

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE CONDICIONES ELECTROSTÁTICAS COMO
FUENTE DE IGNICIÓN EN PROCESOS DE TRANSPORTE Y
ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS**

**VIVIANA ANDREA GARCÍA DUARTE
YEINY YARETH NÚÑEZ HERRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2009

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE CONDICIONES ELECTROSTÁTICAS COMO
FUENTE DE IGNICIÓN EN PROCESOS DE TRANSPORTE Y
ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS**

**VIVIANA ANDREA GARCÍA DUARTE
YEINY YARETH NÚÑEZ HERRERA**

**Trabajo de grado como requisito para optar al título de
Ingeniero de Petróleos**

**Director
ING. CESAR AUGUSTO PINEDA GÓMEZ
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2009

DEDICATORIA

A **DIOS**, tú que nos diste el don de la vida y llenas nuestros días de innumerables maravillas.

Igualmente, a mis Padres, **HUGO GARCÍA** y **HERCILIA DUARTE** por su amor, apoyo, paciencia y confianza

A mis hermanos **HUGUITO**, **OSCAR** y **JOHANNA**, que me han acompañado siempre llenando de alegría y amor mi vida

A mis hermosos sobrinos **ALEJO**, **SOFI**, **JUAN CAMILITO** y **LUCAS**, quienes con sus vidas llenas de dulzura e inocencia me hacen más felices mis días.

Gracias **MÓNICA**, **MARCE** y **JOHN**, por hacer parte de mi familia.

A **CARLOS ANDRÉS AYALA MARÍN**, por acompañarme y apoyarme en todo momento, gracias por estar junto a mí y hacerme feliz

A **YEINY NÚÑEZ** por compartir junto a mí momentos difíciles durante mi carrera.

Y a mis grandes amigos **MARTHA**, **CAMILA**, **LEICY**, **ANA MARÍA**, **MIGUEL** y **LAU PÉREZ**. Gracias por compartir conmigo momentos inolvidables.

Viviana Andrea García Duarte

DEDICATORIA

A **DIOS**, por darme la luz y sabiduría para salir adelante y sobre todo por llenarme de mil bendiciones a cada momento.

A mi madre **MARÍA HELENA HERRERA** por sus consejos, su paciencia, su amor y sobre todo por estar a mi lado.

A mi tía **GERTRUDIS** y **ARGEMIRO** que se convirtieron en mis segundos padres, sin su apoyo no podría haber alcanzado este logro en mi vida.

A mis hermanos **NANCY** y **CARLOS**, a mis primitos **ANGÉLICA**, **LUCERO** y **JUAN** por su cariño.

Al Ingeniero **LAUREANO JIMÉNEZ CASTRO** en quien siempre encontré una mano amiga, sincera y leal.

A **OSCAR GÓMEZ** por ayudarme a ser valiente y aprender de las derrotas y triunfos.

A mi Compañera **VIVIANA** por hacerme reír tanto.

A todos mis Compañeros que en toda la Carrera me ayudaron y, también, a todos los que no creyeron en mí pues fueron un motivo para seguir.

Yeiny Yareth Niñez Herrera

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan sus agradecimientos:

En especial, al Ingeniero **CESAR AUGUSTO PINEDA GÓMEZ**, por confiar en nosotras y brindarnos su dirección, colaboración y respaldo para el cumplimiento de los objetivos del trabajo de investigación.

A la Ingeniera **LEYLA ROJAS**, por compartir sus conocimientos y experiencias, que fueron de gran utilidad en el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero **HUGO GARCÍA DUARTE**, por el tiempo prestado y la colaboración brindada durante el desarrollo de nuestro proyecto.

Y a los Compañeros con quienes compartimos en la Universidad.

CONTENIDO

	pág.
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.1.1 Objetivo General.	1
1.1.2 Objetivos Específicos.	1
1.2 ANTECEDENTES DEL PROYECTO	2
1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE IGNICIÓN	4
1.4 DESCRIPCIÓN DE RIESGOS RELACIONADOS CON ELECTROSTÁTICA	5
2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL FENÓMENO DE LA ELECTROSTÁTICA COMO FUENTE DE IGNICIÓN	10
2.1. CONDICIONES PARA LA IGNICIÓN	10
2.1.1. Condiciones de Combustible.	12
2.1.1.1 Gases.	12
2.1.1.2 Líquidos y Vapores / Líquidos.	14
2.1.1.3 Productos Químicos.	17
2.1.1.4 Sólidos.	18
2.1.2. Condiciones del Ambiente.	18
2.1.3 Fuentes de Ignición.	20
2.2. PROPIEDADES COMBUSTIBLES DE LOS HIDROCARBUROS	21
2.2.1 Límites de Inflamabilidad.	21
2.2.2. Energía Mínima de Ignición.	26
2.2.2.1 Determinación de la Energía Mínima de Ignición (EMI).	29
2.2.2.2 Concentración Límite de Oxígeno y sus Efectos en EMI.	30
2.2.3 Temperatura de Autoignición (TAI).	31

2.3. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA TENDENCIA A LA CARGA DE LOS HIDROCARBUROS	36
2.3.1 Flujo y Velocidad Rotatoria.	36
2.3.2 Temperatura.	36
2.3.3 Contenido de Agua.	38
2.3.4 Envejecimiento.	39
2.3.5 Efectos de los Aditivos Antiestáticos.	39
3. GENERACIÓN Y ACUMULACIÓN DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS	41
3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTRICIDAD	41
3.2 MATERIALES CONDUCTORES VS. MATERIALES AISLANTES	41
3.3. PROCESOS DE GENERACIÓN DE CARGA	43
3.3.1 Electrificación por Contacto o Carga de Doble Capa.	43
3.3.2 Separación de Cargas.	45
3.4 RELAJACIÓN DE CARGA	47
3.5 CARGA DE LÍQUIDOS EN MOVIMIENTO	47
3.6. CARGA DE GASES	51
3.6.1 Autoignición de Gases Premezclados.	52
3.7 CARGA DE SÓLIDOS	54
3.8. REDUCCIÓN EN LA TENDENCIA DE LA CARGA	55
3.8.1 Disminución del Área Interfacial de Contacto.	56
3.8.2 Uso de Series Triboeléctricas.	56
3.8.3 Reducción de la Resistividad de la Superficie.	57
3.9. ACUMULACIÓN DE CARGA ELECTROSTÁTICA	58
3.9.1 Acumulación en Sólidos.	58
3.9.2 Acumulación en Líquidos.	59
3.9.3 Acumulación en Polvos.	59
3.9.4 Acumulación en Conductores Aislados.	59

4. LA DESCARGA ELECTROSTÁTICA: UNA FUENTE DE IGNICIÓN	61
4.1 VALORACIÓN DEL POTENCIAL DE LA ELECTROSTÁTICA COMO FUENTE DE IGNICIÓN	62
4.2 MECANISMO DE DESCARGA	63
4.3. TIPOS DE DESCARGA	64
4.3.1 Descarga de Corona.	65
4.3.2. Descargas Radiantes.	66
4.3.3 Descarga radiante mejorada.	69
4.3.4 Descarga de Cono o Volumétrica.	70
4.3.5 Descarga Radiante de Propagación.	72
4.3.6 Descarga de Chispa.	74
4.4 VALORACIÓN DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS COMO CAUSA DE IGNICIÓN	75
5. MEDIDAS PREVENTIVAS Y DE SEGURIDAD	78
5.1. PRECAUCIONES GENERALES	80
5.1.1 Razones Técnicas, Administrativas y Organizacionales.	80
5.1.2 Conflictos en los Requerimientos de Seguridad.	81
5.2. MÉTODOS COMUNES PARA EL CONTROL DE LA ELECTROSTÁTICA	82
5.2.1 Control al Ambiente.	82
5.2.2. Recomendaciones Asociadas con la Presencia de Mezclas Vapor / Aire.	83
5.2.2.1 Productos de Presión de Vapor Baja.	84
5.2.2.2 Productos de Presión de Vapor Intermedia.	85
5.2.2.3 Productos de Presión de Vapor Alta.	86
5.2.3 Método de Conexión a Tierra.	87
5.2.4 Método de Enlace.	88
5.2.5 Reducción de la Generación de Cargas.	89

5.2.6 Incremento de la Disipación de Cargas.	90
5.2.7 Protección Contra Rayos.	91
5.2.8 Diseño de Equipos Para Instalaciones de Alto Riesgo Electrostático.	92
5.3 MEDICIÓN DE LA ELECTROSTÁTICA	92
5.4 MEDIDAS PREVENTIVAS PARA EL MANEJO DE CONTAMINANTES DE LÍQUIDOS	94
5.5. PRECAUCIONES PARA EVITAR LA CARGA DE LA ROPA Y DEL CUERPO	95
5.5.1 Qué Hacer y Qué No Hacer Para Prevenir Descargas Electrostáticas.	96
5.5.2 Choque Eléctrico.	97
5.5.3 Protección Contra el Choque Eléctrico.	99
5.6 ENTRENAMIENTO DEL PERSONAL	100
CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES	105
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXOS	109

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Clasificación de las Fuentes de ignición identificadas	2
Figura 2. Escenarios más susceptibles a incidentes	3
Figura 3. Proceso de Electricidad	7
Figura 4. a) Componentes necesarios para una explosión, b), Triángulo de fuego simplificado, c) Triángulo de fuego expandido	11
Figura 5. Concentración de vapor % (Vol.) Vs. Presión de etanol en función de la Temperatura	15
Figura 6. Mezclas de aire identificadas como combustibles	19
Figura 7. Relación entre los límites de inflamabilidad del metano en aire y la presión.	24
Figura 8. Efecto de la temperatura sobre los límites de inflamabilidad de n-decano	25
Figura 9. Detección de EMI en presencia de concentración de combustible	27
Figura 10. Temperatura de autoignición de los hidrocarburos a presión atmosférica	32
Figura 11. Temperatura de auto-ignición para el hidrocarburo n- alcano en aire, en función del número de átomos de carbono	33
Figura 12. Efectos de la concentración sobre la temperatura de auto- ignición para el metano tomando dos volúmenes de referencia	34
Figura 13. Efecto del volumen sobre la temperatura de auto-ignición para varios gases y vapores	35
Figura 14. Efectos de la temperatura y el caudal	37
Figura 15. Variación de la tendencia a la carga en aceite	37
Figura 16. Variación con el contenido de agua	38
Figura 17. Efectos del envejecimiento del aceite	39

Figura 18. Electrificación por contacto	44
Figura 19. Separación de cargas	45
Figura 20. Campo eléctrico entre un objeto cargado y una descarga de corona de punto con polo a tierra	65
Figura 21. Campo eléctrico entre un objeto cargado y una descarga corona de esfera con polo a tierra	67
Figura 22. Tubos “plásticos” cargados en contenedores “plásticos”	69
Figura 23. Proceso de carga de doble capa que ocurre cuando un aislante está colocado adyacente a un conductor de puesta a tierra	72
Figura 24. Carga de doble capa que ocurre cuando un aislante esta junto a un conductor de puesta a tierra	75
Figura 25. Relación entre la temperatura, la presión de vapor de Reid y los límites de inflamabilidad del los productos del petróleo	85

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Estrategias para el análisis de las fuentes de ignición	8
Tabla 2. Energías mínimas de ignición	28
Tabla 3. Conceptos básicos y relevantes sobre electrostática	42
Tabla 4. Conductividad eléctrica de los líquidos más comunes	49
Tabla 5. Comportamiento incendiario de distintos combustibles por descargas	63
Tabla 6. Fuentes de ignición y energía de ignición de los materiales eléctricos	79

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. DETECCIÓN DE INSTALACIONES DE ALTO RIESGO	110
ANEXO B. MÉTODOS PRÁCTICOS PARA LA VALORACIÓN DE LA POSIBILIDAD DE PRESENCIA ELECTROSTÁTICA	116

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE CONDICIONES ELECTROSTÁTICAS COMO FUENTE DE IGNICIÓN EN PROCESOS DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS

AUTORES: GARCÍA DUARTE, Viviana Andrea, y, NÚÑEZ HERRERA, Yeiny Yareth **

PALABRAS CLAVES: Ignición, electrostática, cargas eléctricas, descargas eléctricas y medidas de seguridad.

DESCRIPCIÓN:

En la industria de los hidrocarburos, durante las operaciones de almacenamiento y transporte de fluidos, se presentan frecuentemente escenarios que propician la existencia de ambientes peligrosos para continuar con las actividades rutinarias que demanda el sector; factores como altas concentraciones de componentes volátiles, la generación de chispas por acción mecánica, superficies calientes o condiciones electrostáticas, entre otras, dan lugar a la ocurrencia de incidentes con graves repercusiones económicas, operativas y de salud para el personal involucrado, (en base a un estudio realizado a cuarenta incidentes reportados a nivel mundial, un grupo de expertos en análisis de riesgos operacionales concluyó que el 22% de estos incidentes se debieron a la presencia de electrostática como fuente de ignición).

De todos estos factores, hasta el momento al que menos atención se le ha prestado, es al fenómeno electrostático, lo que a su vez, ha incidido en que al personal que labora en esta área industrial se le brinde muy poca capacitación e información al respecto. Sin embargo, resulta relevante brindarle mayor cuidado, ya que muchos estudios y análisis de casos conocidos en la literatura, no se ajustan a ninguna de las demás situaciones expuestas, a un punto tal que se tiende a concluir que la fuente de ignición que generó determinado accidente corresponde a este fenómeno, sin describir en detalle sus causas.

Mediante el desarrollo de este proyecto se plantea identificar y analizar todo tipo de condiciones que puedan afectar la tendencia a la carga e ignición de los hidrocarburos, desde la generación de las cargas hasta la descarga eléctrica, asociadas a fenómenos electroestáticos. Una vez establecidas las variables relacionadas con este problema se buscará proponer posibles estrategias de control para evitar la presencia de la electrostática en estas operaciones y/o se describirán recomendaciones en aquellas situaciones donde su presencia sea inevitable.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Cesar Augusto Pineda Gómez.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE ELECTROSTATIC CONDITION'S INFLUENCE AS A SOURCE OF IGNITION, ON THE TRANSPORT AND STORAGE OF HYDROCARBONS

AUTHORS: GARCÍA DUARTE, Viviana Andrea, y, NÚÑEZ HERRERA, Yeiny Yareth **

KEY WORDS: Ignition, electrostatic, electric charges, Discharge, safety measures.

DESCRIPTION:

The oil and gas industry has experienced a number of serious fires and explosions resulting in worker injuries and fatalities, a significant number of fires and explosions are attributed to static electricity as an ignition source. Unfortunately static ignition of explosive mixtures in the oil and gas industry is not well understood. The impact of charge build up and subsequent discharges as an ignition hazard of vapours, flammable gases, powders, liquids, solids and hybrid mixtures is well known in the oil and gas industry.

From the first step of the research, it can be concluded that there is a lack of information and understanding regarding fire and explosion hazards. In the case of electrostatic fields, there is little to no education on the fundamental principles of the origin of static electricity. Owing to the seemingly mysterious nature of this phenomenon, for many fire and explosions incidents, static electricity is often blamed when no obvious cause can be identified.

Understanding of the static electricity process requires knowledge of some basic concepts and the conditions that make the phenomenon a likely ignition source for fires and explosions in oil operations. For this reason Section 2 is dedicated to presenting important preliminary concepts such as flammability limits and minimum ignition energy (MIE), the conditions required for ignition to occur, and the external parameters that may affect the charging tendency of hydrocarbons, there are four conditions or stages that can lead to an electrostatic charge becoming a source of ignition.

* Grade Project.

** Physical Chemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: Eng. Cesar Augusto Pineda Gómez.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General.

- Analizar la influencia de condiciones electrostáticas como fuente de ignición en procesos de transporte y almacenamiento de hidrocarburos.

1.1.2 Objetivos Específicos.

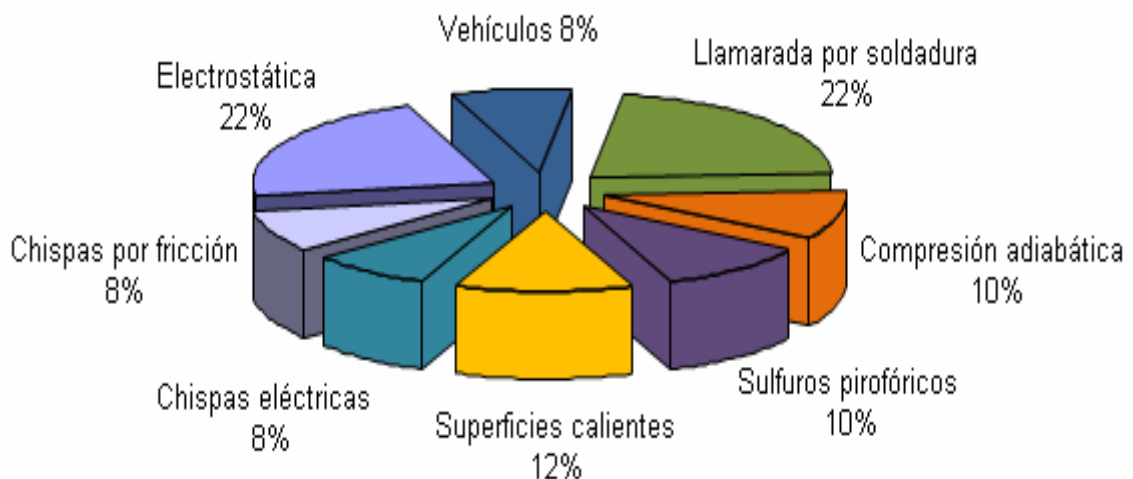
- Estudiar y analizar los cambios en las propiedades de los fluidos hidrocarburos bajo las condiciones establecidas por los procesos de transporte y almacenamiento.
- Evaluar la incidencia de las condiciones, variables y parámetros que generan cargas eléctricas durante las operaciones de transporte y almacenamiento de hidrocarburos.
- Identificar variables de control para evitar la presencia de estas condiciones en ambientes en donde exista una potencial fuente de ignición.
- Proponer recomendaciones para casos particulares en donde la presencia de equipos, herramientas y/o factores que generen el fenómeno no se puedan evitar.

1.2 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

En la industria de los hidrocarburos, durante las operaciones de almacenamiento y transporte de fluidos, se presentan frecuentemente escenarios que propician la existencia de ambientes peligrosos, inseguros y poco apropiados para continuar con las actividades rutinarias que demanda el sector.

Factores como altas concentraciones de componentes volátiles, la generación de chispas por acción mecánica, superficies calientes, materiales eléctricos, polvos en suspensión o condiciones electrostáticas, entre otras, dan lugar a la ocurrencia de incidentes con graves repercusiones económicas, operativas y/o de salud para el personal involucrado, *(en base a un estudio realizado a cuarenta incidentes reportados a nivel mundial, un grupo de expertos en análisis de riesgos operacionales concluyó que el 22% de estos incidentes se debieron a la presencia de electrostática como fuente de ignición).* (Ver Figura 1)

Figura 1. Clasificación de las Fuentes de ignición identificadas



Fuente: Study By IRP 18 Committee, Conducted Research To Technically Support The Possible Causes Of Fire And Explosion Incidents. Universidad de Calgary. 2008.

Los 40 incidentes se agruparon en tres (3) categorías principales: operaciones de perforación y completamiento, operaciones de transporte y almacenamiento y operaciones generales, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Escenarios más susceptibles a incidentes



Fuente: Study By IRP 18 Committee, Conducted Research To Technically Support The Possible Causes Of Fire And Explosion Incidents. Universidad de Calgary. 2008.

De todos estos factores, hasta el momento al que menos atención se le ha prestado, es al fenómeno electrostático como fuente de ignición, lo que a su vez, ha incidido en que al personal que labora en esta área industrial se le brinde muy poca información y capacitación al respecto.

Sin embargo, resulta relevante brindarle mayor cuidado, en la medida en que muchos estudios y análisis de casos conocidos en la literatura, no se ajustan a ninguna de las demás situaciones expuestas, a un punto tal que se tiende a concluir sencillamente que la fuente de ignición que generó determinado accidente corresponde a este fenómeno, sin describir en detalle sus causas.

El comprender todos los componentes que intervienen en esta situación, requiere del conocimiento de aspectos relativamente complejos para individuos no familiarizados con la terminología, los materiales y procesos involucrados, tales como, diferentes tipos de materiales conductores, la física de la carga estática y los campos eléctricos, así como del análisis de las condiciones operativas típicas en actividades de almacenamiento y transporte de hidrocarburos.

Mediante el desarrollo de este proyecto se plantea identificar y analizar todo tipo de parámetros y condiciones que puedan afectar la tendencia a la carga e ignición de los hidrocarburos, desde la generación de las cargas hasta la descarga eléctrica, asociadas a fenómenos electroestáticos. Una vez establecidas las variables relacionadas con este problema se buscará proponer posibles estrategias de control para evitar la presencia de la electrostática en estas operaciones y/o se describirán recomendaciones en aquellas situaciones donde su presencia sea inevitable.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE IGNICIÓN

El análisis del estudio de los casos confirmó la necesidad de clasificar las fuentes de ignición identificadas a fin de comprender mejor este fenómeno y promover una mayor conciencia de los riesgos de incendio y explosión involucrados en la planificación y ejecución de las operaciones sobre el campo petrolero.

Finalmente, estas fuentes de ignición se clasificaron y agruparon en cuatro categorías principales:

- Fuentes de ignición relacionadas con la electrostática, atribuidas principalmente al conjunto de fenómenos asociados con la aparición de una

carga eléctrica en la superficie de un cuerpo aislante o de un cuerpo conductor aislado.

- Fuentes de ignición relacionadas con las reacciones químicas derivadas principalmente de tres fuentes: reacciones pirofóricas, reacciones hipergólicas y reacciones catalíticas.
- Fuentes de ignición relacionadas con las presiones, en particular por los rápidos procesos de compresión o descompresión.
- Las fuentes térmicas de ignición, tales como las superficies calientes, calentamiento espontáneo, gases calientes y radiación térmica.

Una vez que la clasificación se llevó a cabo, una estrategia para el análisis de cada una de las categorías se ha desarrollado. Esta estrategia se presenta en detalle en la Tabla 1, que se incluye al final de esta sección.

1.4 DESCRIPCIÓN DE RIESGOS RELACIONADOS CON ELECTROSTÁTICA

Un número significativo de incendios y explosiones se atribuyen a la electrostática como una fuente de ignición, lamentablemente este fenómeno no es muy bien comprendido en la industria de los hidrocarburos.

Desde el primer paso de la investigación, se puede concluir que existe una falta de información acerca de los riesgos de accidentes. En el caso de los campos electrostáticos, hay poca o ninguna educación sobre los principios fundamentales del origen de este fenómeno.

Aparentemente debido a la misteriosa naturaleza de este fenómeno, para muchos incidentes de incendios y explosiones, la electrostática es a menudo señalada como causa obvia cuando no se puede identificar.

A fin de comprender el alcance del peligro y las maneras de controlarlo, es necesario tener en cuenta algunos conceptos fundamentales y condiciones que hacen que este fenómeno sea considerado una probable fuente de ignición y las formas bajo las cuales se manifiesta en las operaciones del sector petrolero. En cualquier proceso industrial en el cual hay movimiento, se generará estática por el contacto y la separación de los materiales. Puede tratarse de un líquido que fluye por un tubo, un polvo en suspensión, un proceso de mezclado o una persona que camina sobre el piso.

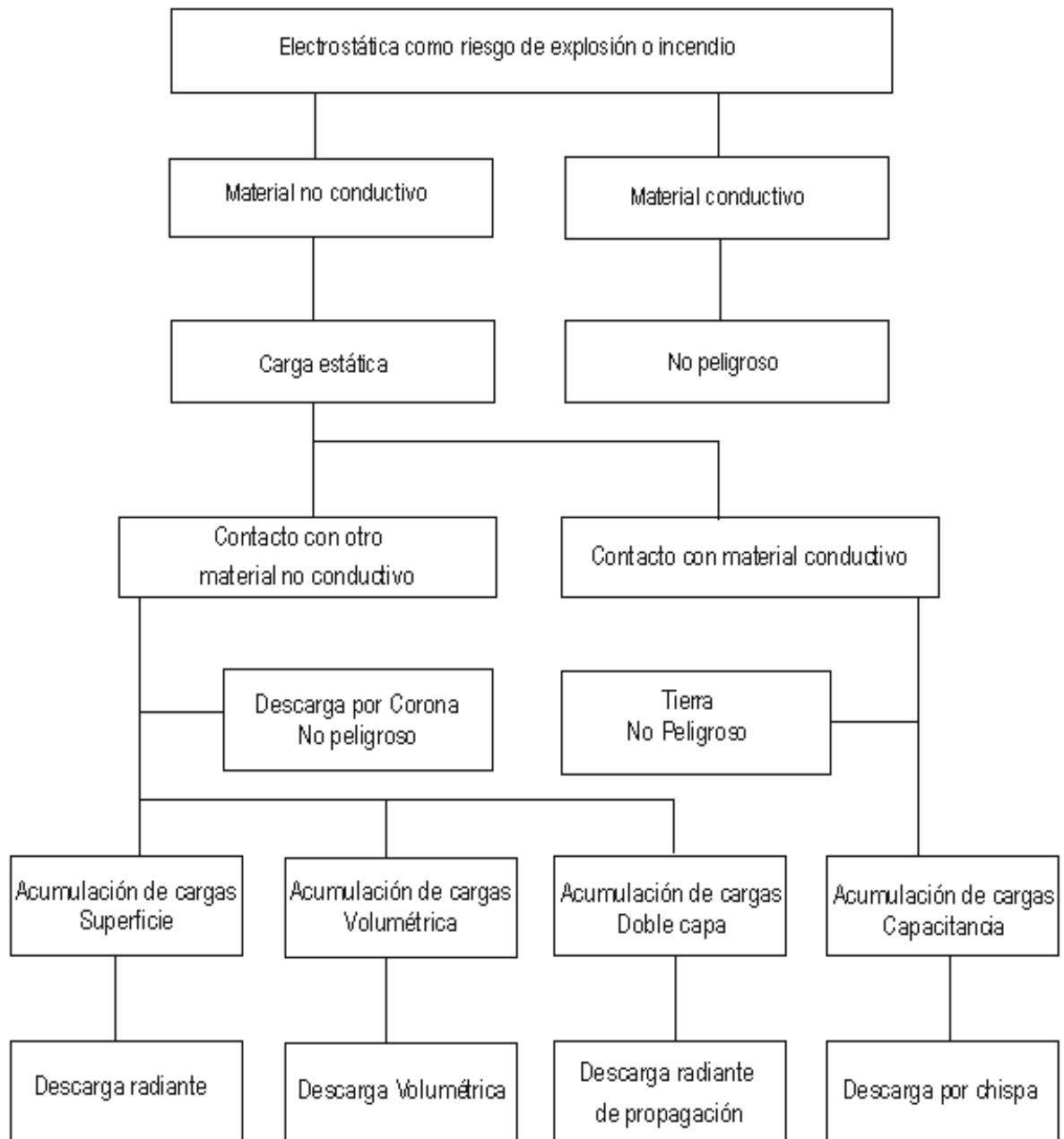
Por esta razón, la sección 2 está dedicada a la presentación de conceptos importantes tales como límites de inflamabilidad, energía mínima de ignición (*EMI*), condiciones necesarias para que se produzca la ignición, y parámetros externos que pueden conllevar a la tendencia a la carga de hidrocarburos. Hay cuatro condiciones o etapas que pueden conducir a una carga electrostática convirtiendo este fenómeno en una potencial fuente de ignición.

1. Existencia de un medio generador de cargas electrostáticas.
2. Acumulación suficiente de carga.
3. Descarga capaz de producir chispas.
4. Presencia de una mezcla inflamable susceptible de ignición.

La Figura 3 resume el proceso de la electrostática. Este proceso se presenta de manera detallada en las secciones 3 y 4. Los principales conceptos mencionados

en la Figura 3 se explican en detalle en la sección 2. Y en la sección 5 se presentan algunos métodos para controlar la generación y la acumulación de las cargas y su aplicación a las operaciones del sector de los hidrocarburos.

Figura 3. Proceso de electricidad



Fuente: LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Electrostatic Hazards". Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 1997.

Tabla 1. Estrategias para el análisis de las fuentes de ignición

Categoría	Definición General	Sub-Clasificación	Estrategias recomendadas
Electrostática	Para generar cargas electrostáticas es suficiente el contacto o fricción y la separación entre dos materiales generalmente diferentes.	Mediante el análisis del proceso electrostático, fueron identificados el conjunto de fenómenos asociados con la aparición de una carga eléctrica en la superficie de un cuerpo aislante de un cuerpo conductor aislado.	<ul style="list-style-type: none"> • Analizar el fenómeno mediante el proceso electrostático, estudiando las condiciones para que una carga de esta naturaleza se convierta en una potencial fuente de ignición (generación de cargas electrostáticas, acumulación y descarga.) • Evaluar los procedimientos para las operaciones petroleras teniendo en cuenta el riesgo de la presencia de electrostática como fuente de ignición en la generación de incidentes. • Por último revisar documentos de seguridad recomendados y procedimientos para manejar y controlar efectivamente las operaciones que impliquen un alto riesgo.
Químicos	Ocurre cuando sólo el calor producido por una reacción química genera ignición, incluso por debajo de la temperatura ambiente.	Reacción Pirofórica	<p>La principal fuente de este tipo de reacción en las operaciones petroleras es la presencia de compuestos químicos pirofóricos tales como el sulfuro de hierro. Para entender mejor estos productos químicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analizar la formación de sustancias pirofóricas (sulfuro de hierro): corrosión como fuente de óxido, condiciones anaeróbicas, rangos de temperatura y concentración de oxígeno necesaria. • El estudio de operaciones donde comúnmente se puede presentar: equipos de proceso y equipos de almacenamiento • Documento de los métodos para el manejo o manipulación de estos químicos: uso de una planta de gas inerte, compactación y saturación de crudo con sulfuros de hierro para prevenir las reacciones pirofóricas.
		Reacción hipergólica	<ul style="list-style-type: none"> • No es muy probable que ocurra en las operaciones petroleras; sin embargo, algunos cohetes tipo combustibles han sido utilizados para mejorar la permeabilidad en arenas apretadas.
		Reacción catalítica	<ul style="list-style-type: none"> • Comprensión del proceso de las reacciones catalíticas: difusión del reactante en la superficie del catalizador, formación de la molécula compleja (catalizador-reactante), la reacción química, y difusión de los productos. • Análisis del efecto del catalizador de ignición al aumentar la concentración de combustible: principalmente en la temperatura de ignición. • Analizar las auto-reacciones catalíticas, comunes en plantas químicas que producen sustancias líquidas.

Categoría	Sub-Clasificación	Definición General	Estrategias recomendadas
Fuentes de ignición generadas por efectos de presión	Efecto Dieseling	Se presenta por un aumento de la temperatura generado a partir de la presión de desequilibrio entre la tasa de calor generada por un gas comprimido y la tasa de pérdida de calor dentro de un sistema.	<ul style="list-style-type: none"> • Comprensión del proceso • Análisis de cada uno de los requisitos (combustible, aire y condiciones de presión) • Análisis de operaciones que impliquen efecto.
	Descompresión súbita	A partir de la oxidación de hidrocarburos líquidos en presencia de aire se forman hidroperóxidos, aldehídos, cetonas. La descomposición de estos productos puede proporcionar una fuente de encendido por la mezcla.	Debido a que este es un proceso no muy bien comprendido, es necesario analizar los productos formados: sus características químicas y físicas.
Fuentes térmicas de ignición	<ul style="list-style-type: none"> • Superficies calientes. • Gases calientes. • Radiación térmica. • Auto-calentamiento 	Ocurre en operaciones donde se produce suficiente calor a partir de llamas, o cualquier otra fuente de ignición, generando una cantidad de energía suficiente para encender vapores inflamables, gases o polvo.	Este es un fenómeno bien documentado que requeriría la revisión de la base teórica y el análisis de su aparición en las actividades petroleras.

Fuente: Autores del Proyecto.

2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL FENÓMENO DE LA ELECTROSTÁTICA COMO FUENTE DE IGNICIÓN

2.1. CONDICIONES PARA LA IGNICIÓN

“La combustión de compuestos combustibles ocurre entre las partículas más pequeñas del combustible y el oxígeno”.¹

Cuando se trata de combustibles líquidos, éstos dependiendo de la temperatura y del punto de inflamación de cada uno de ellos, pueden formar mezclas explosivas vapor/aire, por su fácil proceso de vaporización.

Sin embargo en el caso de los combustibles sólidos es necesario romper los enlaces químicos de hidrocarburos a fin de que sus moléculas libres reaccionen con el oxígeno.

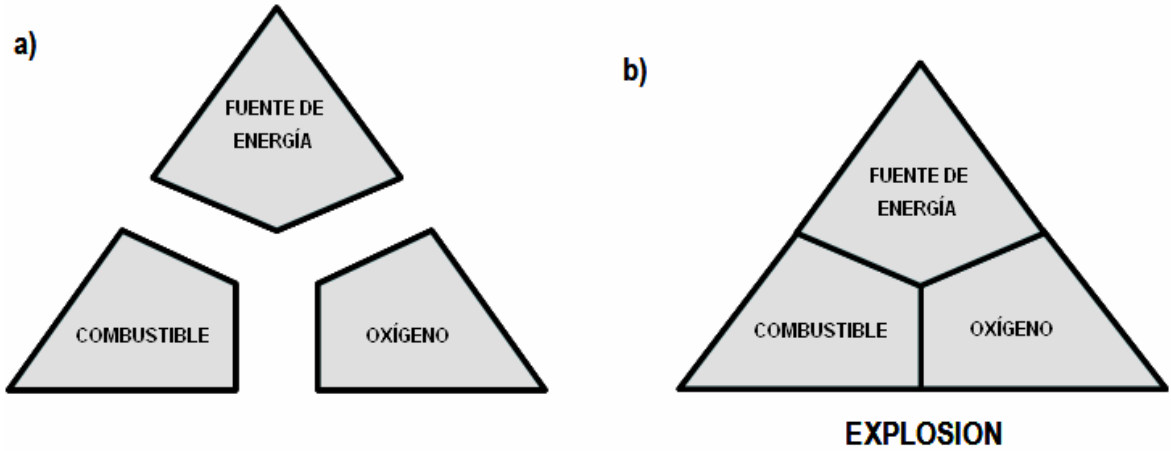
Básicamente, un incendio o una explosión se producen cuando el combustible, el oxígeno y una fuente de energía coexisten en lo que se conoce como el "triángulo de fuego".

La Figura 4 muestra los tres componentes del triángulo del fuego.

La ampliación de este se muestra en la Figura 4 c.

¹ LUTTGENS, Günter; WILSON, N. “Collection of Accidents Caused by Static Electricity”. Journal of Electrostatics. 1985. p. 247–255. 16 p.

Figura 4. a) Componentes necesarios para una explosión, b), Triángulo de fuego simplificado, c) Triángulo de fuego expandido

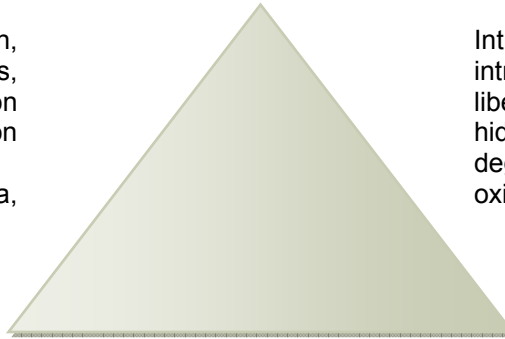


Fuente de ignición

Electrostática, fricción, reacciones químicas, fuentes de ignición térmicas, combustión espontánea, descompresión súbita, superficies calientes

Oxígeno y aire

Introducción de aire, introducción de oxígeno, liberación de hidrocarburos en el aire, degradado de líquidos y oxidantes.



Combustibles e Hidrocarburos

Hidrocarburos pesados y livianos, gases, líquidos, vapores de hidrocarburos, productos químicos y lubricantes, disolventes, fluidos de fracturamiento y materiales inflamables.

Fuente: ROBBINS, Hackett. Manual de Seguridad y Primeros Auxilios. México D.F.: Editorial Alfa S.A. de C.V. 1993. p. 77-87.

Si bien es cierto, que si uno de estos componentes está ausente el riesgo desaparece, al mismo tiempo, lo es el hecho que la presencia simultánea de los tres componentes no siempre conduce a la combustión.

2.1.1. Condiciones de Combustible. En el sector petrolero, se hacen presente una gran variedad de formas obvias y no tan obvias de fluidos hidrocarburos, estos pueden clasificarse en cuatro principales grupos: gases, vapores/líquidos, productos químicos y sólidos; una característica común entre estas sustancias es que la combustión se mantiene sólo dentro de un cierto rango de inflamabilidad.

2.1.1.1 Gases. Para que un gas sea explosivo, este debe mezclarse con aire u oxígeno. La fuerza de una explosión de gas/aire depende de la ubicación de la mezcla en la envolvente de inflamabilidad. Las siguientes son consideraciones especiales para gases hidrocarburos comúnmente encontrados en la industria de petrolera.²

- **Gas natural:** aunque su composición varía en función del yacimiento del que se extrae, está compuesto principalmente por metano en cantidades que comúnmente pueden superar el 87 ó 95%, y suele contener otros gases como nitrógeno, CO₂, H₂S, helio y mercaptanos. Cuando el gas natural no contiene ningún porcentaje de sulfuro de hidrógeno, se considera ácido. Por su gran contenido de metano las propiedades del gas natural son muy similares a este compuesto, tendiendo en muchos casos a suponerse que se comportan igual.
- **Sulfuro de Hidrógeno (H₂S):** es muy tóxico y explosivo. A condiciones atmosféricas, su rango de inflamabilidad es de aproximadamente el 4% - 55,7% en volumen al mezclarse con el aire. Algunas otras características importantes de H₂S incluyen:

² DELLA-GIUSTINA, Daniel E. "The Fire Safety Management Handbook". 2ª ed. Illinois: American Society of Safety Engineers. 1987. 1999.

- **Corrosión:** se da en proporciones altas tanto para los equipos de superficie como para los utilizados en pozo, ya que el H_2S se encuentra en crudos ácidos, agua de producción y condensados, y puede ser un peligro en el espacio libre de aire de los tanques que contienen estos fluidos.
- **H_2S :** por ser más pesado que el aire, puede viajar distancias considerables, ya que es arrastrado por el viento y tiende a depositarse en áreas bajas o a extenderse a lo largo de la superficie hacia fuentes de ignición, provocando así incendios o explosiones por retroceso de llama. Forma mezclas explosivas con el aire en un intervalo alto de concentraciones.
- **Gases Licuados del Petróleo (GLP):** son una mezcla de hidrocarburos livianos constituida principalmente por C_3 (*propano y compuestos derivados de éste*) y C_4 (*butanos y compuestos derivados de éstos*), en proporciones variables. A condiciones normales se encuentra en estado gaseoso y al ser comprimido pasa a estado líquido.

El GLP es un gas inflamable a temperatura ambiente y presión atmosférica, por lo tanto deben aplicarse los estándares establecidos para el diseño de todas las instalaciones para su uso y manejo, tales como tanques de almacenamiento y tuberías. Los contenedores con GLP nunca deben llenarse a más del 80% de la capacidad total. Esto permite la expansión de los vapores producidos por el aumento de temperatura.

Es importante tener en cuenta que el GLP genera vapores desde una temperatura de $-42\text{ }^{\circ}C$, los cuales al mezclarse con el aire en proporciones entre 1.9 y 9.5% en volumen, forman mezclas inflamables y explosivas, adicional a esto, como tiene una densidad aproximadamente de 1.8 veces mayor que la del aire, un escape puede ser muy peligroso debido a que sus vapores tienden a concentrarse en las zonas bajas donde hay mayor riesgo de

encontrar puntos de ignición tales como interruptores eléctricos, tomas de corriente eléctrica, lámparas y puntos calientes.

Al evaporarse, el GLP ocupa en forma gaseosa un volumen aproximado de 250 veces su volumen en forma líquida.

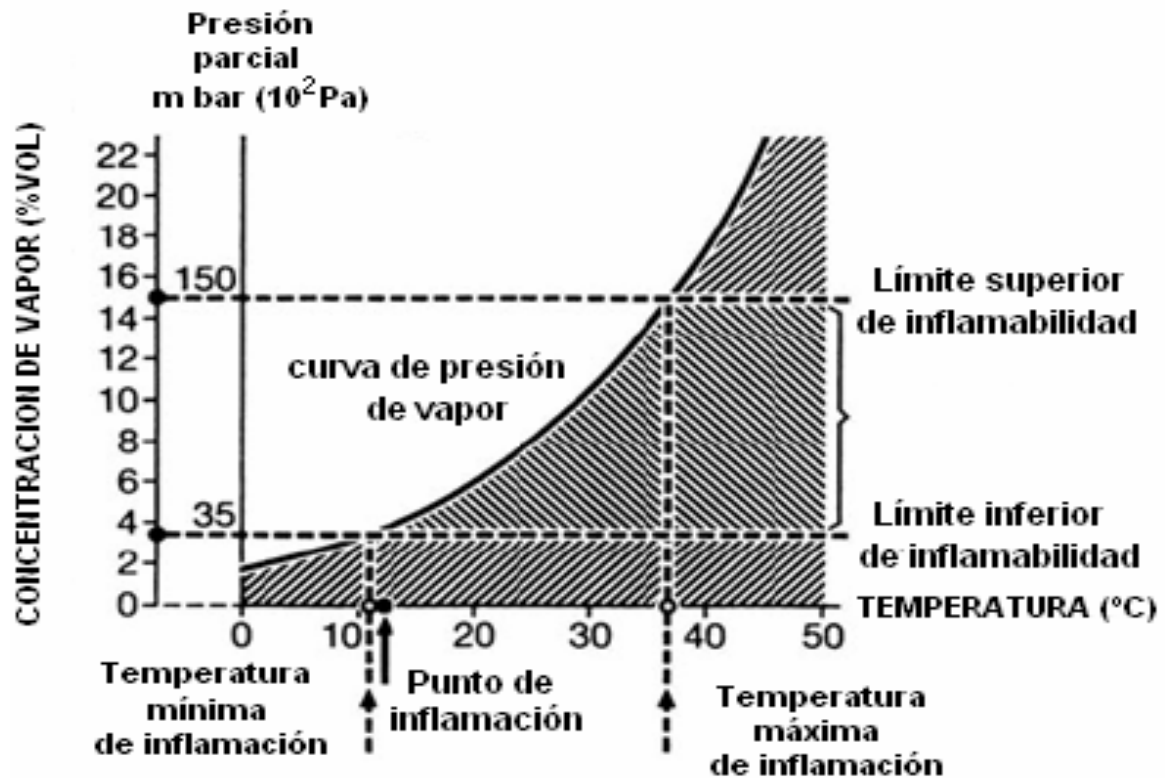
- **Acetileno:** es un gas combustible. A condiciones atmosféricas su rango de inflamabilidad se extiende desde el 2,5% - 100% en volumen. Su límite superior de inflamabilidad es alcanzado si se descompone alrededor del 80%. El acetileno líquido es rara vez utilizado ya que se considera muy inestable y altamente explosivo.
- **Hidrógeno:** es un compuesto inflamable, presenta un amplio rango de inflamabilidad (*Límite de inflamabilidad inferior 4,0% de hidrógeno en el aire; Límite de inflamabilidad superior 74% de hidrogeno en el aire*) y un bajo nivel de energía mínima de ignición. Estas características hacen del hidrógeno un compuesto extremadamente sensible a las chispas y arcos eléctricos.

2.1.1.2 Líquidos y Vapores / Líquidos. Con excepción de algunas sustancias reactivas o inestables, los líquidos no se inflaman. Son los vapores que se desprenden de la superficie de estos los que son altamente inflamables. Los líquidos desprenden vapores a una tasa que es proporcional al aumento de temperatura.

La capacidad de desprender vapores y la velocidad a la que ocurre se define como la volatilidad de los líquidos.

La Figura 5 muestra la presión de vapor Vs. la curva de temperatura para el etanol en donde se puede observar la relación entre la concentración de vapor y la temperatura de la superficie del líquido.

Figura 5. Concentración de vapor % (Vol.) Vs. Presión de etanol en función de la Temperatura



Fuente: LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Electrostatic Hazards". Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 1997.

La temperatura marcada como la temperatura mínima de inflamación es el punto de inflamación y es una manera simple y fiable de definir el peligro de los líquidos desde el punto de vista de su facilidad para inflamarse.

Cuando un líquido se encuentra a una temperatura inferior a su punto de inflamación, no es posible que inflame. Las siguientes son algunas de las propiedades comunes de los líquidos utilizados en la industria de los hidrocarburos.³

- Dentro de la categoría de petróleos crudos se encuentran incluidos líquidos con un rango de propiedades bastante amplio. Los aceites crudos se definen

³ Ibíd.

como crudos líquidos sin refinar. Cada aceite crudo tiene diferentes propiedades en función a su composición. Estos se pueden encontrar en un rango de densidades desde bastante livianos a crudos pesados. Los puntos de inflamación pueden variar considerablemente. Estas diferencias demarcan la necesidad de los trabajadores a estar siempre familiarizados con las propiedades de los fluidos que están manipulando con el fin de poder evaluar con precisión los riesgos potenciales existentes.

- Algunos hidrocarburos que se encuentran en fase líquida a presión y temperatura del yacimiento, pueden llegar a convertirse en vapores a condiciones de superficie. Estos son conocidos como gases condensados y están compuestos principalmente por cadenas de hidrocarburos C_5 y C_6 . Por lo general son líquidos oleosos, y puede causar problemas en las líneas de distribución de gas. Tienden a tener un bajo punto de inflamación y, por lo tanto, son extremadamente inflamables.
- Fluidos usados en operaciones de estimulación para yacimientos de gas y aceite, los cuales pueden variar de un simple fluido como el diesel hasta, complejas mezclas de compuestos. Las propiedades independientes de cada yacimiento son las que se deben tener en cuenta en el momento de escoger el tipo de fluido de fracturamiento que se debe utilizar. Cada una de estas sustancias tiene su ficha de seguridad la cual deberá ser revisada cada vez que se pretenda hacer uso de uno de estos fluidos, a fin de minimizar los riesgos y conocer el carácter explosivo de estas.
- La gasolina, diesel y otros combustibles, son la mezcla de hidrocarburos líquidos ligeros que oscilan en el rango de C_4 a C_{10} . La gasolina es una sustancia muy volátil y ha sido la causa de muchos accidentes (incendios) ya que sus vapores son de fácil ignición.

- El compuesto químico metanol, también conocido como alcohol metílico o alcohol de madera, es el alcohol más sencillo. A temperatura ambiente se presenta como un líquido ligero (de baja densidad), incoloro, inflamable, tóxico y volátil a temperatura y presión atmosférica. Se emplea como anticongelante, disolvente y combustible. El metanol es considerado un compuesto inflamable de primera categoría; ya que puede emitir vapores que mezclados en proporciones adecuadas con el aire, originan mezclas combustibles. El metanol es un combustible con un gran poder calorífico, que arde con llama incolora o transparente y cuyo punto de inflamación es de 12,2 °C.
- **Gas Natural Licuado:** es gas natural que ha sido sometido a un proceso de licuefacción, que consiste en llevarlo a una temperatura aproximada de -160 °C con lo que se consigue reducir su volumen 600 veces. El GNL es inodoro, no es tóxico ni corrosivo, es menos denso que el agua, difícil de incendiarse o explotar, y se evapora en caso de derrame. A diferencia de otros hidrocarburos, los vapores del GNL se disipan al ser liberados a la atmósfera y no arden con la facilidad de otros combustibles comunes como la gasolina, el petróleo o el combustible de aviones. Los vapores del GNL sólo son inflamables en un estrecho rango de 5% a 15% de presencia en el aire. Cuando está confinado en un estanque, el GNL no se puede encender debido a la falta de oxígeno. Para que encienda este compuesto, además de haber oxígeno, sus vapores deben entrar en contacto con una superficie caliente cuya temperatura sea mayor a 540 °C.

2.1.1.3 Productos Químicos. Los aditivos químicos utilizados en diversos escenarios del sector de los hidrocarburos también poseen propiedades que los hace un potencial peligro para crear mezclas explosivas. Estos incluyen:

- Sustancias químicas utilizadas en operaciones de estimulación.

- Disolventes y productos de limpieza para el control de incrustaciones, precipitación de parafinas en tuberías y diversas operaciones.
- Fluidos hidráulicos y lubricantes.

2.1.1.4 Sólidos. En contraste con los gases y vapores, las mezclas de combustibles sólidos con el aire son homogéneas por efecto de la gravedad de las partículas. En circunstancias excepcionales, algunos sólidos utilizados por la industria pueden crear mezclas explosivas. Al calentarse el sólido puede dar lugar a una pirolisis, (*degradación por calentamiento*) produciendo como resultado liberación de vapores. Los vapores liberados tienen la capacidad para formar una atmósfera explosiva provocando accidentes. Estos sólidos pueden incluir:

- Lubricantes.
- Selladores.
- Pinturas y recubrimientos.
- Partículas de polvo.

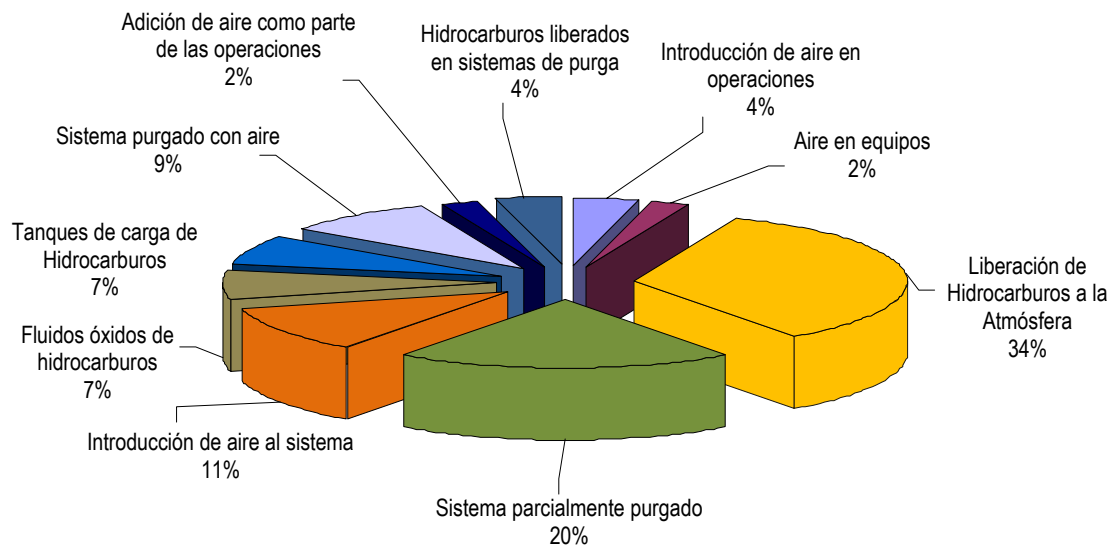
2.1.2. Condiciones del Ambiente. En general, se entiende que el aire es una mezcla gaseosa (*Nitrógeno 78%, Oxígeno 21%, Argón 0,93%, Bióxido de Carbono 0,033% en volumen y el resto está formado por otros gases en cantidades mínimas*), sin olor ni sabor que llena todos los espacios ordinariamente considerados como vacíos, que cuando se mezcla en las proporciones correctas con un hidrocarburo, da lugar a una mezcla explosiva. Esto ocurre en diversos escenarios dentro del sector petrolero tales como operaciones de perforación, completamiento, transporte, almacenamiento, entre otras. Existen varios

componentes que favorecen las condiciones para que la mezcla aire / oxígeno se torne explosiva en presencia de hidrocarburos:

- Utilización de aire en operaciones de purga de tuberías y/o procesos de estimulación.
- Bolsas de aire formadas durante la instalación y el mantenimiento de equipos.
- Utilización de productos químicos comburentes (sustancias y/o productos que, en contacto con otros, en especial con sustancias inflamables, producen una reacción fuertemente exotérmica).

La Figura 6 muestra los tipos de mezclas (aire) identificadas como combustibles.

Figura 6. Mezclas de aire identificadas como combustibles



Fuente: Open Flame Welding ARC, As An Ignition Source And Its Significance As A Hazard In The Canadian Oil. Universidad de Calgary. 2004.

Existen otras posibles fuentes de aire (oxígeno) que vale la pena conocer más detalladamente; estas son:

- **Óxidos de Hidrocarburos:** hidrocarburos líquidos en presencia de aire, pueden oxidar formando óxidos de hidrocarburos tales como hidroperóxidos, aldehídos y cetonas. Estas sustancias pueden descomponerse de manera espontánea en función a parámetros de funcionamiento como la presión o la temperatura, liberando grandes cantidades de energía que pueden dar lugar a explosiones.

El comportamiento de los óxidos de hidrocarburos y procesos relacionados con estos no están bien documentados de ahí su escasa comprensión. Es necesario realizar más estudios e investigaciones al respecto para establecer la comprensión de este fenómeno.

- **Nitrógeno:** puede generarse en operaciones de perforación y en otras aplicaciones como purga y utilización de membranas portátiles de separación. El nitrógeno proveniente de estas unidades contiene un pequeño porcentaje de oxígeno que varía de 3 a 10% en volumen, dependiendo del caudal, temperatura y presión de aire comprimido. Estos niveles pueden significar riesgo de explosión en condiciones de subsuelo, por lo tanto, previamente a cualquier aplicación es necesario determinar la concentración de oxígeno máxima admisible para una operación segura.

2.1.3 Fuentes de Ignición. Se definen como medios de liberación de energía, capaces de producir un incendio, en contacto con un combustible y en presencia de una adecuada concentración de oxígeno.⁴ La siguiente es una lista de las más comunes fuentes de ignición:

⁴ LUTTGENS. Op. Cit.

- Superficies calientes.
- Chispas de origen mecánico.
- Electrostática.
- Reacciones químicas.
- Compresión adiabática.
- Descompresión súbita.

Algunas de las fuentes de ignición antes mencionadas son capaces de producir un incendio en contacto con cualquier tipo de material combustible. Sin embargo, para el caso de la electrostática, sólo puede encender determinados materiales combustibles, especialmente en función de parámetros como la temperatura de ignición y la energía mínima de ignición (EMI).

2.2. PROPIEDADES COMBUSTIBLES DE LOS HIDROCARBUROS

El estudio de estas propiedades es de vital importancia ya que nos ayudan a comprender la dinámica del fenómeno de combustión cuando en él se encuentran involucrados fluidos hidrocarburos; normalmente se presenta en operaciones, tales como: exploración, perforación, producción, transporte y almacenamiento de petróleo y gas.

2.2.1 Límites de Inflamabilidad. Se define como límite de inflamabilidad inferior a la concentración mínima de vapor o gas en mezcla con el aire, por debajo de la cual, no existe propagación de la llama al ponerse en contacto con una fuente de

ignición, y límite de inflamabilidad superior a la concentración máxima de vapor o gas en aire, por encima de la cual, no tiene lugar la propagación de la llama, al entrar en contacto con una fuente de ignición. Los dos definen el rango dentro del cual la combustión es posible. Por encima o por debajo del rango, la combustión no se produce.

En los tanques de transporte y almacenamiento de hidrocarburos existe siempre el peligro de inflamabilidad. Una de las técnicas para reducir este peligro es mantener la atmósfera de los tanques por debajo del límite inferior o por encima del límite superior (*el aire y el oxígeno que contiene, se sustituyen por gases no reactivos como el nitrógeno, el dióxido de carbono o gases nobles. Es decir mediante la introducción de gases inertes*). A esta operación se le denomina inertización de gases.

Esto se puede conseguir procurando en estos espacios confinados una atmósfera muy rica o muy pobre en gases explosivos, es decir, mantener la mezcla de gas y oxígeno fuera de los valores de explosividad, ya que si se encuentra por debajo del límite inferior de inflamabilidad, la mezcla no es lo suficientemente densa como para provocar una explosión, y si se halla por encima del límite superior es excesivamente rica y carece de oxígeno suficiente.

Las mezclas de gases compuestos de combustibles, comburentes y gases inertes son sólo inflamables en determinadas condiciones. Estas condiciones son afectadas por diversas variables que están de una u otra forma relacionadas con los límites de inflamabilidad. Estas variables son:

- **Concentración de Oxígeno:** límite de inflamabilidad inferior no varía con un aumento en la concentración de oxígeno; sin embargo, el límite de inflamabilidad superior aumenta considerablemente con esta variable.

- **Presión:** generalmente, tanto el límite de inflamabilidad inferior como el límite de inflamabilidad superior, se incrementan al aumentar la presión inicial de la mezcla de gases.

Aunque estas tendencias son aplicables para todos los hidrocarburos, cada combustible tiene diferente rango de inflamabilidad.

El límite de inflamabilidad inferior y el límite de inflamabilidad superior llegan a igualarse al disminuir la presión hasta cierto punto, conocido como presión límite. Bajo esta presión, la propagación de las llamas resulta imposible.

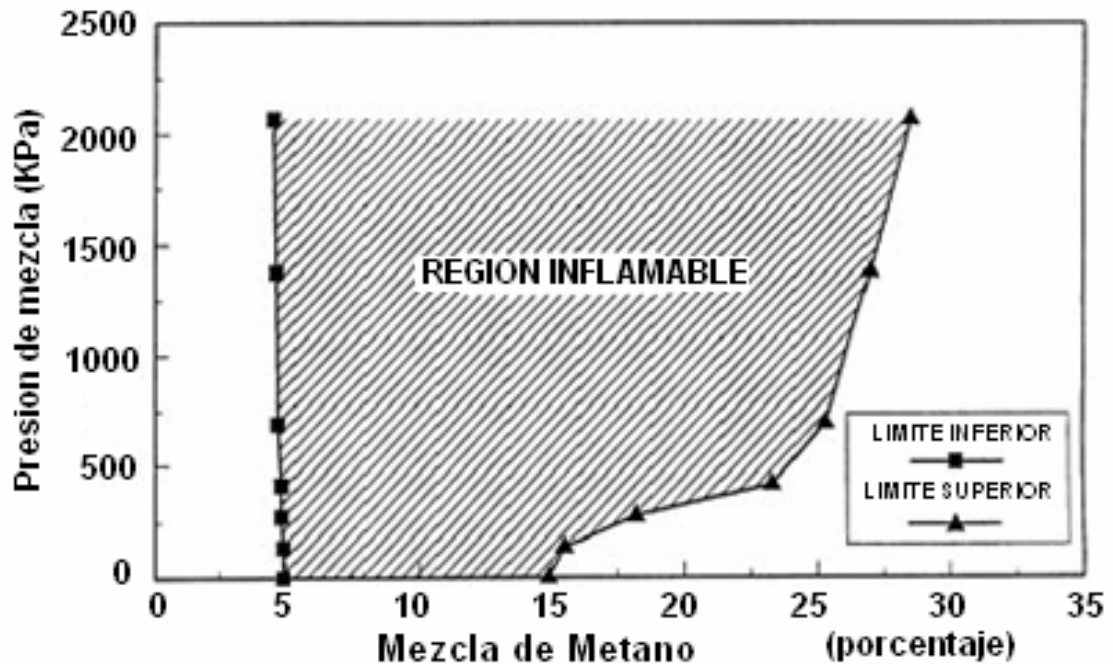
Por ejemplo, un gran contenedor abierto de líquido se encuentra en un recinto cerrado. Una disminución en la presión a temperatura constante provocaría una disminución en la presión parcial del aire, y la presión parcial del vapor seguiría siendo constante.

Por lo tanto, mezclas con un bajo porcentaje de gas pueden convertirse en inflamables a una menor presión; por otra parte, mezclas que se encuentran dentro de los límites de inflamabilidad pueden volverse demasiado ricas para la combustión.⁵

La Figura 7 muestra el efecto de la presión sobre el rango de inflamabilidad de metano en el aire. Cabe resaltar que aunque estas tendencias son aplicables para todos los hidrocarburos, cada combustible tiene diferente rango de inflamabilidad.

⁵ BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

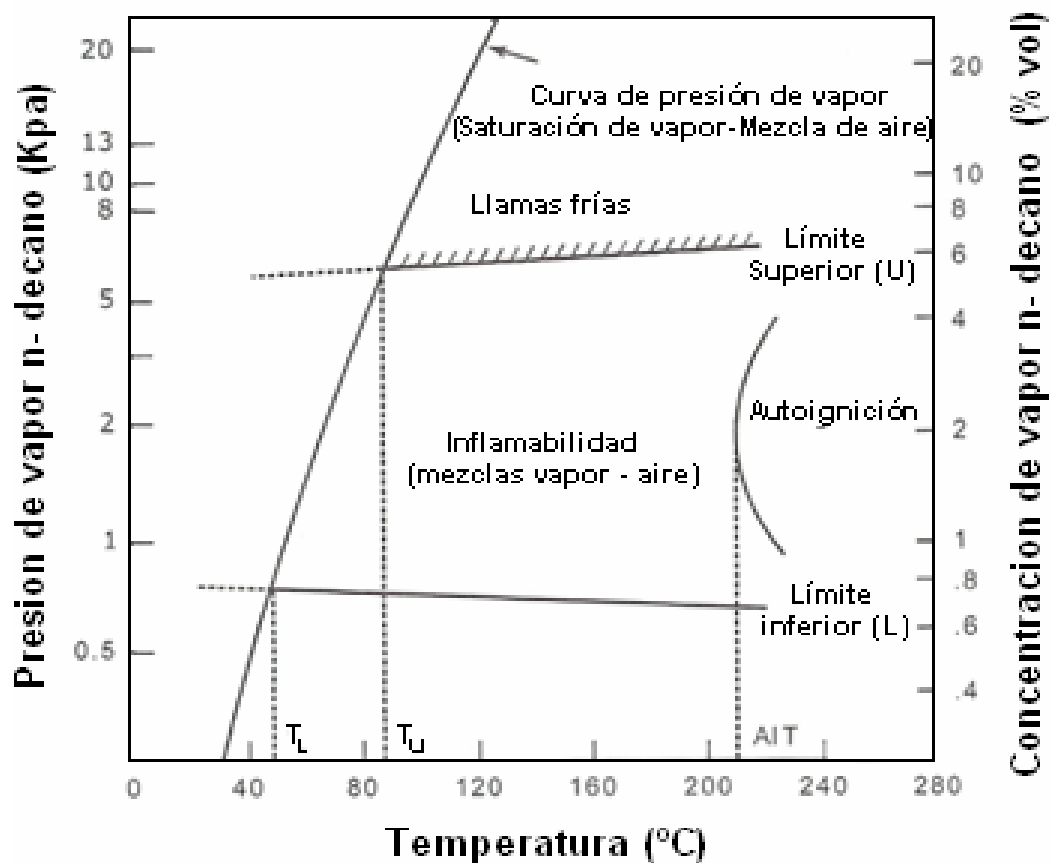
Figura 7. Relación entre los límites de inflamabilidad del metano y la presión.



Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

- **Temperatura:** la Figura 8 muestra como el rango de inflamabilidad se amplía con el aumento de la temperatura. Para el caso específico de n-decano, el límite de inflamabilidad inferior disminuye y el límite de inflamabilidad superior aumenta. La presencia de la fase líquida establece la existencia de un punto especial sobre cada inflamabilidad límite Vs la línea de temperatura. El punto T_L representa la temperatura límite inferior, que es la temperatura mínima necesaria para que se produzca combustión en una mezcla. Del mismo modo hay un límite superior de temperatura (T_U).

Figura 8. Efecto de la temperatura sobre los límites de inflamabilidad de n-decano



Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

- **Velocidad:** no hay datos que detallen la relación entre velocidad y los límites de inflamabilidad. Sin embargo, Starkman et al⁶ logró demostrar con datos de mezcla de propano/aire que existe un aumento en el límite de inflamabilidad inferior y una disminución en el límite de inflamabilidad superior cuando las mezclas están fluyendo comparadas a cuando se encuentran estáticas o no fluyen.

⁶ STARKMAN, E.S.; HAXBY, L.P.; CATTANEO, A.G. "A Study of Free in Turbulent Streams". Fourth Symposium on Combustion. Baltimore: Williams and Wilkins. 1953. p. 670-673.

Esta variación en los límites de inflamabilidad ayuda a explicar por qué algunos materiales potencialmente inflamables no se encienden incluso en presencia de una fuente de ignición.

- **Turbulencia:** los datos de los experimentos sobre gases puros sugieren que la turbulencia reduce los límites de inflamabilidad; sin embargo, podría interpretarse como un efecto sobre la energía mínima de ignición.
- **Aditivos (inertes):** pueden modificar los límites de inflamabilidad de las mezclas cuando son añadidos. Su efecto es proporcional, a sus capacidades caloríficas.

2.2.2. Energía Mínima de Ignición. Para la ignición de una atmósfera explosiva se requiere del aporte de una energía determinada. La energía mínima de ignición (EMI), es la menor cantidad de energía necesaria para causar la inflamación de una mezcla de un material combustible con aire u oxígeno, cuando se mide por un método estándar. Esta medida es utilizada para clasificar situaciones peligrosas donde los incendios y explosiones podrían ser iniciados.

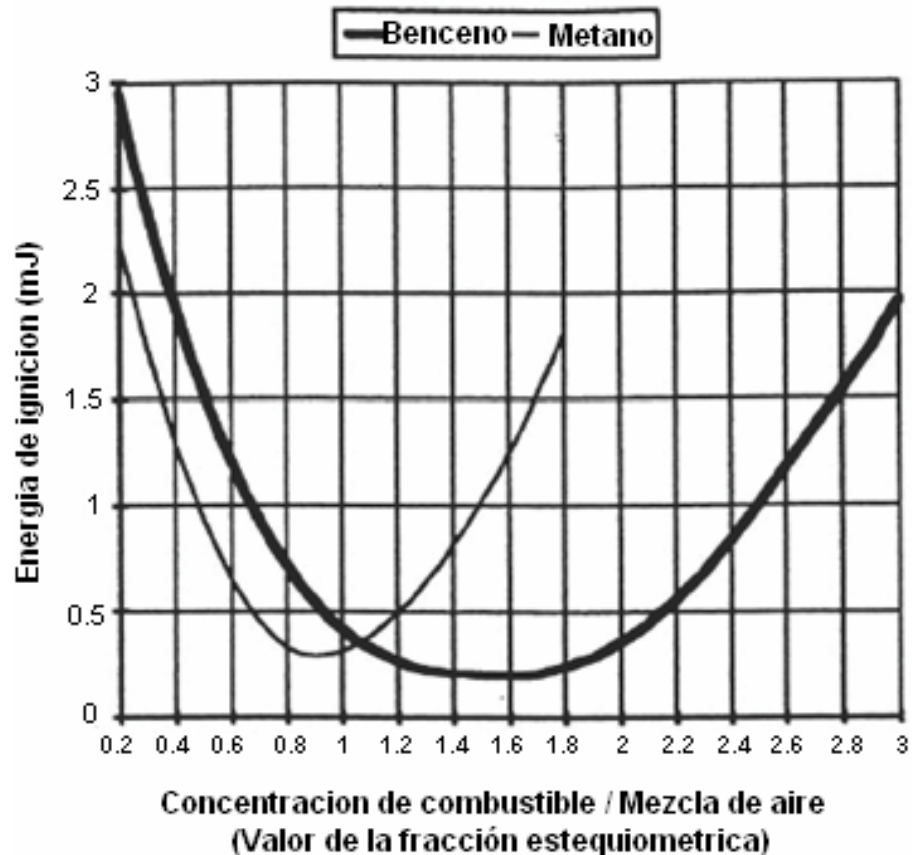
EMI se mide sin tener en cuenta los efectos espaciales y temporales. Es decir, hay diferencias en la capacidad para promover una inflamación en un gran volumen y/o durante un largo período de tiempo, en comparación con la propagación de encendido en un pequeño volumen y/o en un corto período de tiempo. La segunda situación sería menos favorable.⁷

La combustión se produce sólo si la concentración del material combustible en la mezcla se encuentra entre los límites de inflamabilidad superior e inferior, como se

⁷ LUTTGENS. Op. Cit.

mencionó anteriormente. EMI se puede observar en una grafica de energía de ignición Vs la concentración de energía del combustible, como el punto más bajo de la curva en forma de U, como se ve en la Figura 9.

Figura 9. Detección de EMI en presencia de concentración de combustible



Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

La Figura 9 es relevante, ya que ayuda a explicar por qué el fuego y el riesgo de explosión son mayores frente a los vapores de líquidos con gas natural. La energía mínima de ignición es ligeramente inferior y más importante aun es el hecho de que el rango estequiométrico es mayor. Esto permite una amplia variedad de condiciones donde la combustión es más probable.

EMI varía para las diferentes mezclas de combustibles. Innumerables experiencias han puesto de manifiesto que, tratándose de gases y vapores de hidrocarburos saturados, se requieren energías de descarga del orden de 0.25 mJ para que se produzca la ignición de mezclas óptimas con aire. Los hidrocarburos no saturados requieren, sin embargo, menores energías de ignición. La Tabla 2 muestra valores típicos de EMI.

En el caso de los polvos la energía necesaria para encenderse es superior. Típicamente una o dos veces mayor que la de los gases y vapores. Mezclas de polvos y vapores también deben ser considerados.

Tabla 2. Energías mínimas de ignición

Etil acetato	1.42 mJ
Acetona	1.15 mJ
Metano	0.30 mJ
Propano	0.25 mJ
Tolueno	0.24 mJ
Xileno	0.20 mJ
Ciclopropano	0.18 mJ
Acroleína	0.13 mJ
Etileno	0.08 mJ
Acetileno	0.017 mJ
Hidrógeno	0.017 mJ

Fuente: NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA 77). "Recommended Practice On Static Electricity". 1988.

2.2.2.1 Determinación de la Energía Mínima de Ignición (EMI).

- **Gases y Vapores:** hay varios factores a considerar en la medición de EMI de un gas o de un vapor, especialmente relacionadas con los procedimientos experimentales; en primer lugar, es necesario ajustar la concentración del combustible en una mezcla combustible / aire hasta que la mezcla pueda inflamarse utilizando la energía mínima. La fuente de ignición es una chispa generada por una descarga electrostática a través de dos electrodos situados dentro de la mezcla que se encuentra bajo prueba.

Es importante que el tamaño y el espaciamiento de los electrodos sean óptimos si las condiciones de energía mínima de ignición se alcanzarán. El diámetro de los electrodos debe ser lo suficientemente grande para evitar descargas de corona (que se explican en el Capítulo 4) y su separación apenas lo suficientemente grandes para evitar enfriamiento de la expansión de la llama debido a pérdidas térmicas en los electrodos por conducción.

El enfriamiento a distancia es una variable importante para la determinación de EMI. Experimentalmente se constató que las llamas no se pueden propagar a través de espacios pequeños. Esta variable se define como la distancia mínima entre superficies sólidas (*que actúa como disipador de calor*).

Para una distancia de electrodos menor a la distancia crítica de quenching, la energía requerida para que ocurra una ignición va incrementando gradualmente, ya que cada vez se requiere de más energía para compensar las pérdidas de electrodos. Los electrodos a distancias mayores que la distancia crítica de quenching necesitan un potencial mayor entre ellos para causar una descarga de chispa. El tamaño del capacitor que suministra la energía para la chispa debe ser cuidadosamente seleccionado; este debe ser lo suficientemente grande para proporcionar la energía mínima de ignición

requerida cuando el potencial es constante para producir la chispa en el espacio entre los electrodos.

- **Polvos:** en este caso específico, mediciones precisas son extremadamente difíciles de alcanzar por dos razones específicas, la primera de ellas es la dificultad para lograr una distribución uniforme del polvo en el dispositivo de medición en el momento de la descarga de la chispa y por otro lado debido a la contaminación de los electrodos por el polvo.

2.2.2.2 Concentración Límite de Oxígeno y sus Efectos en EMI. Se define como la concentración (*cantidad*) mínima de oxígeno requerida en mezcla con vapor o gas, para que en contacto con una fuente de ignición, pueda llegar a ocurrir una explosión o incendio.

Los límites de inflamabilidad dependen de las concentraciones de oxígeno y de gases inertes en la mezcla. A medida que disminuye la concentración de gases inertes y aumenta la concentración de oxígeno, aumenta el límite superior de inflamabilidad, mientras que el límite inferior prácticamente no varía.

Para eliminar el riesgo de explosiones a través de polvo, gas o vapor inflamable, el nivel de oxígeno atmosférico se mantiene por debajo del límite de oxígeno lo que previene la creación de mezclas explosivas. Como este parámetro varía según el material, cada proceso de inertización se debe diseñar de forma individual. Sin embargo experimentos realizados previamente han demostrado que la concentración límite de oxígeno dentro de la mayoría de mezclas combustibles debe estar por debajo de 10% en volumen, como medida de seguridad, el 10% es solo un valor indicativo.

Este valor es medido para una mezcla con concentraciones de combustible óptimas, utilizando una muy fuerte fuente de ignición mediante la descarga de

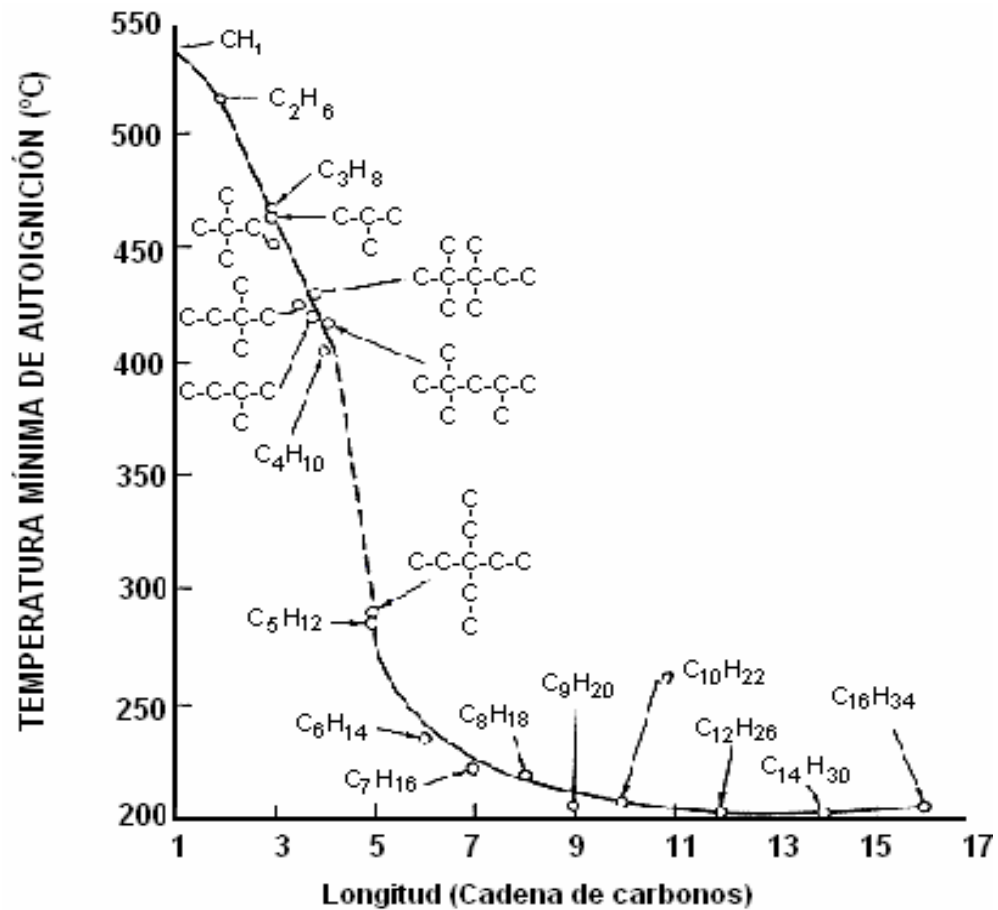
chispas de energía que están dentro de un rango de 2 – 10 kJ, (*dependiendo del volumen de los equipos para la realización de la prueba*) que son aproximadamente 10^6 veces la energía mínima de ignición.

La concentración límite de oxígeno y la energía mínima de ignición son parámetros que definen los niveles de inflamabilidad de una sustancia y/o ambiente. Cuando el porcentaje de oxígeno es utilizado para determinar la energía mínima de ignición, su concentración se mantiene constante mientras que la energía suministrada por la fuente de ignición (*chispa*), es variada, y cuando lo que se pretende determinar es la concentración límite de oxígeno, es la energía la que se mantiene fija.

Experimentos efectuados con polvos combustibles arrojaron como resultado que insignificativas reducciones en la concentración de oxígeno, conducen a grandes aumentos en la energía mínima de ignición. Este hecho tiene una gran influencia sobre el fenómeno de la electrostática. Las descargas electrostáticas generalmente son muy débiles (*excepto descargas radiantes de propagación*) y no alcanzan valores de energía de 1 J, lo que significa que una pequeña reducción en la concentración de oxígeno del aire, puede prevenir accidentes por electrostática.

2.2.3 Temperatura de Autoignición (TAI). Una mezcla combustible/comburente puede inflamarse sin la introducción de una fuente de ignición. La temperatura de auto-ignición, se define como la temperatura a la que una sustancia inflamable puede arder en aire sin necesidad de una fuente de ignición externa. Hidrocarburos sometidos a calentamiento pueden inflamarse, si son expuestos al aire. En otras palabras si una mezcla capaz de sufrir reacciones exotérmicas, es introducida en un recipiente, bajo óptimas condiciones de temperatura puede inflamarse espontáneamente. La Figura 10 presenta temperaturas de autoencendido de hidrocarburos a presión atmosférica.

Figura 10. Temperatura de autoignición de los hidrocarburos a presión atmosférica



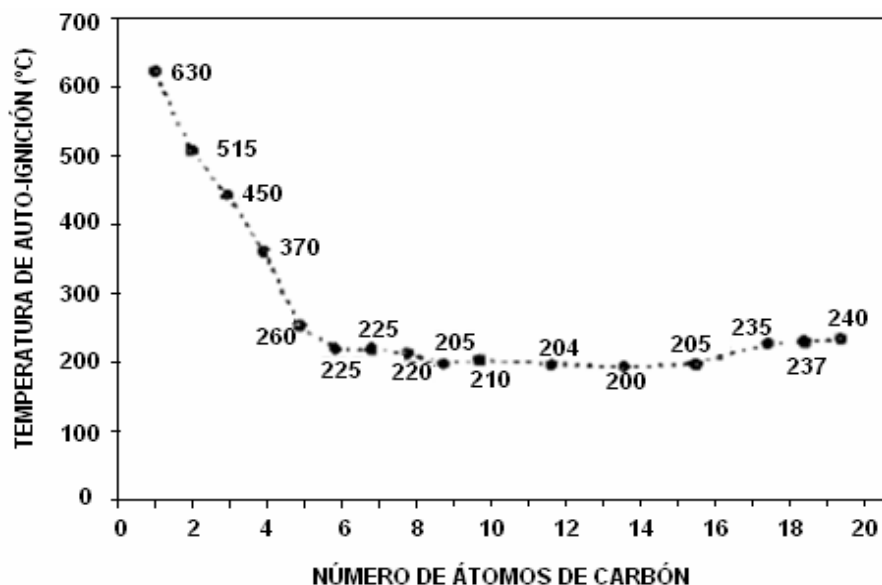
Fuente: COWARD, H.F.; JONES, G.W. "Limits of Flammability of Gases and Vapours". U.S. Department of the Interior. Bureau of Mines. Bulletin 503. 1952.

La temperatura de autoignición depende de muchas variables. Se ha observado que un aumento en el volumen del sistema, en la presión total de operación, en la concentración de oxígeno y la presencia de catalizadores como polvo de óxido de hierro disminuye el valor de esta propiedad, mientras que la variación de la concentración de combustible tiene una influencia mucho más compleja. Otros parámetros influyentes son:

- **Masa Molecular:** la temperatura de auto-ignición depende significativamente de este parámetro. A mayor masa molecular, menor es la temperatura de auto-

ignición de hidrocarburos en aire. La Figura 11 muestra la temperatura de auto-ignición como una función del número de átomos de carbono.

Figura 11. Temperatura de auto-ignición para el hidrocarburo n-alcano en aire, en función del número de átomos de carbono.

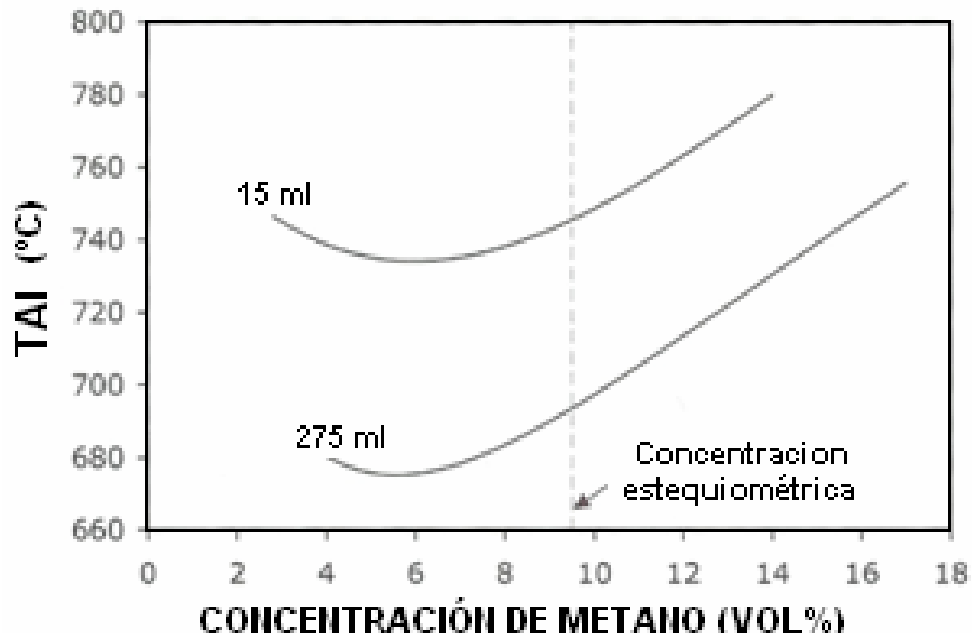


Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

- **Concentración de Combustible:** varios autores han analizado la influencia de la concentración de combustible en la temperatura de auto-ignición. De estos análisis no existe una conclusión unificada. Mediante pruebas se logró establecer una clara concentración de mezcla combustible óptima para el metano en virtud de obtener la menor temperatura de autoignición (Ver Figura 12), compuestos como el butano y el hexano presentan una marcada tendencia a disminuir su temperatura de auto-ignición frente al aumento de la concentración de combustible.⁸

⁸ GRIFFITHS, J.F.; GRAY, B.F. "Fundamentals of Autoignition of Hydrocarbons and Others Organic Substrates in the Gas Phase". 24th Loss Prevention Symposium. AIChE. 1990.

Figura 12. Efectos de la concentración sobre la temperatura de auto-ignición para el metano tomando dos volúmenes de referencia



Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

La Figura 12 deja en evidencia otro punto importante. Si bien los volúmenes utilizados en la prueba son pequeños, el efecto del sistema geométrico en incendios y explosiones es de considerable importancia. Desafortunadamente no hay disponibles datos para volúmenes mayores, aplicables a las operaciones del sector petrolero.

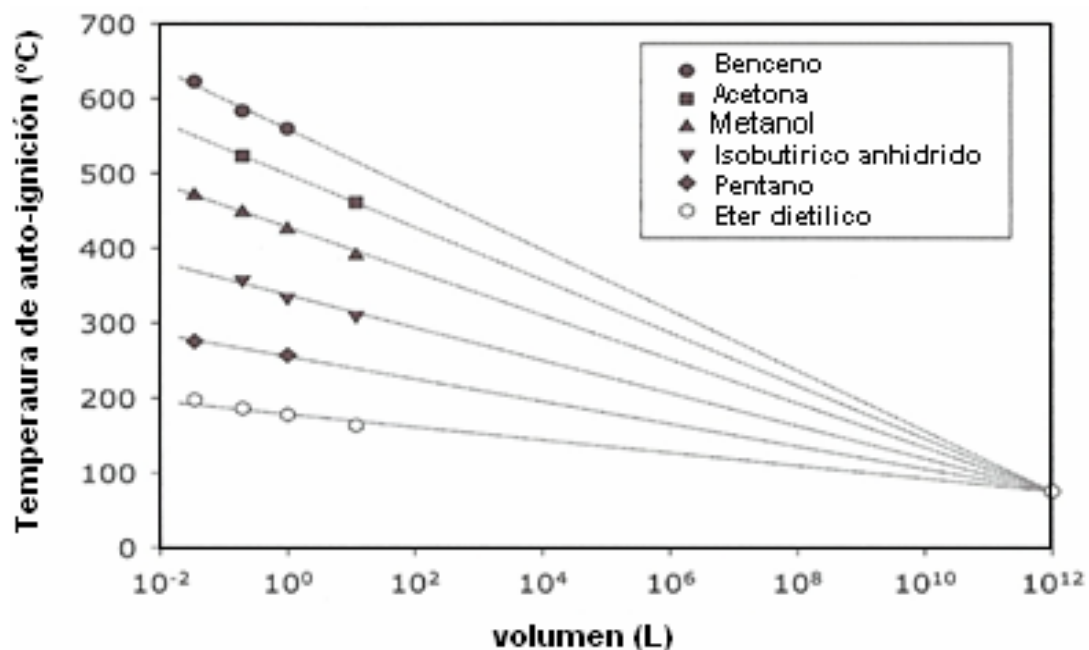
- **Concentración de Oxígeno:** Zabetakis⁹ en su investigación sugiere que hay dos posibilidades. La primera de ellas que los compuestos que tienen bajas temperaturas de autoignición (<300 °C) y, además, presentan un enfriamiento de las flamas y un proceso de ignición en dos etapas muestran valores de temperatura de autoignición casi iguales a las del aire. Por otro lado, los compuestos con temperaturas de autoignición >400 °C y que presentan normal

⁹ ZABETAKIS, M.G. "Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors". Bulletin 627. Bureau of Mines. 1965.

ignición de las flamas tienen temperaturas de auto-ignición en oxígeno que pueden ser considerablemente menores a las del aire.

- **Presión:** el aumento de la presión generalmente reduce la temperatura de autoignición. Sin embargo, algunos autores han indicado que esta dependencia sería una función de las sustancias involucradas.
- **Tamaño del Tanque:** la Figura 13 muestra la relación entre el tamaño del tanque (*aplicable a operaciones de almacenamiento y transporte*) y la temperatura de autoignición, observándose una clara reducción de la temperatura de auto-ignición frente al aumento de este parámetro.¹⁰

Figura 13. Efecto del volumen sobre la temperatura de auto-ignición para varios gases y vapores



Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

¹⁰ FURNO, A.L.; AMHOF, A.C.; KUCHTA, J.M. "Effect of Pressure and Oxidant Concentration on Autoignition Temperatures of Selected Combustibles in Various Oxygen Nitrogen Tetroxide Atmospheres". J. Chem. And Eng. Data 13. 1968. p. 243–249.

2.3. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA TENDENCIA A LA CARGA DE LOS HIDROCARBUROS

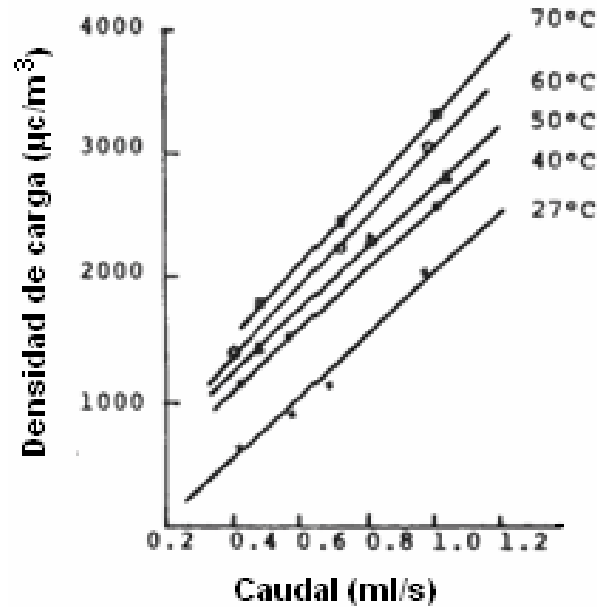
Los fluidos hidrocarburos en movimiento son productores altamente potenciales de cargas estáticas. La tendencia a la carga es una función de varios parámetros operacionales como lo son el caudal, la temperatura, el contenido de agua, la velocidad de rotación, envejecimiento del crudo y el efecto de aditivos. Numerosas investigaciones se han llevado a cabo para determinar la influencia de estos parámetros mediante diversos métodos en laboratorio, y la cuantificación de la tendencia a la carga en aceites. Este fenómeno es explicado en detalle en la sección 3. Es de vital importancia tener en cuenta estos parámetros y su influencia durante las operaciones llevadas a cabo en el campo petrolero, y de esta manera asumir las medidas adecuadas y evitar la carga de los combustibles y crudos tratados. PK Poovamma,¹¹ hizo una recopilación de los más importantes experimentos y sus resultados fueron:

2.3.1 Flujo y Velocidad Rotatoria. Estudios realizados en laboratorio mostraron un aumento lineal en la tendencia a la carga frente a un aumento de caudal, velocidad de rotación y temperatura de trabajo como se muestra en las Figuras 14 y 15. La tendencia a la carga aumenta paralelamente con el incremento en la generación de carga y transporte de esta.

2.3.2 Temperatura. Los resultados experimentales mostraron que la tendencia a la carga es directamente proporcional a la temperatura, manteniendo constantes el caudal y la velocidad de rotación como se presenta en las Figuras 14 y 15. Una de las razones podría ser la disminución de la viscosidad como consecuencia del aumento de la temperatura. Se observó, también, que frente a esta variación la conductividad aumenta.

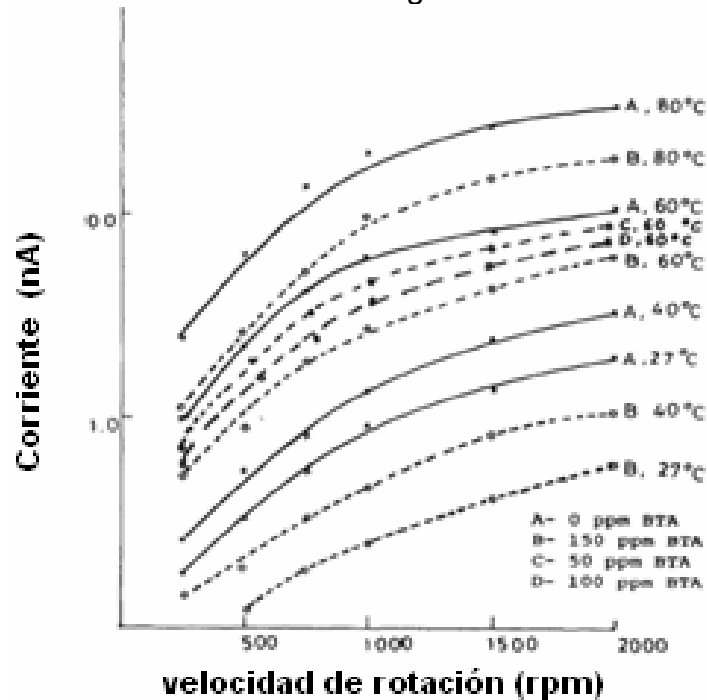
¹¹ POOVAMMA, P.K.; JAGADISH, R.; DWARAKANATH, K. "Investigation on Static Electrification Characteristics of Transformer Oil". Journal of Electrostatic. N° 33. 1994. p. 1–14.

Figura 14. Efectos de la temperatura y el caudal



Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

Figura 15. Variación de la tendencia a la carga en aceite

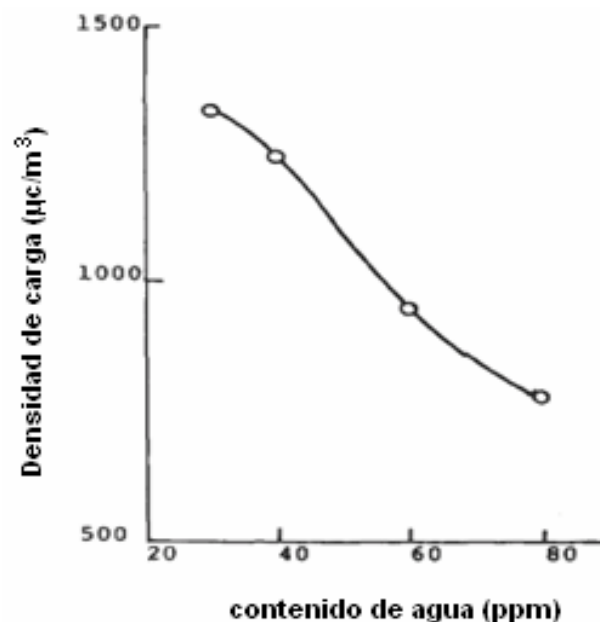


Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

2.3.3 Contenido de Agua. Experimentalmente se constató que a mayor humedad, la tendencia de la carga disminuye, como también ocurre con la ruptura de tensión, mientras que la conductividad aumenta. (Ver Figura 16)

Se observó que la viscosidad permaneció prácticamente constante ante el aumento de contenido de agua. Aunque la conductividad aumentó tanto con la temperatura como con la humedad, la viscosidad se redujo significativamente con la temperatura, pero permaneció casi constante con la humedad. Por lo tanto, puede inferirse que parámetros distintos de conductividad podría también influir fuertemente en la tendencia de la carga del crudo bajo condiciones de humedad.

Figura 16. Variación con el contenido de agua

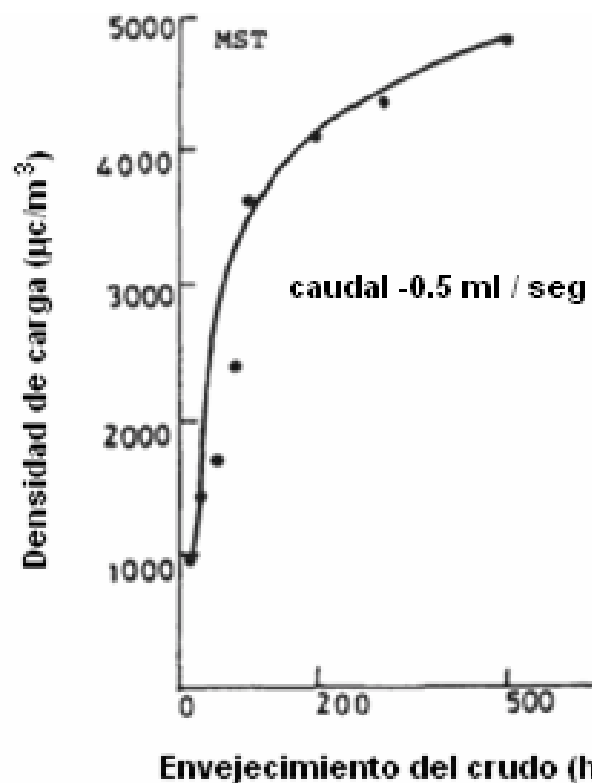


Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

También, es importante destacar que, junto al aumento de la humedad, la energía mínima de ignición (EMI) de la mezcla también aumenta debido a la capacidad de absorción de calor del agua. Como resultado, una fuente de ignición más fuerte es necesaria para encender la mezcla.

2.3.4 Envejecimiento. Como se muestra en la Figura 17, con el envejecimiento se presenta un aumento en la tendencia de la carga así como un aumento en el valor de la neutralización ácida, la viscosidad y la conductividad. El envejecimiento degrada significativamente el crudo debido a la oxidación de hidrocarburos, donde el agua y otros componentes moleculares de mayor peso se forman como resultado de la polarización y condensación.

Figura 17. Efectos del envejecimiento del aceite



Fuente: BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society Of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

2.3.5 Efectos de los Aditivos Antiestáticos. Se realizó un experimento utilizando un aditivo antiestático llamado BTA,¹² con el propósito de estudiar los efectos de estos productos sobre la tendencia a la carga.

¹² Ibíd.

Durante la investigación se manejaron varias temperaturas hasta 100 °C, y el resultado concluyó que el aceite tratado con el aditivo, redujo significativamente su tendencia a la carga.

De igual manera, la adición de aditivos antiestáticos (BTA) influyó en la conductividad, aumentándola. Otro punto relevante que arrojó esta investigación fue que el envejecimiento afecta tanto aceites tratados con aditivos antiestáticos como aceites no tratados de la misma forma, aumentando la tendencia a la carga en ambos casos.

3. GENERACIÓN Y ACUMULACIÓN DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS

3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTRICIDAD

Para comprender el proceso y desarrollo de la electrostática, es importante familiarizarse con conceptos puntuales relacionados con la electricidad. Aunque a menudo en el sector petrolero, personal operativo se ve involucrado en tareas directa o indirectamente relacionadas con este fenómeno, es poco el conocimiento y por tanto el respeto que se le tiene a esta rama del sector, siendo una de las causas primarias de varios incidentes y/o accidentes.

Antes de estudiar el fenómeno de la electrostática es necesario comprender la terminología básica utilizada para definir cada uno de los aspectos involucrados en este proceso. La Tabla 3 presenta una secuencia de conceptos que van a ser utilizados en las siguientes secciones.

3.2 MATERIALES CONDUCTORES VS. MATERIALES AISLANTES

Los materiales conductores permiten el flujo de cargas fácilmente (corriente eléctrica) debido a sus propiedades físicas. Este flujo es proporcional a la tensión (diferencia de potencial eléctrico), siempre y cuando, la temperatura se mantenga constante y el material conserve su estado. En estos materiales no existe peligro de una descarga estática ya que permiten el paso de cargas eléctricas. Mientras que un material aislante es aquel que no permite el paso de la corriente eléctrica cuando se aplica una diferencia de tensión entre dos puntos del mismo, debido a que los electrones de sus átomos están fuertemente unidos a sus núcleos. Este tipo de materiales representan un peligro en cualquier proceso de transporte y almacenamiento de hidrocarburos por su capacidad de acumular carga.

Tabla 3. Conceptos básicos y relevantes sobre electrostática

Concepto	Símbolo	Unidades	Definiciones importantes
Carga	Q	Coulomb (C) Amperio-segundo (As)	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden ser positivas o negativas • Dan lugar a campos eléctricos. • De acuerdo a la ley de conservación de la energía una carga no se crea ni se destruye • El valor de la carga de un electrón $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C
Densidad de carga en superficie	σ_e	C/m ²	<ul style="list-style-type: none"> • Hay un límite de densidad de carga en una superficie sólida. En virtud de las condiciones atmosféricas normales la densidad de carga máxima es de 26 $\mu\text{C}/\text{m}^2$
Potencial	ϕ	Voltios (V) Joule/coulomb	<ul style="list-style-type: none"> • Es el trabajo necesario para desplazar una unidad de carga desde tierra o desde el infinito hasta un punto.
Voltaje	U	Voltios (V)	<ul style="list-style-type: none"> • Es la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera de un conductor eléctrico.
Fuerzas de un campo	E	V/m	<ul style="list-style-type: none"> • Un campo eléctrico es producido por cargas eléctricas • La dirección de un campo siempre va de la carga positiva a la carga negativa • Los campos eléctricos siguen el principio de superposición • Campos fuertes de 3 MV / m, bajo condiciones atmosféricas normales, dan lugar a descargas espontáneas de gas.
Intensidad de corriente	I	Amperios (A)	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de carga que fluye a través de una sección transversal de material por unidad de tiempo. • Su dirección es la misma que la de la carga positiva
Resistencia	R	Volt/Amperios Ohm (Ω)	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad u oposición que presenta un cuerpo al paso de una corriente eléctrica para circular a través de él. • Para muchos materiales es independiente de la tensión aplicada. Sin embargo, la resistencia de materiales débilmente conductores y no conductores puede ser fuertemente dependiente de la tensión aplicada.
Volumen de la resistividad	P	Ω m	<ul style="list-style-type: none"> • Se calcula multiplicando la resistencia del material al flujo de carga por la superficie del electrodo y dividiendo este producto por la distancia entre los electrodos. Para líquidos es típico usar el recíproco del volumen de resistividad. Sus unidades son $1/\Omega\text{m}$
Resistividad de superficie	Σ	Ω	<ul style="list-style-type: none"> • Se calcula multiplicando la resistencia del material, por la longitud de los electrodos y dividiendo este producto por la distancia entre los electrodos.
Capacitancia	C	Faraday (F)	<ul style="list-style-type: none"> • Mide la capacidad de un condensador para almacenar carga

Fuente: Autores del proyecto

3.3. PROCESOS DE GENERACIÓN DE CARGA

Este proceso ha sido objeto de varios estudios con el fin de identificar la ciencia detrás de este fenómeno. Una teoría con un alto nivel de aceptación se estableció con el estudio de los materiales semiconductores. La teoría se basa en la definición de la función de trabajo, tratando de explicar el origen de una carga electrostática.

La función de trabajo se define como la energía mínima requerida para arrancar un electrón de un sólido a un punto inmediatamente fuera de la superficie de éste. “*Inmediatamente*” significa que la posición final del electrón está lejos de la superficie si hablamos a una escala atómica, pero todavía cerca del sólido al hacerlo a una escala macroscópica.

El valor de la energía necesaria es una función del tipo de material y la geometría de este. Cada material tiene su propio valor de función de trabajo. Por ejemplo, el valor de la función de trabajo de materiales aislantes como el plástico es alto, pero son bajos para materiales conductores (*metales*). El proceso es descrito por Helmholtz¹³ en dos pasos: electrificación por contacto y separación de cargas.

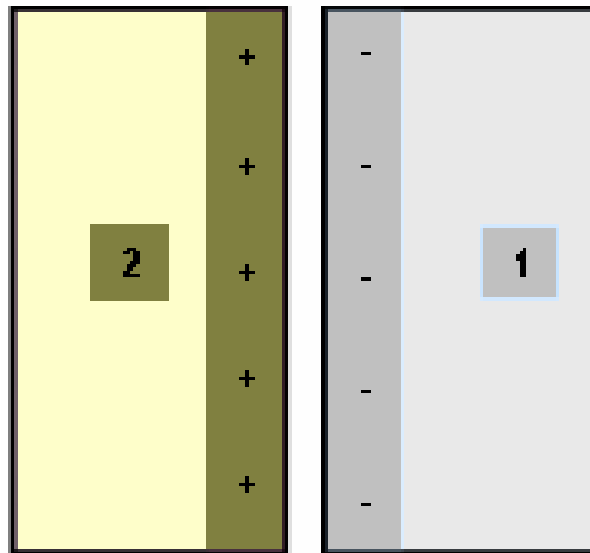
3.3.1 Electrificación por Contacto o Carga de Doble Capa. La generación de la carga tiene lugar cuando dos materiales diferentes y a igual temperatura se encuentran situados a una distancia del orden de unos pocos nanómetros. La diferencia entre los valores de sus funciones de trabajo, permite la transferencia de electrones entre la interface.

El material con menor valor de función de trabajo (donante) cede electrones al material con mayor valor de función trabajo (receptor), produciendo una capa de carga negativa sobre una superficie y una carga positiva sobre la otra.

¹³ HELMHOLTZ, H. “Physic and Chemistry”. 1979. p. 337.

Cuando la diferencia de potencial de la función trabajo equivale a la diferencia de potencial entre las dos capas cargadas, se da lugar a un estado de equilibrio. Esto se ilustra a continuación en la Figura 18.

Figura 18. Electrificación por contacto



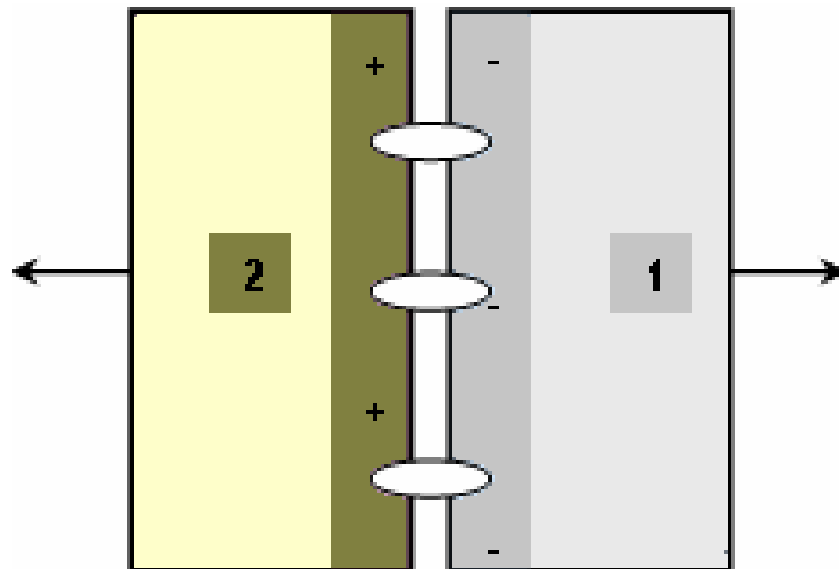
Fuente: LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Electrostatic Hazards". Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 1997.

Cuando la función trabajo del material 1 es inferior a la del material 2, se promueve una transferencia de electrones de 1 a 2 en la interface, dejando el material 2 cargado positivamente, y en consecuencia el material 1 pasa a ser cargado negativamente. La carga doble capa sólo depende de la superficie de contacto entre los materiales, independientemente de si estas son fijas o están en movimiento relativo una con respecto a la otra. Esto deja en evidencia la influencia de la fricción en el proceso de las cargas.

Sin embargo, es sabido que este parámetro no tiene efectos en el proceso de electrificación como tal, pues la fricción lo que hace es provocar un aumento en el área de contacto entre las superficies.

3.3.2 Separación de Cargas. Una vez que la electrificación por contacto ha tenido lugar, las superficies son alejadas, aumentando la distancia entre ellas, lo que ocasiona una reducción en la capacitancia del sistema y en consecuencia un aumento en la diferencia de potencial de la energía de este. La Figura 19 ilustra este segundo paso del proceso.

Figura 19. Separación de cargas



NOTA: la carga es neutralizada en el último punto de contacto.

Fuente: LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Electrostatic Hazards". Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 1997.

Mediante numerosos estudios experimentales, tres tipos de cargas han sido identificadas:

- Electrones.
- Iones atmosféricos y de superficie.
- Partículas cargadas.

Siendo los electrones los principales contribuyentes en el proceso de carga, con la excepción de la carga por contacto entre materiales similares que parece depender más de la transferencia de iones a través de las superficies.

*“Cuando las superficies son separadas las fuerzas de atracción de coulomb entre las capas de cargas opuestas en la interface tienen que ser contrarrestadas gastando la energía mecánica del sistema. Esta energía es instantáneamente convertida en energía eléctrica y posteriormente los campos eléctricos de las cargas expuestas se hacen efectivos causando descarga de gases e inducción electrostática”.*¹⁴

A medida que las superficies son separadas la transferencia de las cargas durante el contacto se reducen principalmente como resultado de dos factores: resistividad de superficie y emisión de gas.

- **Resistividad de la Superficie:** las cargas sobre cada una de las superficies tienden a fluir a través de ellas mediante el último punto de contacto donde estas son neutralizadas. Como lo ilustra la Figura 19. La tendencia de la velocidad de esta corriente depende de la resistencia de las trayectorias adoptadas por las cargas. A mayor resistencia, menor es la descarga y viceversa. Esta dependencia lleva a concluir que altas velocidades de separación de las superficies y altas resistencias de superficie causan la restricción de la neutralización de la carga por conducción.

Como resultado, una gran cantidad de la carga inicial va a permanecer en la superficie. Para el caso contrario, baja velocidad de separación y baja resistencia provocará una fácil neutralización de las cargas en las superficies, dejando poca carga eléctrica residual.

¹⁴ LUTTGENS. Op. Cit.

- **Emisiones de Gas:** suelen suceder cuando la fuerza del campo eléctrico del espacio entre las superficies alcanza el valor de ruptura por aire (3 MV/m). Los iones producidos son atraídos por las cargas opuestas en las superficies. No es posible predecir la cantidad de carga residual después de la separación de las superficies debido a la reducción en la carga.

3.4 RELAJACIÓN DE CARGA

Es el proceso mediante el cual los electrones abandonan la región cargada negativamente y fluyen hacia la tierra o hacia donde los iones se encuentran cargados positivamente cuando las superficies cargadas son separadas. Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente el tiempo de relajación se define como el tiempo que tardan los electrones en fluir a través de un material. Recientemente Babrauskas¹⁵ le dio un nuevo significado al tiempo de relajación, este autor lo define como el tiempo que toma una carga en disminuir un 63% su valor inicial.

3.5 CARGA DE LÍQUIDOS EN MOVIMIENTO

Cuando en el fenómeno de transferencia de carga por interfaces participan compuestos líquidos, se hace necesaria la presencia de iones adicionales.

Cuando los líquidos están fluyendo, existe una tendencia del movimiento que causa la carga y una conductividad innata que provoca la relajación ésta. La acumulación de cargas sólo tendrá lugar si la tasa de generación es superior a la tasa de disipación de las cargas debido a la conductividad del líquido o líquidos involucrados en el proceso. Las cargas eléctricas negativas son las más inflamables en los líquidos.

¹⁵ BABRAUSKAS. Op. Cit.

En líquidos con una elevada conductividad eléctrica, no hay acumulación de una significativa cantidad de carga, porque la relajación de carga ocurre con facilidad.¹⁶ Lamentablemente, muchos de los líquidos presentes en los procesos del sector de los hidrocarburos son orgánicos, lo que sugiere que son buenos aislantes. No obstante sustancias líquidas como petróleo crudo, alcoholes, aldehídos, cetonas, esterres y nitrilos típicamente son suficientemente conductores. La Tabla 4 presenta la conductividad eléctrica de algunos líquidos comunes.¹⁷

La mayoría de los líquidos solubles en agua son conductores y sus conductividades son lo suficientemente altas para no causar problemas de descarga electrostática durante el flujo.¹⁸ Como se indica en la tabla, los líquidos con conductividades inferiores a $5 \times 10^{-11} \text{ S m}^{-1}$ requieren una cuidadosa atención debido a su baja conductividad. Sin embargo, si la conductividad es extremadamente baja ($< 10^{-13} \text{ S m}^{-1}$), hay una ausencia de especies ionizadas, que son las responsables de la acumulación de carga.

Los líquidos que presentan altas conductividades, pueden estar involucrados en accidentes relacionados con la electrostática, si ahí ausencia de una conexión a tierra que ayude a distribuir la carga que por ellos fluye. Hidrocarburos puros no presentan carga electrostática; sin embargo, la presencia de impurezas incluso en una concentración de 0.001 ppm puede inferir en esta situación. Esto es particularmente importante en operaciones del sector petrolero.

Algunos de los factores que aumentan la capacidad de carga de hidrocarburos son:

¹⁶ HARPER, W.R. "Liquids Giving No Electrification By Bubbling". British J. Applied Physics 4. Supplement 2. 1953. p. S19–S22.

¹⁷ BABRAUSKAS. Op. Cit.

¹⁸ NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA 77). "Recommended Practice On Static Electricity". 1988.

- Presencia de agua.
- Oxígeno y compuestos de azufre.
- Aumento de temperatura, que no sólo aumenta la tendencia a la carga, sino que también aumenta la conductividad de los hidrocarburos. Siendo más significativo el efecto en la segunda propiedad mencionada.¹⁹

Tabla 4. Conductividad eléctrica de los líquidos más comunes

Nivel de riesgo	Ejemplo de sustancias	Conductividad eléctrica (S m ⁻¹)
Bajo riesgo: conductividades menores a 10 ⁻¹³	Héxano	10 ⁻¹⁷
	Disulfuro de carbón	8x10 ⁻¹⁶
	Benceno	5x10 ⁻¹⁵
	Heptano	3x10 ⁻¹⁴
Alto riesgo: conductividades (10 ⁻¹³ a 5x10 ⁻¹¹)	Xileno	10 ⁻¹³
	Dioxano	10 ⁻¹³
	Tolueno	10 ⁻¹²
	Ciclohexano	2x10 ⁻¹²
	Estireno	10 ⁻¹¹
	Keroseno	1.5x10 ⁻¹¹
Bajo riesgo: conductividades mayores que 5x10 ⁻¹¹	Gasolina	10 ⁻¹⁰
	Turpentine	4x10 ⁻¹⁰
	Aceites crudos	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁷
	Hidrocarburos halogenados	10 ⁻⁸
	Metil alcohol	10 ⁻⁷
	Etil alcohol	1.4x10 ⁻⁷
	Cetonas	10 ⁻⁵
	Agua: di-ionizada	10 ⁻⁵
	Iso-propanol	10 ⁻⁴
	Agua: lluvia ácida	10 ⁻²

Fuente: COEHN. "Physics". 1898. p. 217.

¹⁹ BUSTIN, W.M.; DUKEK, W.G. "Electrostatic Hazards in the Petroleum Industry". Lethworth: Research Studies Press. 1983.

La capacidad de aislantes líquidos de aumentar la densidad de carga que fluyen a través de tuberías de materiales conductivos es linealmente proporcional a la velocidad de flujo de dicho líquido. Esta densidad de carga alcanza un valor de estado estable después de cierta distancia en la tubería.

La carga acumulada es menor en el caso de flujo a través de tuberías no metálicas. En casos especiales hay una tendencia a adquirir cargas mayores. Tales casos son los líquidos de dos fases, mezclas de líquidos inmiscibles y líquidos con sólidos en suspensión. El flujo a través de filtros de poros finos puede incrementar la acumulación de cargas en los líquidos.

En el caso de flujo a través de tuberías de material aislante, se presentan pequeños flujos de corriente ya que la carga inducida en las paredes de la tubería no es disipada a tierra. Para dichos casos el mayor peligro se presenta cuando la descarga eléctrica inicia una ruptura directa en el material de la tubería creando ranuras y huecos.

Si se trata de un líquido combustible, existe la posibilidad de la presencia de llama externa. Los filtros, especialmente de micro poros representan el ejemplo más significativo para ilustrar la adquisición de cargas altas por parte de líquidos en movimiento.

- **Electrificación Spray:** a diferencia del proceso de carga en el flujo de líquido, en la electrificación spray, cuando se producen, las cargas negativas y positivas permanecen en pequeñas gotas. Las cargas negativas son retenidas por las partículas más finas, mientras que las gotas de mayor tamaño conservan las cargas positivas. Cuando se adjuntan las gotas grandes la atmósfera se carga negativamente.

La electrificación spray debe considerarse como un factor de riesgo importante en las operaciones de la industria de los hidrocarburos. Un ejemplo claro es cuando se vierte combustible en un tanque de almacenamiento. Las posibilidades de generar chispa en un tanque entre sus paredes o el techo y el combustible cargado contenido en el tanque, incrementan debido a la presencia de condiciones iónicas en los vapores de combustible presentes en la atmósfera del tanque.

Como se menciona en la sección uno, el peligro de la ocurrencia de una separación de cargas aumenta con el incremento en la velocidad de llenado del tanque. Además, la presencia de un objeto metálico en la superficie como por ejemplo un medidor de nivel flotador, empeora la situación actuando como uno de los platos de un condensador recogiendo cargas eléctricas del combustible.

Las paredes del tanque y el techo o tapa actúan como el otro plato del condensador. Cuando la distancia entre los dos es suficientemente grande se puede generar una chispa. Debido a que la atmósfera dentro del tanque se encuentra saturada de vapor del combustible con partículas ionizadas, el potencial para generar una chispa es mayor que el requerido en una atmósfera de aire seco.

3.6. CARGA DE GASES

El factor más influyente en la inflamabilidad de gases es la presencia de oxígeno y la forma en que se mezcla con determinado gas en la atmósfera. La interacción de ambos en el mismo ambiente es conocida como pre-mezcla combustible (gas) / oxígeno, y crea un riesgo de inflamabilidad o explosión bajo ciertas condiciones. La cantidad de esta pre-mezcla y la tasa de suministro ayudan a determinar que

tan alto es el riesgo de accidentalidad. En el caso de un quemador o mechero esta cantidad es modesta y la tasa es controlada, pero grandes volúmenes de pre-mezcla y una alta tasa de abastecimiento puede causar una explosión de gas. Hay dos maneras de ignición de gases pre-mezclados: autoignición o ignición experimental.

3.6.1 Autoignición de Gases Premezclados. El principal factor que afectan a la auto-ignición de gases pre-mezclados es la temperatura, incluso para gases “ordinarios”. El principal riesgo se presenta cuando una mezcla de gases capaz de soportar, reacciones exotérmicas es introducida en un tanque a una determinada temperatura y durante un tiempo considerable de ignición. En este caso la mezcla puede arder espontáneamente. Esto ocurre sólo cuando la tasa de generación de calor es mayor que la tasa de pérdida de calor.

Muchos estudios han sido llevados a cabo con el fin de cuantificar tales igniciones. Científicos como Nikolai Semenov y David Frank Kamenetskii han publicado estudios avanzados con este propósito en mente.²⁰ Sus estudios se basaron en la hipótesis de que la reacción química que tiene lugar durante este proceso ocurre en un solo paso, es decir es una reacción simple, pero las reacciones de combustión no satisfacen este supuesto, ya que normalmente ocurren como reacciones en cadena.

El desarrollo y solución de ecuaciones que describen las reacciones en cadena es muy complejo. Esto es parte de la razón por la cual la mejor manera de atenuar este riesgo es mediante el análisis de las variables que afectan la temperatura de auto-ignición (TAI). A continuación, se presentan las variables más influyentes sobre este valor.

²⁰ SEMENOV, N.N. “Some Problems of Chemical Kinetics and Reactivity”. Pergamon Press. Vol. 2. 1935.

- **Estructura Molecular:** la temperatura de autoignición depende de la fuerza de adherencia entre las cadenas más débiles y las moléculas combustibles. Para hidrocarburos n-alcános TAI disminuye con el incremento de número de átomos de carbono.
- **Concentración de Combustible:** un estudio llevado a cabo por Griffiths y Gray²¹ muestra que el valor de la temperatura de auto-ignición disminuye con el aumento de la concentración de combustible.
- **Presión:** un aumento de la presión generalmente reduce la temperatura de autoignición.
- **Concentración de Oxígeno:** compuestos que tienen bajas temperaturas de auto-ignición (<300 °C) y además presentan un enfriamiento de las flamas y un proceso de ignición en dos etapas muestran valores de temperatura de autoignición casi iguales a las del aire. Por otro lado, los compuestos con temperaturas de auto-ignición >400 °C y que presentan normal ignición de las flamas tienen temperaturas de autoignición en oxígeno que pueden ser considerablemente menores a las del aire.²²
- **Velocidad:** para que ocurra ignición a una determinada temperatura es necesario que el periodo de inducción sea igual al periodo de tiempo de residencia. Si un gas es transportado a través de un tanque o un tubo bajo turbulencia a una alta velocidad, la ignición no ocurrirá si el tiempo de residencia gastado por el gas es inferior al período de inducción.
- Otra variable que influye en la temperatura de autoignición, es el **tamaño de los tanques:** a menor tamaño mayor se torna esta propiedad y viceversa.

²¹ GRIFFITHS. Op. Cit.

²² ZABETAKIS. Op. Cit.

3.7 CARGA DE SÓLIDOS

La carga de los sólidos depende principalmente de la resistencia de los materiales involucrados en el proceso. En general, para dos superficies en contacto al menos una de ellas debe tener un alto valor de resistividad para recibir una cantidad considerable de carga. De igual forma, la humedad relativa puede afectar directamente el proceso de carga. Un aumento de este parámetro reduce la resistividad de la superficie, haciendo al material menos propenso a recibir carga; sin embargo, algunos materiales no se ven muy afectados por la humedad relativa.

Los valores altos de contenido de agua (60 – 80%) propician la formación de una capa microscópica de humedad sobre las superficies.

- **Cargas en Ropa y el Cuerpo Humano:** con el simple hecho de caminar, una persona se está cargando. Su carga es generalmente pequeña, por lo cual a menudo pasa inadvertida. Uno de los medios más habituales de generación de carga es la fricción.

Una persona puede acumular cargas con una diferencia de potencial tan alto como 10000 voltios entre su cuerpo y la tierra. Esta acumulación puede rápidamente causar una descarga y provocar a la persona cargada un shock si la persona está cerca de un conductor o de una superficie conectada a tierra. Además de un shock, estas cargas, bajo condiciones óptimas pueden producir ignición en presencia de ambientes combustibles. Múltiples prendas de lana y nylon son comúnmente generadores de electricidad estática. Cuando una persona se mueve, se crea fricción entre las distintas capas acelerando la producción y acumulación de carga electrostática.

Con el propósito de calcular el potencial requerido en este proceso, se realizó un estudio de la acumulación de cargas en ambientes árticos al aire libre.²³ La energía almacenada en la ropa se calculó que permanece en un valor aproximado de 0.011 milijulios. Cuando la persona remueve su capa mas externa de ropa, la energía estática aumenta a un valor de 0.04 milijulios.

Si la misma persona entra en un recinto caliente con baja humedad relativa y se quita su ropa exterior, un potencial entre el cuerpo y el suelo de 8000 voltios con energía almacenada de 3.9 mJ, sería producida. Esto es más que suficiente para proporcionar una chispa que podría desencadenar explosiones o mezclas inflamables combustibles comunes con el aire.

3.8. REDUCCIÓN EN LA TENDENCIA DE LA CARGA

Como se señaló anteriormente, la tendencia de un material a ser cargado depende de varios parámetros. Hay diferentes métodos para reducir la tendencia a la carga. Entre los que se encuentran:

- Disminución del área de contacto interfacial.
- Uso de series triboeléctricas.
- Reducción de la resistividad de la superficie.²⁴

La reducción o restricción de la tasa de generación estática es importante a fin de impedir los principales procesos en la etapa de acumulación.

²³ VEGHTE, J.H.; MILLARD, W.W. "Accumulation of Static Electricity on Arctic Clothing, Arctic Aeromedical Laboratory". AD-412-781. 1963.

²⁴ LUTTGENS. Op. Cit.

En el caso de hidrocarburos líquidos es importante evitar o disminuir las operaciones que producen electrostática para reducir la tasa de generación, lo que paralelamente reduce la agitación, evitar aire o vapor burbujeante, reducir velocidad de flujo, también evitar caída libre o chorros de líquido a través la superficie.

3.8.1 Disminución del Área Interfacial de Contacto. El proceso de carga se define como un fenómeno de superficie. De ahí que, la generación de cargas se reduce significativamente al minimizar la superficie de contacto entre los materiales involucrados en el proceso. La mejor manera de lograr esta reducción es por raspado de la superficie, lo cual puede lograrse a través de lijas y/o limas.

3.8.2 Uso de Series Triboeléctricas. Antes de hablar de su uso es importante conocer su definición. Las series triboeléctricas son listas en las que se ordenan los materiales de acuerdo al signo de la carga que adquieren cuando entran en contacto o se separan de otros a los que estaban unidos. (*Tendencia a ceder o conservar electrones*).

Se colocan al final de la lista los que tienen mayor tendencia a adquirir electrones. La generación de las cargas electrostáticas depende, principalmente de la diferencia entre las funciones de trabajo de los materiales involucrados. A mayor diferencia, mayor es la carga generada y viceversa.

El uso de la serie triboeléctrica para reducir la tendencia de la carga se centra en la selección de los materiales cuya posición en la serie sea una distancia mínima entre sí, lo que significa que sus funciones de trabajo difieren muy poco. Idealmente, la electrificación por contacto entre materiales cuyos valores de sus funciones de trabajo es el mismo debe ser cero (0).

Se cree que este fenómeno puede ser influido tanto por factores físicos, como características propias de cada superficie, así como por factores químicos tales como contaminaciones y diferencia de temperatura entre los dos materiales, lo cual aumenta la probabilidad de generar carga.

La posición de un material dentro de la serie triboeléctrica está determinado por su constante dieléctrica, que es una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada cuando se aplica un potencial, relativo a la permitividad del vacío. Coehn²⁵ estableció que los materiales que presentan alta permitividad relativa (*constante dieléctrica*) pasan a ser cargados positivamente cuando son separados de materiales de baja permitividad

Varios otros autores han trabajado en series triboeléctricas con materiales, aplicables a distintos campos específicos de trabajo. Montgomery²⁶ y Unger²⁷ establecieron experimentalmente una serie triboeléctrica donde indican sólo pequeñas diferencias en la ubicación de determinados materiales. Los materiales están clasificados dependiendo de la facilidad para ser cargados positivamente con el contacto de los materiales situados debajo de ellos en la serie, independiente de la magnitud de las cargas.

3.8.3 Reducción de la Resistividad de la Superficie. La reducción de la resistividad de la superficie a un nivel adecuado representa el método más fiable para reducir la generación de cargas estáticas. Esta reducción es influenciada por la velocidad de la separación de las superficies.

Un factor importante que influye en la resistividad de la superficie es la humedad relativa de la atmósfera. La resistividad de la superficie de algunos materiales

²⁵ COEHN, A. "Physics". 1898. p. 217.

²⁶ MONTGOMERY, D.J. "Static Electrification in Solids". Solid State Physics. 1959. p. 139–197.

²⁷ UNGER, B.A. "Electrostatic Discharge Failures of Semiconductors Devices". IEEE Proc. IRPS. 1981. p. 193–199.

disminuye por absorción de humedad en el aire; sin embargo no puede asumirse como una regla general. Algunos polímeros con muy baja absorción de humedad sólo muestran una ligera disminución en su tendencia a la carga a mayor humedad.

3.9. ACUMULACIÓN DE CARGA ELECTROSTÁTICA

La generación de carga por sí misma no representa una situación peligrosa. Para que este proceso llegue a ser peligroso debe ocurrir eventualmente una acumulación de carga.

3.9.1 Acumulación en Sólidos. Cuerpos que se encuentran relativamente bien aislados unos de otros y de la tierra permitirán una acumulación de cargas. Nuevamente, la humedad de la atmósfera desempeña un papel importante en el proceso de acumulación de cargas en sólidos.

Un sólido aislante puede ser cubierto por una película invisible de agua en periodos de humedad normal, proporcionando una fuga de corriente eléctrica través de dicha película. Sin embargo, en zonas con períodos de sequedad es necesario implementar métodos como conexión a tierra y enlace. Estas técnicas se examinarán más adelante en la sección 5, donde se explicaran los métodos para controlar la electrostática.

Por otra parte, la humedad tiene poco efecto sobre la migración y la acumulación de cargas en una superficie líquida. Mientras que la acumulación de cargas en sólidos está influenciada por dos factores principalmente: la tasa de generación y la resistencia del medio en donde posiblemente la carga se puede disipar.

Los materiales sólidos de alta resistividad eléctrica, de resistencia a tierra superior a $10^8\Omega$, son capaces de acumular cargas electrostáticas. Ejemplos típicos sólidos con alta resistencia son: vidrio, polietileno, nylon y PVC. Los materiales de alta resistencia son capaces de aislar conductores de la tierra. Esto representa un mayor riesgo de ignición que el propio material.

3.9.2 Acumulación en Líquidos. En un líquido el valor de conductividad que se toma como referencia para determinar la posibilidad de una acumulación es de 50 pS m^{-1} . Por debajo de este valor la carga es fácilmente acumulada, pero cuando el valor de conductividad es superior a este valor estándar, la carga se disipa rápidamente presentando un potencial peligro. Sin embargo, hay algunas excepciones. Por muy fuerte que sea la carga, un peligro inminente puede ser producido con líquidos cuya conductividad sea tan alta como 1000 pS m^{-1} .

En líquidos la acumulación de carga sólo ocurre cuando la tasa de generación es mayor que la tasa de disipación de carga. Esencialmente el líquido tiene que estar en contacto con la tierra en todo momento. La carga puede retenerse más tiempo en altas resistividades cuando se trata de líquidos.

3.9.3 Acumulación en Polvos. En el caso de polvos, debido a su alta resistencia el proceso de acumulación de cargas electrostáticas ocurre fácilmente mientras que la disipación de estas no es tan sencilla. Es difícil predecir el nivel de riesgo. En estos casos la medida de seguridad que se toma es el manejo de las nubes de polvo en ambientes donde cualquier descarga que se presente no genere chispa asumiendo que se conoce EMI o donde se cuente con protección a explosiones, en lugar de mitigar el riesgo controlando o eliminando la carga electrostática.

3.9.4 Acumulación en Conductores Aislados. Los conductores aislados pueden retener carga dependiendo de su resistencia a la tierra. Si esta resistencia es menor de $10^6\Omega$ el material no acumulará cargas. Los métodos de enlace y polo a tierra son la manera más fácil de evitar el riesgo de acumulación de cargas electrostáticas en materiales conductores. Las chispas producidas por conductores aislados son la causa más común de peligros relacionados con la electrostática y provocan muchos accidentes.

Pilkington da una lista de los conductores más comunes que podrían aislarse:

- Tuberías metálicas y tanques de procesos.
- Boquillas o inyectores que se encuentren conectados a algún tubo no conductor.
- Un conductor flotando sobre un líquido no conductor.
- (PTFE) válvulas de politetrafluoroetileno.
- Personal sin zapatos antiestáticos o que se encuentre de pie sobre una superficie aislante.

4. LA DESCARGA ELECTROSTÁTICA: UNA FUENTE DE IGNICIÓN

Hay lugar a una descarga electrostática cuando campos eléctricos elevados, producidos por grandes cargas acumuladas se descomponen. Durante este proceso, la totalidad o sólo una parte de la energía eléctrica almacenada se convierten en calor, el cual puede causar una ignición.

La energía de la descarga debe exceder la energía mínima de ignición de la atmósfera inflamable para que ocurra una explosión o incendio. La energía disponible para la ignición depende del tipo de descarga y su origen.

Para que una descarga sea capaz de encender cualquier combustible, necesita generar una temperatura al menos igual a la temperatura de autoignición del material. La mayoría de descargas en gases experimentan un fenómeno llamado *el efecto de pinch*.

Este tiene lugar cuando el campo eléctrico es tan fuerte que los iones gaseosos se comprimen en un delgado canal de plasma de alta temperatura, emitiendo un agudo “crack”.

Las descargas que experimentan este fenómeno son tan calientes que pueden incendiar cualquier combustible ya que poseen la energía suficiente. En el caso particular de las descargas tipo corona, estas no son capaces de causar la ignición ya que no experimentan este efecto, esta es la razón por la cual estas se denominan descargas frías.²⁸

²⁸ LUTTGENS. Op. Cit.

4.1 VALORACIÓN DEL POTENCIAL DE LA ELECTROSTÁTICA COMO FUENTE DE IGNICIÓN

El punto de partida para determinar el potencial electrostático como fuente de ignición es una comparación de la energía mínima de ignición (EMI) con la energía liberada en la descarga estática o electrostática, lo que ayuda a predecir la probabilidad de ignición. No obstante han de considerarse otros factores al evaluar la seguridad de una operación.

La selección de elementos tales como la distancia entre los electrodos, la capacitancia, el potencial, la forma y el tamaño de los electrodos, la resistencia y la inductancia del circuito de descarga deben ser evaluados cuidadosamente con el fin de tener una determinación óptima de EMI así como la duración y la distribución de la chispa que enciende la llama.

En general, el circuito está diseñado para eliminar los efectos de la resistencia y la inducción, y los parámetros restantes se ajustan a las condiciones óptimas. La energía mínima de ignición de varios materiales ha sido establecida para el uso en investigaciones de seguridad, sin embargo, en los casos con descargas que no son del tipo chispa, existen aún muchas dudas alrededor del significado de la energía mínima de ignición, y algunos estudios están siendo conducidos aún sin resultados publicados.

- **Energía Potencial de los Principales Tipos de Cargas Eléctricas:** en la Tabla 5 se resume la energía potencial liberada por los principales tipos de descargas estáticas. Estos valores son aplicables solo a mezclas combustible/gas bajo condiciones atmosféricas normales e indican la

probabilidad de ignición, que podría ser causada por diferentes tipos de descargas gaseosas.²⁹

Tabla 5. Comportamiento incendiario de distintos combustibles por descargas

Tipo de descarga gaseosa	Energía máxima liberada	Gases y Vapores EMI: 0.2 a 1 mJ	Polvos sensitivos EMI: 1 a 10 mJ	Polvo EMI > 10 mJ
Corona	0.01 mJ	No	No	No
Radiante	4 mJ	Posible	Sin probar	Sin probar
Descarga radiante mejorada	10 mJ	Posible	Susceptible	Susceptible
Cono	10 mJ	Posible	Susceptible	Susceptible
Descarga radiante de propagación	1000 mJ	Si	Si	Si
Descarga de chispa	1000 mJ	Calculable	Calculable	Calculable

Fuente: COEHN. "Physics". 1898. p. 217.

4.2 MECANISMO DE DESCARGA

Siempre hay electrones libres en la atmósfera, y estos se pueden producir de varias formas y en diversos medios. En un campo eléctrico estos electrones son forzados a fluir en dirección opuesta a este. Su velocidad depende de la intensidad del campo y la frecuencia de colisión elástica con las moléculas de gas en el aire.

Los electrones ganan velocidad a medida que la fuerza del campo se incrementa. Alcanzan una velocidad crítica cuando las colisiones se convierten en inelásticas.

²⁹ Ibíd.

En esta etapa, las moléculas de gas envueltas en colisiones con electrones liberan otros electrones, convirtiéndose en iones positivamente cargados. Este proceso se llama ionización. Dicho proceso lleva a la producción de un elevado volumen de partículas cargadas (electrones e iones positivos) moviéndose con o en contra de la polaridad del campo. Este movimiento es una corriente eléctrica cuya magnitud depende del número de cargas y la velocidad con que estas se mueven. Este proceso se llama descarga gaseosa.

Cuando las descargas gaseosas se expanden a lo largo de toda la longitud del campo, una falla eléctrica ocurre en el aire causando que este adquiera la intensidad de campo necesaria (aproximadamente 3 MV/m, en un campo eléctrico homogéneo bajo condiciones atmosféricas normales).

4.3. TIPOS DE DESCARGA

Las descargas de electrostática se pueden clasificar en dos categorías principales:

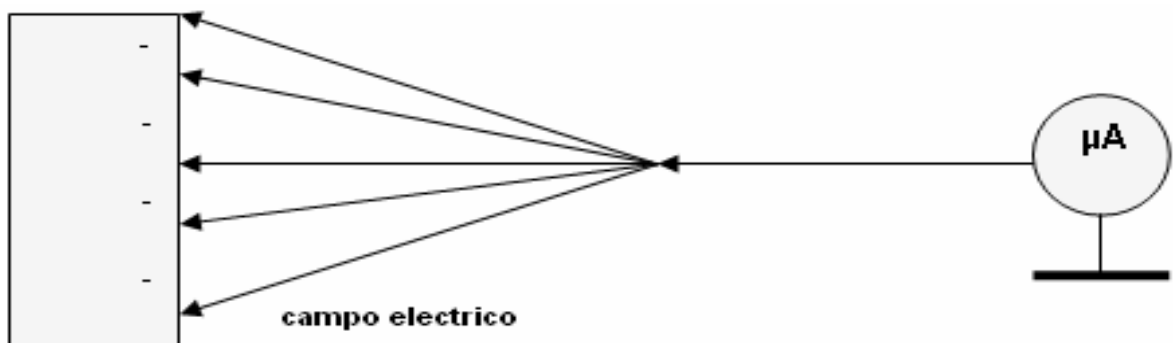
- **Descargas de un (1) electrodo:** tal como descarga de corona, descarga radiante, descarga radiante mejorada, y descarga de cono.
- **Descarga de dos (2) electrodos:** que cubre solo la descarga en chispa como única en este tipo.

Los siguientes párrafos describen los subtipos de descarga. Es imperativo que la gente dentro de la industria de los hidrocarburos comprenda los conceptos asociados con los diversos tipos de descarga con el fin de establecer y mantener entornos seguros de trabajo.

4.3.1 Descarga de Corona. Se origina en un electrodo metálico y se ramifica de forma difusa en el espacio o hacia superficies débilmente conductoras. No crea un canal conductor de plasma caliente.

La Figura 20 muestra una representación de la distribución del campo entre un aislante cargado y una descarga de corona de punto con polo a tierra. El campo eléctrico generado por la carga del electrodo, suele ser bajo, pero mucho más alto cerca al punto.

Figura 20. Campo eléctrico entre un objeto cargado y una descarga de corona de punto con polo a tierra³⁰



Fuente: LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Collection of Accidents Caused by Static Electricity". Journal of Electrostatics. 1985. p. 47-55. 16 p.

Un voltaje mínimo de 2-6 kV es necesario para que ocurra una descarga de corona. La descarga de corona tiene la menor energía entre todos los tipos de descargas electrostáticas, y sólo una pequeña proporción de la energía está disponible para producir ignición.

³⁰ HARVEY, T.J.; WOOD, R.J.K.; DENUAULT, G.; POWRIE, H.E.G. "Effect of Oil Quality on Electrostatic Charge Generation And Transport". Journal of Electrostatic 55. 2002. P. 1-23.

La energía máxima liberada por una descarga de este tipo es de aproximadamente 0.01 mJ, la cual solo sería suficiente para encender los gases más inflamables, como CS₂ o H₂.

Las características de las descargas de corona son diferentes, dependiendo de si el electrodo puntual está cargado positiva o negativamente; sin embargo, este tipo de descargas producidas por electrodos puntuales cargados negativamente son más propensas a ser iniciadas en bajos potenciales que aquellas que surgen de electrodos puntuales con polaridad positiva.

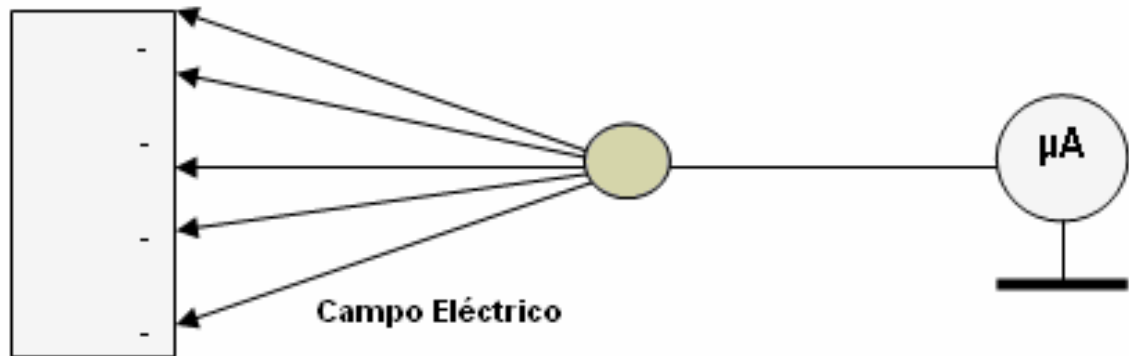
- Descarga de corona como neutralizadores de estática.

La carga estática generada en materiales altamente aislantes no es rápidamente disipada por una conexión a tierra como lo es sobre los conductores. Esto es importante cuando se considera la acumulación de las cargas electrostáticas en un fluido cargable.

La metodología usada para disipar las cargas estáticas o electrostáticas en estos casos es agregar cantidades de cargas iguales pero opuestas sobre la superficie, lo cual se puede lograr ionizando el aire a nivel local y entonces contando con el campo de carga indeseada sustraer una cantidad apropiada de carga de la superficie. Esto es para lo cual las descargas corona se usan comúnmente.

4.3.2. Descargas Radiantes. La Figura 21 muestra la representación de las descargas radiantes. Esta es muy similar a la descarga de corona solo que en este caso el punto de aguja o electrodo puntual es reemplazado por un electrodo esférico. Esta descarga ocurre por la distorsión del campo eléctrico provocada por el electrodo, aumentando localmente su valor de falla.

Figura 21. Campo eléctrico entre un objeto cargado y una descarga corona de esfera con polo a tierra



Fuente: LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Collection of Accidents Caused by Static Electricity". Journal of Electrostatics. 1985. p. 47–55. 16 p.

La "esfera" típicamente posee un radio de 5 a 50 mm, y al igual que en las descargas de corona, la descarga radiante también es de baja energía. Una descarga gaseosa en la forma de descarga radiante puede suceder cuando un conductor con polo a tierra es colocado dentro de un campo eléctrico que se encuentra cercano a su fuerza de falla dieléctrica.

La descarga se produce con un sonido de "crack" y un corto pulso de corriente. Como resultado de la descarga una parte de la carga del objeto cercano al electrodo es neutralizada. Debe haber una mínima diferencia de potencial de 20 – 25 kV para que una descarga radiante se produzca. Las circunstancias que pueden llevar a este tipo de descarga son:³¹

- Llenar un tanque a una gran velocidad con un líquido aislante, con la superficie del líquido cargado acercándose a un acoplamiento interno que puede actuar como un electrodo.
- Descargar sólidos en bolsas plásticas cerca a materiales metálicos.

³¹ LUTTGENS. Op. Cit.

- Introducir un objeto conductor dentro un líquido altamente cargado.
- Proyectar partes metálicas en una nube de polvo o aerosol altamente cargada.
- Verter polvos aislantes en silos cuando la superficie de llenado se aproxima al acoplamiento del conductor.

La capacidad de producir ignición de este tipo de descargas es proporcional al radio.³² No toda la carga de la superficie se encuentra disponible para la descarga. Esto limita la cantidad de energía disipada y solo una fracción de la energía total esta accesible para la ignición.

Se estima que la energía de una descarga radiante no excede los 4 mJ.³³ En el sector petrolero accidentes relacionados con este tipo de descargas se pueden dar en operaciones en donde se vean involucradas sustancias como polvo, niebla y movimientos de materiales plásticos.

La descarga radiante que proviene de un aislante cargado negativamente es más inflamable que la proveniente de un aislante cargado positivamente. Esto se relaciona con la formación de una “raíz” brillante en el electrodo únicamente en el caso de un conductor puesto a tierra positivamente cargado.³⁴

Las descargas radiantes son capaces provocar ignición a la mayoría de gases y vapores, y pueden encender algunos de los polvos más sensitivos. Para que una descarga radiante encienda una mezcla de gas inflamable, es necesario que el

³² *Ibíd.*

³³ PILKINGTON, G.A. “Static Electricity. Fried or Foe”. Electrical Safety in Hazardous Environments. Chilworth Technology Ltd.: Conference Publication N° 390. 1994.

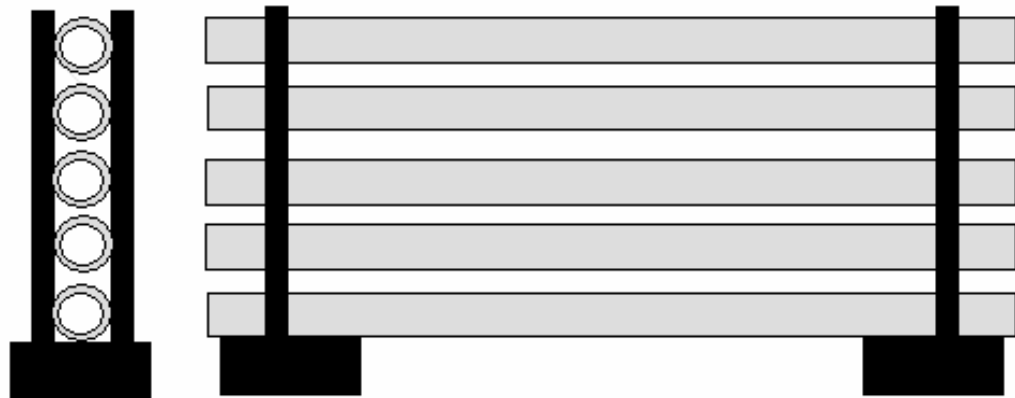
³⁴ BRITTON, L.B.; SMITH, J.A. “Static Hazards Of Drum Filling”. 54^a ed. 21st Loss Prevention Symposium. AIChE. 1987.

espacio entre el aislante y el conductor por el cual ocurre la descarga sea mayor a 20-30 mm y se debe alcanzar un potencial de superficie mínimo (45 – 60 kV).

Para que una descarga radiante inflame un líquido³⁵ este necesita estar cargado negativamente, con un potencial de superficie mayor que 30 kV y una esfera metálica de diámetro entre 10 a 50 mm como electrodo.

4.3.3 Descarga radiante mejorada. Se caracteriza por ser muy intensa y solo ocurre en situaciones específicas. No está comúnmente reportada en la literatura de la industria petrolera. La Figura 23 ilustra una situación donde una descarga radiante mejorada podría ocurrir.

Figura 22. Tubos “plásticos” cargados en contenedores “plásticos”



Fuente: LUTTGENS, Günter; WILSON, N. “Collection of Accidents Caused by Static Electricity”. Journal of Electrostatics. 1985. 47 – 55. 16 p.

La Figura muestra tubos del mismo material, que están electrostáticamente cargados por fricción. Los tubos colocados uno sobre otro, entre contenedores de plástico (*material aislante*) facilitan el surgimiento de la fuerza electrostática proveniente de la carga, causando que se repelen entre sí. Debido a que estas fuerzas actúan contra la gravedad, los tubos se separan a medida que la distancia entre ellos aumenta.

³⁵ EBADAT, V.; CARLWRIGHT, P. “Electrostatic Hazards From Small Non-conductive Containers For Flammable Liquids”. 27th Loss Prevention Symposium. 1993.

La forma en que se cargan induce a que tengan la misma polaridad pero diferentes cantidades de carga sobre la superficie. La densidad de carga está limitada por la máxima intensidad de campo de la atmósfera, así como de la carga presente en cada tubo. La energía en el sistema se incrementa al unir los tubos que se repelen entre sí, incrementando la densidad de descarga. La intensificación de la densidad de carga genera las condiciones para que una descarga ocurra.

Para el caso de las fuerzas de atracción de cargas opuestas, vencer las fuerzas de coulomb produce potenciales más altos; mientras que superar las fuerzas de coulomb de repulsión entre cargas iguales produce mayores densidades de carga. Cada uno de estos procesos causa que la energía eléctrica aumente y por lo tanto la descarga de gas también. Una descarga radiante mejorada se produce cuando un conductor metálico de puesta a tierra es colocado en uno de los lados de los tubos cargados.

Esta descarga produce unos canales luminosos con forma de escobilla que a veces alcanzan la superficie del aislante. Esto pasa debido a que la energía de la descarga es determinada parcialmente por la densidad de carga en la superficie del aislante.

4.3.4 Descarga de Cono o Volumétrica. Este tipo de descarga ocurre en la superficie de bultos altamente cargados de polvo. Cuando un polvo aislante altamente cargado es colocado en volumen (*por ejemplo en un depósito o tanque*) fuertes campos electrostáticos son generados e ionizan el aire en la superficie del polvo. Esto forma canales calientes conductivos que propagan la energía desde el lado de la pared hacia el centro de la pila del material.³⁶ Este mecanismo es muy similar al de las descargas radiantes.

³⁶ PILKINGTON. Op. Cit.

Cuando se llenan grandes contenedores con polvos, hay una acumulación de carga en los polvos, que son el punto de inicio de la descarga. Además del volumen creciente de los agregados de polvo, existe otra razón por la cual las cargas son generadas y no disipadas. La compactación de los polvos ya que las cargas a su vez se compactan si el polvo es aislante. Esto ocurre a lo largo de la superficie del polvo.

Se han llevado a cabo varios estudios para determinar los límites para este tipo de descarga.

Glor³⁷ determinó experimentalmente que el tamaño mínimo para que una partícula produzca una descarga de este tipo es de 0,1 mm. Este autor, también desarrolló una correlación para calcular la cantidad de energía máxima que podría ser transferida dependiendo del diámetro del depósito y del diámetro medio de la partícula. Parece ser que sólo una pequeña fracción de la carga acumulada puede ser disipada en una descarga tipo cono. Sin embargo no hay datos disponibles que puedan cuantificar esto.

Polvos con una resistividad de $10^{10}\Omega\text{-m}$ se han considerado desde siempre como no susceptibles a ignición por descargas de acumulación de polvos, mientras que los polvos con una resistividad de $10^{12}\Omega\text{-m}$ o más han sido reportados en eventos de este tipo de descarga.³⁸

Aunque hay algunas correlaciones para el cálculo de la energía disipada en una descarga en cono, la experiencia industrial sugiere como regla empírica un valor de cerca de 10 mJ que se cree es capaz de causar la combustión de gases, vapores y polvos sensitivos.

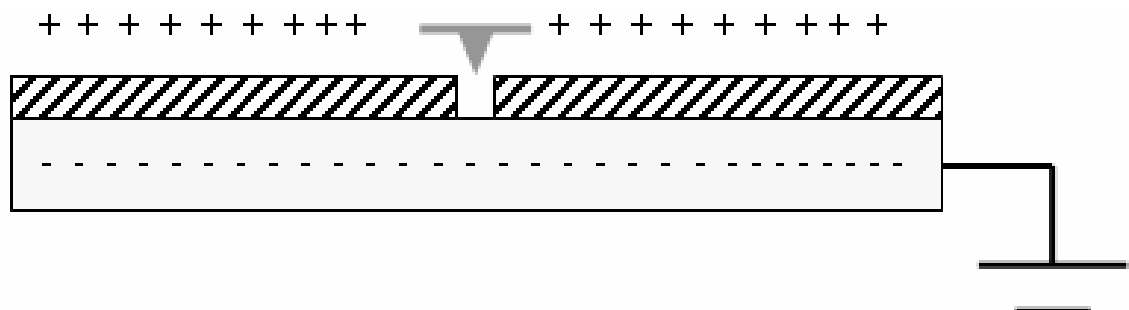
³⁷ GLOR, Martin. "Conditions For The Appearance Of Discharge During Gravitational Compaction Of Powders". J. Electrostatics 15. 1984. p. 223–235.

³⁸ BABRAUSKAS. Op. Cit.

4.3.5 Descarga Radiante de Propagación. Son consideradas el tipo más poderoso de descarga electrostática con la excepción de los rayos. Si se acumula una carga doble capa de polaridades opuestas, la cantidad límite de cargas que pueden ser sostenidas sobre una superficie sin descargar por ionización del aire se incrementa.

Esto ocurre cuando una capa aislante es colocada en la parte superior de una placa metálica conectada a tierra, permitiendo que las cargas se acumulen hacia el otro lado de la capa aislante. La Figura 24 ilustra la carga de una doble capa.

Figura 23. Proceso de carga de doble capa que ocurre cuando un aislante está colocado adyacente a un conductor de puesta a tierra



Fuente: LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Collection of Accidents Caused by Static Electricity". Journal of Electrostatics. 1985. 47 – 55. 16 p.

A medida que se aumenta el voltaje a través de un determinado material dieléctrico, se alcanza un valor en el cual el dieléctrico suelta una chispa, en este punto se dice que sufrió una falla. Consecuentemente por definición el voltaje al cual la falla ocurre dividido por el grosor del material es igual a la "fuerza de fallo del material."

Bajo estas condiciones la carga máxima de superficie es gobernada por la capacidad de resistencia del aislante (*una falla rápida en la resistencia del material producirá una descarga*), que es del orden de 20^{40} MV m⁻¹, en lugar de 3 V m⁻¹ del

aire.³⁹ También, la constante dieléctrica de la mayoría de aislantes se encuentra entre 2 y 4 veces la constante dieléctrica del aire. Estos dos factores se combinan para dar cargas superficiales máximas de $5 \times 10^{-4} \text{ C m}^{-2}$ y se considera que $2.5 \times 10^{-4} \text{ C m}^{-2}$ es la carga mínima de superficie que se necesita para una descarga en radiante de propagación.

Una descarga radiante de propagación puede incendiar la mayoría de mezclas inflamables, incluyendo nubes de polvo. La descarga ocurre ya sea cuando el electrodo puesto a tierra es acercado a la superficie aislante cargada, o cuando una caída dieléctrica de la capa aislante causa una puntura local. Una descarga radiante de propagación es capaz de descargar casi toda la carga almacenada en la doble capa.

Otro hecho importante acerca de este tipo de descarga es que no sucede si el grosor de la capa aislante es mayor que 8-10 mm, pero tampoco puede ocurrir con capas aislantes muy delgadas. Las circunstancias que pueden llevar a una descarga radiante de propagación incluyen:⁴⁰

- Transporte de un líquido aislante a una gran velocidad a través de tubos plásticos que tienen conexión a tierra en el exterior o en tubos metálicos con una cobertura interior aislante.
- Abastecimiento de grandes depósitos no conductivos con polvos aislantes.
- Operar cintas transportadoras que poseen materiales metálicos en el exterior y centros de materiales aislantes a grandes velocidades.

³⁹ *Ibíd.*

⁴⁰ LUTTGENS. *Op. Cit.*

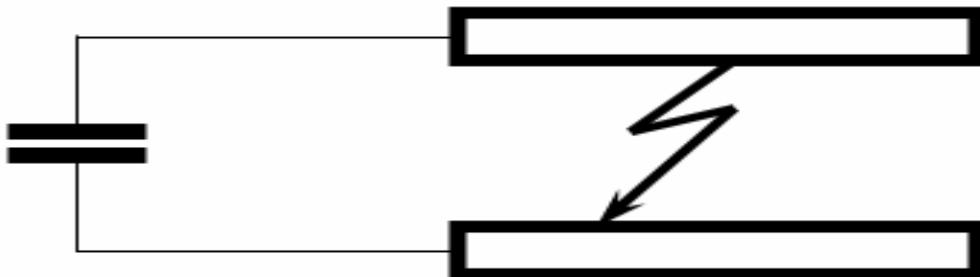
- Colisiones repetidas de partículas de polvo en una superficie aislante sobre una capa conectada a tierra.
- Transportar un polvo aislante a gran velocidad a través de tubos plásticos o depósitos que están en su exterior con contacto a tierra.

La descarga radiante de propagación se forma principalmente porque la fuerza de fallo de la estructura porosa es menor que la del aire, no obstante la deposición de una capa fina de polvo sobre la superficie metálica también influye en este fenómeno, aunque en menor escala.

4.3.6 Descarga de Chispa. Este tipo de descarga se forma por la separación de dos electrodos en presencia de aire cuando el campo eléctrico alcanza valores de aproximadamente 3MV m^{-1} (punto de ruptura dieléctrica para el aire). Es más probable que las descargas se formen en los bordes de los electrodos donde la densidad de carga es la mayor.

El canal de descarga se extiende por toda la distancia entre los electrodos. La Figura 25 ilustra la descarga en chispa de un condensador.

Figura 24. Carga de doble capa que ocurre cuando un aislante esta junto a un conductor de puesta a tierra



Fuente: LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Collection of Accidents Caused by Static Electricity". Journal of Electrostatics. 1985. 247 – 255. 16 p.

Un ejemplo de descarga de chispa es cuando un contenedor metálico se carga durante su llenado y hay un conductor grande o puesto a tierra. El contenedor entonces actúa como condensador.

El cuerpo humano también puede actuar como condensador, ya que conduce la electricidad cuando se encuentra aislado del suelo y es capaz de liberar descargas en chispa.

La energía disponible en un sistema para una descarga de chispa se puede calcular midiendo la capacitancia y el potencial de aislamiento del sistema conductor; sin embargo se sabe que hasta 1000 mJ pueden ser enviados por una descarga.

Esta cantidad de energía está por encima del EMI (*energía mínima de ignición*) de la mayoría de sustancias. Se requiere mucha más energía para incendiar una mezcla de gases cuando uno de los electrodos no es metálico.⁴¹

4.4 VALORACIÓN DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS COMO CAUSA DE IGNICIÓN

Durante la investigación de un incendio o explosión, hay generalmente vestigios o indicios dejados por las descargas de gas, que pueden ser utilizadas para identificar la fuente de ignición.

No siempre es fácil identificarla, especialmente en casos en donde la energía liberada es muy pequeña, haciendo imperceptibles los indicios o vestigios.

⁴¹ BARRETO, S.; REYNOLDS, I.; JURENKA, H. "Ignition of Hydrocarbons And The Thermalization Of Electrical Discharges". J. Applied Physics 45. 1974. p. 3317–3327.

Günter⁴² publicó una lista de diferentes clases de vestigios, que podrían haberse originado por diferentes tipos de descargas de gas.

- Las descargas de corona se extienden en el tiempo. Estas liberan pequeñas cantidades de energía a una baja tasa, lo anteriormente expuesto nos sugiere que no dejan rastros; sin embargo estas descargas pueden producir efectos secundarios como el mejoramiento de la mojabilidad de las superficies poliméricas a las cuales se han dirigido.
- Las descargas radiantes dejan atrás huellas en forma de helecho en las superficies, usualmente no se pueden visualizar inmediatamente. Para que se hagan visibles, se debe aplicar alguna sustancia (*tinta Xerox por ejemplo*). Sin embargo partículas de polvo transportadas por el aire y que son atraídas por la superficie aislante, después de una descarga radiante, dejan en evidencia los rastros después de un periodo de tiempo.
- Las descargas radiantes mejoradas generan un patrón similar al de las descargas radiantes sobre las superficies desde las que han sido liberadas, pero en una escala mayor.
- Las descargas en cono no dejan huellas en los cúmulos de polvo de los cuales se originan, sin embargo si en las paredes del depósito donde son terminadas, pueden dejar marcas de erosión, pero para verlas se necesita examinar con una lupa.
- Las descargas radiantes de propagación pueden dejar rastros “ramificados” cubriendo grandes áreas de la superficie aislante. Estas se revelan de la misma manera que las de las descargas radiantes y pueden ser tan potentes

⁴² LUTTGENS. Op. Cit.

que su ruta puede identificarse a veces instantáneamente como rastros de plástico derretido. Usualmente se pueden ver como una perforación en forma de punzada o cráter. También se puede observar erosión, especialmente en los casos, donde la descarga radiante de propagación es iniciada por un electrodo puesto a tierra cercano a la superficie.

- Las descargas de chispa pueden producir erosión a veces e incluso fundición de los electrodos a lo largo de su curso, dependiendo de la cantidad de energía que es liberada.

Las descargas electrostáticas pueden dejar rastros que a veces no pueden ser identificados o es muy difícil hallarlos. Estos representan evidencia cualitativa, y por lo tanto no son necesariamente un medio confiable para sacar conclusiones acerca del comportamiento inflamable de las descargas. Para corroborar una ignición electrostática es necesario llevar a cabo una reconstrucción de las condiciones del accidente para así poder comparar con casos previamente documentados.

5. MEDIDAS PREVENTIVAS Y DE SEGURIDAD

Basados en este análisis de la electrostática como fuente de ignición, es correcto concluir que para que este fenómeno se pueda considerar como un peligro de incendio o explosión se deben presentar varias condiciones simultáneamente.

Estas condiciones se representan por el “*triángulo de fuego*”, como se vio en la sección 2. Si se retira alguno de estos componentes, los peligros de ignición causados por la electrostática se pueden descartar.

En la mayoría de los casos, la alternativa más viable para evitar un incendio o explosión es prevenir el desarrollo de una atmósfera inflamable. Sin embargo existen circunstancias en donde el mejor método de control es la eliminación de las fuentes de ignición.

Esta sección trata de las estrategias de control aplicables cuando la electrostática es una fuente potencial de ignición.

En general, las estrategias están enfocadas en el manejo de la generación de la carga o de la prevención de su acumulación.

Kassebaum⁴³ organizó una escala basada en el tipo de descarga como fuente de ignición, la energía de ignición de los materiales y sus valores correspondientes de energía.

La Tabla 6 muestra esta escala, la cual es muy útil para el propósito de este análisis.

⁴³ KASSEBAUM, John H.; KOCKEN, Richard A. “Controlling Static Electricity in Hazardous (Classified) Locations”. IEEE Transactions On Industry Applications. Vol. 33. N° 1. 1997.

Tabla 6. Fuentes de ignición y energía de ignición de los materiales eléctricos

Energía (mj)	Materiales	Químicos	Fuentes de ignición
1000	Polvos gruesos, Gases insensitivos	Cloruro de metileno Amoníaco	Llamas Fuentes químicas Superficies calientes Propagación radiante
100	Polvo muy finos Nubes de polvo Gases insensitivos	←	Límite de chispa del personal
10	Polvos sensitivos Neblinas finas	←	Límite de descarga en cono
1	Algunos gases en el aire	Acetona	Límite descarga radiante
0.1	Gases del aire Polvos muy sensitivos Neblinas muy finas	Metano Propano Metanol	Chispas Metálicas Chispas de Corrientes fuera de curso Conductores subterráneos Pequeños puntos calientes
0.01	gases sensitivos Explosivos primarios Aire enriquecido con Oxígeno	Etileno Hidrógeno Acetileno	Descargas en textiles, Vestuario Acoplamiento inductivo débil Captación de ondas de radio de baja frecuencia

Fuente: COEHN. "Physics". 1898. p. 217.

5.1. PRECAUCIONES GENERALES

Para prevenir los accidentes causados por la electrostática como una fuente de ignición, es indispensable detectar sus principales causas. Estas causas fueron clasificadas en un estudio previo realizado por Martin Glor⁴⁴ en dos (2) grupos:

5.1.1 Razones Técnicas, Administrativas y Organizacionales.

- La acumulación de cargas se asocia generalmente con el proceso de las operaciones involucradas, por ejemplo, la fricción entre los materiales (tuberías) durante una operación de limpieza.
- No se tienen en cuenta las consecuencias en términos de la acumulación de cargas electrostáticas, el peligro de incendio y la probabilidad de la existencia de una atmósfera explosiva, cuando se realiza un cambio o una innovación dentro del equipo de operación.
- Las medidas para prevenir la acumulación de las cargas electrostáticas con frecuencia son de naturaleza organizacional, por lo cual pueden ser susceptibles a errores humanos, es importante asegurarse que los equipos de transporte y almacenamiento estén conectados a tierra.
- La falta de conocimiento en física y la inexperiencia con los fenómenos electrostáticos puede conducir a errores, que llevan a que sea más probable la ocurrencia de accidentes. Este tema no es de fácil entendimiento y por lo tanto, tampoco lo es el hecho de predecir su comportamiento, de allí que el conocimiento es un requerimiento importante para poder manejar el peligro debido a la acumulación de cargas electrostáticas.

⁴⁴ GLOR, Martin. "Electrostatic Ignition Hazards In The Process Industry". Institute For The Swiss Promotion of Safety And Security. Journal of Electrostatic 63. 2005. p. 447–453.

- Estos dos (2) últimos ítems traen a colación otro asunto importante, que es el nivel de entrenamiento que todo el personal, desde los operadores hasta los ingenieros deben tener. A menudo es difícil asegurar que estos niveles de calidad y entrenamiento se mantengan, especialmente en tiempos de cambio tanto en recursos humanos como en las estructuras corporativas. Un adecuado entrenamiento de los empleados con respecto a la educación acerca de la electrostática debería ser la responsabilidad de todos los trabajadores de la industria petrolera.
- Finalmente, la mayoría de accidentes donde no hay evidencia de cualquier fuente plausible de ignición son atribuidos a la electrostática. Este enfoque es peligroso y no es recomendado. Cualquier medida tomada en base a este hallazgo podría ser inefectiva o no tener el alcance necesario. En la mayoría de los casos esto refleja *“la carencia de conocimiento y entendimiento del campo en lo que concierne a la electrostática por parte del personal técnico”*.⁴⁵

5.1.2 Conflictos entre los Requerimientos de Seguridad y las actividades del sector. La implementación de medidas y procedimientos para lograr las metas corporativas o gubernamentales en el campo, tales como la protección ambiental, la seguridad ocupacional, la calidad de la seguridad o incluso de la productividad, con frecuencia se realizan sin tomar en consideración el riesgo de aumentar los peligros de ignición debidos a la generación o acumulación de electrostática.

Los ejemplos más notables incluyen:

- La utilización de cascos plásticos para la protección de la cabeza incluso en zonas peligrosas en las cuales podrían causar descargas incendiarias.

⁴⁵ Ibíd.

- Las medidas de protección contra la corrosión como pinturas, revestimientos de vidrio y/o recubrimientos interiores en las tuberías evitan la igualación del potencial y la conexión a tierra de las superficies ásperas de las tuberías. En casos extremos, la acumulación de cargas electrostáticas y las descargas resultantes pueden incluso anular el propósito original del recubrimiento.
- La acumulación de polvo en los filtros locales para la salud ocupacional y la protección ambiental (nubes de polvo) pueden formar una atmósfera potencialmente explosiva, especialmente durante la limpieza de los filtros. La carga electrostática se puede acumular si hay una conexión inadecuada de los componentes a tierra como los elementos de soporte del filtro durante la operación de limpieza.

5.2. MÉTODOS COMUNES PARA EL CONTROL DE LA ELECTROSTÁTICA

El peligro de la presencia de la electrostática como fuente de ignición puede ser eliminado ya sea evitando la generación o acumulación de la cargas estáticas y posterior descarga o por eliminación y/o control de las mezclas de vapor/aire en los puntos donde la electrostática no libera suficiente energía para encender estas mezclas.

En otras palabras, el peligro podría ser eliminado controlando uno de los tres componentes del “triángulo de fuego”. En los siguientes párrafos serán discutidos los métodos más importantes, sus procedimientos básicos y efectivos para prevenir la ignición por electrostática

5.2.1 Control al Ambiente. Cuando una descarga electrostática no puede ser evitada utilizando alguno de los métodos explicados en la sección anterior, la única alternativa que queda para prevenir que la electrostática se convierta en un

peligro potencial, es la presencia de una mezcla aire/vapor inflamable. En el caso de la industria petrolera esto es de algún modo contradictorio ya que la presión de vapor del petróleo produce mezclas inflamables a temperaturas de manipulación

El método para controlar el ambiente está basado en el concepto de la proporción vapor/aire. Una mezcla combustible no puede ser encendida a menos que la proporción de esta se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad. Los peligros pueden controlarse ya sea disminuyendo el contenido de oxígeno, desplazando el aire con gases inertes o manteniendo la concentración de vapor por encima del límite superior de inflamabilidad mediante la introducción de gas natural. Este método debe ser usado con precaución para evitar la contaminación del producto.⁴⁶

5.2.2. Recomendaciones Asociadas con la Presencia de Mezclas Vapor / Aire.

Una mezcla de vapor/aire es clasificada como inflamable dependiendo de la presión de vapor y del punto de inflamabilidad del producto. Para tener un mejor entendimiento de este concepto el Instituto Americano de Petróleo ha recomendado la clasificación de estas mezclas basada principalmente en la presión de vapor. Como referencia, la NFPA 30 clasificó los líquidos como combustibles e inflamables de la siguiente manera:⁴⁷

- Se clasifican como líquidos inflamables aquellos con un punto de inflamabilidad inferior a 37,8 °C y una presión absoluta de vapor que no excede 40 Psi a esta temperatura. Es además conocido como líquido Clase 1 y se subdivide así:
 - **Líquidos Clase IA:** incluyen aquellos que tienen puntos de inflamabilidad por debajo de 22,8 °C y tienen un punto de ebullición inferior a 37,8 °C.

⁴⁶ API RP. API Standards. "Protection Against Ignitions Arising Out Of Static, Lightning, And Stray Currents". 2003.

⁴⁷ *Ibíd.*

- **Líquidos Clase IB:** aquellos que tienen un punto de inflamabilidad por debajo de 22,8 °C y un punto de ebullición superior a 37,8 °C.
- **Líquidos Clase IC:** definen como aquellos que tienen puntos de inflamabilidad iguales o mayores que 22,8 °C y menores de 37,8 °C.
- Un líquido combustible es aquel que tiene un punto de inflamabilidad igual o mayor a 37,8 °C y se puede subdividir como se describe a continuación:
 - **Líquidos Clase II:** incluye aquellos que tienen un punto de inflamabilidad que varía de 37,8 °C a 60 °C.
 - **Líquidos Clase IIA:** incluye aquellos que tienen un punto de inflamabilidad entre 60 °C y 93,4 °C.
 - **Líquidos Clase IIIB:** incluye aquellos que tienen un punto de inflamabilidad por encima de 93,4 °C.

5.2.2.1 Productos con Presión de Vapor Baja. Estos son productos con puntos de inflamabilidad por encima de 38 °C. Ejemplos claros son: solventes, diesel, y keroseno, y no representan mayor peligro, ya que usualmente son manipulados a temperaturas por debajo de su punto de inflamabilidad. El peligro aparece cuando son tratados a altas temperaturas o cuando están presentes algunos contaminantes de alta o intermedia presión de vapor.

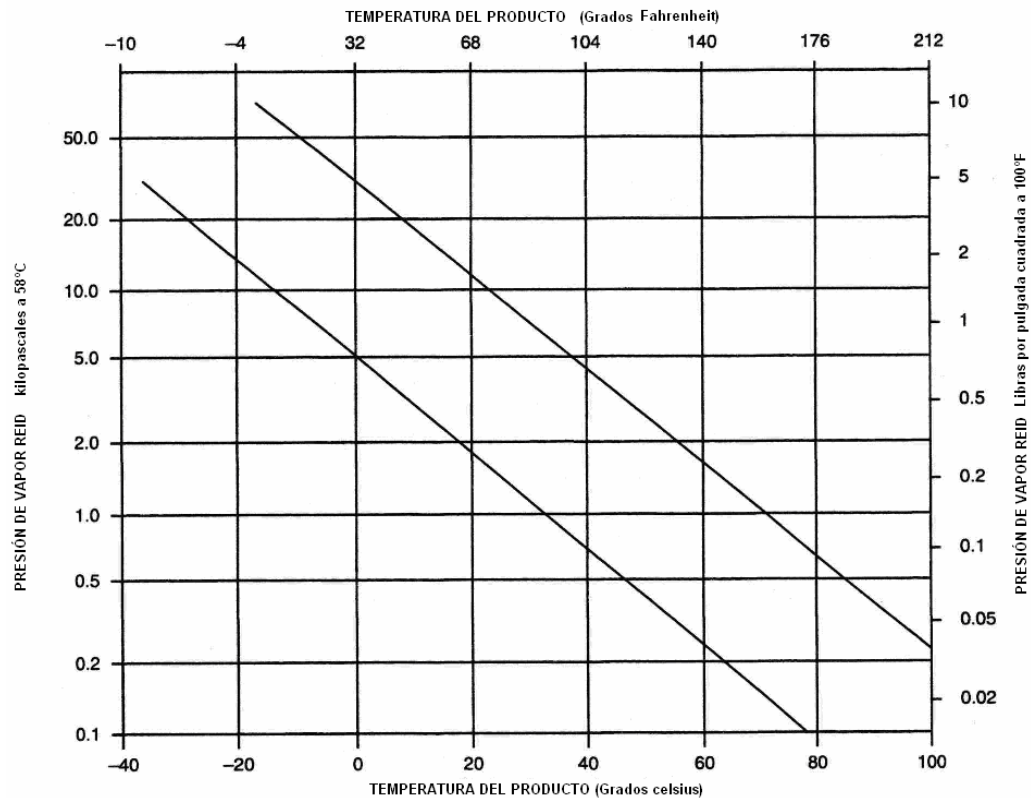
Los contaminantes⁴⁸ pueden ser agregados durante el transporte o almacenamiento del producto, donde residuos de un vapor inflamable utilizado anteriormente pueden estar presentes. Los productos de presión de vapor baja,

⁴⁸ ASTM D 4865. "Standard Guide For Generation And Dissipation Of Static Electricity In Petroleum Fuel Systems".

tratados previamente con hidrogeno pueden también producir una mezcla inflamable vapor/aire, en el espacio de vapor de los tanques de almacenamiento si se ha disuelto este combustible u otro hidrocarburo ligero ha sido introducido.

5.2.2.2 Productos con Presión de Vapor Intermedia. Los productos cuyas presiones de vapor se clasifican como intermedias representan un alto riesgo de formar una mezcla inflamable en el espacio de vapor al ser sometidos a temperaturas de manipulación, incluyendo líquidos inflamables con una presión de vapor de Reid por debajo de 4,5 Psi con un punto de inflamabilidad menor que 38 °C. Los solventes como el Xileno, Benceno y Tolueno se encuentran dentro de esta categoría.

Figura 25. Relación entre la temperatura, la presión de vapor de Reid y los límites de inflamabilidad del los productos del petróleo



Fuente: API RP. API Standards, "Protection Against Ignitions Arising Out Of Static, Lightning, And Stray Currents". 2003.

Algunos productos que deberían estar dentro de este grupo bajo condiciones normales pueden quedar por fuera bajo condiciones de temperatura extrema. La Figura 26 presenta la correlación aproximada entre la presión de vapor de Reid⁴⁹ y la temperatura del producto en el rango de inflamabilidad. Esta gráfica puede ser útil para la determinación de la probabilidad de formación de una mezcla vapor/aire inflamable.

5.2.2.3 Productos con Presión de Vapor Alta. Se definen como los productos del petróleo con una presión de vapor de Reid superior a 4,5 Psi. Algunos ejemplos son la gasolina y la nafta.

Estos productos, bajo condiciones de equilibrio no representan ningún riesgo ya que producen una mezcla muy rica para ser inflamable en un espacio de vapor restringido. Por lo tanto chispas en este entorno no darán como resultado incendios.

Aunque los productos con presión de vapor alta no representan un riesgo de ignición bajo las condiciones de equilibrio, durante su carga dentro de un compartimiento o tanque vacío, tienen el potencial de pasar a través del rango de inflamabilidad y convertirse en material combustible rápidamente. Sin embargo otras áreas no pueden enriquecerse con combustible de la misma forma, por lo tanto deben considerarse como áreas susceptibles a chispas incendiarias, lo que incrementa el riesgo como se puede observar en la Figura 26.

Estos productos pueden formarse y existir aún en un conducto de ventilación abierto y pueden estar presentes durante o después de la transición de una mezcla muy rica en donde cualquier chispa puede originar un incendio.

⁴⁹ Es una medida de la tendencia de los componentes más volátiles a evaporarse. El valor máximo consta de 80 Kpa y evita la formación de bolsas de vapor en el sistema que transporta el combustible, impidiendo su flujo normal.

La API RP 2003,⁵⁰ Protección contra la ignición proveniente de la estática, rayos y corrientes eléctricas, publicó algunas directrices y recomendaciones para evitar las atmósferas inflamables.

Las prácticas recomendadas incluyen:

- Inertizar el sistema.
- Llenar el espacio de vapor con vapor en exceso.
- Evitar cargar productos de presión de vapor baja a altas temperaturas.
- Evitar cargar productos de presión de vapor alta a bajas temperaturas.
- Evitar alternar las cargas.
- Usar las tuberías o contenedores llenos de líquido (sin espacio para vapor).

5.2.3 Método de Conexión a Tierra. Este es un método bien conocido para controlar la electrostática y prevenir que se convierta en una fuente ignición. Está basado en el hecho de que la tierra puede almacenar una infinita cantidad de electrones, permitiendo un intercambio de cargas hacia y desde el suelo.

El desbalance de cargas positivas en un sistema es causado por la pérdida de electrones y puede ser neutralizado por la ganancia de ellos.

Un sistema de conexión a tierra se implementa principalmente por los siguientes motivos:

⁵⁰ API RP. API Standards. "Protection Against Ignitions Arising Out Of Static, Lightning, And Stray Currents". 2003. Op. Cit.

- Sobrecarga de los circuitos y de equipos, lo que podría llevar a acortar la vida útil de estos o posiblemente estropearlos.
- Electrocuación al personal.
- Arcos o chispas que podrían actuar como fuente de ignición.

En nuestra industria los tres propósitos aplican como una razón para usar una conexión a tierra. Se debe tomar especial cuidado en tanques o recipientes conteniendo líquidos de baja conductividad donde la conexión a tierra no puede prevenir la acumulación de las cargas

5.2.4 Método de Enlace. Este método asegura que todas las partes mayores de un sistema se encuentran unidas para proveer una vía continua de la corriente hacia tierra, a través de una conexión mecánica, que provee un camino de baja resistencia a la corriente entre las superficies, que están separadas.⁵¹

El mecanismo más común usado para unir dos cuerpos es el cable de enlace, que es usualmente de gran extensión debido a consideraciones mecánicas, razón por la cual su resistencia es baja. Para la disipación de cargas estáticas o electrostáticas es adecuado tener conexiones aseguradas con pernos dentro del cable de enlace o en las terminales del cable de enlace.

Willie Hammer y Dennis Price en su libro “Manejo de la Seguridad Ocupacional, e Ingeniería”⁵² trazan un número de criterios importantes para un sistema adecuado de conexión a tierra y enlace:

⁵¹ CHUBB, J.N. “Methods Of Measurement To Assess The Suitability Of Materials For The Control Of Static Electricity”. Institution Of Electrical Engineers. 1995.

⁵² HAMMER, Willie; PRICE, Dennis. “Occupational Safety Management And Engineering”. 5th ed. Prentice Hall International: Series In Industrial And Systems Engineering. 2001.

- Que sea estable.
- Que tenga la capacidad de conducir cualquier corriente.
- Que tenga una baja impedancia.
- Que este asegurado de manera que la vibración, la expansión, la contracción u otro movimiento no rompa o debilite la conexión provocando variaciones en la resistencia.
- Que tenga las conexiones localizadas en áreas protegidas, accesibles para la inspección o el reemplazamiento.
- Que no impida el movimiento de componentes móviles
- Que no esté sujeto o comprimido a través de materiales no metálicos

5.2.5 Reducción de la Generación de Cargas. Se puede prevenir que el voltaje generado durante el proceso electrostático alcance el potencial para producir chispas si la tasa de generación estática es restringida o reducida.

La descarga es el resultado del proceso de electrostática. La etapa final del proceso representa su amenaza directa como fuente de ignición; sin embargo, los mecanismos para prevenir un incendio o una explosión debido a una descarga eléctrica se enfocan en prevenir la generación o acumulación de cargas.

Dependiendo de las circunstancias, la conexión a tierra de los conductores puede ser la manera más fácil de superar un peligro potencial, siempre que esta sea confiable y permanente. Si la conexión a tierra no es hecha apropiadamente desde el principio, o el aislante esta total o parcialmente cargado, la conexión a tierra

podría no ser efectiva en la prevención de descargas de gas inflamable desde el aislante.

En el caso de hidrocarburos líquidos, la tasa de generación de cargas electrostáticas se puede reducir sustancialmente por:

- *Reducir la agitación evitando el calentamiento de vapor o aire.*
- *Controlando la velocidad de flujo de los hidrocarburos.*
- *Evitando la caída o goteo de líquido en la superficie de los productos almacenados.*
- *Prevenir que las gotas o material particulado se asienten sobre el cuerpo del líquido.*
- *Evitar salpicar o empañar durante las operaciones (en operaciones de llenado)*
- *Prevenir el flujo libre de vapor en un espacio de vapor potencialmente inflamable, el vapor de agua es uno de los mayores separadores de cargas.*

5.2.6 Incremento de la Disipación de Cargas. La tasa de disipación de carga es una función del tiempo y la conductividad del líquido. Aditivos antiestáticos pueden ser usados para incrementar la conductividad del líquido y por lo tanto reducir su carga. El aditivo permitirá una disipación de cargas más rápida.

Estos aditivos deberían ser agregados al principio del tren de distribución aunque la conductividad pueda ser reducida después por dilución del aditivo en el transporte / distribución o por absorción a medida que pasa el líquido los filtros de arcilla.⁵³

⁵³ API RP. API Standards. "Protection Against Ignitions Arising Out Of Static, Lightning, And Stray Currents". 2003. Op. Cit.

La disipación de cargas también se puede lograr manteniendo el líquido en una tubería cerrada o en un tanque de relajación con poca turbulencia. Esto permitiría un mayor tiempo para que las cargas en el líquido se disipen.

5.2.7 Protección Contra Rayos. El rayo es una poderosa descarga electrostática natural que involucra altos potenciales y altas corrientes, que fluyen siguiendo el camino de menor resistencia hacia la tierra. El pararrayos inventado por *Benjamín Franklin* es el método más común para prevenir situaciones peligrosas que involucran la caída de rayos.

Este método consiste en colocar una barra metálica a tierra en un extremo y levantarla en el aire en el otro. El potencial conductor a tierra en el aire proporciona un medio más viable para la conducción, por el cual la corriente baja por la barra y llega a tierra. Es necesario que la barra tenga las dimensiones adecuadas para que no se recaliente.

El diseño inicial de la barra poseía un extremo puntudo en su terminal aéreo, lo que conducía a una descarga puntual (*descarga corona*), que se consideraba necesaria para atraer el rayo. Los experimentos recientes demostraron que una extremidad suavemente redondeada es más exitosa en la atracción del rayo hacia ella y previene que el rayo alcance objetos cercanos.⁵⁴

El sector de seguridad industrial ha desarrollado sistemas preventivos de rayos para dar advertencias en tiempo real de relámpagos dentro de un radio de 100 millas náuticas de una antena goniométrica. El sistema brinda, a través de su componente de vigilancia, la distancia y la localización de los rayos y codifica en colores la intensidad en una escala que exhibe las siguientes advertencias:

⁵⁴ *Ibíd.*

ocasional, moderado, e intenso en: amarillo (tormenta dentro de media-hora), ámbar (*tormenta dentro de unos minutos*) y roja (*peligro inminente*).⁵⁵

5.2.8 Diseño de Equipos Para Instalaciones de Alto Riesgo Electrostático.

Antes de diseñar equipos para locaciones peligrosas, es necesario evaluar el sitio y clasificarlo según el propósito de la operación que se va a realizar. La clasificación del área peligrosa, explicada detalladamente antes, es el proceso de determinar qué partes de un complejo son peligrosas y dividirlos apropiadamente en zonas para permitir métodos adecuados de cableado y la selección apropiada del equipo eléctrico.

Entender la clasificación del área peligrosa, las condiciones específicas de cada sitio, y las especificaciones del equipo eléctrico es importante para determinar el tamaño de la zona de peligro real y las precauciones requeridas que se deben tomar. Una apreciación más detallada de las localizaciones peligrosas se presenta en el Anexo A.

5.3 MEDICIÓN DE LA ELECTROSTÁTICA

Aún cuando la caracterización de la capacidad de la descarga para producir ignición es muy compleja, es una de las acciones más relevantes que se deben tener en cuenta en la evaluación de riesgos electrostáticos. Un enfoque muy común para determinar este tipo de peligro es realizar pruebas de ignición reales; sin embargo estas pruebas a menudo consumen mucho tiempo y requieren de personal experimentado en manejo de atmósferas explosivas.

Esta prueba se realiza en una atmósfera explosiva, para la cual es conocido el valor de la energía mínima de ignición EMI, en la cual se genera y expone una

⁵⁵ *Ibíd.*

descarga. Posteriormente se asigna un valor equivalente de energía a esta. Este valor es igual al EMI de la atmósfera explosiva, que puede todavía encender con esta descarga.

Por estas razones, recientemente ha ganado más uso la medida de transferencia de carga como método para caracterizar la capacidad de causar ignición de una descarga, particularmente para la evaluación de la capacidad de ignición de las descargas radiantes. Sin embargo, las afirmaciones contradictorias y los resultados inconsistentes han llevado a un debate en curso entre los expertos.

Se conocen y recomiendan diversas medidas para limitar la capacidad de causar ignición de las descargas radiantes. En la industria petrolera hay algunos métodos prácticos para probar, ya sea la capacidad de ignición de las descargas originadas durante las operaciones, u obtener valores de la comparación entre los elementos implicados en los incidentes reportados causados por descargas electrostática. Un resumen de los métodos disponibles para medir cargas electrostáticas se presenta en el Apéndice B.⁵⁶

Esto conlleva a que la única herramienta que tiene la industria para determinar las causas y los posibles métodos de control para evitar que la electrostática se convierta en una fuente peligrosa de la ignición, sean las lecciones aprendidas de los incidentes. Ésta es la única manera de alcanzar una comprensión del problema, así como una manera de determinar qué medidas preventivas se deben tomar para evitar los incidentes futuros.

Un enfoque simple y fiable para el desarrollo de un proceso de análisis de los incidentes relacionados con la electrostática como potencial fuente de ignición fue

⁵⁶ PRATT, H. "Electrostatic Ignitions Of Fires And Explosions". CCPS / AIChE. 2000.

propuesto por Günter Luttgens⁵⁷ en su estudio “Compilación de Accidentes Causados Por Electrostática”. En este estudio, él propuso:

- Caracterizar el incidente (descripción).
- Identificar la atmósfera inflamable.
- Analizar e interpretar la generación y acumulación de carga y posterior descarga.
- Localizar la fuente de ignición.
- Evaluar las probabilidades.
- Proponer medidas de seguridad con el objetivo de prevenir accidentes relacionados con la electrostática

5.4 MEDIDAS PREVENTIVAS PARA EL MANEJO DE CONTAMINANTES DE LÍQUIDOS

Los hidrocarburos líquidos se pueden considerar matrices inertes donde la conducción es gobernada por los contaminantes (*concentración de impurezas*). Estas impurezas pueden estar presentes en una amplia gama de tamaños (*de moléculas a grandes partículas*) y pueden ser iónicas. En los hidrocarburos puros la concentración de los contaminantes puede ser muy baja, haciéndolos extremadamente difíciles de detectar.

⁵⁷ LUTTGENS. Op. Cit.

Schmidt⁵⁸ sugirió que los iones se podrían formar a partir de la combinación de las impurezas con los electrones de los líquidos no polares. Estos iones presentes en los hidrocarburos líquidos probablemente son compuestos aromáticos polinucleares y compuestos orgánicos del azufre, covalentes en la naturaleza y presentes incluso en líquidos altamente refinados. Las impurezas son activas eléctricamente y pueden experimentar transferencia de cargas en un electrodo.⁵⁹

Parsons⁶⁰ sugirió que la generación continua de carga causada por el movimiento de un fluido sobre un electrodo debe ocurrir ya sea por una reacción de oxidación/reducción donde los electrones son intercambiados con la solución o por una reacción de deposición / desadsorción. Este autor consideraba la energía requerida para realizar reacciones electroquímicas con las especies encontradas en los hidrocarburos líquidos y el oxígeno disuelto como la principal candidata de una impureza que podría experimentar reducción en una superficie de metal cargada y capaz de generar las corrientes observadas durante los experimentos de flujo en las tuberías.⁶¹

5.5. PRECAUCIONES PARA EVITAR LA CARGA DE LA ROPA Y DEL CUERPO

Este fenómeno llega a ser especialmente apreciable en atmósferas secas tales como edificios con unidades de calefacción durante el invierno. Aun cuando es poco probable que las descargas electrostáticas en la ropa sean capaces de encender los gases de hidrocarburos ordinarios en el aire, las chispas del cuerpo

⁵⁸ SCHMIDT, W.F. "Electrons In Non-Polar Dielectric Liquids". IEEE Trans. Electro. Insul. N° 26. 1991. p. 560–567.

⁵⁹ HARVEY. Op. Cit.

⁶⁰ PARSONS, R. "Electrical Double Layer, Electron Reaction And Static". Proceedings Of The Third Conference On Static Electrification. 1971. p. 124–137.

⁶¹ HARVEY. Op. Cit.

hacia la tierra pueden contener suficiente energía para la ignición debido a la medianamente alta conductividad del cuerpo humano.⁶²

Durante las operaciones normales realizadas en los campos de la industria petrolera, se puede afirmar que la carga estática del personal no representa un problema de seguridad significativo; sin embargo han sido reportados casos en donde la ropa externa sintética ha sido atribuida como fuente directa o indirecta de la ignición producida por una descarga electrostática en operaciones donde estaban presentes las mezclas inflamables.

Las operaciones como el llenado de barriles con líquidos inflamables en donde se involucra la manipulación con plástico requieren precauciones especiales con respecto al personal que carga, especialmente si estas operaciones se realizan en espacios interiores.

En estos casos la prevención del personal de carga se logra por el contacto continuo entre el cuerpo humano y la tierra a través de calzado conductor y pisos conductores.

Existe también ropa antiestática, que no es suficientemente segura para las situaciones mencionadas anteriormente. La conexión del cuerpo a tierra se recomienda siempre. La ropa fabricada con fibras conductoras generalmente es incómoda; sin embargo proporciona una buena protección contra la carga estática para el personal.

5.5.1 Qué Hacer y Qué No Hacer Para Prevenir Descargas Electroestáticas.

Sadiku et al⁶³ recomendó algunas instrucciones para el personal en la prevención de las descargas electrostáticas:

⁶² HAMMER. Op. Cit.

- Tratar todo escenario como susceptible a la estática para mantenerse seguro.
- Tocar algún material conectado a tierra antes de manipular ensambles o componentes electrónicos con el riesgo de tener cargas acumuladas en ellos.
- Mantener la humedad relativa en o por encima de 40%.
- No tocar ninguna correa, contacto o tramo al manejar los dispositivos.
- No moverse demasiado. Al moverse el cuerpo puede acumular cargas electrostáticas.
- No entrar en contacto con dispositivos electrónicos si se están recibiendo descargas electrostáticas.

5.5.2 Choque Eléctrico. Es definido como una estimulación repentina y accidental del sistema nervioso por una corriente eléctrica. Aquí se presentan algunos de los efectos producidos por varios valores de flujos de una corriente alterna de 60 hertzios a través del cuerpo.⁶⁴

- **1 miliamperio:** el choque es perceptible. En esta magnitud el efecto es solo una reacción refleja que genera un movimiento inadvertido del cuerpo, lo que puede causar una lesión a la persona afectada, quien experimenta un violento tirón.
- **5 a 25 miliamperios:** hace que la persona perturbada pierda el control del músculo afectado. Para los circuitos de 60 hertzios, el amperaje más alto que

⁶³ MATTHEW, N.; SADIKU, O.; CAJETAN, M.; AKUJUOBI. "Electrostatic Discharge (ESD)". IEEE. 2003. p. 39–41.

⁶⁴ HAMMER. Op. Cit.

una persona puede soportar sin perder el control del músculo es de 9 miliamperios en el caso de los hombres y 6 miliamperios para las mujeres.⁶⁵

- **25 a 75 miliamperios:** puede ser muy doloroso y nocivo. Un contacto prolongado puede causar un colapso, un estado de inconsciencia, e incluso la muerte ya que la parálisis de los músculos respiratorios causa asfixia. Una parálisis de más de 3 minutos generalmente causa la muerte.
- **75 a 300 miliamperios:** la corriente de esta magnitud que dure un cuarto de segundo o más puede causar inmediatamente la muerte.⁶⁶
- **2.5 o más amperios:** una corriente de esta magnitud paraliza el corazón. La presión arterial cae a medida que se detiene la circulación. El latir del corazón y la circulación de la sangre generalmente se reanudarán cuando es interrumpida la corriente. Habitualmente produce inconsciencia. Una corriente alterna de esta magnitud, fluyendo por el cuerpo causa quemaduras en la piel y los órganos internos.⁶⁷

Otros factores relevantes relacionados con las consecuencias que trae el contacto de una corriente con el cuerpo son: la frecuencia, duración y trayectoria de esta. Las corrientes con frecuencias de 20 a 100 hertzios son las más peligrosas.

La corriente que atraviesa un cuerpo también depende de la resistencia de este, la cual está representada prácticamente por la piel. Una persona que trabaja en una atmósfera húmeda está en mayor peligro de sufrir un accidente, que una persona que lo haga cuando su piel se encuentra relativamente seca. Se debe asumir

⁶⁵ Ibíd.

⁶⁶ Ibíd.

⁶⁷ Ibíd.

siempre que el cuerpo es húmedo; la resistencia baja y la posibilidad de choque alta.

5.5.3 Protección Contra el Choque Eléctrico. La protección más importante del personal contra el choque eléctrico puede ser proporcionada por el diseño y los procedimientos de funcionamiento de los procesos realizados bajo riesgo de corrientes eléctricas o de descargas electrostáticas. Los más comunes se sintetizan a continuación.⁶⁸

- **Aislamiento:** se recomienda el aislamiento de las piezas del equipo eléctrico que una persona puede contactar rutinariamente o accidentalmente durante la operación de un sistema. Las perillas, los diales, las manijas, los controles, interruptores, cajones, son ejemplos de tales artículos.
- **Aislamiento del Personal:** se pueden proporcionar esteras de caucho o de otros materiales no conductivos, para el uso del personal cuando se encuentren trabajando de pie con equipos eléctricos encendidos, o en operaciones de mantenimiento y reparación. Los guantes de goma y zapatos no conductivos deben ser usados cuando el trabajo a realizar sea con un equipo que presente alto riesgo de carga.
- **Apartamiento:** equipos con potencial peligro de estar cargado, especialmente el de alto voltaje, debe estar cerrado y apartado para prevenir que el personal desautorizado o inexperto este demasiado cerca. Las cajas de fusibles, los generadores, los motores grandes, las baterías, las barras de distribución, deben estar cercados o con guardias para prevenir contactos accidentales.

⁶⁸ Ibíd.

- **Marca:** los puntos de acceso a equipos eléctricos peligrosos se deben marcar con las advertencias apropiadas. Las zonas donde se localizan pueden pintarse con colores y diseños inmediatamente sean abiertas.
- **Dispositivos de Advertencia:** se debe conectar un dispositivo de advertencia adecuado que indique cuando el equipo eléctrico se energiza. Éste puede ser una luz, ya sea constante o intermitente; un indicador convenientemente coloreado; un símbolo encendido-apagado; o una señal audible.

5.6 ENTRENAMIENTO DEL PERSONAL

Cada persona implicada en operaciones peligrosas debe ser advertida y entrenada sobre los riesgos de la electrostática en el programa de seguridad para manejar situaciones de emergencia. Además debe ser instruida en los peligros que este fenómeno representa en las operaciones rutinarias del sector. El empleado debe ser entrenado en primeros auxilios; el uso de las señales de peligro, de guardas, y otros dispositivos protectores.

Las recomendaciones generales se pueden encontrar en la “*Norma de Seguridad Industrial y Salud Ocupacional*” (OSHA), y varios otros acuerdos de prácticas estándares de trabajo para evitar peligros y garantizar particularmente el buen manejo en situaciones de emergencia.

El programa de seguridad tiene que ser aplicado a las operaciones y cambios específicos que pueden acontecer dentro de los sistemas. Los trabajadores deben ser expertos en la operación, y más importante, en el programa de seguridad, y los procedimientos de emergencia que se seguirán en caso de una eventualidad.

Los supervisores deben estar informados sobre los peligros eléctricos existentes y posibles. La Gerencia debe exigir que mantengan una supervisión cercana sobre todas las operaciones donde la electrostática representa un problema.

CONCLUSIONES

- La mayor parte de los incidentes donde no hay evidencia de cualquier fuente plausible de ignición, son atribuidos a la electrostática. Esto refleja la carencia de entendimiento por parte de técnicos y personal del campo en lo que se refiere a este fenómeno.
- La tendencia a la carga es una función de varios parámetros operacionales tales como el caudal, la temperatura, la humedad, la velocidad de rotación, el envejecimiento del crudo. Cada uno de estos parámetros afecta esta propiedad de forma independiente, propiciando ambientes peligrosos, especialmente en operaciones de transporte y almacenamiento.
- Tanto la velocidad de flujo, como la temperatura son las dos variables que afectan más seriamente los límites de inflamabilidad durante las operaciones de transporte y almacenamiento de hidrocarburos, mientras que la energía mínima de ignición se ve más influenciada por la presencia de gases inertes en la mezcla y la concentración de oxígeno.
- Comprender que la presencia de impurezas en fluidos hidrocarburos y su caracterización son relevantes para la valoración de los peligros electrostáticos en la manipulación de estas sustancias.
- No existe una alternativa de solución general para la prevención y control de la electrostática como fuente de ignición, pues en virtud de disminuir los riesgos potenciales es de vital importancia la puesta en marcha de estrategias específicas para cada entorno debido a que las condiciones ambientales y las sustancias a manipular varían.

RECOMENDACIONES

- Diseñar e implementar continuamente estudios y programas de capacitación y entrenamiento para el personal que labora en procesos de almacenamiento y transporte de fluidos hidrocarburos volátiles respecto a los peligros que genera la electrostática como fuente de ignición.
- Realizar investigaciones experimentales más detalladas para evaluar el efecto de los diversos aditivos usados en la industria petrolera (alcoholes, peróxidos, ácidos grasos y aminas), en condiciones específicas de presión y temperatura, respecto a su efecto sobre la capacidad de ignición en ambientes electrostáticos.
- Realizar estudios orientados hacia la determinación de la energía mínima de ignición de fluidos hidrocarburos en diferentes escenarios operativos, en virtud de limitar las condiciones para la creación de ambientes explosivos.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Guide For Fighting Fires In And Around Petroleum Storage Tanks. API Publication 2021. 2^a ed. March, 1980.

API RP. API Standards. "Protection Against Ignitions Arising Out Of Static, Lightning, And Stray Currents". 2003.

ASTM D 4865. "Standard Guide For Generation And Dissipation Of Static Electricity In Petroleum Fuel Systems".

BABRAUSKAS, Vytenis. "Ignition Handbook, Principles And Applications To Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management And Forensic Science". Society of Fire Protection Engineers. Fire Science Publishers. 2003.

BARRETO, S.; REYNOLDS, I.; JURENKA, H. "Ignition of Hydrocarbons And The Thermalization Of Electrical Discharges". J. Applied Physics 45. 1974. p. 3317–3327.

BRITTON, L.B.; SMITH, J.A. "Static Hazards Of Drum Filling". 54^a ed. 21st Loss Prevention Symposium. AIChE. 1987.

BUSTIN, W.M.; DUKEK, W.G. "Electrostatic Hazards in the Petroleum Industry". Lethworth: Research Studies Press. 1983.

CHUBB, J.N. "Methods Of Measurement To Assess The Suitability Of Materials For The Control Of Static Electricity". Institution Of Electrical Engineers. 1995.

COEHN, A. "Physics". 1898. p. 217.

COWARD, H.F.; JONES, G.W. "Limits of Flammability of Gases and Vapours". U.S. Department of the Interior. Bureau of Mines. Bulletin 503. 1952.

DELLA-GIUSTINA, Daniel E. "The Fire Safety Management Handbook". 2^a ed. Illinois: American Society of Safety Engineers. 1987. 1999.

EBADAT, V.; CARLWRIGHT, P. "Electrostatic Hazards From Small Non-conductive Containers For Flammable Liquids". 27th Loss Prevention Symposium. 1993.

ELECTRICAL TECHNICAL COUNCIL. "Code For Electrical Installations At Oil And Gas Facilities". Safety Codes Council. 2^a ed. 2002.

FURNO, A.L.; AMHOF, A.C.; KUCHTA, J.M. "Effect of Pressure and Oxidant Concentration on Autoignition Temperatures of Selected Combustibles in Various Oxygen Nitrogen Tetroxide Atmospheres". J. Chem. And Eng. Data 13. 1968. p. 243–249.

GLOR, Martin. "Conditions For The Appearance Of Discharge During Gravitational Compaction Of Powders". J. Electrostatics 15. 1984. p. 223–235.

GLOR, Martin. "Electrostatic Ignition Hazards In The Process Industry". Institute For The Swiss Promotion of Safety And Security. Journal of Electrostatic 63. 2005. p. 447–453.

GRIFFITHS, J.F.; GRAY, B.F. "Fundamentals of Autoignition of Hydrocarbons and Others Organic Substrates in the Gas Phase". 24th Loss Prevention Symposium. AIChE. 1990.

GUEST, P.G. "Static Electricity In Nature And Industry". Bulletin 368. Bureau of Mines. 1933.

HAGAN, Philip E.; MONTGOMERY, John; O'REILLY, James T. "Accident Prevention Manual". National Safety Council. 2001.

HAMMER, Willie; PRICE, Dennis. "Occupational Safety Management And Engineering". 5th ed. Prentice Hall International: Series In Industrial And Systems Engineering. 2001.

HARPER, W.R. "Liquids Giving No Electrification By Bubbling". British J. Applied Physics 4. Supplement 2. 1953. p. S19–S22.

HARVEY, T.J.; WOOD, R.J.K.; DENUAULT, G.; POWRIE, H.E.G. "Effect of Oil Quality on Electrostatic Charge Generation And Transport". Journal of Electrostatic 55. 2002. P. 1–23.

HELMHOLTZ, H. "Physic and Chemistry". 1979. p. 337.

KASSEBAUM, John H.; KOCKEN, Richard A. "Controlling Static Electricity in Hazardous (Classified) Locations". IEEE Transactions On Industry Applications. Vol. 33. N° 1. 1997.

KLINKENBERG, A.; VAN DER MINE, J.L. "Electrostatics In The Petroleum Industry". Elsevier. 1958.

KUCHTA, J.M. "Investigation Of Fire And Explosion Accidents In The Chemical, Mining, And Fuel-Related Industries". A Manual. Bulletin 680. Bureau of Mines. 1985.

LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Collection of Accidents Caused by Static Electricity". Journal of Electrostatics. 1985. p. 247–255. 16 p.

LUTTGENS, Günter; WILSON, N. "Electrostatic Hazards". Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 1997.

MATTHEW, N.; SADIKU, O.; CAJETAN, M.; AKUJUOBI. "Electrostatic Discharge (ESD)". IEEE. 2003. p. 39–41.

MONTGOMERY, D.J. "Static Electrification in Solids". Solid State Physics. 1959. p. 139–197.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA 77). "Recommended Practice On Static Electricity". 1988.

Open Flame Welding ARC, As An Ignition Source And Its Significance As A Hazard In The Canadian Oil. Universidad de Calgary. 2004.

PARSONS, R. "Electrical Double Layer, Electron Reaction And Static". Proceedings Of The Third Conference On Static Electrification. 1971. p. 124–137.

PILKINGTON, G.A. "Static Electricity. Fried or Foe". Electrical Safety in Hazardous Environments. Chilworth Technology Ltd.: Conference Publication N° 390. 1994.

POOVAMMA, P.K.; JAGADISH, R.; DWARAKANATH, K. "Investigation on Static Electrification Characteristics of Transformer Oil". Journal of Electrostatic. N° 33. 1994. p. 1–14.

PRATT, H. "Electrostatic Ignitions Of Fires And Explosions". CCPS / AIChE. 2000.

Reglas Para la Seguridad en Planta. Comisión de Expertos de Seguridad en la Industria Química Suiza. Serie Electricidad Estática N° 2. Vol. 7. N° 1. Enero de 1988.

ROBBINS, Hackett. Manual de Seguridad y Primeros Auxilios. México D.F.: Editorial Alfa S.A. de C.V. 1993. p. 77–87.

SCHMIDT, W.F. “Electrons In Non-Polar Dielectric Liquids”. IEEE Trans. Electro. Insul. N° 26. 1991. p. 560–567.

SEMENOV, N.N. “Some Problems of Chemical Kinetics and Reactivity”. Pergamon Press. Vol. 2. 1935.

STARKMAN, E.S.; HAXBY, L.P.; CATTANEO, A.G. “A Study of Free in Turbulent Streams”. Fourth Symposium on Combustion. Baltimore: Williams and Wilkins. 1953. p. 670–673.

Study By IRP 18 Committee, Conducted Research To Technically Support The Possible Causes Of Fire And Explosion Incidents. Universidad de Calgary. 2008.

UNGER, B.A. “Electrostatic Discharge Failures of Semiconductors Devices”. IEEE Proc. IRPS. 1981. p. 193–199.

VEGHTE, J.H.; MILLARD, W.W. “Accumulation of Static Electricity on Arctic Clothing, Arctic Aeromedical Laboratory”. AD-412-781. 1963.

ZABETAKIS, M.G. “Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors”. Bulletin 627. Bureau of Mines. 1965.

ANEXOS

ANEXO A. DETECCIÓN DE INSTALACIONES DE ALTO RIESGO

La identificación de locaciones peligrosas requiere una comprensión detallada de los procesos y las operaciones implicadas donde gases, vapores inflamables, polvos combustibles, materiales explosivos pueden encenderse como resultado de causas eléctricas.

Para determinar una ubicación segura de aparatos o equipos eléctricos para aplicaciones rutinarias, es necesario entender que en situaciones en donde existe la presencia de gases inflamables, vapores, polvos y otros materiales que pueden arder fácilmente, este equipo o aparato representa un riesgo potencial.

Primero que todo es relevante considerar la naturaleza exacta del material inflamable que estará presente. Por ejemplo un adaptador o dispositivo eléctrico puede ser seguro para la instalación en una atmósfera de polvo combustible y al mismo tiempo puede ser inseguro para operar en una atmósfera que contiene vapores o gases inflamables.

En segundo lugar, se debe llevar a cabo una valoración para verificar la categorización de las máquinas o dispositivos que serán usados y los líquidos, gases, o sustancias sólidas implicadas en la operación. Cuando se han determinado los peligros, se debe tomar una decisión acerca de si una sección del complejo donde la operación va a ser ejecutada, se debe clasificar como peligrosa, o si esta clasificación debe extenderse a todo el sitio.

Determinar el nivel de peligrosidad de una locación no es difícil. Cada compañía, adopta un procedimiento para clasificar los peligros de acuerdo a sus operaciones y necesidades.

En el caso de las operaciones relacionadas con los procesos de la industria petrolera, solamente algunas operaciones y dispositivos comunes han sido analizados y clasificados como inseguros debido al riesgo elevado de electrostática como fuente de ignición. La carga a carro-tanques, el llenado de tuberías, los filtros, los contenedores plásticos, etc.

Una vez que se haya identificado y clasificado una locación peligrosa es más fácil desarrollar los procedimientos para la detección y el control de descargas electrostáticas. Sin embargo, definir los límites de estas zonas peligrosas puede ser un inconveniente bastante serio.

En situaciones donde esto es un problema determinar los límites de la locación peligrosa, son convenidos generalmente entre la compañía operacional, la compañía de servicios que ejecuta la operación, y la autoridad, haciendo cumplir los códigos de seguridad.

1. CLASIFICACIÓN DE LAS LOCACIONES PELIGROSAS

Philip E. Hagan et al⁶⁹ en el “Manual de Prevención de Accidentes para la Ingeniería y Tecnología” presentan una tabla con la clasificación de las locaciones peligrosas, la cual fue realizada basándose en las propiedades de los vapores, líquidos, o gases inflamables (Ver Tabla 1).

La clase fue determinada por las propiedades físicas de la sustancia combustible que puede estar presente y se subdividen en categorías, determinadas por el grado de probabilidad de que exista una atmósfera inflamable o combustible.

⁶⁹ HAGAN, Philip E.; MONTGOMERY, John; O'REILLY, James T. “Accident Prevention Manual”. National Safety Council. 2001.

Finalmente, las sustancias combustibles son organizadas en grupos, dependiendo de la reacción de la sustancia en contacto con una fuente de ignición. Van de la A a la G.

2. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES PELIGROSAS

La Tabla 2, presentada a continuación contiene un procedimiento recomendado por Philip E. Hagan en su libro “Manual de Prevención de Accidentes para la Industria, Ingeniería y Tecnología”,⁷⁰ donde basado en recomendaciones de la Asociación Nacional del Fuego y del Instituto Americano del Petróleo, da a conocer una guía para clasificar las áreas peligrosas paso a paso, que es aplicable para todos los tipos de industrias, incluida la industria petrolera.

Tabla 1. Clasificación de las instalaciones peligrosas

CLASE I Gases o vapores altamente inflamables		CLASE II Polvo combustible		CLASE III Fibras combustibles	
DIVISIÓN 1	DIVISIÓN 2	DIVISIÓN 1	DIVISIÓN 2	DIVISIÓN 1	DIVISIÓN 2
Locaciones donde es probable que existan concentraciones peligrosas, o donde su presencia accidental sea simultánea con la falla de un equipo eléctrico.	Locaciones donde es posible encontrar concentraciones inflamables, pero solo en recintos cerrados con ausencia de ventilación etc.	Locaciones donde es probable que existan concentraciones peligrosas y su existencia sea simultánea con la falla de un equipo eléctrico o donde están involucrados polvos conductores.	Locaciones donde no es probable que existan concentraciones peligrosas, pero los depósitos de polvo pueden interferir con la disipación del calor del equipo eléctrico, o ser encendidas por éste.	Locaciones en las cuales fibras o sólidos en suspensión que arden fácilmente son usados o manipulados.	Locaciones en las cuales fibras o sólidos en suspensión son almacenados y/o manipulados, excepto en el proceso de fabricación.

⁷⁰ Ibíd.

GRUPOS

- A. Atmósferas que contienen acetileno.
- B. Atmósferas que contienen hidrógeno, gases o vapores de alto riesgo.
- C. Atmósferas que contienen vapores de éter, etileno, o ciclopropano.
- D. Atmósferas que contienen gasolina, hexano, nafta, benceno, butano, propano, alcohol, acetona, benzol, o gas natural.
- E. Atmósferas que contienen polvo metálico, incluyendo aluminio, magnesio, y otros metales de características igualmente peligrosas
- F. Atmósferas que contienen carbón negro, coque, o polvo de carbón
- G. Atmósferas que contienen harina, almidón, o polvo de grano.

Fuente: HAGAN, Philip E.; MONTGOMERY, John; O'REILLY, James T. "Accident Prevention Manual". National Safety Council. 2001.

3. ESTABLECIMIENTO DE LOS LÍMITES

Las áreas peligrosas se clasifican con base en la posibilidad de que sustancias combustibles e inflamables que puedan encenderse fácilmente estén presentes. Una vez el área se clasifique como peligrosa, se determina el grado del peligro, y finalmente se definen los límites, que básicamente representan la extensión del área afectada por la fuente del peligro.

El Ingeniero de infraestructura tiene generalmente la responsabilidad de definir el área afectada, y el lugar más seguro para las instalaciones.

En términos de seguridad relacionada a la electrostática como fuente de ignición, se recomienda el desarrollo de un análisis de riesgos antes de cada operación con potencial peligro debido la presencia de la electrostática.

Un grupo de expertos en ambos campos (electrostática y operaciones petroleras) deben reunirse para discutir la operación etapa por etapa. El resultado del análisis debe ser una lista de puntos con el riesgo más alto de descarga electroestática durante la operación.

Una vez que se reconocen los puntos riesgosos, se deben poner en ejecución las medidas correctivas y los procedimientos que se deberán llevar a cabo en caso de una emergencia.

Tabla 2. Instrucciones para clasificar áreas peligrosas

DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD DE LA CLASIFICACIÓN		
La necesidad de clasificación es indicada por la respuesta afirmativa a una de las siguientes preguntas		
CLASE I	CLASE II	CLASE III
<p>¿Es probable que se encuentren presentes líquidos, vapores, o gases inflamables?</p> <p>¿Es probable que líquidos que tienen puntos de inflamabilidad de o sobre 38°C sean manipulados, procesados, o almacenados a temperaturas superiores a sus puntos de inflamabilidad?</p>	<p>¿Es probable que estén presentes polvos combustibles?</p> <p>¿Es probable que los polvos combustibles sean encendidos como resultado del almacenamiento, manipulación, u otras causas?</p>	<p>¿Se encuentran presentes fibras o sólidos combustibles o inflamables, pero no es probable que se encuentren en suspensión en el aire en suficientes cantidades para producir una mezcla combustible o inflamable en la atmósfera?</p>
ASIGNACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN		
La clasificación está decidida como se indica por una respuesta afirmativa a cualquier pregunta		
CLASE I, DIVISIÓN 1	CLASE II, DIVISIÓN 1	CLASE III, DIVISIÓN 1
<p>¿Es probable que una mezcla inflamable este presente bajo condiciones de funcionamiento normales?</p> <p>¿Es probable que una mezcla inflamable este presente con frecuencia debido a la reparación, el mantenimiento o escapes?</p> <p>¿Es probable que una falla de procesamiento, almacenamiento, manipulación u otro equipo produzca un fallo eléctrico que coincida con la liberación de un gas o líquido inflamable?</p>	<p>¿Bajo condiciones de funcionamiento normales, es probable que el polvo combustible se encuentre en suspensión en el aire, en cantidades suficientes para producir mezclas explosivas o que produzcan su ignición?</p> <p>¿Es probable que el polvo combustible se encuentre en suspensión en el aire debido a operaciones de mantenimiento o reparación, en las suficientes cantidades para producir mezclas explosivas o que produzcan su</p>	<p>¿Las fibras fácilmente combustibles o inflamables o los materiales que producen suspensión de combustibles están siendo manipulados, fabricados, o usados?</p>

<p>¿El sistema de tuberías de líquidos, vapores o gases inflamables se encuentra en una locación con ventilación inadecuada, y contiene válvulas, guarniciones atornilladas o con rebordes que tienen la posibilidad de producir una fuga?</p> <p>¿Está la zona debajo de la elevación o nivel circundante de manera que los líquidos o vapores inflamables pueden acumularse?</p>	<p>ignición?</p> <p>¿Sería probable que la falla de un equipo causara un fallo en el sistema eléctrico que coincidiera con la liberación de polvo combustible en el aire?</p> <p>¿Es probable este presente un polvo combustible de naturaleza conductiva?</p>	
CLASE I, DIVISIÓN 2	CLASE II, DIVISIÓN 2	CLASE III, DIVISIÓN 2
<p>¿El sistema de tuberías de líquidos, vapores o gases inflamables está en una locación con ventilación inadecuada sin embargo no es probable que hayan escapes?</p> <p>¿El líquido, gas o vapor inflamable es manipulado en una locación sin la ventilación adecuada, y la sustancia inflamable puede escaparse únicamente en el transcurso de cierta anomalía tal como la falla de un empaque o en el empacamiento?</p> <p>¿Esta locación es adyacente a una locación de la división 1 o la sustancia inflamable puede ser conducida a través de zanjas, tuberías o conductos?</p> <p>¿Si se utiliza ventilación mecánica, podría una falla u operación incorrecta del equipo de ventilación permitir que las mezclas se acumulen hasta concentraciones inflamables?</p>	<p>Es probable que el polvo combustible se encuentre en suspensión en el aire, solo bajo condiciones de funcionamiento anormales, pero las acumulaciones de polvo puedan ser encendidas por el calor desarrollado por el equipo eléctrico, o por arcos, chispas, o materiales ardientes expelidos del equipo eléctrico.</p> <p>¿Se previenen normalmente las concentraciones peligrosas de polvos que pueden arder fácilmente mediante la utilización de equipos confiables de control de polvo tal como ventiladores o filtros?</p> <p>¿Esta locación es adyacente a una locación de la división 1, y no está separada por un muro de fuego?</p> <p>¿Los materiales que producen polvo se almacenan y manipulan solo en bolsas o contenedores pero no se usan en el área?</p>	<p>¿Las fibras o sólidos en suspensión fácilmente combustibles o inflamables están siendo manipulados y almacenados pero no procesados?</p> <p>¿Esta locación es adyacente a una clase II, división 1?</p>

Fuente: HAGAN, Philip E.; MONTGOMERY, John; O'REILLY, James T. "Accident Prevention Manual". National Safety Council. 2001.

ANEXO B. MÉTODOS PRÁCTICOS PARA LA VALORACIÓN DE LA POSIBILIDAD DE PRESENCIA ELECTROSTÁTICA

Donde se sospecha la generación y acumulación de cargas electrostáticas J.N Chubb recomendó como primer paso medir la carga directamente usando una cubeta de Faraday. Cuando el material o la superficie cargada no se pueden ubicar en una cubeta de Faraday, es práctico utilizar un medidor de campo electrostático para identificar las fuentes de carga estática y medir la densidad de carga, el potencial superficial y la tasa de disipación de la carga.

Los instrumentos, fenómenos y procedimientos útiles en los estudios de la electrostática se describen en los siguientes párrafos.

1. MEDIDORES DE CAMPO ELECTROESTÁTICO

Hay dos clases de medidores de campo: para observar niveles relativamente altos de carga y voltaje superficial se puede utilizar una prueba simple de inducción, mientras que para conseguir una sensibilidad mucho más alta y la oportunidad de que las medidas sean confiables a largo plazo se debe utilizar un molino de campo eléctrico. Estos instrumentos tienen que ser manejados cuidadosamente para evitar la modificación de los voltajes superficiales causados por la proximidad de estos y el material o superficie cargada.

2. CUBETA DE FARADAY

Para medir la carga total en los líquidos que fluyen se puede utilizar una cubeta de Faraday. Este proceso de transferencia de carga de un conductor a otro mediante contacto interno fue estudiado por Faraday, haciendo uso de un contenedor de metal sin carga. Es aplicable tanto para materiales conductores como para

materiales aislantes cargados, El medidor de campo puede ser usado para hallar la facilidad de transferencia de carga a través y sobre de la superficie de los materiales, creando una pequeña área cargada sobre la superficie y después usando el medidor de campo para observar cómo se disipa esta carga rápidamente, sin contacto.⁷¹

3. ELECTRÓMETRO

Estos dispositivos son voltímetros que se utilizan para determinar el tipo y cantidad de carga en dispositivos que almacenan "pequeñas" cantidades de carga eléctrica. El modelo sencillo del electrómetro es el de un medidor de diferencias de potencial eléctrico y un capacitor de capacitancia conocida.

Los electrómetros se emplean generalmente para medir corrientes o cargas muy bajas. Por esta razón son dispositivos móviles y funcionan con batería. Los electrómetros se utilizan con frecuencia para las investigaciones del laboratorio y campo relacionadas con la electrostática.⁷²

4. CONDUCTIVIDAD DE HIDROCARBUROS

La conductividad de los hidrocarburos se puede medir con un electrómetro, una batería, y una celda de conductividad. La conductividad es dependiente del número de portadores de carga en el hidrocarburo. La ASTM D 3114 recomienda un procedimiento específico para medir la conductividad de los hidrocarburos combustibles. Este procedimiento está diseñado para minimizar al máximo la perturbación de las transferencias de carga.⁷³

⁷¹ API RP. API Standards. "Protection Against Ignitions Arising Out Of Static, Lightning, And Stray Currents". 2003.

⁷² *Ibíd.*

⁷³ *Ibíd.*

5. TENDENCIA DE CARGA

El grado en la tendencia de carga de los hidrocarburos varía entre ellos. Un experimento usado para medir esta tendencia se realiza haciendo pasar un hidrocarburo a través de un filtro. El reporte de un informe (ASTM D 4865) describe un aparato usado para medir la tendencia de carga pasando el combustible o el hidrocarburo a través de un pequeño filtro y midiendo la corriente. Las chispas se pueden detectar a través de la observación directa, receptores de radio, o la ignición de una mezcla inflamable existente. Sin embargo, es muy difícil realizar una valoración cuantitativa de la intensidad de la chispa.⁷⁴

⁷⁴ ASTM D 4865. "Standard Guide For Generation And Dissipation Of Static Electricity In Petroleum Fuel Systems".