

08-009

RISK ANALYSIS IN POWER PLANTS CONSTRUCTION PROJECTS.

Sánchez Colmenarejo, José Ignacio ⁽¹⁾; Gonzalez-Gaya, Cristina ⁽²⁾; Morales Camprubi, Felipe ⁽²⁾

⁽¹⁾ PhD student programme in Industrial Engineering Technologies, EIDUNED, National University of Distance Education (UNED), ⁽²⁾ Manufacturing and Construction Engineering Department, National University of Distance Education (UNED)

Construction of thermal power plants continues to be part of international tenders. International Energy Agency, in its latest report, considers that the energy demand of plants with non-renewable sources will be around 26% in 2050, which leads to consider that this type of facilities will continue to be built in the coming years, so construction projects should continue to progress to reach the highest levels of safety in all its phases. This paper provides an overview of how risk analysis is currently developed in conventional Power Plants Construction projects during the different stages of their life cycle. The most relevant hazard identification and risk analysis studies are described and how they are being carried out by large manufacturers and international contractors. Review will also be carried out considering the different stages of the life cycle along the projects, highlighting studies from conceptual engineering stage up to detailed engineering phase. Risk analysis during construction stage will be also identified, analysing the techniques that have been applied in other industrial sectors and how they are being incorporated into the construction of power plants construction projects.

Keywords: Risk analysis; construction of power plants; engineering projects.

ANÁLISIS DE RIESGOS EN LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

La construcción de centrales térmicas sigue formando parte de las licitaciones internacionales. La Agencia Internacional de la Energía, en su último informe, considera que las necesidades energéticas de plantas con fuentes no renovables, estarán en torno al 26% en el año 2050, lo que conduce a considerar que estas instalaciones seguirán construyéndose durante los próximos años, por lo que deberán seguir evolucionando para mejorar el nivel de seguridad en todos sus aspectos y fases. En el presente trabajo se proporciona una visión general de cómo se realiza actualmente el análisis de riesgos en los proyectos de construcción de las centrales de generación eléctrica convencional durante las diferentes fases de su ciclo de vida. Se describen los estudios de identificación de peligros y análisis de riesgos más relevantes y como se realizan por los grandes tecnólogos y contratistas internacionales. Se realizará además la revisión considerando las diferentes fases del ciclo de vida de los proyectos, destacando los estudios de la fase de ingeniería desde su etapa temprana hasta la de detalle. También se identificarán los estudios en la fase de construcción y aquellas técnicas que se vienen aplicando en otros sectores industriales y como se incorporan a estos proyectos de construcción.

Palabras claves: Análisis de riesgos; construcción de plantas eléctricas; proyectos de ingeniería.

Correspondencia: José Ignacio Sánchez Colmenarejo jsanchez4395@alumno.uned.es



©2021 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) en su último informe estadístico del año 2020 (International Energy Agency, 2020) incluye la evolución desde los años 70 hasta la actualidad del consumo energético por fuentes de energía observando un crecimiento sostenido de la demanda de energía mundial incluso en los peores años de la última crisis financiera mundial. Por otra parte, la proyección de generación de electricidad hasta el año 2050, publicado por la Unión Europea en el 2016 (Capros, De Vita, Tasios, Siskos, & Kannavou, 2016), muestra que las centrales convencionales seguirán formando parte del mix energético, a pesar del notable incremento de las energías renovables, de modo que su expectativa de producción en 2050 será del 26%, lo que contribuirá adicionalmente a la estabilidad de la red eléctrica de cada país, dada su disponibilidad frente a las renovables, al menos con el actual marco tecnológico. Por tanto, el sector energético mundial seguirá necesitando de las plantas de generación de energía eléctrica que utilizan fuentes convencionales en los próximos años.

Estas instalaciones basan su principio de funcionamiento en la conversión de diversas fuentes de energía en energía eléctrica. Manejan presiones y temperaturas del agua y del vapor muy elevadas y utilizan en el propio proceso de conversión de energía térmica en energía eléctrica productos, que por su naturaleza son peligrosos y por tanto necesitan de la adopción de medidas de seguridad que reduzcan el nivel de peligrosidad en sus instalaciones. Los proyectos de construcción deben seguir evolucionando para incorporar los métodos de identificación de peligros y análisis de riesgos tal como viene haciendo en los últimos años con objeto de incrementar los niveles de seguridad en las centrales.

2. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal proporcionar una visión general de cómo se aborda el análisis de riesgos en los proyectos de construcción de las centrales de generación eléctrica, durante las diferentes fases de su ciclo de vida.

Se analizarán los métodos de identificación de peligros y análisis de riesgos de un número representativo de proyectos de construcción de centrales eléctricas realizados en los últimos años por contratistas españoles y tecnólogos internacionales y se comparará con lo que se viene realizando en otras industrias consideradas líderes en el sector de la seguridad de los procesos como es la industria del refino, petroquímica o del gas. Para el estudio se han usado un total de 69 referencias de centrales térmicas de gas, carbón y proyectos de actualización como desulfuraciones y mejoras o sustituciones de equipos principales identificando los métodos de análisis y evaluación de riesgos empleados para la comparativa.

3 Metodología

3.1 Gestión de riesgos

La norma UNE-ISO 31000 (IEC/ISO 31000, 2018), proporciona las directrices generales para la gestión del riesgo. Define el riesgo como *efecto de la incertidumbre sobre los objetivos*. La nota 3 a la entrada, establece que con frecuencia el riesgo se expresa en términos de fuentes de riesgo, eventos potenciales, sus consecuencias y sus probabilidades. La norma UNE-ISO 31010 (IEC/ISO 31010, 2011) hace referencia a los métodos de apreciación o identificación del riesgo en función de parámetros de empresa o proyecto.

En el diccionario panhispánico del español jurídico se define como: *función de la probabilidad de un suceso y de la cuantía de un daño que puede provocar*. Esta definición procede

directamente de la que se utiliza por el Real Decreto 840/2015 (España Ministerio de la Presidencia, 2015).

En la Directiva 2012/18/UE conocida comúnmente como Seveso III (Unión Europea, s. f.) en el Artículo 2, se establecen los términos peligro y riesgo:

Artículo 14) «peligro»: *la capacidad intrínseca de una sustancia peligrosa o de una situación física de ocasionar daños a la salud humana o al medio ambiente;*

Artículo 15) «riesgo»: la probabilidad de que se produzca un efecto específico en un período de tiempo determinado o en circunstancias determinadas;

Al evaluar la amenaza que representa un peligro, los factores principales son la probabilidad (likelihood) de que se produzca y la extensión de sus consecuencias, es decir, los daños a las personas, a la propiedad o al medio ambiente, en caso de que se produzca. El término que expresa esta probabilidad en este contexto es el **riesgo**.

Es común entre los profesionales de la seguridad industrial formular el riesgo como

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Magnitud de las consecuencias}$$

Entendiendo así el riesgo como una función de las consecuencias y las probabilidades de ocurrencia, se podrá establecer que un análisis de riesgos considerará la obtención de la medida del riesgo de modo que se pueda proceder con su evaluación, de tal manera que, si como resultado de dicha evaluación el riesgo es aceptable, la instalación industrial se considerará apta para su construcción y operación. Cuando el riesgo se considere como no aceptable será preciso proceder a su eliminación / supresión y cuando esto no sea posible será necesario reducirlo a un nivel que pueda ser considerado aceptable. En ocasiones, ninguna de las opciones anteriores es posible, por lo que, en estos casos será preciso estudiar su transferencia o condiciones de aceptación.

Está ampliamente aceptado que el proceso por el cual se realiza la evaluación de los riesgos de una instalación industrial se lleva a cabo a través cuatro etapas básicas interrelacionadas entre sí: Identificación de peligros; Análisis de peligros, identificando los escenarios peligrosos y los eventos accidentales; Estimación del riesgo para lo que se necesita estimar la probabilidad de ocurrencia y el alcance de las consecuencias del accidente; Evaluación del riesgo para determinar su aceptabilidad o inclusión de medidas de mitigación, como última etapa del proceso de evaluación.

Para una compañía eléctrica cuya producción depende en una u otra medida de los procesos fisicoquímicos en el que se basa su capacidad productiva, se asume que un aumento en la seguridad de dichos procesos produce una reducción directa de los accidentes graves. La seguridad de los procesos forma parte nuclear de la reducción del riesgo. La seguridad de los procesos está íntimamente relacionada con los métodos de identificación de peligros. Está ampliamente aceptado que los estudios de identificación de peligros y análisis de riesgos deben formar parte del ciclo de vida del proyecto.

Dada su relevancia, se toma como referencia básica el enfoque dado por el Instituto Estadounidense de Ingenieros Químicos IChemE, a través del Centro para la Seguridad de Procesos Químicos (CCPS) (Center for Chemical Process Safety, 2008), y el trabajo de F. Crawley (Crawley, 2021). No hay que perder de vista la norma UNE ISO 150008 (ISO 150008, 2008) y los estándares (PMBOK Guide, 2013) y (Benjamin, Goff, Hubbard, & Waller, 2008)

auténticos referentes para la gestión de riesgos ambientales y gestión de proyectos, incluyendo la gestión de riesgos.

3.2 Métodos de identificación de peligros y análisis de riesgos

Aunque en las referencias anteriores no se establece una clasificación atendiendo al método, se ha considerado más intuitivo seguir la clasificación que proporcionan algunos autores y las Guías Técnicas de protección Civil de España (Dirección General de Protección Civil, 1994a), (Dirección General de Protección Civil, 1994b) o (Ruiz Gimeno et al., 2005), que si atienden a esta una clasificación distinguiendo entre métodos cuantitativos, cualitativos o híbridos, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.- Métodos de identificación de peligros y análisis de riesgos Elaboración propia

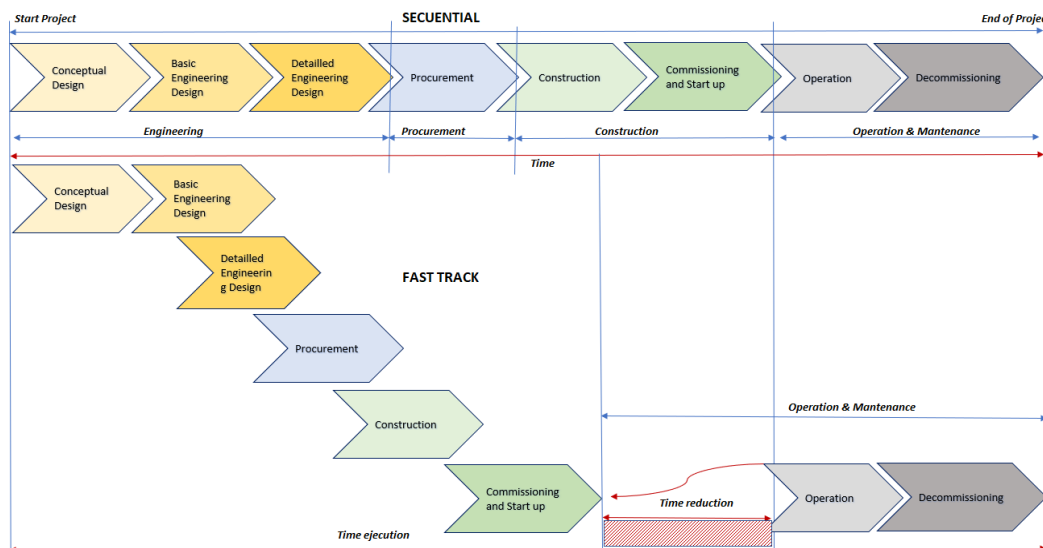
Método	Descripción	Tipos
Cualitativo	Metodologías que basan sus análisis en valoraciones cualitativas, es decir que no establecen un valor numérico del fenómeno analizado. Los métodos cualitativos se clasifican en función de que los mismos utilicen técnicas de análisis basadas en escenarios o técnicas de análisis no basadas en escenarios	Basados en escenarios
		Análisis preliminar de peligros (Preliminary Hazard Analysis-PreHA-)
		Revisión de seguridad (Safety Review).
		Método de la clasificación relativa (Relative Ranking). Listas de verificación (Check List)
Semicuantitativo o híbrido	Se basan en el uso de metodologías cualitativas con la utilización de índices para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado y sus consecuencias. Normalmente se utilizan modelos para evaluar el alcance de las consecuencias	No basados en escenarios
		Análisis What-if o ¿Qué pasa si?
		Análisis estructurado ¿Qué pasa si? SWIFT
		Análisis What-if / Lista de verificación Estudios de riesgo y operabilidad (HAZOP). Análisis modal de fallos y efectos (FMEA)
Métodos cuantitativos	Calculan de la manera más exacta posible la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado y sus consecuencias. Normalmente se utilizan modelos para evaluar el alcance de las consecuencias	Métodos basados en índices (DoW, MOND entre otros)
		Estudios SIL/LOPA
		Análisis del Árbol de Sucesos (Event Tree Analysis -ETA)
		Análisis del Árbol de Fallos (Fault Tree Analysis FTA)
		Análisis de Causa-Consecuencia y Análisis de pajarita (Bow-Tie).
		Análisis Cuantitativo de Riesgos (Quantitative Risk Analysis-QRA)

3.2 Ciclo de vida del proyecto

La construcción de plantas de generación de energía eléctrica se rige en términos generales por los mismos principios y complejidad que los grandes proyectos industriales. El PMI (PMBOK Guide, 2013) establece que todos los proyectos, independientemente de su tamaño y complejidad pueden configurarse dentro de una estructura genérica de ciclo de vida consistente en Inicio, Organización y preparación, Ejecución y Cierre. El ciclo de vida es la serie de fases por las que atraviesa un proyecto. Cada fase del proyecto es un conjunto de actividades relacionadas de manera lógica, que culmina con la finalización de uno o más entregables. La Figura 1 muestra las fases principales de un proyecto de construcción de una

planta de generación de energía eléctrica y los dos modos de ejecución que son usados más frecuentemente, secuencial y el que se denomina de fases solapadas o “fast track”.

Figura 1.- Fases principales de un proyecto de construcción de una planta de generación eléctrica mostradas en secuencia Elaboración propia



4 Resultados

4.1 Fase de diseño previo

La variabilidad de estudios a incluir en las etapas previas de un proyecto depende en gran medida de las prácticas empresariales del promotor o propietario de la planta. No es lo mismo que el proyecto lo lleve a cabo una *utility* o un promotor financiero; el enfoque será muy diferente y los estudios que se realizarán en esta fase probablemente también. Mientras que el cliente utility tiene interiorizados las experiencias de operar centrales y busca asegurar fiabilidad, seguridad de operación y facilidad de mantenimiento, el financiero, carece de esa estructura y centra su esfuerzo en asegurar cumplimiento con especificaciones de diseño, muchas veces no suficientemente orientadas a los puntos anteriores. Además de los objetivos técnicos y comerciales, el promotor de la obra debe identificar los aspectos de seguridad, salud y medioambiente para las distintas alternativas, los cuales, en algún caso pueden resultar determinantes para la propia viabilidad del proyecto. En general, en esta fase se realizan estudios de dos tipos, aquellos relacionados con la Seguridad Industrial y los relacionados con la Seguridad del Proceso. Entre los estudios relacionados con la Seguridad Industrial se encuentran habitualmente entre otros, el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), Estudios Seveso o “Major Hazards Reports” y Evaluación de Riesgos para la Salud HRA (Health Risk Assessment). Entre los estudios relacionados con la Seguridad del Proceso, se pueden citar los siguientes:

- Estudio HAZID Identificación de Peligros (HAZard IDentification). Habitualmente lo realiza en su estadio más temprano el cliente, pero es habitual repetirlo en la etapa de Ingeniería Básica.
- Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA) Preliminar. Evalúa asuntos estratégicos que pueden resultar claves para la propia viabilidad de la planta como su ubicación y

localización, el entorno y los habitantes, infraestructuras básicas, logística y otros que se puedan identificar relativos a la tecnología / proceso etc.).

4.2 Fase de ingeniería

Respecto a los estudios y análisis de riesgos que se realizan en la etapa de ingeniería, usualmente se realizan por una tercera parte mediante la subcontratación de los servicios especializados correspondiente cuya gestión suele correr a cargo del equipo de HSE (Salud, Seguridad y Medioambiente de sus siglas en inglés).

Los estudios que se realizan en un proyecto se identifican en el Plan de HSE del Proyecto. Es habitual en los proyectos de generación eléctrica distinguir entre el Plan de HSE para la fase de Ingeniería y Aprovechamientos y el Plan de HSE para la Construcción dado que los alcances difieren notablemente. Así, en el plan de HSE para la etapa de ingeniería y aprovisionamientos, se encuentran estudios relativos a Clasificación de Áreas Peligrosas, Estudio HAZOP, Hojas de Datos de Seguridad (SDS) y vías de evacuación y rutas de escape, entre otros, mientras que en el plan de HSE para la Construcción se incluye desde la definición de la política de HSE para la obra, hasta la definición del alcance de los trabajos durante la fase de construcción identificando “quien hace que”. Además, suele definirse la implementación y elaboración de procedimientos de investigación de incidentes/accidentes en obra, informes y registros de seguridad, sistemas de permisos de trabajo y bloqueo y etiquetado y gestión de peligros en la construcción, entre los que se encuentran:

Etapas de Ingeniería Básica

En primer lugar, se necesita disponer de la *Lista de Sustancias Peligrosas* del proyecto. Para ello será preciso identificar las propiedades y mezclas peligrosas, las cuales se pueden encontrar en las Hojas de Datos de sustancias inflamables, Fichas de Seguridad de los Productos (MSDS), las cuales suelen estar disponibles en bases de datos internas de las compañías, así como de organismos internacionales. La Lista de Sustancias Peligrosas es un documento básico de partida para generar otros como la *Lista de Fuentes de Escape* o la *Lista de Equipos Peligrosos*, que también forma parte de los documentos de seguridad relacionados con la clasificación de áreas peligrosas.

Estudios HAZID

Cuando se realiza un estudio HAZID el estado del proyecto es fundamental para que el resultado sea el adecuado a los objetivos que se buscan. Precisamente en base a esto se tendrán dos tipos de estudios HAZID:

- HAZID Conceptual. Normalmente utilizado en las etapas de diseño previo.
- HAZID detallado. Normalmente desarrollado en las etapas de ingeniería básica o de detalle, según se haya realizado previamente el conceptual.

Para el correcto desarrollo del estudio HAZID, ya sea conceptual o detallado, se atenderán los siguientes elementos básicos de verificación (Checklist), los cuales se organizan normalmente en las cuatro categorías básicas siguientes:

- Peligros externos y medioambientales. Se incluyen aquí los peligros referidos a condiciones ambientales como temperatura o humedad y aquellos relativos a condiciones sísmicas o condiciones especiales del terreno donde se construirá la central.

Peligros de la propia instalación. Se consideran redundancias de unidades, procedimientos de arranque y parada, así como la respuesta de emergencia de la planta ante un blackout, entre otros. Aquí también se consideran los peligros de proceso, entre los que habitualmente se estudian desde el almacenamiento de sustancias peligrosas,

sobrepresiones y sobretensiones de operación, venteos y fugas de sustancias peligrosas entre otros.

- Peligros relacionados con la seguridad y salud laboral, como pueden ser aquellos relacionados con las condiciones de la localización donde se realizará la obra y también otras relacionadas propiamente con la prevención de riesgos laborales.

Problemas relacionados con la implementación del proyecto.

Etapas de Ingeniería de Detalle

En este punto es interesante revisar con una perspectiva de más de una década el artículo de Fluor (James Brown & Michael Martin, 2008), donde se declara la implementación, como práctica habitual en la compañía, de estudios HAZOP para todos los proyectos de construcción de centrales térmicas realice la compañía. Este tipo de estudios no eran habituales en centrales eléctricas hasta que se incorporaron por compañías como Fluor que si eran realizados de manera habitual en instalaciones de generación y cogeneración instaladas en las refinerías e instalaciones auxiliares de las mismas como práctica habitual. Pueden atribuirse razones de estabilidad tecnológica histórica de los ciclos termodinámicos que rigen estas instalaciones o la estabilidad regulatoria de las redes eléctricas lo que ha contribuido a la tardía implantación de estos estudios. Sin embargo, los cambios regulatorios debidos a la irrupción de energías alternativas y cambios en la regulación medioambiental exigiendo menores cuotas de emisiones contaminantes a la atmosfera, así como la incorporación en el mercado de contratistas internacionales de compañías como Fluor que tradicionalmente centraban sus trabajos en otras industrias, hizo que la aplicación de estas técnicas y estudios fuesen siendo incluidas por los clientes y promotores en sus especificaciones, haciendo de todo ello una mejora notable en términos de seguridad

Estudios HAZOP

En los últimos años la realización de estudios HAZOP en los proyectos de construcción de centrales eléctricas se ha convertido en práctica habitual y es común realizarlo al final de la ingeniería básica o al inicio de la ingeniería de detalle. Es tan común su realización, que se considera habitualmente como hito de proyecto para la edición de los P&IDs y descripciones funcionales de los sistemas y equipos. Constituye un hito importante en la congelación del diseño de los sistemas y, de alguna manera, proporciona una garantía al cliente de la correcta realización del diseño de la planta. La metodología HAZOP además de aplicarse a los sistemas, equipos mecánicos y unidades paquete, puede aplicarse al diseño de los sistemas e instalaciones eléctricas, el cual se denomina EHAZOP y a los sistemas de control denominados CHAZOP. El primero es más conocido y habitual que el segundo.

Se distinguen dos tipos de estudios HAZOP que se vienen realizando de manera habitual en los proyectos de generación eléctrica: HAZOP y HAZOP/SIL, el cual se realiza de manera integrada el estudio HAZOP con el estudio de determinación o asignación de niveles SIL.

La metodología HAZOP que se aplica a las centrales eléctricas es igual a la que se ha venido realizando en otros sectores industriales pioneros en este tipo de análisis de peligros. La metodología se basa en la realización de un análisis detallado de las posibles desviaciones de un sistema respecto de sus condiciones normales de operación. Se conforma un equipo multidisciplinar que sigue un método estructurado de análisis que utiliza un conjunto de palabras guía (no, más/menos, etc.), para detectar desviaciones de las condiciones normales del proceso en puntos clave, denominados "nodos". Estas palabras clave se aplicarán a los parámetros más relevantes (flujo, presión, temperatura, nivel...), de modo que se identifican las diferentes causas que generan la situación en estudio y las consecuencias de dichas desviaciones. Se estudian las salvaguardas y protecciones de que se dispone para evitar las causas y las consecuencias. En los proyectos de construcción de plantas de generación de

electricidad es habitual disponer de sesiones diferenciadas para los equipos principales y para los sistemas y equipos auxiliares del BOP (Balance Of Plant). Así es muy habitual programar y dividir la planta en los sistemas de agua y vapor del BOP, Caldera y equipos auxiliares, Turbina de Gas y HRSGs para ciclos combinados, Turbina de Vapor, Sistemas Auxiliares y Sistemas paquete. Si se realiza un HAZOP eléctrico, se necesita además incluir otros nodos adicionales relacionados con los sistemas eléctricos. En ocasiones se realizan estudios SAFOP los cuales incorporan además de la seguridad, estudios de operatividad y mantenimiento. Así se realizan estudios SAFAN, SYSOP y OPTAN.

Entre los estudios HAZOP de unidades paquete, se encuentran entre otros: Sistemas de manejo de sólidos, en los cuales se almacena y transportan combustibles sólidos como carbón, biomasa, petcoke u otros. También se encuentran en esta categoría, los sistemas de manejo de cenizas y los sistemas de almacenamiento y tratamiento de caliza para sistemas de desulfuración de gases. También se consideran como unidades paquete los sistemas de almacenamiento de combustible líquido desde los tanques de almacenamiento hasta los tanques diarios, los sistemas de tratamiento de agua, sistemas de tratamiento de gases y estaciones de regulación y medida de gases o estaciones de compresión.

Ejemplos de análisis HAZOP se pueden encontrar en la bibliografía en (Melani, Murad, Caminada Netto, Souza, & Nabeta, 2018), (Al Saffar & Ezzat, 2020), (Musyafa & Adiyagsa, 2012) o (Rathod, Gidwani, & Solanky, 2017).

Estudios de Alcance de Consecuencias (EAC)

Los estudios EAC proporcionan el modelado de las consecuencias de las emisiones de materiales peligrosos en términos de dispersión de vapor, radiación térmica, sobrepresión de la explosión y toxicidad. En términos prácticos, en los proyectos de construcción de centrales térmicas, estos estudios se limitan a los específicos de riesgo de Fuego y Explosión de la Central.

Para la realización del estudio EAC se parte normalmente del HAZID detallado realizado en la etapa de ingeniería básica. Entre los riesgos habituales que se consideran en los escenarios del estudio se encuentran derrames, fugas, incendios o explosiones. Para definir adecuadamente los escenarios de trabajo sobre los que trabajar en el análisis de consecuencias, se requiere además identificar los eventos o sucesos no deseados sobre los que se realizará la evaluación y además identificar aquellos eventos iniciadores del escenario de accidente. Es habitual que para ello se utilicen las técnicas de análisis del árbol de eventos ETA y de análisis de árbol de fallos FTA. Las herramientas de cálculo usadas para calcular los efectos del accidente normalmente se basan en el uso de software comercial (como el de DNV, PHAST, SCRI u otros), que están disponibles en el mercado. Este software incluye los modelos habituales utilizados en la estimación de consecuencias pudiendo simular escenarios de afectación bajo diferentes condiciones, tales como emisiones continuas puntuales (Chimeneas), derrames y fugas con evaporación a nivel del suelo (Continuas o limitadas), nubes explosivas, modelos de fuego por llamarada ("Flash Fire"), entre otros. También suelen incluir modelos de radiación térmica por bola de fuego por explosión de vapor en expansión de líquido en ebullición ("BLEVE"), modelo de radiación térmica por fuego en derrames ("Pool Fire") y modelo de radiación térmica por chorro de fuego ("Jet Fire").

Para su cálculo es necesario que el especialista que lo realiza considere determinadas hipótesis que permitan establecer el caudal de liberación o evaporación del gas, y considerando la meteorología, el modelo de dispersión estimará la distancia a la que ocurrirá

una concentración particular de la sustancia liberada. Aquí también deben realizarse determinadas hipótesis de trabajo para que el software proporcione resultados creíbles.

Estudios cuantitativos de riesgos (QRA)

Los estudios QRA proporcionan los peligros, frecuencias de ocurrencia y consecuencias de los escenarios de trabajo que resultan creíbles en términos de derrames, fuego, explosión, nubes tóxicas y otros accidentes que pueden resultar graves, no solo para la propia planta, sino también para su entorno. Como todos, consta de las cuatro etapas anteriores:

Identificación de peligros. Se parte también aquí del HAZID de la etapa de ingeniería básica, con los escenarios allí considerados. Entre los peligros habituales en centrales se encuentran la liberación e ignición de productos inflamables y combustibles, limitado normalmente a gas natural, H₂, fueloil y gasoil como combustibles. Respecto de chorros de fuego, normalmente los relacionados con las áreas de descarga y suministro de combustibles, así como de los sistemas de lubricación de aceite de las Turbinas de Gas o Vapor. Hay escenarios de incendios en arquetas y fosos de recogida de fugas mayores de combustibles líquidos, aceite de lubricación e incluso arquetas de recogida de condensados de gas e incendios en transformadores o en fosos de recogida de aceite de refrigeración. Otros escenarios también consideran la formación de atmosferas explosivas en parques de manejo de combustibles sólidos, zonas de transferencia como en las cintas transportadoras o en los sistemas de pulverizadores de carbón, o en los silos de almacenamiento.

En calderas se consideran los riesgos de explosión e implosión debidos a la operación o a la acumulación de vapores de combustibles en las áreas de combustión. También se debe considerar peligros en equipamientos auxiliares, como son Precipitadores Electrostáticos, conductos de gases de escape, Calentadores Regenerativos, Filtros de Mangas, sistemas de Desulfuración de Gases, etc. También cabe mencionar la formación de atmósferas explosivas en el interior de equipos como Turbinas de Gas, así como en el sistema de enfriamiento de hidrógeno de los generadores o los incendios en edificios y salas específicas (salas eléctricas, salas de baterías).

Estimación de la frecuencia. La frecuencia se estima de manera cuantitativa utilizando datos estadísticos de frecuencia de fallos de bibliografía especializada,

- Estimación de las consecuencias. Se usan herramientas comerciales como las descritas en EAC.
- Evaluación de riesgo. La probabilidad y las consecuencias se combinan utilizando una matriz de riesgo para obtener el nivel de riesgo asociado a cada escenario. **Otros estudios de Evaluación de Riesgos**
- Evaluación de Riesgos en Edificios (Building Risk Assessment BRA). Es muy habitual que este estudio forme parte bien del estudio QRA o del estudio EAC.
- Clasificación de Áreas Peligrosas. Existen dos sistemas principales de clasificación, NFPA/NEC, NFPA 70 National Electric Code, NEC (National Fire Protection Association - NFPA, 2017) utilizado principalmente en EEUU y ATEX/IEC (IEC 60079 (IEC60079-10-1, 2015)), que se puede considerar más universal que el primero. La Clasificación de Áreas Peligrosas consta de dos documentos básicos fundamentales, el estudio de clasificación de áreas peligrosas y los planos de clasificación de áreas. Para la elaboración del estudio de clasificación de áreas peligrosas es necesario disponer, de la lista de sustancias

peligrosa, lista de fuentes de escape, lista de aperturas y características de los lugares ventilados, así como otros datos necesarios para establecer las fuentes de emisión o fuentes de escape en condiciones normales de funcionamiento. Para cada fuente de emisión se determinará a continuación el grado de liberación, calculando el radio de las zonas clasificadas y su área de influencia, los cuales se representan en los planos de áreas clasificadas.

4.3 Fase de construcción

Los requisitos relacionados con la evaluación de riesgos para la construcción y de seguridad y salud en el trabajo aplicables al proyecto se definen en el plan de HSE para la construcción. El proceso de evaluación de riesgos en la etapa de construcción es similar al que se realiza en cualquier proceso de evaluación de riesgos donde se distinguen las etapas habituales: Identificación del peligro, estimación del riesgo, evaluación del riesgo y control del riesgo. Para la identificación de peligros, es necesario disponer de una lista de peligros la cual se suele elaborar del histórico de obras de características similares y de las actividades evaluadas. Respecto a la estimación del riesgo, como siempre se puede evaluar de manera cualitativa o cuantitativa. En el proceso de evaluación de los riesgos de construcción es habitual utilizar métodos cualitativos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias del mismo. El riesgo como siempre será función de ambos parámetros. La matriz de riesgos propuesta en (INSHT, 2000) es muy utilizada por contratistas españoles en sus proyectos internacionales. En (INSHT, 1993), también se propone un método simplificado semicuantitativo que es usado alternativamente.

Una vez que se han identificado todos los peligros y los riesgos han sido estimados y evaluados, se identificarán las acciones correctivas. La evaluación de riesgos debe ser, en general, un proceso continuo.

La seguridad en la etapa de construcción se encuentra en permanente evolución. Sirva como referencia el anexo del PMI recientemente incorporado al PMBOK en su revisión del año 2016 (PMBOK Guide, 2016), donde se incorporan en su apéndice 3 referencias de causas comunes de riesgos en la etapa de construcción para su uso por los equipos de gestión de proyectos o (Reese & Eidson, 2006), donde los autores proporcionan una guía para la eliminación de peligros relacionados con la seguridad y la salud laboral en relación al cumplimiento con OSHA 18001. También conviene mencionar en este punto la reciente edición de la norma ISO 45001 (ISO 45001, 2018) que sustituirá a OSHA 18001. De esta forma, es muy importante establecer los planes de seguridad en obra antes del inicio de los trabajos e identificar los roles y responsabilidades del personal involucrado y de las organizaciones participantes en el sitio. Se identifican y aprueban los planes de seguridad en obra, identificación de peligros y respuesta de emergencia de todos los subcontratistas. Durante la ejecución de los trabajos se establecen reuniones de seguridad en obra diarias y semanales, así como charlas a pie de obra siempre que se requiera por las necesidades y particularidades de los trabajos a realizar.

Análisis de Seguridad del Trabajo (JSA) y Exposición de Métodos (Method Statement)

La técnica más habitual usada en la identificación de peligros en la construcción es el Análisis de Seguridad en el Trabajo, que se conoce como JSA de sus siglas en inglés Job Safety Analysis. El método divide el alcance del trabajo en fases, las cuales serán a su vez subdivididas en tareas y actividades, de manera que dichas tareas y actividades se evalúan por separado. El nivel de riesgo de las actividades y tareas permite establecer los permisos de trabajo necesarios para cada una de tales actividades y tareas. Aquí también se

identificarán las medidas de mitigación necesarias para que el nivel de riesgo no supere el nivel ALARP.

También es usada la técnica del HAZCON (Crowther, 1996), (Alistair Gibb, Guido Simons, John Taylor, Mike Draper, Roy Greenslade, 2013), la cual se suele realizar en la etapa de ingeniería con objeto de que sus resultados se apliquen a los diseños y de este modo se puedan reducir los riesgos en etapas previas a la construcción. Suele constar de dos etapas, una primera más general donde, mediante listas de verificación, el equipo de construcción identifica los riesgos mayores del proyecto y una segunda etapa donde se proporciona una evaluación detallada de los riesgos de construcción cuando la ingeniería se encuentra muy avanzada o casi finalizada. Dado que el HAZCON utiliza listas de verificación para la identificación, es probable encontrar procedimientos corporativos en las compañías que no se designen específicamente con este nombre, pero cuya función sea la misma.

En la Exposición de Métodos (MS), se detallan como, cuando y porque deben ser implementadas las medidas de control identificadas en la evaluación de riesgos de JSA. Por tanto, el MS debe ser realizado después de la evaluación de riesgos de las tareas y actividades en las que se han descompuesto las fases de los trabajos de construcción, no antes.

Finalmente, para una gestión adecuada del riesgo se dispone de los elementos necesarios de control que aseguren que las medidas de mitigación del riesgo son adecuadas y siempre se encuentran activas. Así se tendrá en obra un *registro* de evaluación de riesgos, HAZID, HAZCON, JSA y de riesgos laborales, entre otros. También se dispone habitualmente de un procedimiento de gestión del cambio y un sistema de permisos de trabajo (WPS), donde se establezca qué trabajo se debe hacer, dónde y cuándo.

4.4 Fase de comisionado y puesta en servicio

La etapa más peligrosa en la construcción de una planta es la que se realiza durante su puesta en servicio. Lamentablemente, además de los peligros que se identifican en esta fase en cada una de las actividades, se suman de manera recurrente los retrasos acumulados en las fases previas del proyecto que incrementan el nivel de peligrosidad al sumar al peligro de las propias actividades de las pruebas y puesta en marcha, el nivel de estrés de los equipos del proyecto y la necesidad de “acortar” los plazos de esta fase. Es precisamente en esos momentos en los que la dirección de las pruebas debe ser más exigente en el cumplimiento de los protocolos y verificaciones requeridas para la ejecución de las actividades de esta etapa. Los operadores y técnicos deben poner en práctica todas sus capacidades y recursos para, precisamente, garantizar que todos los pasos requeridos en los protocolos de pruebas se realizan tal como es requerido en los procedimientos.

Normalmente, en los proyectos de construcción de centrales térmicas, la planta se divide en sistemas que cumplen una función determinada en la central. La estructura de trabajo en la planta se basa en el establecimiento de sistemas mecánicos, eléctricos y de I&C, los cuales se pueden construir completos o en subsistemas o “paquetes”, de tal manera que una vez finalizada la construcción, se elabora un dossier, donde se incluye toda la documentación del sistema durante la fase de construcción. Este dossier se denomina Paquete de Transferencia o ToP (Turn Over Package). En la planificación del proyecto es usual definir hitos de transferencia de ToPs que se consolidan en obra con una revisión del estado de los equipos, componentes y materiales según se encuentran instalados mediante una inspección conjunta

entre los responsables del montaje y pruebas en el emplazamiento (walkdown), que se realiza habitualmente con la presencia del cliente.

Los procedimientos de prueba constituyen el sistema de trabajo más metódico que garantiza una secuencia de trabajos y actividades segura y reduce los riesgos en esta fase y deben estar disponibles con tiempo suficiente para que los equipos de pruebas se puedan familiarizar con la central.

El sistema o procedimiento de ejecución de bloqueo y etiquetado, comúnmente conocido como LOTO (LockOut-TagOut), donde se establecen los requisitos que aseguren el aislamiento de fuentes peligrosas como eléctricas, químicas, térmicas, hidráulicas o neumáticas es también imprescindible para la seguridad de las operaciones de esta etapa.

5 Conclusión

En términos generales los proyectos de construcción de centrales de generación eléctrica incorporan en su sistema de gestión un sistema basado en riesgos en las diferentes etapas del ciclo de vida del proyecto. Sin embargo, atendiendo específicamente, a los estudios y análisis que se vienen implementando en otras industrias, el resultado aunque satisfactorio, muestra la respuesta reactiva del sector a la inclusión de los nuevos métodos de análisis que si se vienen implementando en otros sectores, como el del refino o el petroquímico, los cuales,

por su repercusión mediática y social son líderes en este campo. En la Tabla 2 se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 2. Comparativa Análisis de Riesgos. A partir de Apéndice A de (Center for Chemical Process Safety, 2019) **Elaboración propia**

Categoría Estudios de Riesgo	Industria	Fase del ciclo de vida del proyecto					
		Etapa de viabilidad		Etapa de Ingeniería		Construcción	Comisionado y Arranque de planta
		Estudios previos		Ingeniería Básica	Ingeniería Detalle		
		FEL-1 (Ident. Oportunidad)	FEL-2 (Fase Conceptual)	FEL-3(FEED)			
Plan HSE para el Proyecto	En todas las Industrias del comparativo	Se actualizan continuamente a lo largo del ciclo de vida del proyecto					
Registro de Riesgos							
Lista de seguimiento de acciones							
Identificación de Peligros	Generación Eléctrica	HAZID conceptual		HAZID Detallado	HAZOP	RA/MS JSA	JSA Check list
	Refino / Petroquímica / O&G *	HAZID preliminar	HAZID	Prelim HAZOP /What If /CheckList	HAZOP Final / What if /CheckList Actualiz Estudios Seguridad	JSA ORR*	Change mangmt temporally piping JSA ORR*
Evaluación de consecuencias	Generación Eléctrica						
	Refino/Petroquímica/ O&G		FSS/FEA preliminar FHA preliminar	FSS/FEA FHA SGIA / SIP	FSS/FEA ** FHA ** SGIA / SIP**		
Evaluación de la Seguridad	Generación Eléctrica			DHM preliminar HAC preliminar EER	DHM HAC RAM (ocasional) EER	Auditorias e Inspecciones	SIMOPS (ocasional)
	Refino/Petroquímica/ O&G	ISD preliminar	rev ISD preliminar DHM preliminar DB/PR/Flare preliminar SVA preliminar	ISD DHM HFA DB/PR/Flare RAM HAC preliminar SCE EER SVA SIMOPS preliminar Diseño "Casos de Seguridad" (Case for Safety) preliminar	ISD ** DHM ** HFA ** DB/PR/Flare ** RAM ** HAC ** SCE ** EER ** SVA ** SIMOPS Diseño "Casos de Seguridad" (Case for Safety)	SIMOPS ** Auditorias e inspecciones "Casos de Seguridad" (Case for Safety) Operacionales	SIMOPS ** Audits
Análisis de Riesgos	Generación Eléctrica	QRA preliminar			QRA	HRA	
	Refino/Petroquímica/ O&G	CRA	CRA revisado	QRA preliminar HRA	QRA	HRA	
Mitigación de riesgos	Generación Eléctrica				HAZOP/SIL (LOPA)	Emergency Response Plan	
	Refino/Petroquímica/ O&G		F&G preliminar ESD preliminar Fire Protection preliminar Emerg Response preliminar	LOPA SIS/SIL F&G ESD Fire Protection Emerg Response	LOPA ** SIS/SIL ** F&G ** ESD ** Fire Protection ** Emerg Respons **	Emergency Response **	
Revisiones de etapas de proyecto	Generación Eléctrica				Revisiones de Diseño	Revisión Construcción	PSSRs (muy ocasionalmente)
	Refino/Petroquímica/ O&G	Revision diseño conceptual	Revisión según selección	Revisión definición técnica	Revisiones de Diseño	Revisión de Construcción	PreStartup Safety Review (PSSR)

* Tomado de CCPS GUIDELINES FOR INTEGRATING PROCESS SAFETY INTO ENGINEERING PROJECTS

** Revisar según necesidades y avance de proyecto

Leyenda:

CRA: Concept Risk Analysis	HAC: Hazards Area Classification	RAM: Reliability, Availability and Maintainat
DHM: Design Hazard Management	HAZID: HAZards Identification study	RA/MS (RAMS): Risk Analysis/Method Stater
EER: Evacuation, Escape and Rescue study	HAZOP: HAZard and Operability study	SGIA: Smoke and Gas Ingress Analysis
ESD: Emergency Shut Down	HFA: Human Factors Analysis	SCE: Safety Critical Equipment/Element
FEL: Front End Loading	HRA: Hazards and Risk Analysis	SIP : Shelter In Place
FSS: Facility Siting Study	ISD: Inherently Safer Design	SVA: Security Vulnerability Analysis
FHA: Fire Hazard Analysis	JSA: Job Safety Analysis	ORR: Operational Readiness Review (Revisi
F&G: Fire and Gas	QRA: Quantitative Risk Analysis	

Se pueden extraer algunas conclusiones y propuestas de mejora, algunas de ellas muy representativas del estado del sector en la seguridad del proceso:

1. Se detecta una respuesta reactiva por parte del sector eléctrico a la adopción y adecuación de los sistemas y estándares de uso común en otras industrias de referencia. El sector va

incorporando de manera lenta y no siempre adecuada las mejoras y avances que en este campo lideran otros sectores industriales.

2. La incorporación de las prácticas de diseño inherentemente seguro en etapas tempranas del proyecto es un área en el que el sector eléctrico puede dar un paso para acercarse a los estándares de otros sectores. Aunque el diseño de áreas de la planta tiene en consideración la selección de diseños inherentemente más seguros, no se encuentra implementado como diseño prioritario y mandatorio, de modo que no se realizan justificaciones y estudios específicos para este fin. Podría incorporarse en la documentación la inclusión de un estudio específico que tratara estos asuntos muy relevantes para la seguridad de los procesos.
3. Sería muy conveniente implementar el análisis de factores humanos para revisar los riesgos y problemas relacionados con los factores humanos, respecto de la ergonomía física, el potencial del error humano y problemas tales como la priorización de alarmas, etiquetado, señalización, ruido e iluminación. Se abordarían de modo riguroso problemas como:
 - a) Interfases del operador con el sistema de control, tales como pantallas de operación, consideraciones para evitar la avalancha de alarmas y otros aspectos de la interfase hombre-maquina.
 - b) Marcado / etiquetado de equipos y tuberías
 - c) Rutas de salida y de evacuación de emergencia, eludir zonas de peligro mediante señalización adecuada
 - d) Sistema de comunicación adecuado. Calidad en las comunicaciones, sobre todo en áreas de mucho ruido. Específicamente señales de alarma.
 - e) Tiempo de respuesta de emergencia. Cálculo de tiempos requeridos por el operador para la realización de determinadas tareas críticas que pueden resultar determinantes en la prevención de accidentes.

Muchas de estas consideraciones se atienden en el diseño, o al menos, en partes del diseño, pero no se encuentra establecido la elaboración de un estudio específico de factores humanos, el cual sería muy bien recibido por los interesados en la construcción de este tipo de plantas.

4. Sería muy conveniente incorporar, como prácticas estándar, la elaboración de estudios específicos SIS/SIL y ESD. Esto simplificará y aclararía la puesta en práctica y cumplimiento de estándares IEC relacionados con estos estudios, los cuales por el momento no son realizados con la suficiente solvencia que se requiere por los clientes y promotores, los cuales por otra parte, tampoco disponen del necesario conocimiento para cumplir con dichos estándares y normas.

6 Referencias

- Al Saffar, I. Q., & Ezzat, A. W. (2020). Qualitative risk assessment of combined cycle power plant using hazards identification technique. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(2), 284-293.
- Alistair Gibb, Guido Simons, John Taylor, Mike Draper, Roy Greenslade. (2013). *Safety , Health & Environment (SHE) Management Guide (2nd Edition)* (European Construction Institute, Ed.). Great Britain.
- Benjamin, C. W., Goff, S., Hubbard, B., & Waller, R. (2008). NCB - USA National Competence Baseline v3.5. En American Society for the Advancement of Project Management (Ed.), *Ipma -Usa*.
- Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Siskos, P., & Kannavou, M. (2016). EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050. En *European Commission*. <https://doi.org/10.2833/9127>
- Center for Chemical Process Safety. (2008). *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures* (Third Edit; J. WILEY, Ed.). New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Center for Chemical Process Safety. (2019). *Guidelines for integrating process safety into Engineering Projects* (American Institute of Chemical Engineers, Ed.). New York, NY 10005: AIChE and John Wiley & Sons, Inc.
- Crawley, F. (2021). A Guide for Hazard Identification Methods. En Elsevier (Ed.), *IChemE*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819543-7.09995-x>
- Crowther, D. (1996). Total project management of construction safety, health and environment 2nd edition. *International Journal of Project Management*. [https://doi.org/10.1016/s0263-7863\(96\)90015-0](https://doi.org/10.1016/s0263-7863(96)90015-0)
- Dirección General de Protección Civil. (1994a). Guia Tecnica. Métodos cualitativos para el análisis de riesgos. *Protección Civil España*.
- Dirección General de Protección Civil. (1994b). Guia Técnica. Métodos cuantitativos para el análisis de riesgos. *Proteccion Civil España*.
- España Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. , BOE núm. 251, de 20 de octubre § (2015).
- IEC/ISO 31000. *UNE-ISO 31000 Gestión del riesgo. Directrices*. , (2018).
- IEC/ISO 31010. *UNE-EN 31010 Gestión del riesgo Técnicas de apreciación del riesgo*. , (2011).
- IEC60079-10-1. (2015). IEC 60079-10-1 Explosive atmospheres Part 10-1 : Classification of areas —. En *IEC 60079-10-1 :2015*.
- INSHT. (1993). NTP 330 : Sistema simplificado de evaluación de riesgos de accidente. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, 7.
- INSHT. (2000). Evaluación de Riesgos Laborales INSHT. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, 1-13.
- International Energy Agency. (2020). Key World Energy Statistics 2020. En *Int. Energy Agency* (Vol. 33). Recuperado de <https://webstore.iea.org>
- ISO 150008. *UNE ISO 150008 Análisis y evaluación del riesgo ambiental*. , (2008).
- ISO 45001. (2018). Sistemas de gestion de la seguridad y salud en el trabajo. ISO

45001:2018. *Secretaría Central del ISO en Ginebra, Suiza.*

James Brown & Michael Martin. (2008). Comprehensive review of potential hazards and operational safety designed into power plants is becoming more common. *Power Engineering*, pp. 156-162.

Melani, A. H. A., Murad, C. A., Caminada Netto, A., Souza, G. F. M. de, & Nabeta, S. I. (2018). Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant. *Energy*, 147, 767-781. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.048>

Musyafa, A., & Adiyagsa, H. (2012). Hazard and Operability study in Boiler System of The Steam Power Plant. *International Journal of Science and Technology (IJSTE)*, 1(3), 1-10.

National Fire Protection Association - NFPA. (2017). NFPA 70. National Electrical Code (NEC). En *NFPA 70: National Electrical Code*.

PMBOK Guide. (2013). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (Fifth edit). Pennsylvania 19073-3299 USA: Project Management Institute, Inc.

PMBOK Guide. (2016). *Construction Extension to the PMBOK® Guide*. Pennsylvania 19073-3299 USA: Project Management Institute, Inc.

Rathod, R., Gidwani, G. D., & Solanky, P. (2017). Hazard analysis and risk assesment in Thermal Power Plant. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 177(7), 177-185. <https://doi.org/10.5281/zenodo.823080>

Reese, C. D., & Eidson, J. V. (2006). *Handbook of OSHA Construction Safety and Health* (second edi; Taylor & Francis Group, Ed.). <https://doi.org/10.1201/9781420006230>

Ruiz Gimeno, J., Garcés de Marcilla Val, A., Miñana Aznar, A., González Ferradás, E., Cano Sarabia, A. M., & Martínez Alonso, J. (2005). *Casos prácticos de análisis de riesgos (en establecimientos afectados de nivel inferior, en el ámbito del Real Decreto 1254/1999 [Seveso II])* (Proteccion Civil España, Ed.). Proteccion Civil España y Universidad de Murcia.

Unión Europea. Directiva 2012/18/UE relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. , Diario Oficial de la Unión Europea (2012) 1-37 §.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

[Sustainable Development Goals](#)

