cuáles son tus tareas?

ASPECTOS CLAVE	✓
¿Cómo sabes que debes empezar una tarea o cuándo empiezas?	
¿Hay algo que haga que esto cambie?	
¿Tienes que informar a alguien cuando terminas?	
¿Existen requisitos previos o cosas que deban estar preparadas antes para que puedas comenzar a realizar esta tarea con normalidad?	
¿Qué haces si las condiciones previas no están disponibles?	
¿Tienes que registrar alguna información? Si es así, ¿dónde lo haces?	
¿Qué recursos necesitas para realizar tus tareas como personas, equipos, fuentes de energía, etc.?	
¿Qué haces si los recursos no están disponibles?	
¿Cómo has aprendido a realizar la tarea?	
¿Hay algo que controle la ejecución de la tarea? (Supervisores, procedimientos....)	
¿Hay algún tiempo establecido para ejecutar la tarea?	
¿Qué sucede si hay retrasos?	
¿Sueles trabajar con presión de tiempo?	
¿Cómo respondes si ocurre algo inesperado? Por ejemplo, una interrupción, una pausa requerida por una tarea más urgente que tiene prioridad, un recurso que falta, etc.	
¿Qué problemas suelen surgir al realizar la tarea?	
¿Cómo afectan a la tarea?	
¿Cómo los resuelves?	
¿Cómo te preparas para su trabajo (documentos, instrucciones, compañeros, etc.)?	
¿Todo el mundo realiza la tarea así o hay otras formas?	

### 5. Posibilidades de mejora

Si pudieras hacer algo para que estas operaciones sean más seguras y eficientes, sin límites presupuestarios ni limitaciones de tiempo ¿harías algo? ¿qué podría ser? ¿tienes algo que le gustaría agregar, como comentarios o sugerencias, antes de que terminemos?



<b>CÓDIGO DE LA OBSERV.:</b>		<b>FECHA:</b>		<b>HORA:</b>	
<b>INVESTIGADOR:</b>					
<b>OBRA:</b>					
<b>TAREA OBSERVADA:</b>					
<input type="checkbox"/> Replanteo	<input type="checkbox"/> Montaje ferralla planta	<input type="checkbox"/> Montaje de línea de vida			
<input type="checkbox"/> Encofrado de pilares	<input type="checkbox"/> Verificación ferralla	<input type="checkbox"/> Montaje de sistemas de redes V			
<input type="checkbox"/> Montaje armadura pilares	<input type="checkbox"/> Hormigonado de la planta	<input type="checkbox"/> Montaje de redes horizontales			
<input type="checkbox"/> Hormigonado de pilares	<input type="checkbox"/> Curado del hormigón	<input type="checkbox"/> Montaje de barandillas			
<input type="checkbox"/> Desencofrado pilares/muros	<input type="checkbox"/> Desmontaje del mecano	<input type="checkbox"/> Operaciones con la grúa			
<input type="checkbox"/> Montaje del mecano	<input type="checkbox"/> Construcción in situ ferralla	<input type="checkbox"/> Otras operaciones			

<b>¿Cómo lo hacen?</b>
<b>¿Quién lo realiza?</b>
<b>¿Quién está al mando?</b>
<b>¿Se realizan comprobaciones previas?</b>
<b>¿Se supervisa la operación?</b>
<b>¿Se verifica una vez terminada?</b>
<b>¿Qué verifican? ¿Qué documento o información de referencia emplean?</b>
<b>¿Qué medidas de seguridad emplean?</b>

Plantilla para las observaciones durante las visitas a obra



**ANEXO D: Plantilla del cuestionario diseñado conforme al  
Resilience Assessment Grid**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

EVALUACIÓN DE CONTRIBUCIÓN AL DESEMPEÑO RESILIENTE DE LOS PLANES DE SEGURIDAD Y SALUD		Ausente	Deficiente	Inaceptable	Aceptable	Satisfactorio	Excelente
<b>RESPONDER</b>							
R01	En el Plan de Seguridad y Salud se identifican y evalúan los riesgos y sucesos críticos, tanto frecuentes como inesperados.						
R02	En el Plan de Seguridad y Salud se detallan las medidas y acciones que deben implantarse para evitar estos riesgos o sucesos críticos y las respuestas que deben llevarse a cabo en caso de que se materialicen.						
R03	El Plan de Seguridad y Salud incluye la planificación de los métodos concretos de trabajo que realmente se pondrán en práctica.						
R04	El Plan de Seguridad y Salud se actualiza conforme a los cambios en la planificación de las operaciones que realmente se ejecutan.						
R05	El Plan de Seguridad y Salud recoge los recursos disponibles (personal, equipos, materiales...) para mantener la capacidad de ejecutar los trabajos de forma segura en condiciones de presión o alto volumen de trabajo.						
R06	Se fomenta que los subcontratistas y trabajadores autónomos propongan revisiones del plan para que éste se ajuste a los recursos y métodos que realmente serán empleados.						
R07	El Plan de Seguridad y Salud recoge los sistemas de comunicación y coordinación entre contratistas, subcontratistas y trabajadores autónomos para facilitar un desempeño eficaz de los trabajos.						
R08	El Plan de Seguridad y Salud es fácil de entender y se emplea en la práctica en la ejecución de los trabajos.						
R09	El Plan de Seguridad y Salud permite a los trabajadores ajustar sus acciones según consideren apropiado.						
R10	El Coordinador de Seguridad y Salud antes de aprobar el Plan de Seguridad y Salud verifica adecuadamente que el contenido del plan se adapta a la realidad de la obra que va a ejecutarse.						
<b>MONITORIZAR</b>							
M01	En Plan de Seguridad y Salud se definen métodos e indicadores para monitorizar adecuadamente la ejecución de los trabajos.						
M02	Si se definen indicadores de seguridad, éstos son coherentes con los trabajos que realmente se realizan en la obra.						
M03	Se establecen en el Plan de Seguridad y Salud procedimientos y criterios para realizar la revisión regular y adecuada de los indicadores para se sigan adaptando a la realidad.						
M04	En el Plan de Seguridad y Salud se planifica el uso de indicadores proactivos (Ejemplos: porcentaje de reuniones de planificación previas a la ejecución de tareas o número de acciones de promoción de la seguridad)						
M05	En el Plan de Seguridad y Salud se planifica el uso de indicadores reactivos (Ejemplo: índice de accidentes o lesiones)						
M06	Los indicadores proactivos son válidos y fiables						
M07	El período cubierto por los indicadores reactivos es apropiado.						

<b>EVALUACIÓN DE CONTRIBUCIÓN AL DESEMPEÑO RESILIENTE DE LOS PLANES DE SEGURIDAD Y SALUD</b>		<b>Ausente</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Inaceptable</b>	<b>Aceptable</b>	<b>Satisfactorio</b>	<b>Excelente</b>
M08	Los indicadores son fáciles de usar a la vez que eficientes.						
M09	La frecuencia de las mediciones de los indicadores es apropiada en el Plan de Seguridad y Salud.						
M10	El retraso entre la medición y el análisis de los resultados de los indicadores es aceptable.						
<b>APRENDER</b>							
AP01	En el Plan de Seguridad y Salud se establece claramente sobre qué tipo de incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) debe informarse.						
AP02	En el Plan de Seguridad y Salud se establecen criterios que garanticen que la información de los de incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) se investigan adecuadamente.						
AP03	En el Plan de Seguridad y Salud se establecen protocolos para que se informe sobre estos de incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) a todas las organizaciones implicadas en la obra.						
AP04	En el Plan de Seguridad y Salud se establecen criterios para controlar que el tiempo desde que se informa sobre un incidente (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles) hasta que dicha información es analizada y se aprende de ella es aceptable.						
AP05	En el Plan de Seguridad y Salud de definen los recursos suficientes para que se puedan escribir reportes o informes sobre estos incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles).						
AP06	En el Plan de Seguridad y Salud de definen mecanismos para motivar a los empleados para que comuniquen los incidentes (sucesos o eventos inesperados o imprevisibles).						
AP07	En el Plan de Seguridad y Salud se definen mecanismos para aprender de las cosas que van bien, así como de las que van mal.						
AP08	En el Plan de Seguridad y Salud se planifican reuniones periódicas en las que intervienen todos los agentes de la obra para aprender no solo de las cosas que han ido mal, sino también de las que han ido bien.						
AP09	En el Plan de Seguridad y Salud existen un procedimiento formal para la recopilación, clasificación y análisis de toda la información y datos recibidos (informes, indicadores...).						
AP10	En el Plan de Seguridad y Salud existe un procedimiento formal para aprender de esta información (desarrollo de nuevos procedimientos, formación, rediseño, reorganización...).						
<b>ANTICIPAR</b>							
AN01	En el Plan de Seguridad y Salud se establece una sistemática para adelantarse a posibles debilidades y amenazas relacionadas con la seguridad.						

<b>EVALUACIÓN DE CONTRIBUCIÓN AL DESEMPEÑO RESILIENTE DE LOS PLANES DE SEGURIDAD Y SALUD</b>		<b>Ausente</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Inaceptable</b>	<b>Aceptable</b>	<b>Satisfactorio</b>	<b>Excelente</b>
AN02	Las personas que llevan a cabo este análisis de potenciales debilidades y amenazas tienen la experiencia, capacidad y recursos necesarios para ello.						
AN03	En el Plan de Seguridad y Salud se establecen sistemas para garantizar que cualquier trabajador de las diferentes empresas intervinientes en la obra pueda aportar de forma sencilla cualquier información relacionada con las debilidades y amenazas de seguridad potenciales o anticipadas.						
AN04	Además de recoger esa información conforme al ítem anterior, en el Plan de Seguridad y Salud se establecen los cauces de comunicación para que esta información sobre potenciales amenazas y debilidades sea transmitida y compartida adecuadamente a todo el personal que interviene en la obra.						
AN05	En el Plan de Seguridad y Salud se definen mecanismos para el desarrollo y el mantenimiento de la capacidad para identificar las amenazas futuras para la seguridad, la calidad y el rendimiento operacional.						
AN06	Existen mecanismos definidos para que las amenazas y oportunidades detectadas se transmitan o reflejen en futuros Planes de Seguridad y Salud.						

