

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA**



**PROYECTO DE GRADO**

**“MODELO ESTOCÁSTICO DE RIESGO DE EXPLOSIÓN  
DE LAS UNIDADES DE PROCESO DE LA REFINERÍA  
GUILLERMO ELDER BELL”**

**POSTULANTE: UNIV. RÓMULO IVAN MONTAÑO QUISPE**

**TUTOR: M.SC. ING. HERMAS HERRERA CALLEJAS**

**LA PAZ - BOLIVIA**

**2021**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a mi madre por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi madre, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a mi tutor de tesis, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, si no a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

A la Universidad Mayor de San Andrés, por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

## INDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
INDICE GENERAL.....	iii
INDICE DE FIGURAS.....	x
INDICE DE TABLAS .....	xii
SIMBOLOGIA .....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xv
Capítulo 1 GENERALIDADES .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.3.1. Identificación del problema.....	6
1.3.2. Formulación del problema .....	7
1.4. Objetivos .....	8
1.4.1. Objetivo general .....	8
1.4.2. Objetivos específicos.....	8
1.5. Justificación .....	8
1.5.1. Justificación técnica.....	8

1.5.2. Justificación económica.....	9
1.5.3. Justificación ambiental.....	9
1.6. ALCANCES.....	10
1.6.1. Alcance temático .....	10
1.6.2. Alcance geográfico .....	10
1.6.3. Alcance temporal.....	11
Capítulo 2 DESCRIPCIÓN DE LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL	12
2.1. Generalidades de la refinería.....	12
2.2. Características de la empresa .....	13
2.3. Ubicación de la refinería .....	13
2.4. Unidades de proceso de industrialización.....	14
2.5. Combustibles líquidos obtenidos en la refinería.....	15
2.5.1. Gasolina especial: (La más producida a nivel nacional YPFB 2015) .....	15
2.5.2. Diesel oíl: (La segunda de mayor producción en la refinería YPFB 2015) .....	15
2.5.4. Kerosene .....	16
2.7. Producción en la refinería Guillermo Elder Bell.....	19
2.7.1. Producción de GLP en refinerías.....	19
2.8. RECEPCIÓN Y ELABORACIÓN DE CRUDO, POR REFINERÍA.....	21

2.9. riesgos en procesos quimicos de la refineria .....	26
2.9.1. Dispersión de Sustancias Peligrosas y Explosión de una nube de vapor (“VCE”).....	26
2.9.2. Derrame instantáneo de un líquido en Ebullición (“Boil–Over”) 27	
2.9.3. Explosión de los vapores en Expansión de un Líquido en Ebullición .....	27
(BLEVE).....	27
2.10. procesos en la refineria guillermo elder bell.....	27
Destilación .....	28
Separación y estabilización .....	28
Tratamiento .....	28
Conversión media.....	28
2.11. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE SEGURIDAD DE PROCESOS .....	29
QUÍMICOS PARA LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL d1 .....	29
2.10.1. Información de Seguridad de los Procesos Químicos .....	29
2.10.2. Información sobre los riesgos de los materiales o sustancias peligrosas .....	30
2.10.3. Información sobre la tecnología.....	30
2.10.4. Información sobre el diseño de los equipos.....	30
2.10.5. Análisis de Riesgos de los Procesos Químicos .....	31

Capítulo 3 TEORIA DE LOS PROCESOS ESTOCÁSTICOS .....	32
3.1. Distribución de probabilidad.....	32
3.1.1. Espacios de probabilidad.....	32
3.1.2. Espacio muestral .....	33
3.1.3. $\sigma$ -álgebra. ....	33
3.1.4. Medida de probabilidad. ....	33
3.1.5. Espacio de probabilidad .....	34
3.2. Definición matemática de procesos estocásticos.....	34
3.2.1. Proceso de ensayos independientes .....	38
3.2.2. Procesos de Márkov .....	39
3.2.3 Procesos con incrementos independientes .....	40
3.2.4. Procesos estacionarios.....	40
3.2.5. Procesos con incrementos estacionarios .....	40
3.2.6. Martingalas .....	41
3.2.7. Procesos de Levy .....	41
3.2.8. Procesos Gaussianos.....	42
3.3. Caminatas aleatorias .....	42
3.3.1. Probabilidades de transición.....	45
3.4. La cadena de Markov .....	49

Capítulo 4 MITIGACIÓN DE RIESGOS AL IMPLEMENTAR NUEVAS TECNOLOGÍAS DE PROCESOS EN REFINERÍAS Y PLANTAS QUÍMICAS.	51
4.1. INTRODUCCIÓN .....	51
4.2. RIESGO DE ALIMENTACIÓN DE CRUDO DE REFINERÍA .....	52
4.3. RIESGO DE LA REFINACIÓN DEL CATALIZADOR.....	54
4.4. RIESGO DE CATALIZADOR Y COMBUSTIBLES.....	55
4.5. EVALUACIÓN DEL RIESGO EN LA PRODUCCIÓN .....	58
4.5.1. Gestión de riesgos en la seguridad de las plantas de procesos	59
4.5.2. Capa de protección independiente aplicada a la industria de refinación .....	64
Capítulo 5 MODELOS ESTOCÁSTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE ACCIDENTES Y EXPLOSIONES .....	67
5.1. Modelado probabilístico de los datos de accidentes.....	67
5.2. Evaluación de la probabilidad de que se produzcan accidentes.....	68
5.2.1. Determinación de la magnitud de los accidentes estableciendo posibles consecuencias o gravedad .....	73
5.3. Compilación de probabilidad y consecuencia (gravedad) bajo una formulación de riesgo .....	75
5.4. Predicción de riesgos por análisis de series temporales .....	80
5.5 SIMULACIÓN CON R-STUDIO D3.....	84
5.5.1. Instalación y licencia.....	88

Capítulo 6 APLICACIÓN PRÁCTICA .....	90
6.1. LENGUAJE DE OPTIMIZACIÓN DE R STUDIO .....	90
6.2. DETERMINACIÓN DEL INCREMENTO DE RIESGO EN LAS ÀREAS DETERMINADAS.....	96
6.2.1. Área del Mezclador.....	96
Para el control del riesgo .....	100
6.2.2. UNIDAD DE CRUDO.....	101
Para el control del riesgo .....	104
6.2.3. Área de reformación catalitica .....	105
6.2.4. CALCULO DE LA PROBABILIDAD Y RIESGO D1 .....	110
Capítulo 7 FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO G3.....	116
Ingresos .....	116
Costos directos .....	117
Costos indirectos.....	118
Costos de mantenimiento.....	119
Costos totales .....	119
Análisis TIR .....	120
Análisis VAN .....	121
Capítulo 8.....	123
conclusiones y recomendaciones .....	123

Capítulo 9 BIBLIOGRAFÍA.....	125
ANEXOS.....	127
A.1. TABLA DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS .....	127
A.2. TABLA DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS .....	131
A.3. CODIGO DE PROGRAMACIÓN DEL PROGRAMA .....	140
a.4 DATOS TECNICOS DE LA PLANTA GUILLERMO ELDER BELL ...	146

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 VISTA SUPERIOR DE LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL..	10
Figura 2-1 REFINERIA GUILLERMO ELDER BELL .....	12
Figura 2-2 VISTA SATELITAL DE LA PLANTA .....	14
Figura 2-3 DIRECCIÓN DE REFINERÍAS, UNIDADES DE PROCESO E INDUSTRIALIZACIÓN .....	14
Figura 2-4 VISTA INSTALACIONES REFINERÍA GUALBERTO VILLARROEL..	19
Figura 2-5 UNIDADES DE REFINACIÓN GUALBERTO VILLARROEL .....	20
Figura 2-6 VOLUMEN DE CRUDO PROCESADO EN LAS PRINCIPALES REFINERÍAS.....	21
Figura 2-7 PRODUCCIÓN DE GLP EN LAS PRINCIPALES REFINERÍAS .....	23
Figura 2-8 Producción de JF en la refinería GV y EB .....	23
Figura 2-9 VOLUMEN PRODUCIDO DE GASOLINA PREMIUM EN REFINERÍA GEB.....	24
Figura 2-10 VOLUMEN PRODUCIDO DE KEROSENE GV Y GEB .....	25
Figura 3-1 MODELO VECTOR ALEATORIO DE DIMENSIÓN INFINITA.....	35
Figura 3-2 ESPACIO PERIMETRAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	37
Figura 3-3 Trayectoria de los procesos estocásticos .....	43
Figura 4-1 Plantas pilotos en refinerías.....	51
Figura 5-1 FRECUENCIA VS ACCIDENTES.....	70
Figura 5-2 DETERMINACIÓN DE LA MAGNITUD DE LOS ACCIDENTES ESTABLECIENDO POSIBLES CONSECUENCIAS O GRAVEDAD.....	74
Figura 5-3 MATRIZ DE RIESGO DE LA MINA GLI-TUNCBILEK .....	76

Figura 5-4 SALIDA DE LA SIMULACIÓN PROPUESTO DE MONTECARLO PARA LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL .....	78
Figura 5-5 DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE DATOS DE DÍAS PERDIDOS ANUALES PARA LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL.....	79
Figura 5-6 Parcela número de accidentes al mes propuesto en la refineria Guillermo Elder Bell.....	82
Figura 6-1 ESTUDIO PREDICTIVO DE LA SIMULACIÓN EN ÁREA DE MESCLADO EN R-STUDIO.....	99
Figura 6-2 Control de riesgo área mesclador.....	100
Figura 6-3 Estudio predictivo área de destilación.....	103
Figura 6-4 CONTROL DE RIESGOS EN ÁREA DE DESTILACIÓN.....	104
Figura 6-5 Estudio predictivo área del horno .....	108
Figura 6-6 Control de riesgo en área del horno.....	109

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 CAPACIDAD DE PROCESO REFINERÍA GUALBERTO VILLARROEL .....	20
Tabla 2-2 Producción en BPD refinerías.....	22
Tabla 2-3 PRODUCCIÓN ANUAL 2013-2019 DE LAS PRINCIPALES REFINERÍAS .....	22
Tabla 2-4 VOLUMEN REFINADO DE GASOLINA PREMIUM.....	24
Tabla 2-5 Producción de gasolina refinería GEB .....	25
Tabla 2-6 Producción de KE refinerías GEB y GB 2006-2012.....	26
Tabla 4-1 Número de isómeros en función al número de carbono.....	53
Tabla 4-2 Comparación de catalizadores heterogéneos y homogéneos .....	57
Tabla 4-3 Programa de HDT Diésel de azufre ultra bajo: Evaluación de riesgos..	60
Tabla 5-1 Distribución de poisson para accidentes mensuales .....	72
Tabla 5-2 Matriz de riesgo propuesta en la refinería Guillermo Elder Bell .....	76
Tabla 6-1 Clasificación de riesgos en área de mesclador.....	97
Tabla 6-2 Clasificación de riesgos en área de destilación .....	101
Tabla 6-3 Clasificación de riesgos en área del horno .....	105

## **SIMBOLOGIA**

IESA: Instituto de Estudios Superiores de Administración

BLEVE: Expansión Explosiva de Vapor en un Líquido en Ebullición

PDVSA: Petróleos de Venezuela S.A.

CEPSA: Compañía Española de Petróleos S.A.

YPFB: Yacimiento Petrolíferos Fiscales Bolivianos

ANH: Agencia Nacional de Hidrocarburos

ISO: International Organization for Standardization

OHSAS: Occupational Health and Safety Assesment Series

NFPA: Asociación Nacional Contra Incendios

RGV: Refinería Gualberto Villarroel

RGEB: Refinería Guillermo Elder Bell

BPD: Barriles por Dia

JF: Jet Fuel

RECON: Crudo Reconstituido

GLP: Gas Licuado de Petróleo

FAME: Análisis del perfil de ácidos Grasos

HAZOP: Hazard and Operability Study

CEI: Indice de Explosión Química

LOPA: Capa Analisis de Protección

IPL: Capa de protección independiente

API: American Petroleum Institute

ASTM: International (American Society for Testing and Materials

PFD: Diagramas de Flujo de Proceso

CPQRA: Analisis Cuantitativo Completo de Riesgo

ULSD: diesel Ultra bajo de azufre

LSE: Lenguaje de Programación

MAPE: Error Porcentual Absoluto Medio

## RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto de grado que se desarrolló es el modelo estocástico de riesgo de explosión de las unidades de proceso de la refinería “Guillermo Elder Bell” enfocado a los riesgos y peligros latentes que existen dentro de las instalaciones de la planta de refinación. Luego de poder observar los resultados, podemos darnos cuenta que el análisis de riesgo tiene una tendencia en las áreas de Craqueo y Horno de la refinería, mediante este estudio se pretende reducir los potenciales riesgos de explosión. El problema básico consiste que la mayoría de los equipos funcionan a delicadas condiciones operativas, por lo que realizó una matriz de riesgos y análisis probabilístico aplicando el Software R-Studio como aporte en futuros estudios para detección y eliminación de riesgos en plantas industriales.

## Capítulo 1 GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

El riesgo está presente en las plantas industriales de forma intrínseca, por los procesos industriales que se realizan a diario (procesos químicos, mecánicos, térmicos), por las sustancias peligrosas que se manipulan o se producen (reacciones químicas, inflamables, corrosivas, explosivas), por los espacios de trabajo que requieren que un gran número de personas circulen alrededor de máquinas de procesos industriales, todos estos factores y otros deben ser controlados bajo estrictas medidas de seguridad.

La capacidad de producción industrial ha incrementado notablemente en los últimos años, desde la época de la revolución industrial hasta el día de hoy, una época de revolución tecnológica que acelera los procesos productivos. En algún momento se creyó erróneamente, que el crecimiento industrial daría lugar al incremento natural de accidentes industriales, aceptando al riesgo y sus consecuencias como parte inminente del progreso industrial.

Los accidentes industriales han sucedido en diferentes partes del mundo y sus consecuencias han tenido gran variabilidad según sucedieron en países en vías de desarrollo o en países desarrollados. Las consecuencias de países en vías de desarrollo se agravan de acuerdo a la capacidad de respuesta, la atenuación o grado de resiliencia de una localidad ante un evento adverso, es decir de acuerdo

a la vulnerabilidad. Porque la vulnerabilidad es el conjunto de condiciones ambientales, sociales, económicas, políticas y educativas que hacen que estemos más o menos expuestos a un evento indeseado, sea por las condiciones inseguras existentes o por su capacidad de recuperación ante el mismo<sup>1</sup>.

Actualmente la percepción del riesgo ha cambiado, este ya no es un accidente o un evento infortunio, sino que es el resultado de un riesgo no identificado o mal manejado y las medidas de control ya no se plantean desde un enfoque correctivo sino uno preventivo. Hoy en día la mayoría de las industrias consideran como parte fundamental de los procesos industriales, el manejo integrado de sistemas de gestión de seguridad, medio ambiente y salud. Debido a que en el proceso industrial el riesgo no puede ser eliminado, pero puede ser controlado para reducir sus efectos al mínimo.

## **1.2. ANTECEDENTES**

Las refinerías de petróleo son industrias naturalmente expuestas a riesgos de incendio, explosión, derrame de producto, entre otros. Esta situación encuentra su raíz en el proceso mismo de refinación, el cual implica el manejo de temperaturas extremas, condiciones de alta presión, uso y generación de energía, manipulación de productos químicos. Por ende, se considera que el riesgo en el campo de refinación de petróleo es alto, pero necesitamos de este proceso para continuar con

---

<sup>1</sup> [3].Bord Gais, DGC, ENAGAS, Fluxys, Gasum

el desarrollo energético a nivel general, por lo tanto, se debe aprender a manejar, controlar y mitigar los niveles de riesgo.

A lo largo del tiempo se han registrado varios accidentes en plantas de refinación. Uno de los más recientes fue el ocurrido el 25 de agosto de 2012, tratándose de una explosión en el Complejo Refinador Paraguaná (CRP), específicamente en la Refinería de Amuay, costándole la vida a 42 personas, hiriendo a 150 y cerca de US\$ 1800 millones en pérdidas materiales, según estimaciones del Centro de Orientación en Energía (COENER). Profesores e investigación [Internet]. (IESA): Venezuela. Instituto de Estudios Superiores de Administración; 2013 [Consultado 26 Jul 2021]. Disponible en: <http://www.iesa.edu.ve/profesores-e-investigacion/2013-noviembre-25/>

Otro suceso tan solo tuvo lugar dos años después del accidente de Flixborough, (Reino Unido, 1974), cuando el escape de 40 Tn de ciclohexano en una planta industrial dedicada a la producción de caprolactama (empleada para la fabricación de fibras textiles) y su posterior explosión, produjo la muerte de 29 trabajadores y cientos de heridos. AVANCES EN LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES A PARTIR DE LOS ACCIDENTES MAYORES

CAPITULO IV [Internet]: España. Escuela Politécnica Superior d'Edificació de Barcelona; 2014 [Consultado 26 Jul 2021]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41815782.pdf>

En ambos casos se han afrontado trágicas consecuencias con víctimas fatales y enormes pérdidas de recursos económicos. Las estadísticas han demostrado que

la explosión BLEVE es la explosión con más alto riesgo, por las consecuencias personales, económicas, de proceso y por el impacto al medio ambiente que ocasiona.

En la refinería La Rábida de la compañía española de petróleos S.A. (CEPSA) y en la refinería Puerto la Cruz de Venezuela (PDVSA), se ha implementado un estudio integral de gestión de riesgos que incluye la vulnerabilidad de la sociedad expuesta. Se ha realizado estudios de evaluación de riesgos, con el fin de obtener una valoración cuantitativa que les permita evaluar el impacto y sus efectos en la sociedad (PDVSA, 2011). En ambas refinerías se realizaron modelaciones y visualizaciones de las áreas de riesgo, con el uso de sistemas de información geográfica (CEPSA, 2010). Se debe buscar la fundamentación en revistas o páginas web

En Bolivia, un peligroso incendio que se originó en la Refinería de Palmasola fue controlado a tiempo y no provocó ningún daño personal, según la Empresa Boliviana de Refinación. El fuego, de unos cinco metros de altura, que emergía desde la planta de refinación "Guillermo Elder Bell" generó zozobra en los habitantes de la zona, ante el temor que se propague en toda la industria, empero, la brigada contra incendios de la empresa actuó oportunamente para controlar el siniestro. ANF [Internet].: Bolivia. Agencia de Noticias Fides; 2014 [Consultado 26 Jul 2021]. Disponible en: <https://www.noticiasfides.com/nacional/sociedad/un-incendio-en-la-refineria-de-palmasola-fue-controlado-a-tiempo-252988>

YPFB Refinación realizó con éxito un simulacro de incendio en la refinería Gualberto Villarroel, ubicada en Cochabamba. El objetivo es mostrar la capacidad del personal al momento de atender este tipo de situaciones riesgosas. “Se simula una fuga de gas y un incendio. Allí se pone a prueba si todos los recursos de la atención a la emergencia están correctamente implementados, establecidos y cómo respondemos ante este tipo de situaciones. YFPB Simulacro de Incendio [Internet]: Bolivia. Yacimientos Fiscales Petrolíferos Bolivianos; 2021 [Consultado 26 Jul 2021]. Disponible en: <https://www.ypfb.gob.bo/es/informacion-institucional/noticias>

Actualmente ambas refinerías han incursionado en una etapa de reinversión para mejorar los procesos productivos. Estos proyectos mayores han generado mayor movilización de personal que trabajan actualmente en las refinerías.

Para llevar adelante una producción constante, con altos niveles de calidad y seguridad ocupacional, la Refinería de Cochabamba, ha considerado como una prioridad en su sistema integrado de gestión la identificación y prevención de accidentes industriales. Esta forma de trabajo les ha permitido obtener y conservar registros de certificación en las normas ISO 9001:14001 y OHSAS 18001, así como diferentes reconocimientos por el trabajo seguro y por la implementación de normativas de seguridad contra incendios según la norma americana de la Asociación Nacional de Protección Contra Incendios (NFPA, por sus siglas en inglés), entre otros.

Las plantas de refinación se manejan bajo una cadena de producción constante. Cuando una parte de la cadena para, toda la producción será indirectamente afectada, ocasionando el paro de la producción.

La vulnerabilidad de la pérdida de producción (mil dólares por día), se refiere para el estudio a las plantas de lubricantes y carburantes) y los diferencia de aquellos no productivos (departamento administrativo, laboratorio, sanidad, entre otros.). Los datos, los valores y la estandarización correspondiente se los puede observar ver a detalle en el anexo H, sin embargo los valores fueron multiplicados por un factor, para conservar la confidencialidad de los datos de la empresa.

Por tal motivo, se desarrollará un modelo estocástico de riesgo de explosión de las unidades de proceso en la refinería Guillermo Elder Bell para mejorar la eficiencia del análisis de riesgo de explosión tradicional aplicando un método cuantitativo de tal manera que pueda predecirse un potencial accidente y por consiguiente evitar pérdidas materiales y vidas humanas.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1. Identificación del problema**

Los accidentes en las refinerías han sido el problema con mayor consistencia que se ha presentado dentro del área de la industria petrolera. A diferencia de muchos proyectos de grado, que tratan de explicar con mayores detalles el problema de la propuesta, que es fácil entender que el problema del proyecto dentro del riesgo de

una refinería, es la explosión y el peligro que genere para toda la planta. No existen otras excusas o explicaciones para desprestigiar este problema, ya que el mayor peligro enfrentar los procesos petroquímicos simplemente son las explosiones.

Pero sí detallamos la descripción del problema, era que también podemos identificar de que los métodos convencionales en el análisis de riesgos no han generado un gran aporte al control de los peligros; que ya que los métodos convencionales como diagramas de riesgo, y nada pescado, análisis de causas y consecuencias; no genera mucho impacto en el control de un proceso de refinería, que ya que no es lo mismo controlar un peligro de un golpe y controlar el peligro de una radiación térmica.

Por todo esto es necesario considerar un sistema capaz de predecir el incremento del riesgo en función de las variables que controlan el proceso de refinación, además muchas empresas pagan montos bastante elevados para desarrollar algoritmos computacionales que pueda manejar este tipo de situaciones.

### **1.3.2. Formulación del problema**

En función a la anterior explicación y análisis se puede formular el siguiente problema:

¿Será posible aplicar un modelo estocástico que pueda estimar el riesgo de explosión en los procesos de refinación de la refinería Guillermo Elder Bell?

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Aplicar un modelo estocástico de riesgo de explosión de las unidades de proceso, de la refinería Guillermo Elder Bell.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar una matriz de análisis de riesgos dentro de los procesos de la refinería, con el fin de encontrar las zonas y áreas vulnerables.
- Desarrollar una simulación de la probabilidad de explosión aplicando el software R studio.
- Determinar los tiempos óptimos para evitar una explosión y evacuación del personal de la planta.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN**

### **1.5.1. Justificación técnica**

Al realizar un estudio probabilístico predictivo, mejorará el proceso de control de riesgos y la prevención de accidentes y eventos peligrosos, los cuales perjudicarían a la planta, al entorno económico del país y a la imagen de la empresa. También se generarán más aportes cuantitativos al estudio de Riesgo y la aplicación del software R-studio.

### **1.5.2. Justificación económica**

Mediante el uso de modelos y aplicaciones avanzadas, se logra tener una estimación de la probabilidad de los accidentes que puedan producirse en la planta, por lo cual es de utilidad para evitar grandes pérdidas económicas y múltiples gastos en daños y perjuicios ocasionados por una explosión dentro de una refinería. También cuando esta refinería deja de producir y transformar la materia prima en el producto deseado; representa una gran pérdida económica para el estado. Esto nos permitiría asegurar la vida útil de la planta, así como sus instalaciones y ductos en los sistemas de transporte.

### **1.5.3. Justificación ambiental**

El proyecto contribuye en la protección del medio ambiente; evitando todo tipo de explosión se llega a reducir la contaminación ambiental, ya que la incineración de hidrocarburos produce gases de efecto invernadero que reducen la capa de ozono, además el fuego producto del siniestro genera grandes volúmenes de dióxido de carbono y otros agentes inertes muy contaminantes.

## 1.6. ALCANCES

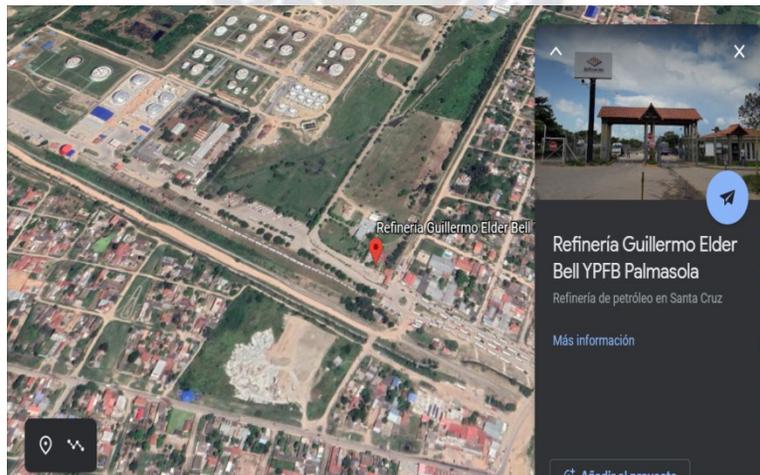
### 1.6.1. Alcance temático

Los temas que comprenden este proyecto, son principalmente análisis de riesgos y control de accidentes. Por otra parte, las materias que se llegan a abarcar son principalmente Probabilidad y Estadística, simulación numérica, seguridad industrial y programación aplicada, las cuales son los fundamentos principales de este proyecto.

### 1.6.2. Alcance geográfico

El proyecto llega a aplicarse en las instalaciones de la refinería Guillermo Elder Bell el cual se ubica ubicación de la refinería Guillermo Elder Bell

**FIGURA 1-1 VISTA SUPERIOR DE LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL**



Fuente: <https://earth.google.com/web/search/YPFB+Guillermo+Elder+Bell+refinery>, 2021

### **1.6.3. Alcance temporal**

El proyecto se realizará en dos etapas: una parte inicial que comprende la presentación del perfil del proyecto de grado, como parte final se tiene el marco teórico y el marco práctico, además el proyecto será realizado y defendido en la gestión 2021.



## Capítulo 2 DESCRIPCIÓN DE LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL

La refinería “Guillermo Elder Bell S.A.” es una empresa que tiene el trabajo de refinar los hidrocarburos y obtener productos derivados para la demanda de estos productos en nuestro país.

**FIGURA 2-1 REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL**



*Fuente: YPFB Corporación; Informe anual*

### 2.1. GENERALIDADES DE LA REFINERÍA

**Nombre:** “Refinería Guillermo Elder Bell”

**Características:** la refinería Guillermo Elder Bell se caracteriza por:

**Misión:** optimizar el proceso de refinación de petróleo, operando de forma eficiente y transparente, comprometidos con el desarrollo sostenible del país, contribuyendo a la seguridad y soberanía energética.

**Visión:** ser una empresa modelo de gestión con capacidad de refinación que permita el autoabastecimiento del mercado nacional.

**Valores:** integridad - seguridad-excelencia - pro actividad - trabajo en equipo – compromiso - responsabilidad - diversidad e inclusión.

## 2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA EMPRESA

La Refinería Guillermo Elder Bell cuenta con una capacidad de procesamiento de 24.000 barriles de petróleo crudo por día y está conformada por las unidades de crudo del Área 301 y el Área 300, dos plantas de Reformación Catalítica que procesan un total de 6.400 BPD y una Unidad de Isomerización de 6.000 BPD.

Esta unidad de refinación está ubicada en el departamento de Santa Cruz y fue inaugurada en 1979, desde entonces contribuye al desarrollo nacional con la producción de gasolinas y diésel oíl, entre otros productos de importancia estratégica. ANH [Internet]. : Bolivia. Agencia Nacional de Hidrocarburos; 2019 [Consultado 26 Jul 2021]. Disponible en: <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=6>

## 2.3. UBICACIÓN DE LA REFINERÍA

La Refinería Guillermo Elder Bell está ubicada a 12 kilómetros de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, es una de las dos refinerías de YPFB Refinación S.A que desde 1979 aporta al crecimiento regional y nacional. <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=6>

Opinión [Internet]. : Bolivia. Periódico Digital; 2012 [Consultado 26 Jul 2021].

Disponible en: <https://www.opinion.com.bo/articulo/el-pais/ypfb-refinacion-prepara-compra-nuevos-turbogeneradores/20121117155300438259.html>

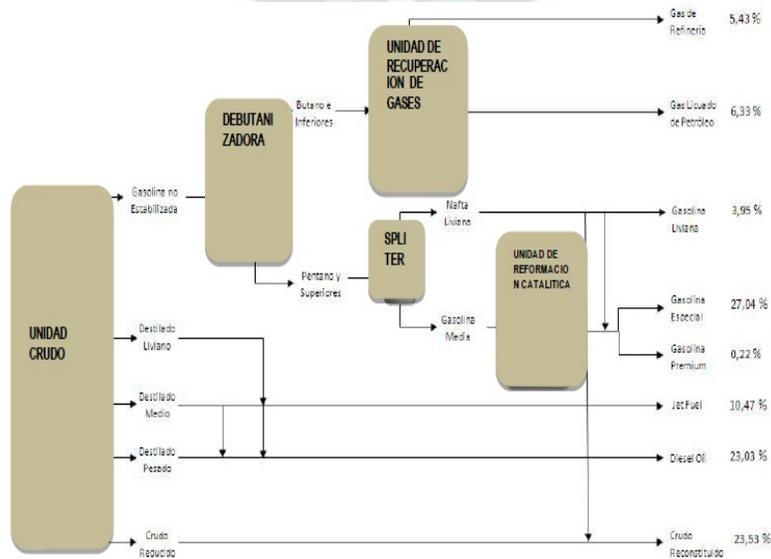
**FIGURA 2-2 VISTA SATELITAL DE LA PLANTA**



*Fuente: Google Maps*

## 2.4. UNIDADES DE PROCESO DE INDUSTRIALIZACIÓN

**FIGURA 2-3 DIRECCIÓN DE REFINERÍAS, UNIDADES DE PROCESO E INDUSTRIALIZACIÓN**



*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

## **2.5. COMBUSTIBLES LÍQUIDOS OBTENIDOS EN LA REFINERÍA**

### **2.5.1. Gasolina especial: (La más producida a nivel nacional YPFB 2015)**

Líquido inflamable, muy ligero, compuesto por una serie de hidrocarburos volátiles obtenidos del petróleo. Se emplea como combustible automotriz. Es de color cristalino amarillento y olor característico. Su octanaje o grado de resistencia a la compresión antes de su detonación o ignición es de 85 octanos. Es un producto sin plomo.

### **2.5.2. Diesel oíl: (La segunda de mayor producción en la refinería YPFB 2015)**

Es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene por destilación fraccionada del petróleo a presión atmosférica. Una de las especificaciones principales es el índice de cetano de acuerdo a la especificación debe de ser de 45 pero la refinería produce con mayor calidad con índice aproximadamente de 55. El diesel tiene aproximadamente un 18 por ciento, más energía por unidad de volumen que la gasolina, lo que, sumado a la mayor eficiencia de los motores diesel, contribuye a que su rendimiento sea mayor Combustible de bajo contenido de azufre utilizado en motores de combustión interna para vehículos de carga y transporte de pasajeros.

### **2.5.3. Jet fuel a-1:** (el tercero más producido a nivel nacional YPFB 2015)

El Jet Fuel A-1, es un destilado medio proveniente de la destilación atmosférica del petróleo crudo. Se lo utiliza como combustible en aviones Jet, recibe un tratamiento muy riguroso por el uso o aplicación que se le da. Una de sus principales especificaciones es el punto de congelamiento que debe ser igual o menor a  $-47^{\circ}\text{C}$ .

La producción promedio de este combustible para el primer semestre del 2015, fue mayor en 12,12% en relación a la producción del mismo período del 2014.

### **2.5.4. Kerosene**

El kerosene es un líquido transparente o con ligera coloración amarillenta obtenido por destilación del petróleo. De densidad intermedia entre la gasolina y el diésel.

El Kerosene y la Gasolina Premium son de menor producción y son elaborados solamente por las refinerías de YPFB Refinación S.A., para el primer semestre del 2015 la Refinería Gualberto Villarroel produjo el 97,30% del Kerosene y la Refinería Guillermo Elder Bell el restante 2,70% del Kerosene.

### **2.5.5. Gasolina Premium:** (son de menor producción en YPFB 2015)

Líquido inflamable, producto sin plomo y mayor octanaje - 95 octanos-, Es de color violeta con la cual se la identifica en el mercado, formulada para automóviles

con convertidor catalítico y motores de alta relación de compresión. La producción promedio de Gasolina Premium fue mayor en 0,67% en relación al 2014.

### **2.5.6. Crudo reconstituido**

Crudo reconstituido, más conocido como Recon, es el resultado de la mezcla del crudo reducido, líquido opaco negro de olor característico con gasolina blanca proceso utilizado para facilitar el transporte por ductos.

El crudo reconstituido (RECON), obtenido en el proceso de refinación, es destinado al mercado externo debido a la ausencia de tecnología en las refinerías nacionales para procesar este producto. Durante el primer semestre de 2015 la producción de RECON se incrementó en 72,05%.

## **2.6. Comercialización de hidrocarburos líquidos**

### **2.6.1. Diésel oíl**

Es el combustible de mayor demanda en el mercado interno, para el primer semestre del 2015, se ha comercializado un promedio de 28.685 Bbl/día. El volumen promedio comercializado de Diésel Oíl se incrementó en 1,88% respecto al primer semestre del 2014.

La comercialización de este combustible se centralizó principalmente en los departamentos de Santa Cruz (38.43%), La Paz (18,26%) y Cochabamba (16,43%), representando estos tres departamentos el 73,12% del consumo total.

### **2.6.2. Gasolina especial**

La Gasolina Especial es el segundo combustible de mayor consumo en el mercado interno. En el primer semestre de 2015 se comercializó un promedio de 25.274 Bbl/día superior en 9,01% a similar periodo del 2014.

El mayor consumo se registró en los departamentos de Santa Cruz (33,04%), La Paz (27,92%) y Cochabamba (14,61%). El consumo de estos tres departamentos representa aproximadamente el 75,58% del consumo total.

### **2.6.3. Kerosene**

Las ventas de Kerosene durante el primer semestre del 2015 alcanzaron un promedio de 108 Bbl/día. Los departamentos de mayor consumo fueron: Oruro, Potosí, La Paz, Cochabamba y Santa Cruz.

### **2.6.4. Gasolina Premium**

Asimismo, para el primer semestre del 2015 se comercializó un promedio de 66,0 Bbl/día de Gasolina Premium. Este combustible fue comercializado en 70,05% en el departamento de Santa Cruz, 19,94% en La Paz y 10,01% en Cochabamba. En los demás departamentos no se comercializa este producto.

El volumen promedio de Gasolina Premium comercializado para el primer semestre del 2015 fue mayor en 8,67% en relación al 2014.

## 2.7. PRODUCCIÓN EN LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL

### 2.7.1. Producción de GLP en refinerías

La producción de GLP en refinerías es menor a la producida en plantas. Durante el primer semestre de la gestión 2015, la producción promedio de GLP en refinerías se incrementó en 19,48% con relación a similar periodo de la gestión 2014.

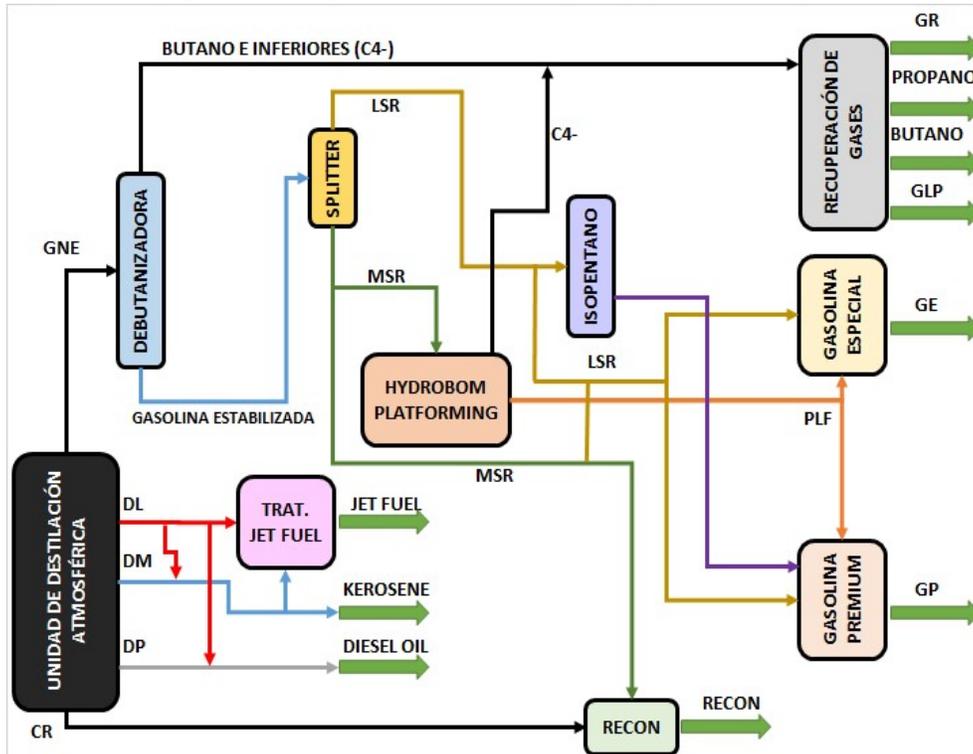
**FIGURA 2-4 VISTA INSTALACIONES REFINERÍA GUALBERTO VILLARROEL**



*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

El primer semestre de 2015, YPFB Refinación produjo el 96,47% de los volúmenes de GLP de refinerías, de los cuales el 76,79% fue producido en Gualberto Villarroel y el 19,68% en Guillermo Elder Bell.

**FIGURA 2-5 UNIDADES DE REFINACIÓN GUALBERTO VILLARROEL**



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica

Del anterior proceso se tienen las siguientes capacidades

**TABLA 2.1 CAPACIDAD DE PROCESO REFINERÍA GUALBERTO VILLARROEL**

UNIDADES	CAPACIDAD	MÁXIMA (B)
Torre <u>Atmosférica -30A</u>	18.500	
Torre <u>Atmosférica -30A</u>	6.000	
<u>Reformación -30B</u>	3.200	
<u>Reformación -30B</u>	3.200	

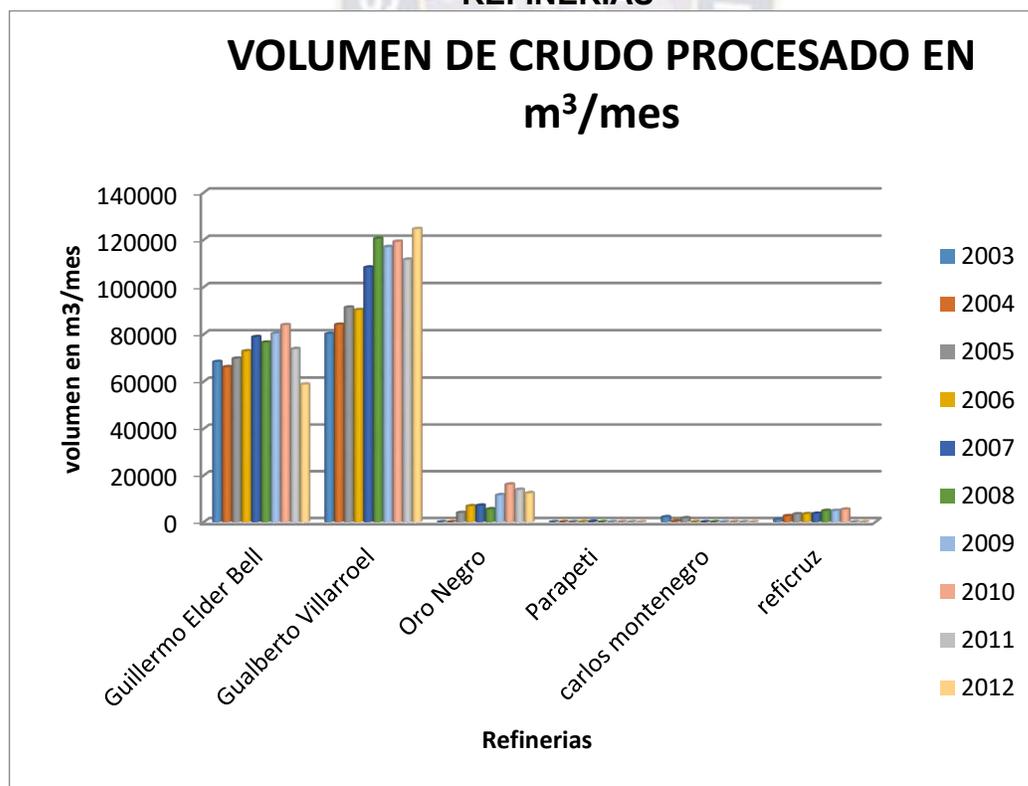
Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica

En la refinería Guillermo Elder Bell no existe una planta de lubricantes, sin embargo, de su planta de carburantes también se obtiene productos no regulados tal como el crudo reducido, la nafta liviana y el crudo reconstituido.

## 2.8. RECEPCIÓN Y ELABORACIÓN DE CRUDO, POR REFINERÍA

La refinería Gualberto Villarroel es la que mayor volumen de Crudo procesa, con un volumen promedio de 4.050 m<sup>3</sup>/día que alcanza el 58% del total procesado, seguida de Guillermo Elder Bell con 2.423 m<sup>3</sup>/día ó el 35%, Oro negro con 450 m<sup>3</sup>/día el 6%.

**FIGURA 2-6 VOLUMEN DE CRUDO PROCESADO EN LAS PRINCIPALES REFINERÍAS**



*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

**TABLA 2.2 PRODUCCIÓN EN BPD REFINERÍAS**

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<b>Guillermo Elder Bell</b>	68308	66120	69727	72816	78852	76512	80320	83902	73743	58764
<b>Gualberto Villarroel</b>	80202	84075	91322	90278	108291	120495	116958	119209	111543	124572
<b>Oro Negro</b>	0	0	3961	6833	7109	5503	11524	16091	13835	12336
<b>Parapeti</b>	0	0	0	39	206	0	0	0	0	0
<b>Carlos Montenegro</b>	2162	320	1675	0	0	0	0	0	0	0
<b>Reficruz</b>	1138	2601	3379	3473	3626	4833	4833	5380	0	0

*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

**TABLA 2.3 PRODUCCIÓN ANUAL 2013-2019 DE LAS PRINCIPALES REFINERÍAS**

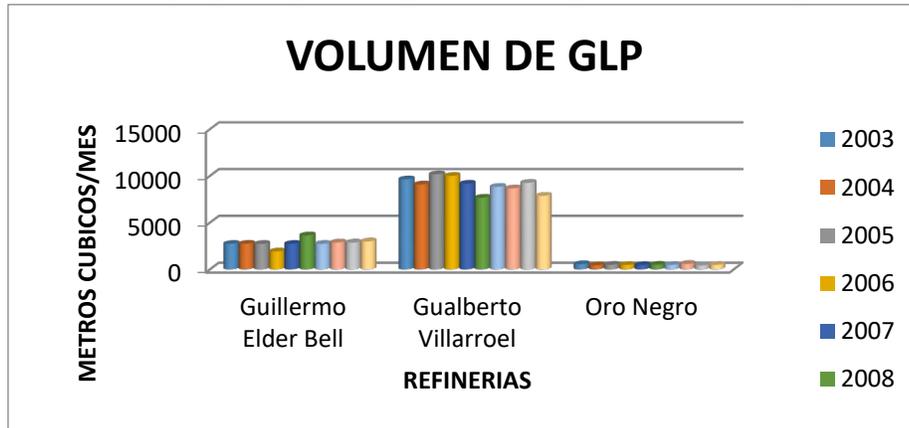
REFINERIA	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>Guillermo Elder Bell</b>	1906	2720	3622	2714	2863	2853	2980
<b>Gualberto Villarroel</b>	9992	9154	7655	8813	8654	9246	7853
<b>Oro Negro</b>	463	457	490	469	573	423	479

*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

### **VOLUMEN REFINADO DE GAS LICUADO DE PETROLEO (GLP)**

La refinería Gualberto Villarroel entregó 8.844 m<sup>3</sup>, lo que es equivalente al 65% del total entregado, Guillermo Elder Bell y Oro Negro el volumen restante.

**FIGURA 2-7 PRODUCCIÓN DE GLP EN LAS PRINCIPALES REFINERÍAS**

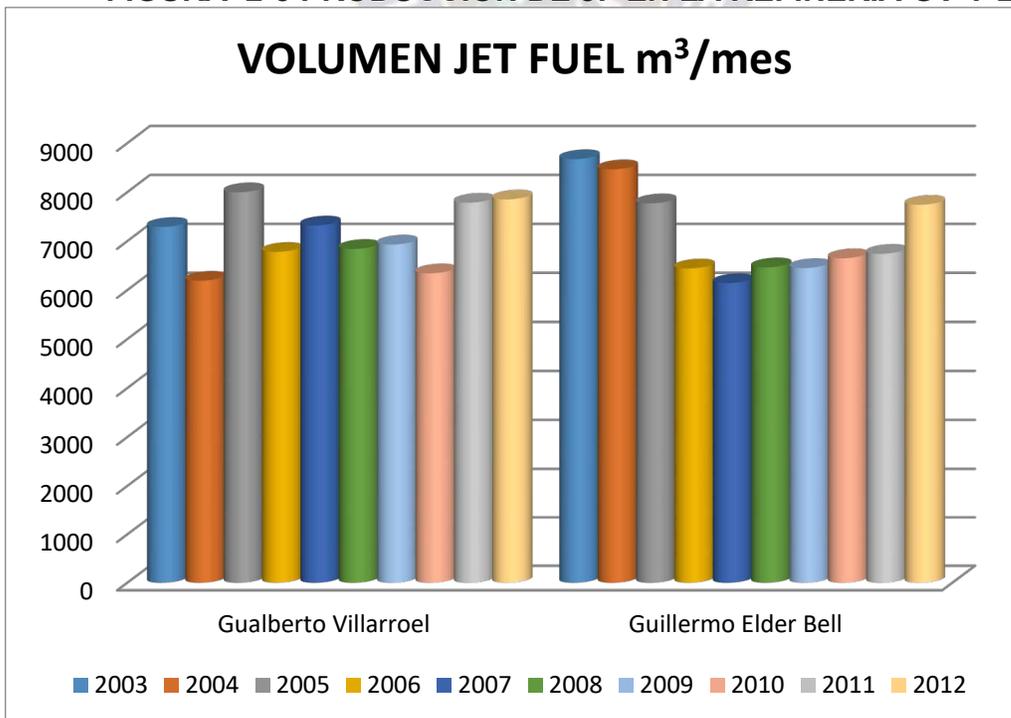


*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

**VOLUMEN REFINADO DE JET FUEL EN METROS CUBICOS/MES**

El producto Jet fuel lo elaboran tanto la refinería Gualberto Villarroel como Guillermo Elder Bell.

**FIGURA 2-8 PRODUCCIÓN DE JF EN LA REFINERÍA GV Y EB**



*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

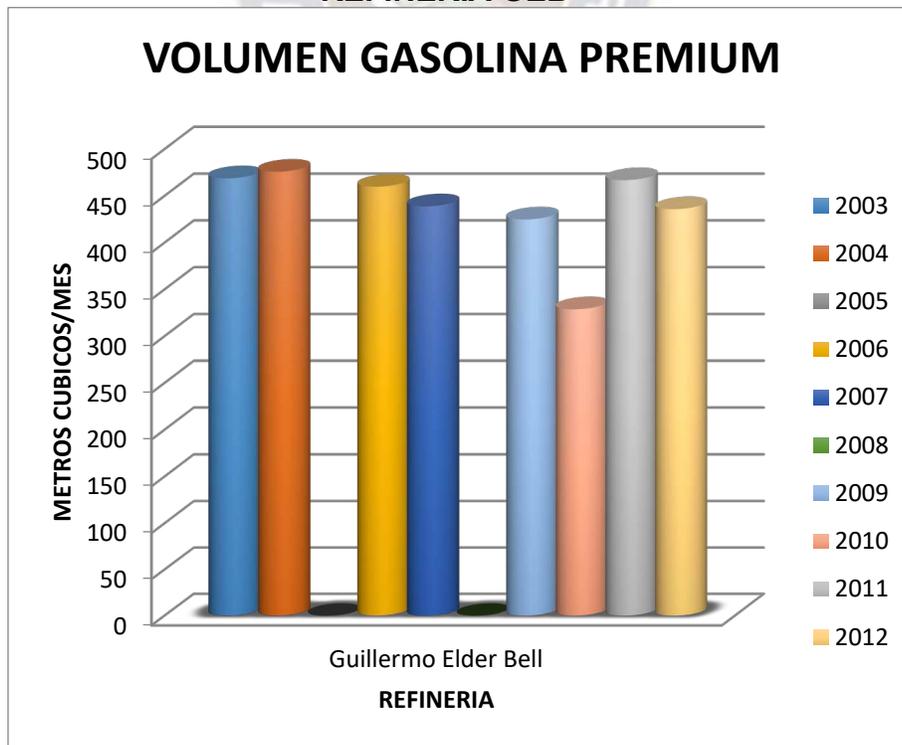
**TABLA 2.4 VOLUMEN REFINADO DE GASOLINA PREMIUM**

REFINERIA	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Gualberto Villarroel	6782	7321	6842	6932	6345	7786	7854
Guillermo Elder Bell	6444	6144	6466	6453	6652	6743	7743

*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

La única refinera que elabora Gasolina Premium en la actualidad es Guillermo Elder Bell.

**FIGURA 2-9 VOLUMEN PRODUCIDO DE GASOLINA PREMIUM EN REFINERÍA GEB**



*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

### TABLA 2.5 PRODUCCIÓN DE GASOLINA REFINERÍA GEB

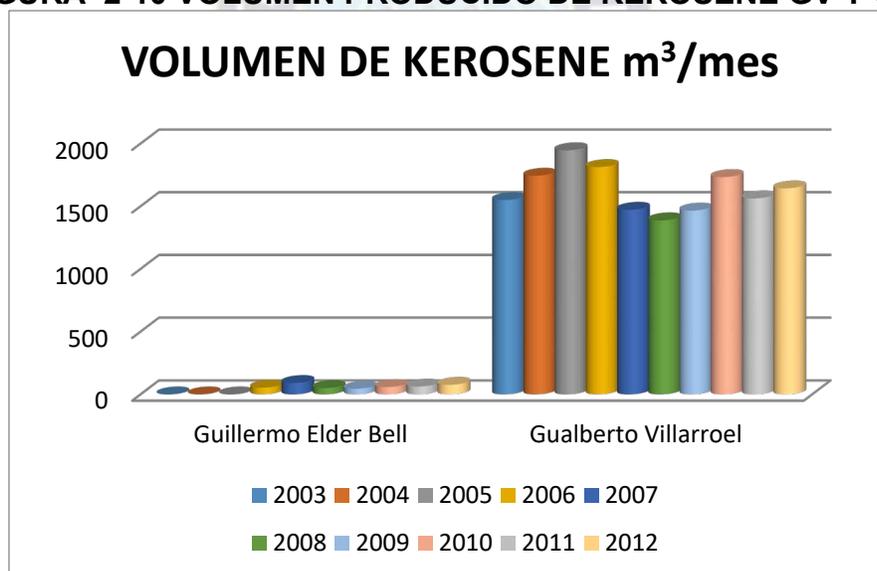
Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica

REFINERIA	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Guillermo Elder Bell	460	439	0	425	329	467	436

### VOLUMEN TOTAL DE REFINACIÓN DE KEROSENE

Las refineras que elaboran kerosene son Gualberto Villarroel y Guillermo Elder Bell con un promedio de 1.686 m<sup>3</sup> mes.

FIGURA 2-10 VOLUMEN PRODUCIDO DE KEROSENE GV Y GEB



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica

**TABLA 2.6 PRODUCCIÓN DE KE REFINERÍAS GEB Y GV 2006-2012**

REFINERIA	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Guillermo Elder Bell	54	91	51	45	59	63	77
Gualberto Villarroel	1813	1472	1388	1466	1733	1563	1643

*Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos; Ficha Técnica*

## **2.9. RIESGOS EN PROCESOS QUIMICOS DE LA REFINERIA**

A continuación, se describen los riesgos presentes en la refinería:

### **2.9.1. Dispersión de Sustancias Peligrosas y Explosión de una nube de vapor (“VCE”)**

Una dispersión de sustancias peligrosas puede ocurrir cuando un hoyo o rotura se presentan en determinados equipos de la instalación, esto origina la formación de una nube de vapor inflamable, esta se dispersa corriente abajo en función de las condiciones del ambiente y las propiedades del material.

La presencia de una fuente de ignición cerca de la concentración de la nube de gas que se encuentre entre sus límites de inflamabilidad, producirá una

Explosión (“Flash–Fire”). La probabilidad de que ocurra este evento depende de factores tales como el flujo del salida, el grado de confinamiento y la reactividad de la sustancia. Sin embargo, en general se considera que los daños producidos en caso de VCE resultan más severos que en el caso de un incendio de vapores.

### **2.9.2. Derrame instantáneo de un líquido en Ebullición (“Boil-Over”)**

Este tipo de suceso puede ocurrir como consecuencia de un incendio de larga duración en un tanque de almacenamiento de petróleo crudo, u otros líquidos viscosos, esto debido al incendio en la superficie del líquido, los componentes más volátiles se desprenden, mientras los más pesados aún permanecen y son conductores de calor según la densidad de los líquidos presentes, esto quiere decir que se genera una onda de calor que va progresando en el interior del líquido hacia el fondo.

### **2.9.3. Explosión de los vapores en Expansión de un Líquido en Ebullición (BLEVE)**

Este evento catastrófico puede ocurrir cuando un recipiente a presión, que contiene un gas licuado o un líquido inflamable altamente volátil, está sometido directamente a un incendio externo. Las paredes del tanque aumentan rápidamente su temperatura por efecto del incendio en el ambiente hasta el punto en que no pueden soportar la presión. Al ocurrir la rotura de la pared del tanque, se produce una explosión debido a la liberación súbita de la presión esto a su vez acompañado de la liberación de fragmentos al exterior.

## **2.10. PROCESOS EN LA REFINERIA GUILLERMO ELDER BELL**

En refinación existen procesos de separación y conversión. El primero (Destilación y Separación) separa el crudo en diferentes fracciones, en función de los puntos de

ebullición, mientras que el segundo (Conversión media) modifica la estructura química de los componentes.

### **Destilación**

Después del precalentamiento, la destilación es la primera operación a la que se somete el crudo en una refinería. Es un proceso de separación del crudo en productos intermedios, en función de sus diferentes puntos de ebullición: Gas, Nafta, Diesel, Residuos y Fondos de vacío. El proceso incluye destilación atmosférica (a presiones atmosféricas) y destilación al vacío.

### **Separación y estabilización**

El gas y la nafta de la destilación se someten a un proceso mediante el cual se extraen las fracciones ligeras (vapores) para obtener productos de mayor pureza: nafta y butano normal y gas de refinería.

### **Tratamiento**

Son los procesos a los que se someten algunos flujos de refinería, con el objetivo de despojarlos de impurezas, principalmente azufre, para mejorar su calidad. Los productos que alimentan otros procesos o que se envían a la mezcla de productos finales, como nafta, gasolina, queroseno, diesel, son sometidos a tratamiento. Los principales procesos de tratamiento incluyen hidrosulfuración (HDS), hidrotratamiento de nafta (HDT) y tratamiento Mercox.

### **Conversión media**

En este grupo de procesos se encuentran Reformación, Craqueo Catalítico e Hidrocacking y dos procesos complementarios como como alquilación e isomerización.

- Reformado: Un proceso que transforma la gasolina en gasolina de alto octanaje, llamada reformada, en presencia de un catalizador.
- Craqueo catalítico e hidrocrqueo: Estos son los procesos más importantes en una refinería que convierten fracciones pesadas en gasolina más fina y productos más ligeros, en presencia de un catalizador que acelera las reacciones de desintegración.
- Craqueo Catalítico: Este proceso toma como alimento el combustible diesel al vacío ya tratado, para obtener nafta de alto octanaje, olefinas (carga de alquilación) y aceites catalíticos.

## **2.11. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE SEGURIDAD DE PROCESOS QUÍMICOS PARA LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL D1**

El objeto es establecer los lineamientos y requerimientos mínimos para proponer la implantación del Sistema de Seguridad de Procesos Químicos en la refinería:

El sistema de Seguridad de los Procesos Químicos requiere la implantación y aplicación integrada de 6 elementos, enunciados como:

### **2.10.1. Información de Seguridad de los Procesos Químicos**

Es el conjunto de documentos que registran información sobre la tecnología, el diseño de los equipos y los riesgos de los Materiales o las Sustancias Peligrosas utilizadas en los procesos industriales

### **2.10.2. Información sobre los riesgos de los materiales o sustancias peligrosas**

Está compuesta por un conjunto de datos referentes a cada uno de los materiales o sustancias involucradas en el proceso, incluyendo corrientes intermedias. Esto comprende tanto las propiedades químicas y/o físicas, como datos sobre sus condiciones de inflamabilidad, reactividad, estabilidad térmica y efectos en la seguridad y salud de las personas.

### **2.10.3. Información sobre la tecnología**

La información relacionada con la tecnología del proceso, debe incluir, como mínimo, lo siguiente:

- Diagrama de flujo del proceso
- Procesos químicos
- Límites máximos y mínimos de operación segura, relativos al proceso, para temperaturas, presiones, flujos, composiciones, etc.

### **2.10.4. Información sobre el diseño de los equipos**

La información relacionada con el diseño de los equipos, debe incluir, como mínimo, lo siguiente:

- Diagrama de tuberías e instrumentación
- Material de construcción
- Clasificación de áreas
- Especificaciones de equipos y tuberías

### **2.10.5. Análisis de Riesgos de los Procesos Químicos**

Es un procedimiento sistemático y formal para la identificación, evaluación y control de los riesgos de los procesos.

Todas las instalaciones deben ser sometidas a un Análisis de Riesgos de los procesos. Los Análisis de Riesgos de los Procesos para estas instalaciones deberán ser

realizados en orden de prioridad. Los factores que pueden ser considerados, cuando se establezca prioridad en la selección de instalaciones, para el desarrollo de análisis de riesgos, son:

Nivel de exposición al riesgo del personal y terceros.

- Inventario, rata de flujo y nivel de riesgo de sustancias tóxicas, reactivas, inflamables o explosivas.
- Características y complejidad del proceso, y tiempo en servicio de las instalaciones.

## Capítulo 3 TEORÍA DE LOS PROCESOS ESTOCÁSTICOS

### 3.1. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

La teoría de la probabilidad es la parte de las matemáticas que se encarga del estudio de los fenómenos o experimentos aleatorios. Se entiende por experimento aleatorio todo aquel experimento tal que cuando se le repite bajo las mismas condiciones iniciales, el resultado que se obtiene no siempre es el mismo. A menudo, y por muy diversas razones, es necesario aceptar que no es posible predecir el resultado de un experimento particular cuando se le haya efectuado con anterioridad varias veces bajo las mismas condiciones iniciales, y en consecuencia se considera aleatorio. Bajo estas circunstancias, la teoría de la probabilidad tiene el objetivo de modelar matemáticamente cualquier experimento aleatorio de interés.

#### 3.1.1. Espacios de probabilidad

El modelo matemático creado durante el primer tercio del siglo XX para estudiar los experimentos aleatorios es el así llamado espacio de probabilidad. Este modelo consiste de una terna ordenada, denotada usualmente por  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ , en donde  $\Omega$  es un conjunto arbitrario,  $\mathcal{F}$  es una  $\sigma$ -álgebra de subconjuntos de  $\Omega$ , y  $P$  es una medida de probabilidad definida sobre  $\mathcal{F}$ .

### 3.1.2. Espacio muestral

El conjunto  $\Omega$  es llamado espacio muestral o espacio muestra, y tiene como objetivo agrupar a todos los posibles resultados del experimento aleatorio en cuestión. No es imprescindible darle esta interpretación al conjunto  $\Omega$ , y matemáticamente se le considera entonces como un conjunto arbitrario.

### 3.1.3. $\sigma$ -álgebra.

Una clase o colección no vacía  $F$  de subconjuntos de  $\Omega$  es una  $\sigma$ -álgebra si es cerrada bajo las operaciones de tomar complementos y uniones numerables. El término  $\sigma$ -álgebra se lee "sigma-álgebra". A los elementos de una  $\sigma$ -álgebra se les llama eventos, sucesos, o conjuntos medibles. Debido a su uso extendido, se usa el término medible, aunque tal vez lo correcto sea decir mensurable. En particular, un evento es simple o elemental si consta de a lo más un elemento de  $\Omega$ , y es compuesto cuando consta de dos o más elementos de  $\Omega$ .

### 3.1.4. Medida de probabilidad.

Una función  $P$  definida sobre una  $\sigma$ -álgebra  $F$  y con valores en el intervalo  $[0, 1]$  es una medida de probabilidad si  $P(\Omega) = 1$  y es  $\sigma$ -aditiva, es decir, si cumple que  $P(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n)$ , cuando  $A_1, A_2, \dots$  son elementos de  $F$  que cumplen con la condición de ser ajenos dos a dos, esto es,  $A_i \cap A_j = \emptyset$  para valores de  $i$  y  $j$  distintos. El número  $P(A)$  representa una forma de medir la posibilidad de observar

la ocurrencia del evento  $A$ , al efectuar una vez el experimento aleatorio. Tenemos entonces formalmente la siguiente definición.

### **3.1.5. Espacio de probabilidad**

Un espacio de probabilidad es una terna  $(\Omega, F, P)$ , en donde  $\Omega$  es un conjunto arbitrario,  $F$  es una  $\sigma$ -álgebra de subconjuntos de  $\Omega$ , y  $P$  es una medida de probabilidad definida sobre  $F$ . El objetivo es asociar un espacio de probabilidad al experimento aleatorio de interés. No existen reglas establecidas para ello y además la posible asignación no es única, pues dependiendo del interés del observador, se puede asociar un espacio de probabilidad u otro.

## **3.2. DEFINICIÓN MATEMÁTICA DE PROCESOS ESTOCÁSTICOS**

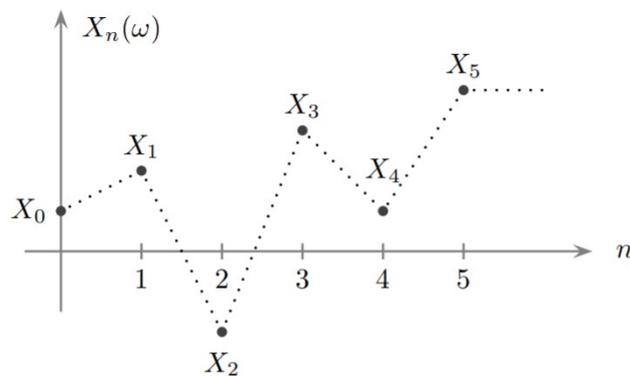
Considere un sistema que puede caracterizarse por estar en cualquiera de un conjunto de estados previamente especificado. Suponga que el sistema evoluciona o cambia de un estado a otro a lo largo del tiempo de acuerdo con una cierta ley de movimiento, y sea  $X_t$  el estado del sistema al tiempo  $t$ . Si se considera que la forma en la que el sistema evoluciona no es determinista, sino provocada por algún mecanismo azaroso, entonces puede considerarse que  $X_t$  es una variable aleatoria para cada valor del índice  $t$ .

Esta colección de variables aleatorias es la definición de proceso estocástico, y sirve como modelo para representar la evolución aleatoria de un sistema a lo largo

del tiempo. En general, las variables aleatorias que conforman un proceso no son independientes entre sí, sino que están relacionadas unas con otras de alguna manera particular. Las distintas formas en que pueden darse estas dependencias es una de las características que distingue a unos procesos de otros. Más precisamente, la definición de proceso estocástico toma como base un espacio de probabilidad  $p(\Omega, F, P)$  y puede enunciarse de la siguiente forma.

Un proceso estocástico es una colección de variables aleatorias  $T \times T$  parametrizada por un conjunto  $T$ , llamado espacio perimetral, donde las variables toman valores en un conjunto  $S$  llamado espacio de estados. En los casos más sencillos se toma como espacio perimetral el conjunto discreto  $T = t_0, 1, 2, \dots$  y estos números se interpretan como tiempos.

**FIGURA 3-1 MODELO VECTOR ALEATORIO DE DIMENSIÓN INFINITA**



*Fuente: Bajpayee, T; Blasting injuries in surface mining with emphasis on flyrock and blast area security;*

*Journal of Safety Research.*

En este caso se dice que el proceso es a tiempo discreto, y en general este tipo de procesos se denotara por  $t_{X_n} : n = 0, 1, \dots$  u, o explícitamente,

$$X_0, X_1, X_2, \dots \quad (3-1)$$

así, para cada  $n$ ,  $X_n$  es el valor del proceso o estado del sistema al tiempo  $n$ . Este modelo corresponde a un vector aleatorio de dimensión infinita.

El espacio parametral puede también tomarse como el conjunto continuo  $T = [0, \infty)$ . Se dice entonces que el proceso es a tiempo continuo, y se denotaría por:

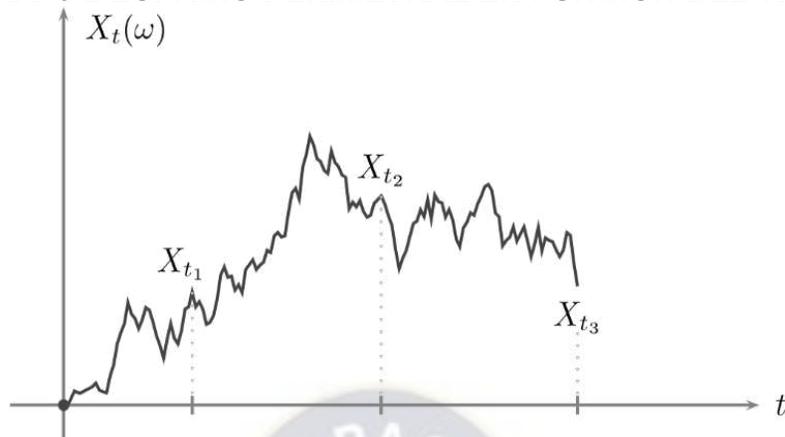
$$X_t: t \geq 0 \quad (3-2)$$

Por lo tanto, se sigue con la convención de que si el sub índice es  $n$ , entonces los tiempos son discretos, y si el subíndice es  $t$ , el tiempo se mide de manera continua.

Los posibles espacios de estados que consideraremos son subconjuntos de  $Z$ , y un poco más generalmente tomaremos como espacio de estados el conjunto de números reales  $R$ , aunque en algunos pocos casos también consideraremos a  $Z^n$  o  $R^n$ .

Naturalmente, espacios más generales son posibles, tanto para el espacio parametral como para el espacio de estados. En particular, para poder hablar de variables aleatorias con valores en el espacio de estados  $S$ , es necesario asociar a este conjunto una  $\sigma$ -álgebra.

**FIGURA 3-2 ESPACIO PERIMETRAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**



*Fuente: Internet Estadística de procesos estocásticos*

Considerando que  $S$  es un subconjunto de  $R$ , puede tomarse la  $\sigma$ -álgebra de Borel de  $R$  restringida a  $S$ , es decir,  $S \mathcal{B} R$ .

Un proceso estocástico, también llamado proceso aleatorio, puede considerarse como una función de dos variables

$$X: T \times \Omega \rightarrow S \quad (3-3)$$

tal que a la pareja  $t, \omega$  se le asocia el valor o estado  $X(t, \omega)$ , lo cual también puede escribirse como  $X_t \omega$ . Para cada valor de  $t$  en  $T$ , el mapeo  $\omega \rightarrow X_t \omega$  es una variable aleatoria, mientras que para cada  $\omega$  en  $\Omega$  fijo, la función  $t \rightarrow X_t \omega$  es llamada una trayectoria o realización del proceso. Es decir, a cada  $\omega$  del espacio muestral le corresponde una trayectoria del proceso. Es por ello que a veces se define un proceso estocástico como una función aleatoria.

Una de tales trayectorias típicas que además cuenta con la propiedad de ser continua se muestra en la Figura 1.2, y corresponde a una trayectoria de un movimiento Browniano, proceso que se definirá y estudiará más adelante.

Si  $A$  es un conjunto de estados, el evento  $X_n \in A$  corresponde a la situación en donde al tiempo  $n$  el proceso toma algún valor dentro del conjunto  $A$ . En particular,  $X_n = x$  es el evento en donde al tiempo  $n$  el proceso se encuentra en el estado  $x$ . Considerando distintos tiempos, estaremos interesados en eventos de la forma

$$X_{n_1} = x_1, X_{n_2} = x_2, \dots, X_{n_k} = x_k. \quad (3-4)$$

Los diferentes tipos de procesos estocásticos se obtienen al considerar las distintas posibilidades para el espacio parametral, el espacio de estados, las características de las trayectorias, y principalmente las relaciones de dependencia entre las variables aleatorias que conforman el proceso. Los siguientes son algunos ejemplos generales de procesos estocásticos.

Estos son procesos que cumplen una cierta propiedad particular, no necesariamente excluyentes unas de otras. A lo largo del texto estudiaremos y definiremos con mayor precisión algunos de estos tipos de procesos.

### 3.2.1. Proceso de ensayos independientes

El proceso a tiempo discreto  $X_n : n = 0, 1, \dots$  puede estar constituido por variables aleatorias independientes. Este modelo representa una sucesión de ensayos

independientes de un mismo experimento aleatorio, por ejemplo, lanzar un dado o una moneda repetidas veces.

El resultado u observación del proceso en un momento cualquiera es, por lo tanto, independiente de cualquier otra observación pasada o futura del proceso.

### 3.2.2. Procesos de Márkov

Estos tipos de procesos son modelos en donde, suponiendo conocido el estado presente del sistema, los estados anteriores no tienen influencia en los estados futuros del sistema. Esta condición se llama propiedad de Márkov y puede expresarse de la siguiente forma: para cualesquiera estados  $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$  (pasado),  $x_n$  (presente),  $x_{n+1}$  (futuro), se cumple la igualdad

$$P\{X_{n+1} = x_{n+1} | X_0 = x_0, \dots, X_n = x_n\} = P\{X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n\}. \quad (3-5)$$

De esta forma la probabilidad del evento futuro  $X_{n+1} = x_{n+1}$  solo depende el evento  $X_n = x_n$ , mientras que la información correspondiente al evento pasado  $X_0 = x_0, \dots, X_{n-1} = x_{n-1}$  es irrelevante. Los procesos de Márkov han sido estudiados extensamente y existe un gran número de sistemas que surgen en muy diversas disciplinas del conocimiento para los cuales el modelo de proceso estocástico y la propiedad de Márkov son razonables. En particular, los sistemas dinámicos deterministas dados por una ecuación diferencial pueden considerarse procesos de Márkov, pues su evolución futura queda determinada por la posición inicial del sistema y la ley de movimiento especificada.

### 3.2.3 Procesos con incrementos independientes

Se dice que un proceso estocástico a tiempo continuo  $X_t: t \geq 0$  tiene incrementos independientes si para cualesquiera tiempos  $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$ , las variables  $X_{t_1}, X_{t_2} - X_{t_1}, \dots, X_{t_n} - X_{t_{n-1}}$  son independientes. Esto quiere decir que los desplazamientos que tiene el proceso en estos intervalos disjuntos de tiempo son independientes unos de otros.

### 3.2.4. Procesos estacionarios

Se dice que un proceso estocástico a tiempo continuo  $X_t: t \geq 0$  es estacionario en el sentido estricto si para cualesquiera tiempos  $t_1, \dots, t_n$ , la distribución del vector  $X_{t_1}, \dots, X_{t_n}$  es la misma que la del vector  $X_{t_1+h}, \dots, X_{t_n+h}$  para cualquier valor de  $h \geq 0$ . En particular, la distribución de  $X_t$  es la misma que la de  $X_{t+h}$  para cualquier  $h \geq 0$ .

### 3.2.5. Procesos con incrementos estacionarios

Se dice que un proceso estocástico a tiempo continuo  $X_t: t \geq 0$  tiene incrementos estacionarios si para cualesquiera tiempos  $s < t$ , y para cualquier  $h \geq 0$ , las variables  $X_{t+h} - X_s$  y  $X_{t+h} - X_{s+h}$  tienen la misma distribución de probabilidad. Es decir, el incremento que tiene el proceso entre los tiempos  $s$  y  $t$  sólo depende de estos tiempos a través de la diferencia  $t - s$ , y no de los valores específicos de  $s$  y  $t$ .

### 3.2.6. Martingalas

Una martingala a tiempo discreto es, en términos generales, un proceso  $X_n : n = 0, 1, \dots$  que cumple la condición

$$E X_{n+1} | X_0, \dots, X_n = X_n. \quad (3-6)$$

En palabras, esta igualdad significa que el valor promedio del proceso al tiempo futuro  $n+1$  es el valor del proceso en su último momento observado, es decir,  $X_n$ . Esto es, se trata de una ley de movimiento aleatorio que es equilibrada o simétrica, pues en promedio el sistema no cambia del último momento observado. A estos procesos también se les conoce como procesos de juegos justos, pues si se considera una sucesión infinita de apuestas sucesivas y si  $X_n$  denota el capital de uno de los jugadores al tiempo  $n$ , entonces la propiedad de martingala (1.1) establece que el juego es justo pues en promedio el jugador no pierde ni gana en cada apuesta.

### 3.2.7. Procesos de Levy

Se dice que un proceso estocástico a tiempo continuo  $X_t : t \geq 0$  es un proceso de Levy si sus incrementos son independientes y estacionarios. Más adelante veremos que tanto el proceso de Poisson como el movimiento Browniano son ejemplos de este tipo de procesos.

### 3.2.8. Procesos Gaussianos

Se dice que un proceso estocástico a tiempo continuo  $X_t : t \geq 0$  es un proceso Gaussiano si para cualesquiera colección finita de tiempos  $t_1, \dots, t_n$ , el vector  $X_{t_1}, \dots, X_{t_n}$  tiene distribución normal o Gaussiana multivariada. Nuevamente, el movimiento Browniano es un ejemplo de este tipo de procesos.

### 3.3. CAMINATAS ALEATORIAS

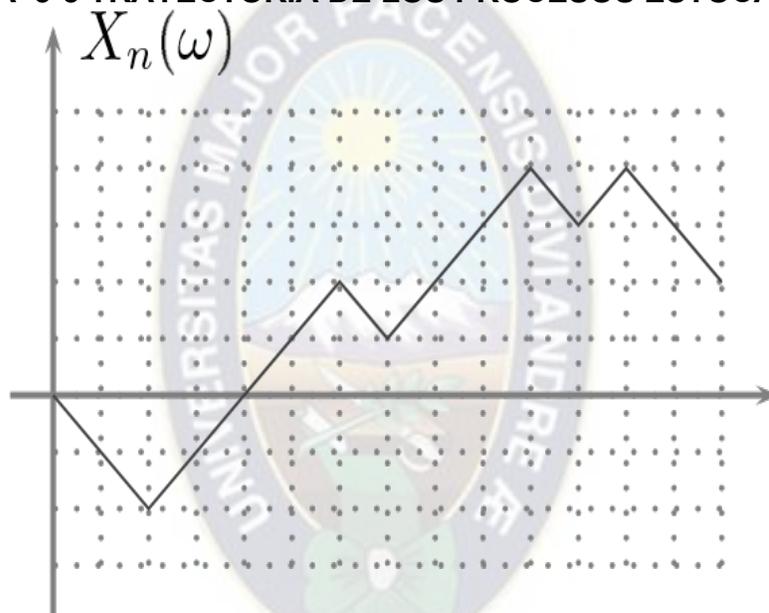
Una caminata aleatoria simple sobre el conjunto de números enteros  $Z$  es un proceso estocástico a tiempo discreto  $X_n : n = 0, 1, \dots$  que evoluciona hasta  $n + 1$

Es decir, iniciando en el estado 0, al siguiente tiempo el proceso puede pasar a  $p$  al estado 1 con probabilidad  $p$ , o al estado -1 con probabilidad  $q$ , donde  $p + q = 1$ . Se usa la misma regla 2-1 para los siguientes tiempos, es decir, pasa al estado de la derecha con probabilidad  $p$ , o al estado de la izquierda con probabilidad  $q$ . El valor de  $X_n$  es el estado del proceso al tiempo  $n$ . Este proceso cambia de un estado a otro en dos tiempos consecutivos de acuerdo con las probabilidades de transición que se muestran en la Figura 2.1, válidas para cualquier  $n \geq 0$ , y para cualesquiera enteros  $i$  y  $j$ . Estas probabilidades se pueden escribir de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} P_{X_{n+1} = j | X_n = i} &= p \quad \text{si } j = i + 1, \\ &= q \quad \text{si } j = i - 1, \\ &= 0 \quad \text{otro caso.} \end{aligned} \quad (3-7)$$

Como estas probabilidades no dependen de  $n$ , se dice que son homogéneas en el tiempo, es decir, son las mismas para cualquier valor de  $n$ . A partir de estas consideraciones, es intuitivamente claro que este proceso cumple la propiedad de Markov, es decir, el estado futuro del proceso depende únicamente del estado presente y no de los estados previamente visitados. Una posible trayectoria de este proceso se muestra en la Figura 2.2.

**FIGURA 3-3 TRAYECTORIA DE LOS PROCESOS ESTOCÁSTICOS**



*Fuente: Internet Estadística de procesos estocásticos*

Una caminata aleatoria puede también definirse de la forma siguiente: sea  $\xi_1, \xi_2, \dots$

Figura 3-3 una sucesión de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Por la idéntica distribución denotaremos a cualquiera de ellas mediante la letra  $\xi$  sin subíndice. Supondremos que  $P \xi \geq 1$   $p$  y  $P \xi \leq 1$   $q$ , en donde, como antes,  $p + q = 1$ . Entonces para  $n \geq 1$  se define

$$X_n : X_0 \quad \xi_1 \quad \xi_n. \quad (3-8)$$

Sin pérdida de generalidad supondremos que  $X_0 = 0$ . Nos interesa encontrar algunas propiedades de la variable  $X_n$ , y de su comportamiento como función de  $n$ . Por ejemplo, a partir de la expresión anterior, es inmediato encontrar su esperanza y varianza.

**Proposición 3.1** Para cualquier entero  $n \geq 0$ ,

1.  $E X_n = n p - q$ .

2.  $\text{Var} X_n = 4npq$ .

**Demostración.** Para la esperanza tenemos que:

$$E(X_n) = \sum_{i=1}^n E(\xi_i) = n E(\xi) = n(p - q) \quad (3-9)$$

Por otro lado, como  $E \xi^2 = p + q - 1$  y  $E \xi = p - q$ , se tiene que  $\text{Var} \xi = 1 - (p - q)^2 = 4pq$ . Por lo tanto,

$$\text{Var}(X_n) = \sum_{i=1}^n \text{Var}(\xi_i) = n \text{Var}(\xi) = 4npq. \quad (3-10)$$

Analicemos estas dos primeras fórmulas. Si  $p > q$ , es decir, si la caminata toma pasos a la derecha con mayor probabilidad, entonces el estado promedio después de  $n$  pasos es un número positivo, es decir, su comportamiento promedio es tender hacia la derecha, lo cual es intuitivamente claro. Análogamente, si  $p < q$ , entonces el estado final promedio de la caminata después de  $n$  pasos es un número negativo,

es decir, en promedio la caminata tiende a moverse hacia la izquierda. En ambos casos la varianza crece conforme el número de pasos  $n$  crece, eso indica que mientras mayor es el número de pasos que se dan, mayor es la incertidumbre acerca de la posición final del proceso. Cuando  $p < q$  se dice que la caminata es asimétrica. Cuando  $p = q = \frac{1}{2}$  se dice que la caminata es simétrica, y en promedio el proceso se queda en su estado inicial, pues  $E X_n = 0$ , sin embargo, para tal valor de  $p$  la varianza es  $\text{Var } X_n = n$ , y es sencillo demostrar que ese valor es el máximo de la expresión  $4npq$ , para  $p \in [0, 1]$ .

### 3.3.1. Probabilidades de transición

Como hemos supuesto que la caminata inicia en cero, es intuitivamente claro que después de efectuar un número par de pasos el proceso sólo puede terminar en una posición par, y si se efectúan un número impar de pasos la posición final solo puede ser un número impar. Además, es claro que después de efectuar  $n$  pasos, la caminata solo puede llegar a una distancia máxima de  $n$  unidades, a la izquierda o a la derecha. Teniendo esto en mente, en el siguiente resultado se presenta la distribución de probabilidad de la variable  $X_n$ .

**Proposición 3.2** *Para cualesquiera números enteros  $x$  y  $n$  tales que  $n \geq x$ , y para el caso cuando  $x$  y  $n$  son ambos pares o ambos impares,*

$$P \{X_n = x | X_0 = 0\} = \binom{n}{\frac{n+x}{2}} p^{\frac{1}{2}(n+x)} q^{\frac{1}{2}(n-x)} \quad (3-11)$$

Para valores de  $x$  y  $n$  que no cumplen las condiciones indicadas la probabilidad en cuestión vale cero.

Demostración. Suponga que se observa la posición de la caminata después de efectuar  $n$  pasos. Sean  $R_n$  y  $L_n$  el número de pasos realizados hacia la derecha y hacia la izquierda, respectivamente. Entonces  $X_n = R_n - L_n$ , y además  $n = R_n + L_n$ . Sumando estas dos ecuaciones y substituyendo la expresión  $X_n = \sum_{i=1}^n \xi_i$  se obtiene

$$R_n = \frac{1}{2}(n + X_n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2}(1 + \xi_i) \quad (3-12)$$

Esta ecuación es la identidad clave para obtener el resultado buscado. Observe que esta fórmula arroja un valor entero para  $R_n$  cuando  $n$  y  $X_n$  son ambos pares o ambos impares. Como las variables independientes  $\xi_i$  toman los valores  $1$  y  $-1$  con probabilidades  $p$  y  $q$  respectivamente, entonces las variables independientes  $\frac{1}{2}(1 + \xi_i)$  toman los valores  $1$  y  $0$  con probabilidades  $p$  y  $q$ . Esto lleva a la conclusión de que la variable  $R_n$  tiene distribución binomial  $n, p$ . Por lo tanto, para cualquier valor de  $x$  que cumpla las condiciones enunciadas se tiene que

$$p^{\frac{1}{2}(n+x)} q^{\frac{1}{2}(n-x)} \quad (3-12)$$

En particular, cuando la caminata es simétrica, es decir, cuando  $p = \frac{1}{2}$ , y con las mismas restricciones para  $n$  y  $x$  ( $n \geq x$ , ambos pares o ambos impares) se tiene la expresión

$$P(X_n = x | X_0 = 0) = \binom{n}{\frac{n+x}{2}} p^{\frac{n+x}{2}} q^{\frac{n-x}{2}} \quad (3-13)$$

Esta fórmula puede también justificarse mediante argumentos de análisis combinatorio de la siguiente forma: en total hay  $2^n$  posibles trayectorias que la caminata puede seguir al efectuar  $n$  pasos, todas ellas con la misma probabilidad de ocurrir debido a la simetría. Ahora, ¿cuántas de estas trayectorias terminan en  $x$ , por ejemplo?

Como se ha argumentado antes, el número de pasos a la derecha debe ser  $\frac{1}{2}(n+x)$ , y el número de trayectorias que cumplen la condición es el número de formas en que los  $\frac{1}{2}(n+x)$  pasos a la derecha pueden escogerse de los  $n$  pasos totales. La respuesta es entonces el cociente que aparece en (2.2). La fórmula (2.1) puede extenderse fácilmente al caso general de pasar de un estado cualquiera  $y$  a otro estado  $x$  en  $n$  pasos, como se muestra a continuación.

**Proposición 3.3** Si los números  $n$  y  $x$  y  $y$  son ambos pares o ambos impares, entonces para  $n \geq |x-y|$ ,

$$P(X_n = x | X_0 = y) = \binom{n}{\frac{n+x-y}{2}} p^{\frac{n+x-y}{2}} q^{\frac{n-x+y}{2}} \quad (3-14)$$

*Para valores de la diferencia  $x$  y  $y$  y el entero  $n$  que no cumplen las condiciones indicadas la probabilidad en cuestión vale cero.*

Demostración. Tenemos como hipótesis que  $X_0 = y$ . Consideremos el proceso  $Z_n = X_n - y$ . Entonces  $Z_n : n \geq 0$  es ahora una caminata aleatoria que inicia en cero como en el caso antes demostrado. El resultado enunciado se obtiene de la identidad

$$P\{X_n = x | X_0 = y\} = P\{Z_n = x - y | Z_0 = 0\} \quad (3-15)$$

### 3.3.2. Probabilidad de regreso a la posición de origen

Nos plantearemos ahora el problema de encontrar la probabilidad de que una caminata aleatoria, que inicia en el origen, regrese eventualmente al punto de partida. Demostraremos que, en el caso asimétrico,  $p \neq \frac{1}{2}$ , la probabilidad de tal evento es estrictamente menor que 1, es decir, no es seguro que ello ocurra, pero en el caso simétrico,  $p = \frac{1}{2}$ , se cumple que con probabilidad uno la caminata regresa eventualmente al origen. Para el último caso demostraremos además que el número de pasos promedio para regresar al origen es, sin embargo, infinito. La demostración es un tanto técnica y hace uso de las funciones generadoras de probabilidad. Como este capítulo es introductorio, tal vez sea mejor recomendar al lector, cuando se trate de una primera lectura, omitir los detalles de esta demostración.

**Proposición 3.4** Para una caminata aleatoria sobre  $Z$ , la probabilidad de un eventual regreso al punto de partida es

$$1 \quad \text{si } p = q,$$

$$1 - 2p \quad \text{si } p < q$$

$$1 - 2q \quad \text{si } p > q. \quad (3-16)$$

Es decir, sólo en el caso simétrico,  $p = q$ , se tiene la certeza de un eventual retorno, sin embargo el tiempo promedio de regreso en tal caso es infinito.

### 3.4. LA CADENA DE MARKOV

Cadena es un proceso estocástico con espacio de estados discreto.

Cadena en tiempo discreto es un proceso estocástico en tiempo discreto con espacio de estados discreto

Cadena en tiempo continuo un proceso estocástico en tiempo continuo con espacio de estados discreto

Un proceso estocástico  $\{X_n, n = 1, 2, 3, \dots\}$  es una Cadena de Márkov en Tiempo Discreto si para cada  $n$  y  $x_j, j = 0, 1, 2, \dots, n + 1$ , se verifica

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n, \dots, X_0 = x_0) = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n)$$

La probabilidad de transición en un paso del estado  $i$  al estado  $j$  en un paso es:

$$p_{j,i}(1) = P(X_{n+1} = j | X_n = i)$$

La Cadena de Márkov en Tiempo Discreto es **homogénea** si  $p_{ij}(1)$  no depende del tiempo  $n$

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i) = P(X_{n+m+1} = j | X_{n+m} = i)$$

La matriz de transición o matriz de probabilidades de transición  $P$ :

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & \dots \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \end{matrix} & \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & \dots \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & \dots \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (3-17)$$

$P$  es una matriz cuadrada no negativa cuyas filas suman la unidad, es decir,  $0 \leq p_{ij} \leq 1$  y  $\sum_j p_{ij} = 1$  para cada  $i \in \Omega$ .

Por lo tanto,  $P$  es una matriz estocástica.



## Capítulo 4 MITIGACIÓN DE RIESGOS AL IMPLEMENTAR NUEVAS TECNOLOGÍAS DE PROCESOS EN REFINERÍAS Y PLANTAS QUÍMICAS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Se discuten los riesgos técnicos en las industrias de biodiésel y petróleo y refinación. Las pruebas de plantas piloto se consideran una capa de protección independiente para reducir el riesgo técnico al implementar nuevas tecnologías de procesos en refinerías y plantas químicas.

**FIGURA 4-1 PLANTAS PILOTOS EN REFINERIAS**



*Fuente: Robert P. Absil; Intertek PARC Pittsburgh; Pennsylvania USA.*

Existen varios tipos de riesgo al implementar una nueva tecnología en las industrias de refinación y química. Estos incluyen riesgos de seguridad, riesgos

financieros y riesgos técnicos. El riesgo técnico es que la tecnología a implementar en la planta no ofrezca el rendimiento esperado medido, entre otros, por las propiedades del coque de petróleo, el contenido de metal de petróleo des-asfaltado o la temperatura necesaria para hacer especificaciones de azufre de diésel de azufre ultra-bajo (ULSD). Obviamente, el riesgo técnico está estrechamente ligado a la seguridad y a los riesgos financieros.

#### **4.2. RIESGO DE ALIMENTACIÓN DE CRUDO DE REFINERÍA**

Al considerar el riesgo en la industria de refinación, una variable es la materia prima. El petróleo crudo convencional es una mezcla compleja de especies de hidrocarburos que hierven a una amplia gama de temperaturas. Las especies de hidrocarburos incluyen parafinas, ciclo-parafinas, aromáticas, resinas y asfaltos.

El petróleo crudo también incluye compuestos que contienen hetero-átomos, es decir, azufre, nitrógeno, oxígeno y metales. Los compuestos presentes en las distintas fracciones de destilación, como el diésel, varían con el origen crudo [1].

La complejidad de un crudo o sus fracciones se puede ilustrar teniendo en cuenta sólo el número de parafinas que pueden existir en un número de carbono dado. La Tabla 1 muestra los puntos de ebullición de las n-parafinas y el número de isómeros que pueden existir en cada número de carbono. También existen variaciones estructurales similares para ciclo-parafinas, aromáticas, resinas y asfaltos a un número de carbono determinado.

Debido a la complejidad del petróleo crudo, es difícil predecir el comportamiento de las fracciones en procesos no catalíticos, como el des-asfaltamiento y el coque retrasado. Mientras que la única variable es la composición de la materia prima, todavía surgen preguntas de cómo la materia prima interactuará con los disolventes parafínicos o cómo se agrietará térmicamente en las operaciones de coque y visbreaking retardadas en condiciones de proceso. Esto aumenta el riesgo al implementar nuevas tecnologías de procesamiento en refinerías.

**TABLA 4.1 NÚMERO DE ISÓMEROS EN FUNCIÓN AL NÚMERO DE CARBONO**

Carbon Number	Boiling of n-Paraffin, ° C	Número de carbono Ebullición de n-Parafina,
5	36	3
8	126	18
10	174	75
12	216	355
15	271	4347
20	343	$3.66 \cdot 10^5$
25		$3.67 \cdot 10^7$
30		$4.11 \cdot 10^9$
35		$4.93 \cdot 10^{11}$
40		$6.24 \cdot 10^{13}$

*Fuente: Robert P; Absil Intertek.*

El riesgo aumenta especialmente cuando se prueban materias primas muy diferentes de los recursos convencionales. Estas materias primas pueden proceder de recursos no convencionales, como el esquisto de petróleo, arenas petrolíferas o biomasa. La amplia variabilidad de la calidad en el depósito de arenas petrolíferas es un problema que debe tenerse en cuenta con una concentración de betún que varía considerablemente verticalmente y a través de la reserva.

#### **4.3. RIESGO DE LA REFINACIÓN DEL CATALIZADOR**

Otro factor importante que afecta a la evaluación del riesgo es la naturaleza de los catalizadores utilizados en el proceso. Un catalizador es un material que aumenta la velocidad de reacción sin afectar el equilibrio termodinámico. Existen dos tipos de catalizadores: catalizadores homogéneos y heterogéneos. Los catalizadores homogéneos son solubles en el medio de reacción, mientras que los catalizadores heterogéneos son catalizadores sólidos que convierten materias primas de líquido/gas. En el cuadro 2 se ofrece una comparación de catalizadores heterogéneos y homogéneos. Los factores, como las limitaciones de difusión, la sensibilidad al veneno y la mala comprensión mecanicista, aumentan el riesgo al implementar procesos que emplean catalizadores heterogéneos.

En la industria del petróleo y el refino, más del 90% del producto entrará en contacto con catalizadores heterogéneos sólidos. La composición del catalizador sólido es compleja. El catalizador puede consistir en varios componentes, como

zeolita, metales y aglutinante. A menudo el catalizador es dual-funcional en el caso de que la función ácida, proporcionada por la zeolita, cataliza las reacciones de agrietamiento e isomerización y la función metálica cataliza las reacciones de hidrogenación, como es el caso de los catalizadores hidrocracking. Esto, ligado a la variabilidad de la composición de las fracciones de petróleo crudo, aumenta el riesgo de implementar nuevas tecnologías en las refinerías.

El nivel de riesgo es especialmente alto cuando se implementan procesos catalíticos para la conversión de crudos sustancialmente más pesados, como el petróleo de esquisto y el betún.

#### **4.4. RIESGO DE CATALIZADOR Y COMBUSTIBLES**

En la industria del biodiesel el aceite vegetal, típicamente procedente de soja en los Estados Unidos, consiste en triacylglicéridos, también llamados triglicéridos, que se reaccionan con metanol con un catalizador para producir ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) y glicerol. Esta reacción se denomina trans-esterificación.

Los ésteres metílicos de ácidos grasos constituyen el biodiesel. El catalizador utilizado en este proceso es el hidróxido de sodio o potasio, que se disuelve en el alcohol. El hidróxido de sodio se carga como escamas de 99% + pureza; el hidróxido de potasio también se carga como escamas, pero su pureza es de 90-92% con el resto siendo agua cristalina. Aunque se basa en la economía, las soluciones de metóxido de sodio se pueden entregar a la planta, evitando así mezclar el hidróxido

con el metanol en el sitio de la planta. La materia prima es típicamente aceite de soja de alta pureza. Sin embargo, otros aceites y grasas contienen ácidos grasos libres.

Estos ácidos grasos libres pueden ser problemáticos a concentraciones más altas ya que reaccionan con hidróxido de sodio y forman jabón y agua a través de la saponificación, lo que conduce al consumo de catalizadores. El alto contenido de ácidos grasos libres requiere un paso de pretratamiento de esterificación catalizado por ácido. La comparación de las propiedades del catalizador de hidróxido de sodio con la lista de la Tabla 2, muestra que estos catalizadores son consistentes con los de los catalizadores homogéneos. Están en la misma fase que el medio de reacción. Además, se conoce la composición y la estructura química del catalizador y se entiende bien el mecanismo de reacción. En consecuencia, el riesgo al implementar esta tecnología se reduce sustancialmente.

Las empresas emergentes de la industria de los biocombustibles, en particular, tienen que hacer frente a mayores niveles de riesgo, ya que los programas, que prueban nuevos conceptos en catálisis o procesan materias primas muy diferentes, a menudo se inician sin datos extensos y se necesitan pruebas iniciales rápidas para explorar rápidamente el potencial de estos conceptos. Las materias primas que se están probando a menudo son de origen de biomasa y tienen composiciones sustancialmente diferentes a las de los aceites crudos convencionales, como un mayor contenido de oxígeno y un mayor número total de ácidos. Se introduce un riesgo adicional, por ejemplo, a medida que se desarrollan catalizadores

heterogéneos que pueden esterificar simultáneamente los ácidos grasos libres y transesterificación de los triglicéridos.

**TABLA 4.2 COMPARACIÓN DE CATALIZADORES HETEROGÉNEOS Y HOMOGÉNEOS**

<b>Catalisis Heterogénea</b>	<b>Catálisis Homogénea</b>
<b>Por lo general, fase sólida distinta</b>	La misma fase que el medio de reacción
<b>Fácilmente separado</b>	A menudo difícil separar
<b>Fácilmente regenerado y reciclado</b>	Caro y difícil de reciclar
<b>Las tarifas no suelen ser tan rápidas como homogéneas</b>	A menudo tasas muy altas
<b>Puede ser controlado por difusión</b>	No controlado por difusión
<b>Muy sensible a los venenos.</b>	

	Por lo general, robusto para los venenos
<b>Menor selectividad</b>	Alta selectividad
<b>Larga vida útil</b>	Vida útil corta
<b>A menudo proceso de alta energía</b>	A menudo tiene lugar en condiciones leves
<b>Pobre entendimiento mecanicista</b>	A menudo mecanismo bien entendido

*Fuente: Robert P, Absil; Intertek PARC Pittsburgh; Pennsylvania USA*

#### 4.5. EVALUACIÓN DEL RIESGO EN LA PRODUCCIÓN

Considere que un refinador decide implementar la tecnología diésel de azufre ultra-bajo en su refinería. En el Cuadro 3 se ha realizado una simple evaluación

técnica del riesgo. El refinador u operador de la planta en el caso general tiene que preguntarse sistemáticamente cuáles son los riesgos y si puede aceptar estos riesgos. Los principales riesgos son si el refinador será capaz de producir diésel de azufre ultra bajo que cumpla con las especificaciones de ATSM utilizando las tecnologías disponibles en el mercado.

#### **4.5.1. Gestión de riesgos en la seguridad de las plantas de procesos**

El concepto de riesgo y los diversos medios de gestión del riesgo están bien desarrollados en el campo de la seguridad de las plantas de proceso. En el diseño de las unidades operativas, se realizan los conocidos estudios "Peligro y Operabilidad" (HAZOP) y "Qué pasaría si" para evaluar la seguridad de los diseños de unidades o cambios en las unidades. Estos estudios examinan el 100% de los resultados potenciales del evento, pero sin embargo son puramente cualitativos. Por ejemplo, un estudio HAZOP puede indicar que se debe instalar una válvula de alivio para evitar la sobrepresión del tanque y la rotura del tanque.

Los métodos cuantitativos simplificados utilizan clasificaciones relativas de peligros para evaluar el potencial de peligro de las instalaciones o cambios en las instalaciones. Estos incluyen el índice de exposición química (CEI) y el índice fire & Explosion (F&EI).

El CEI proporcionaría una clasificación de peligro relativo en caso de que el tanque se rompiera y liberara su contenido a la atmósfera en comparación con las

liberaciones de otros productos químicos. Además, la Capa de Análisis de Protección (LOPA) identificaría capas independientes de protección que reducirían el riesgo sobre la sobrepresión del tanque. Una capa de protección independiente (IPL) se define como:

"... un dispositivo, sistema o acción que sea capaz de impedir que un escenario pase a su consecuencia no deseada independientemente del evento de inicio o de la acción de cualquier otra capa de protección asociada con el escenario."

**TABLA 4.3 PROGRAMA DE HDT DIÉSEL DE AZUFRE ULTRA BAJO: EVALUACIÓN DE RIESGOS**

Variables de entrada	Variables de salida	Evaluación de riesgos
<p>Velocidad de avance (bbl/día)</p> <p>H2 Tasa de maquillaje (scf/bbl) Entrada H2</p> <p>Composición (vol%)</p> <p>Velocidad de reciclaje H2 (scf/b bl)</p>	<p>Tasa de producto (bbl/día) Saldo de material (wt %)</p> <p>Velocidad de sangrado H2 (scf/bbl)</p> <p>Velocidad de torre H2 (scf/bbl) Consumo H2 (scf/bbl)</p>	<p>¿Cuál es el impacto en el rendimiento? ¿Se puede suministrar H2?</p>

<p>Presión de entrada (psig)</p>	<p>Presión de salida (Psig) Caída de presión (psig/L)</p>	<p>¿La capacidad de la bomba es correcta?</p>
<p>Temperatura, F</p>	<p></p>	<p>¿Cuál es la longitud del ciclo? ¿Se puede regenerar el Catalyst?</p>
<p>Catalyst</p>	<p></p>	<p>¿Se ha seleccionado Optimal Catalyst?</p>
<p>Reactor Dimensiones (L/D) Reactor de configuración del distribuidor de líquidos</p>	<p></p>	<p>¿Qué es Catalyst Contactando Eficiencia?</p>
<p></p>	<p></p>	<p>¿El recipiente está clasificado para la presión de</p>



<p>Reactor / Torre</p> <p>Integridad</p>		<p>funcionamiento? ¿Se conoce el estado de integridad del equipo?</p>
<p>Alimentación</p> <p>Composición API, D-482</p> <p>Azufre, D-5453</p> <p>Destilación, D-86</p>	<p>Api de composición del producto, D-482 Flash Point D-93 Azufre, D-5453 Destilación D-86 Viscosidad cinemática D-445 Ceniza, D-482 Agua y Sedimento D-2709 Corrosión de la tira de cobre, D-130</p> <p>Número de cetano, D-613 Cetane Index, D-976 Aromaticity, D-1319 Cloud Point, D-2500 Ramsbottom Carbon, D-524 Lubricity, D-6079 Conductividad, D-2624, 4308</p>	<p>¿Se puede cumplir la especificación?</p>

Fuente: Bhattacharjee, A; Injury experience analysis; Journal of Safety Research

Ejemplos de IGL incluyen válvulas de alivio, que evitan que el sistema supere la sobrepresión especificada. El PFD para una válvula de alivio es, por ejemplo, 1 de 100. Por lo tanto, mediante la instalación de una válvula de alivio el riesgo de sobrepresión se reduce en un factor de 10-2. LOPA también es semi-cuantitativo y asigna órdenes de magnitud a probabilidades de falla bajo demanda (PFD) de capas independientes de protección. LOPA se puede utilizar en cualquier etapa del desarrollo de procesos, pero se utiliza con mayor frecuencia en la etapa de diseño cuando se completan los diagramas de tuberías e instrumentación. LOPA se utiliza para examinar escenarios generados por herramientas de peligro de proceso cualitativa (HAZOP, qué pasaría si, etc.) cuando las consecuencias no son claras, no se conoce la frecuencia de las consecuencias finales o cuando los procesos son demasiado complejos para abordar cualitativamente. LOPA, CEI y F&EI se aplican al 10-20% de los escenarios considerados en un análisis HAZOP.

El análisis cuantitativo completo del riesgo (CPQRA) se aplica a un pequeño porcentaje (1%) de las situaciones potenciales. Este análisis se utiliza para ayudar a evaluar los riesgos potenciales cuando los métodos cualitativos no pueden proporcionar una comprensión adecuada de los riesgos y se necesita más información. El análisis cuantitativo del riesgo incluye el modelado estadístico y probabilístico de la frecuencia y las consecuencias de un único escenario. Por lo tanto, en caso de ruptura del tanque y liberación de su contenido, CPQRA determinaría el número de muertes a una distancia de decir 1000 metros de distancia de la unidad y la frecuencia de esta ocurrencia.

#### **4.5.2. Capa de protección independiente aplicada a la industria de refinación**

Revisemos el refinador que quiere implementar la tecnología de procesos ULSD. Después de examinar las variables de salida y semi-cuantificar el nivel de riesgo asociado con el logro de estas variables de salida, debe preguntarse qué nivel de riesgo está dispuesto a aceptar. Si el nivel de riesgo no es aceptable, entonces una manera de reducir el riesgo de implementar nueva tecnología es mediante la adición de una capa de protección independiente (IPL) análoga a lo que se hace en el campo de la seguridad de la planta de proceso.

Una capa de protección independiente utilizada a menudo en las industrias de refinación y química es la prueba piloto de plantas. Una planta piloto es una unidad que simula el funcionamiento de una unidad de finura excepto en una escala sustancialmente reducida. Las plantas piloto pueden cubrir unidades de refinación no hidro-procesadas, como un coque retrasado, desafalter y visbreaker. Las plantas piloto también pueden simular operaciones de reactores de lecho fijo utilizados en hidrotratamiento, hidrocracking, reforma e isomerización. Las pruebas de micro-reactor se utilizan principalmente para el cribado inicial de catalizadores, pero los reactores de banco y planta piloto se utilizan para la confirmación del rendimiento del catalizador y las especificaciones del producto. En el presente caso de la aplicación de la nueva tecnología de hidrotratamiento ULSD, la capa de protección independiente serían los servicios independientes de pruebas de plantas piloto de terceros o de ensayo de reactores de banco. Sería capaz de proporcionar datos

sobre los requisitos de temperatura, la longitud del ciclo y las especificaciones del producto.

Las pruebas independientes significan que la empresa proporciona servicios de pruebas confidenciales cuyos únicos ingresos provienen de los servicios de la planta piloto prestados. La empresa de pruebas no compite con sus clientes ni posee la tecnología que se comercializa a sí misma.

Una ventaja adicional es que la empresa que proporciona los servicios de pruebas tiene una amplia experiencia que puede facilitar la ejecución del programa. Otra ventaja es que, si bien un cliente puede tener instalaciones de planta piloto propias, el fallo de causa común puede garantizar que las pruebas sean realizadas por una empresa independiente. Si bien se trata de un problema complejo, puede pagar a largo plazo para hacer pruebas independientes antes de implementar tecnología compleja en la refinería.

El nivel de riesgo puede ser mitigado por la experiencia. Se pueden desarrollar bases de datos y modelos complejos que correlacionen el rendimiento del catalizador. En lugar de centrarse en compuestos individuales, grupos o "bultos" de compuestos que caen en clasificaciones químicas similares se han utilizado con éxito.

En un análisis aún más profundo, las superficies de los catalizadores se pueden caracterizar y sus propiedades se pueden correlacionar con el rendimiento del

catalizador. Estos dan confianza en el rendimiento del proceso y reducen el riesgo de implementar la tecnología en la refinería o en una planta química.



## **Capítulo 5 MODELOS ESTOCÁSTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE ACCIDENTES Y EXPLOSIONES**

### **5.1. MODELADO PROBABILÍSTICO DE LOS DATOS DE ACCIDENTES**

El riesgo se define como incertidumbre con respecto a la ocurrencia de una pérdida (Rejda, 1998). La evaluación del riesgo consta de dos fases distintas: una identificación cualitativa, caracterización y clasificación de los peligros; y una evaluación cuantitativa del riesgo, que incluye la estimación de la probabilidad (por ejemplo, frecuencias) y las consecuencias de un peligro (Vose, 2000). Según Ramani (1992), el término peligro se utiliza para describir una situación insegura en una mina y esto puede ser una condición física insegura o los actos inseguros de los mineros. Ahora existe un acuerdo común en el sentido de que los riesgos deben evaluarse en términos de frecuencia y gravedad, y la mayoría de las fórmulas utilizadas para sistematizar evaluaciones cuantitativas contienen variables de estos tipos (Cuny y Lejeune, 1999).

El enfoque de análisis de riesgos es una de las formas de examinar todos los aspectos de una refinería. A este respecto, se trata de un método o conjunto de técnicas, que identifica las posibles pérdidas e incluye la consideración de los peligros, la gravedad de las consecuencias de las exposiciones a los peligros, el nivel de riesgo y las medidas de control necesarias para reducir el riesgo a un nivel prácticamente alcanzable. Los pasos básicos de la metodología de análisis de riesgos estocásticos desarrollada para este trabajo se presentan a continuación:

- Recopilación de datos de accidentes en refinerías.
- Evaluación de la probabilidad de ocurrencias de accidentes.
- Determinación de la magnitud de los accidentes mediante el establecimiento de posibles consecuencias o gravedad.
- Compilación de probabilidad y consecuencia (severidad) bajo una formulación de riesgo utilizando una simulación de Monte Carlo.
- Establecimiento de niveles de riesgo basados en la gravedad y la capacidad. Predicción de riesgos mediante análisis de series temporales.
- Métodos de gestión y control de riesgos para riesgos no cetros.

## **5.2. EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE QUE SE PRODUZCAN ACCIDENTES**

Si los insumos en un proceso revelan incertidumbre y variabilidad, sin duda será necesario describir la naturaleza de esta incertidumbre y variabilidad. La forma más simple y mejor es expresar esto en forma de una distribución de probabilidad, que da tanto el rango de valores que la variable podría tomar y la probabilidad de ocurrencia de cada valor dentro del rango. Generalmente, la distribución y sus parámetros son previamente desconocidos y deben estimarse a partir de la información disponible sobre la naturaleza aleatoria de los datos del accidente. La información suele estar en la forma de una muestra de valores observados y hay de acuerdo con Bury (1999) más de 30 distribuciones teóricas de probabilidad que pueden representar adecuadamente los datos en varios grados de éxito si son continuas o discretas.

Una distribución discreta puede tomar uno de un conjunto de valores identificables cada uno de los cuales tiene una probabilidad calculable de

ocurrencia. Una distribución continua, por otro lado, se utiliza para representar una variable que puede tomar cualquier valor dentro de un rango (Vose, 2000). Todos los tipos de distribución utilizan un conjunto de argumentos para especificar un rango de valores reales y la distribución de probabilidades. Una distribución normal, por ejemplo, utiliza una desviación media y estándar como argumentos. La media define el valor alrededor del cual se centrará 'la curva de campana' y la desviación estándar define la dispersión de los valores alrededor de la media. Una descripción completa y el uso de distribuciones de probabilidad se pueden encontrar en la obra de Bury (1999), Evans et al. (1993), Johnson et al. (1993, 1995).

Dado que se ha obtenido una cantidad adecuada de datos sobre los accidentes de las refinerías las frecuencias de los registros de accidentes se pueden utilizar en las evaluaciones de probabilidad. Las distribuciones estadísticas plausibles para el número de accidentes (H) se pueden detectar mediante una prueba de bondad de ajuste. Las distribuciones estadísticas más utilizadas para la frecuencia de datos discretos son Poisson, binomio negativo y, en algunos casos especiales, distribución binomial (Vose, 2000).

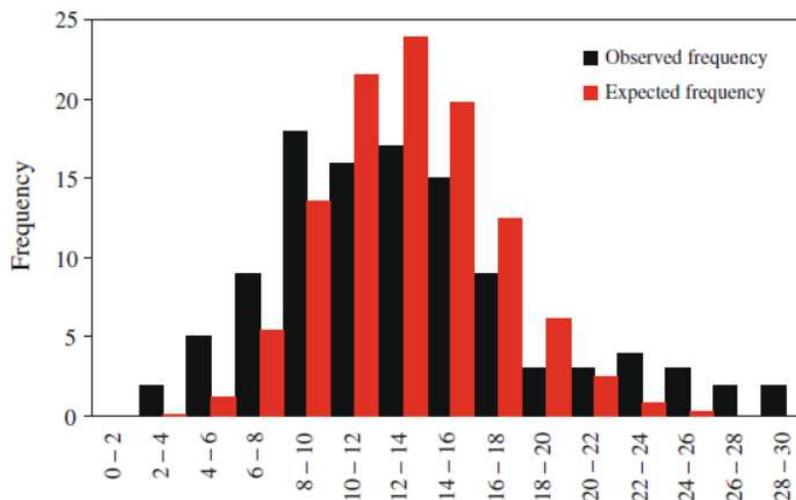
Es posible probar qué tan bien la distribución de los valores de la muestra se ajusta a una distribución teórica por el procedimiento de bondad de ajuste o chi-cuadrado, La frecuencia esperada de ocurrencia dentro de cada intervalo de una distribución teórica se puede comparar con la frecuencia de las observaciones reales que se encuentran dentro de los mismos intervalos. Si el número real de observaciones en cada intervalo se desvían significativamente de lo esperado,

parece poco probable que la muestra se extraiga de una población distribuida de Poisson (Daniel, 1978). Las estadísticas de prueba se calculan mediante la ecuación:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j} \quad (5-1)$$

donde  $O_j$  es el número de observaciones reales dentro de la clase y  $E_j$  es el número de observaciones esperadas en esa clase.

**FIGURA 5-1 FRECUENCIA VS ACCIDENTES**



*Fuente: Bhattacharjee, A; Injury experience analysis; Journal of Safety Research*

La segunda columna enumera las frecuencias observadas para cada clase, mientras que la tercera columna enumera las frecuencias esperadas para cada clase como resultado de la función Poisson mejor ajustada en la Fig. Del mismo modo, la prueba realizada por el software BestFit (Anon, 2001) produce un valor de chi- cuadrado de 21,53 (p a 0,089) y estima el parámetro k como 12,87 accidentes/mes. La distribución de Poisson se expresa como

$$P(X = x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad \lambda \geq 0, \quad (5-2)$$

Donde, x denota el número de ocurrencias por tiempo dado y k es la tasa promedio de ocurrencia por tiempo dado.

Una propiedad importante de un proceso de Poisson, el tiempo entre dos accidentes, T, se distribuye exponencialmente. Para los datos de accidentes, se evalúan los tiempos de fallos (tiempo transcurrido entre dos accidentes) y la distribución estadística que se ajusta a los datos se encuentra como una distribución exponencial negativa con estimación de parámetros de b como 2,33 días (1 mes/k) y la prueba de ajuste de bondad produce un valor chi-cuadrado de 19,88 (p a 0,134) con 14 grados de libertad. La función de densidad de la distribución exponencial (exponencial negativa) con la media b se da como

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-x/\beta} \quad 0 \leq x < \infty, \quad \beta > 0. \quad (5-3)$$

Resultados de la prueba de bondad de ajuste de chi-cuadrado para la distribución de Poisson

**TABLA 5.1 DISTRIBUCIÓN DE POISSON PARA ACCIDENTES MENSUALES**

Numero de accidentes/mes	Frecuencia obeservada	Frecuencia esperada	v2
0-2	0	0	-
2-4	2	0.15	-
4-6	5	1.30	10.53
6-8	9	5.50	2.23
8-10	18	13.50	1.50
10-12	16	21.50	1.41
12-14	17	23.90	1.99
14-16	15	19.70	1.12
16-18	9	12.50	0.98
18-20	3	6.25	1.69
20-22	3	2.55	0.08
22-24	4	0.85	-
24-26	3	0.30	-
26-28	2	0	-
28-30	2	0	-
Total	108	108	21.53

*Fuente: Myers, J; Lifetime risk of fatal occupational injuries; Human and Ecological Risk Assessment*

La distribución de Poisson permite la estimación del parámetro,  $k$ , para diferentes períodos de tiempo, una vez que se determina para uno especificado. Si se estima que la frecuencia media de accidentes por mes es de 12,87, el número de

accidentes por año también seguirá una distribución de Poisson con un parámetro de  $k$  a  $12 * 12,87$  a  $154,44$ .

### **5.2.1. Determinación de la magnitud de los accidentes estableciendo posibles consecuencias o gravedad**

Las consecuencias de los accidentes consisten en muertes, lesiones, discapacidades, daños en el equipo, cierre de todo el sistema, pérdida de producción, etc. También pueden diferir considerablemente en función del entorno de la mina, el lugar de trabajo y las características de los trabajadores mineros. La variedad en las consecuencias requiere una consideración multidimensional en el modelado. La refinería Guillermo Elder Bell tiene los registros completos del número de días que un trabajador perdió como consecuencia del accidente.

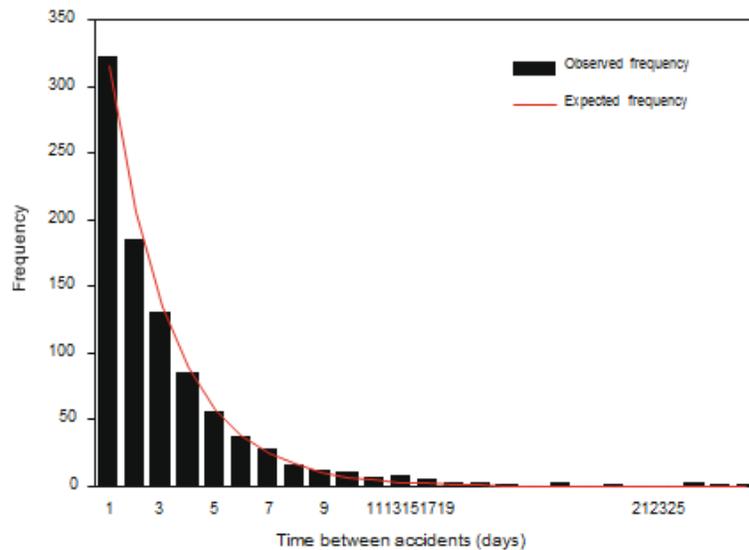
En la literatura, la distribución de la gravedad suele estar modelada por distribuciones normales, lognormales y Weibull (Quintana y Pawlowitz, 1999). Para el conjunto de datos,

BestFit produce una distribución lognormal admitida por la prueba de significancia estadística. La prueba de bondad de ajuste chi-cuadrada calcula un valor de  $40,44$  ( $p$  a  $0,097$ ) con 30 grados de libertad. Los análisis realizados sobre los datos de gravedad realizados por Hull et al. (1996), Cuny y Lejeune (1999) también mostraron la distribución lognormal como una opción plausible. Los parámetros de la distribución lognormal significan  $l$  y la desviación estándar  $r$  se estiman como  $14,3$

días y 23,1 días, respectivamente. Esto conduce a la expresión de la distribución de la gravedad como

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad x \geq 0, \mu > 0, \sigma > 0 \quad (5-4)$$

**FIGURA 5-2 DETERMINACIÓN DE LA MAGNITUD DE LOS ACCIDENTES ESTABLECIENDO POSIBLES CONSECUENCIAS O GRAVEDAD**



**Fuente:** Myers, J; *Lifetime risk of fatal occupational injuries; Human and Ecological Risk Assessment*

3. Distribución del intervalo de tiempo para la mina GLI-Tuncbilek. 4 muestra la distribución ajustada para el número de datos perdidos de días

### **5.3. COMPILACIÓN DE PROBABILIDAD Y CONSECUENCIA (GRAVEDAD) BAJO UNA FORMULACIÓN DE RIESGO**

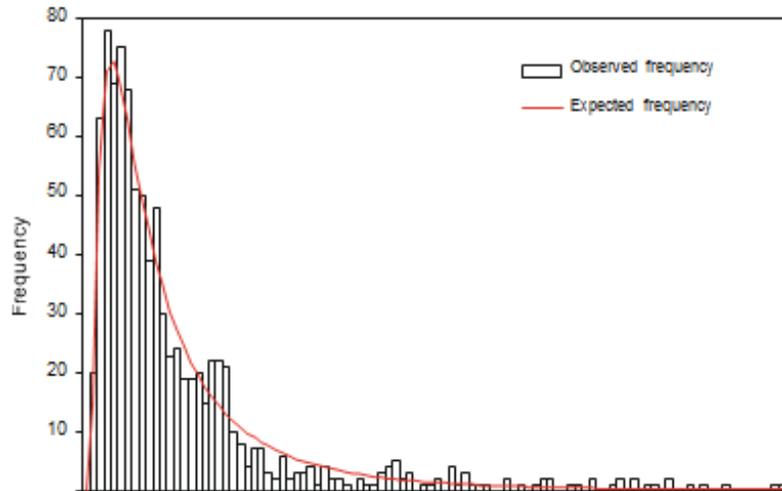
Una matriz de riesgo simple, tal como se indica en el Cuadro 4, se construye arbitrariamente para los datos perdidos de día mediante la combinación de dos componentes en una formulación de riesgo en la que se sustituye uno en el eje horizontal y el otro en el eje vertical (Sari, 2002).

En la matriz de riesgo, las escalas de frecuencia y gravedad se determinan intuitivamente haciendo referencia a las distribuciones acumulativas de estas componentes estimadas en secciones anteriores. A continuación, ambas distribuciones acumulativas se dividen por igual en cuatro intervalos de probabilidad y también se registra un rango equivalente de observaciones verdaderas en el eje X. Se puede ver que las magnitudes de gravedad y frecuencia aumentan de abajo a arriba y de izquierda a derecha.

Por último, para cada celda de la matriz de riesgo, se ha designado cuantitativamente una puntuación de riesgo adecuada multiplicando el rango inferior y superior de valores de probabilidad en dos componentes, al tiempo que se asigna el valor más alto a la celda de intersección. Los niveles de riesgo cualitativos también se asignan en celdas que van de muy bajas a graves, ya que la igualdad diagonal de las puntuaciones de riesgo se mantiene especialmente.

En el Cuadro la matriz de riesgo propuesta se ilustra con dos componentes relacionados y escalas de riesgo apropiadas para la mina GLI-Tuncbilek.

**FIGURA 5-3 MATRIZ DE RIESGO DE LA MINA GLI-TUNCBILEK**



*Fuente: Myers, J; Lifetime risk of fatal occupational injuries; Human and Ecological Risk Assessment*

4. Distribución del número de días perdidos para la refinería Guillermo Elder Bell.

**TABLA 5.2 MATRIZ DE RIESGO PROPUESTA EN LA REFINERIA GUILLERMO ELDER BELL**

Accidente/ año	Probabilidad acumulativa	Dias perdidos/accidente			
		0-4	4-8	8-16	16+
		0.0-0.25	0.25-0.50	0.50- 0.75	0.75- 1.0
162+	0.75-1.0	0.250	0.500	0.750	1.0
		Moderate	High	Very high	Severe
154-162	0.50-0.75	0.1875	0.375	0.5625	0.750
		Low	Moderate	High	Very high
146-154	0.25-0.50	0.125	0.250	0.375	0.500

		Very low	Low	Moderate	High
0-146	0.0-0.25	0.0625	0.125	0.1875	0.250
		Very low	Very low	Low	Moderate

*Fuente: Elaboración propia*

Dos componentes de riesgo, cuantificados y modelados en términos de distribuciones de probabilidad, simplemente se combinan en una simulación de Monte Carlo con el fin de obtener una imagen completa del total anual de días perdidos debido a accidentes incluyendo incertidumbre y variabilidad. Un sistema que procesa estos cálculos en paquetes de hojas de cálculo estándar, incluye explícitamente la incertidumbre presente en las entradas para generar salidas que muestren todas las alternativas (Anon, 2001).

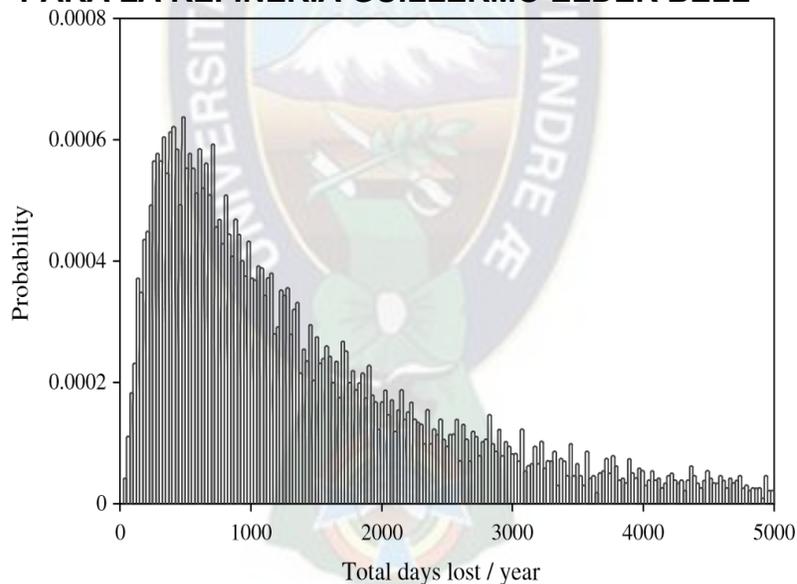
La distribución es el producto de la distribución de insumos de accidentes anuales, que es la versión anual de la distribución de Poisson obtenida anteriormente con un nuevo parámetro accidentes/año, y distribución log normal modelando los datos días perdidos como resultado de cada accidente.

Se puede elegir una nueva escala de riesgo para el nivel de riesgo de la mina después de averiguar el total de días perdidos en un año de operaciones en las refinerías debido a incidentes traumáticos. Para establecer estos nuevos niveles, los niveles de riesgo obtenidos cuantitativamente en la matriz de riesgo pueden ubicarse en la escala de probabilidad relevante del gráfico acumulativo de nueva

distribución, tal como se presenta. Cuando se corta la línea, el valor en el eje X que representa el total anual de días perdidos se puede leer y posteriormente corresponderá a un nuevo nivel de riesgo en las unidades del número total de días perdidos en un año que anteriormente se dieron como unidades de probabilidad.

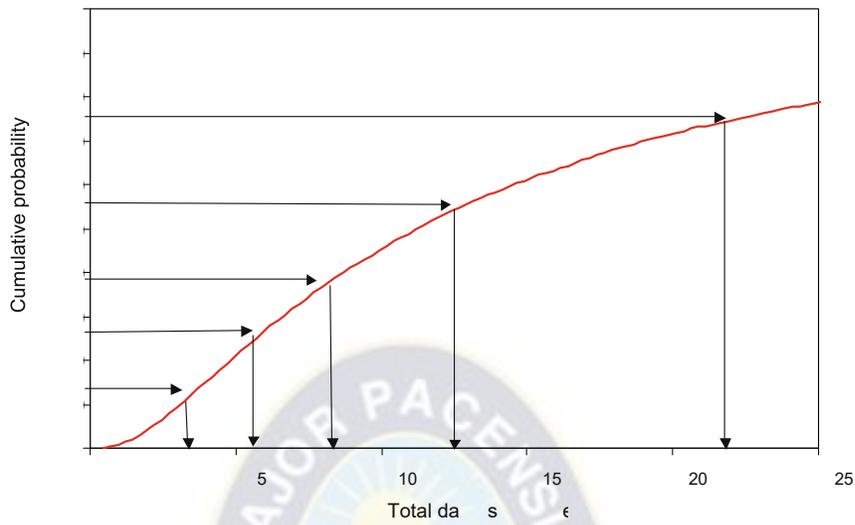
Para un nivel de riesgo moderado, la probabilidad oscilaría en un mínimo de 0,250 y un máximo de 0,375. Si estos números se encuentran en la escala apropiada del eje de probabilidad acumulativa en la Fig. 5-4, el valor equivalente para el total de días perdidos sería de 600 y 850 días, respectivamente.

**FIGURA 5-4 SALIDA DE LA SIMULACIÓN PROPUESTO DE MONTECARLO PARA LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL**



**Fuente:** Estudio de accidentes por año en refinería Monte Carlo

**FIGURA 5-5 DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE DATOS DE DÍAS PERDIDOS ANUALES PARA LA REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL**



*Fuente: Simulación en R-studio*

Esto significa que si la refinería Guillermo Elder Bell experimenta un total de 700 días perdidos en un año debido a accidentes. En consecuencia, se establecen otros niveles de riesgo siguiendo el mismo procedimiento y los niveles de riesgo finales se indican en el cuadro 5 de la refinería Guillermo Elder Bell.

El Cuadro presenta la historia de los registros de rendimiento de seguridad de las minas en el pasado. Según los niveles de riesgo propuestos anteriormente, todos los años anteriores han sido sometidos a niveles de riesgo graves, muy altos y altos en la refinería Guillermo Elder Bell. Esto merece más atención; por lo tanto, se espera que la gestión de minas ponga en vigor aplicaciones adecuadas de gestión y control de riesgos para reducir o eliminar, si es posible, y si no, deben controlarse hasta el punto de que los riesgos sean lo más bajos posible, lo que es el objetivo de una buena gestión del riesgo.

#### 5.4. PREDICCIÓN DE RIESGOS POR ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES

Debe tenerse en cuenta que el análisis de riesgos normalmente se ocupa de fenómenos futuros y las predicciones de eventos futuros deben incorporarse a cualquier proceso de toma de decisiones.

En esta sección, se demostrará un enfoque estadístico hacia la previsión de los niveles de riesgo de la refinería Guillermo Elder Bell previstos en el futuro de la vida de la refinería Guillermo Elder Bell mediante el uso de la técnica de series temporales en las estadísticas

Un modelo de serie temporal uní-variado describe el comportamiento de una variable en términos de observaciones pasadas y supone que el patrón identificado continuará en el futuro.

Un modelo simple se puede desarrollar esencialmente para explicar el proceso subyacente que genera la serie, y ser capaz de predecir, interpretar y probar hipótesis relativas a los datos. Contrariamente a la regresión lineal, se supone que las observaciones están igualmente espaciadas y estadísticamente dependientes (Cryer, 1986).

El número de accidentes (frecuencia) se expresa en términos de un modelo de serie temporal, ya que existe una alta posibilidad de que se produzca un accidente

con la condición de que haya ocurrido anteriormente y vuelva a ocurrir debido a la falta de equipo, mano de obra y razones psicológicas y administrativas.

Existen diferentes técnicas de modelado aplicables a los datos de series temporales. Las más utilizadas son la media móvil, la descomposición, el suavizado exponencial y las técnicas Box-Jenkins (Bowerman y O'connell, 1993). Si los datos de series temporales muestran una tendencia constante y también algunas desviaciones regulares de la línea de tendencia dependiendo del período de tiempo (temporada, mes del año, día de la semana, etc.), un método simple y práctico es el método de descomposición.

En este método, las series se dividen en componentes de tendencia, ciclo, estacionales e irregulares y, a continuación, cada componente se analiza por separado. En el modelo de serie temporal determinista en el momento,  $t$ , el valor observado ( $Y_t$ ) se expresa en formas de cuatro componentes en un modelo multiplicativo; tendencia ( $TR_t$ ), estacional ( $SN_t$ ), cíclica ( $CL_t$ ) e irregular (aleatoria) ( $IR_t$ ) como

$$Y_t = TR_t \times SN_t \times CL_t \times IR_t \quad (5-5)$$

Para alcanzar un modelo estacionario, es importante eliminar el modelo de su tendencia, componentes estacionales y cíclicos. Un modelo limpiado de estos componentes producirá una media cero, varianza constante y residuos no correlacionados denotados como una serie de ruido blanco.

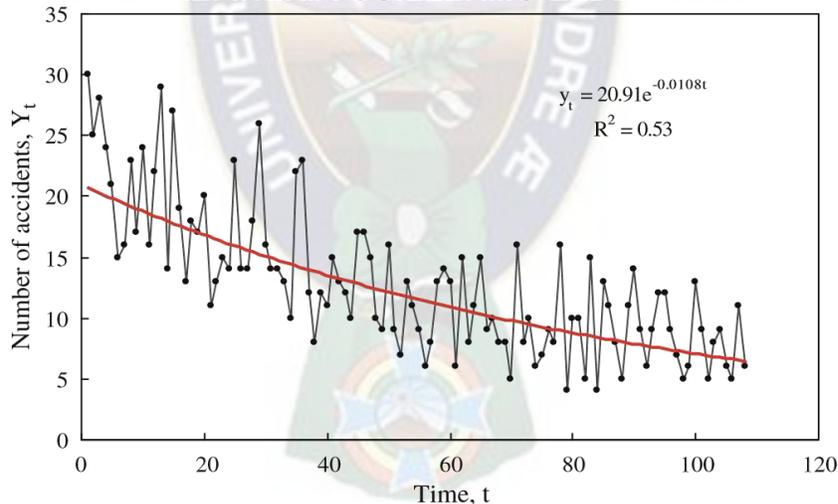
Una de las estadísticas de prueba en el modelo es el error porcentual absoluto medio (MAPE) de la serie, que es la diferencia absoluta media entre el valor estimado y el valor real como el porcentaje del valor real (Vose, 2000).

Una gráfica del número de accidentes por mes desde enero de 1994 hasta diciembre de 2002 indica que existe una tendencia a la baja en la serie. Para eliminar el efecto de tendencia, una línea de tendencia es estimada por LSE y se encuentra como:

$$Y_t = 20.91 \exp(-0.0107t)$$

with  $R^2 = 0.53$ . (5-6)

**FIGURA 5-6 PARCELA NÚMERO DE ACCIDENTES AL MES PROPUESTO EN LA REFINERIA GUILLERMO ELDER BELL**



**Fuente:** Myers, J; *Lifetime risk of fatal occupational injuries; Human and Ecological Risk Assessment*

Parcela del número de accidentes al mes propuesto en la refinería Guillermo Elder Bell

El gráfico de los datos originales muestra movimientos estacionales durante períodos de tiempo específicos, tal como se observa por correlaciones significativas para algunos valores de retraso del gráfico de auto-correlación que se muestra en la 5.6.

Aquí se emplea la media móvil de 12 períodos porque los datos de accidentes son mensuales (L 12 períodos de tiempo o "temporadas" por año). Mientras que los índices más altos se observan en mayo, junio y noviembre de cada año debido a los días de trabajo mensuales, excesivos y los efectos negativos de las condiciones climáticas externas, los meses restantes tienen índices más bajos.

La incorporación de los dos componentes estimados en el modelo presentado en Eq. (7) da como resultado la siguiente ecuación de serie temporal:

$$Y_t = 20.91 \exp(-0.0107t) \times SN_t \quad (5-7)$$

En este caso,  $Y_t$  es el número previsto de accidentes en el período "t" que corresponde al recuento de tiempo discreto de meses, donde la cohorte t - 1 significa enero de 1994. El valor MAPE para este modelo se calcula como el porcentaje, lo que proporciona información sobre el porcentaje de valores reales que no están cubiertos por el modelo de serie temporal. Aquí, el MAPE más pequeño concluye un mejor ajuste.

Después de la proyección de los incidentes en un futuro próximo, es sencillo determinar los niveles de riesgo esperados para la refinería Guillermo Elder Bell. Para ello, en primer lugar, el número total de accidentes debe calcularse a partir del

modelo de serie temporal introduciendo períodos de tiempo futuros en Eq. (5-7) antes de totalizar los números mensuales estimados para cada año. A continuación, los números de accidentes anuales previstos deben multiplicarse intuitivamente por un factor de días promedio perdidos por accidente (1 a 14,3 días/accidente). En el último paso, se debe comprobar el nivel de riesgo correspondiente con la matriz de riesgo.

Los resultados del procedimiento son los niveles de riesgo previstos para los años siguientes de la refinería Guillermo Elder Bell. En un futuro próximo, esta refinería Guillermo Elder Bell experimentará niveles de riesgos más altos y moderados debido a accidentes.

### **5.5 SIMULACIÓN CON R-STUDIO D3**

Es un lenguaje de simulación que permite realizar simulaciones y predicciones través de modelos estocásticos, estadísticos y diferenciales

R ha ganado popularidad porque la curva de aprendizaje es relativamente sencilla comparado con otros lenguajes de programación y permite maquetar o hacer prototipos de modelos muy rápido y con resultados muy buenos.

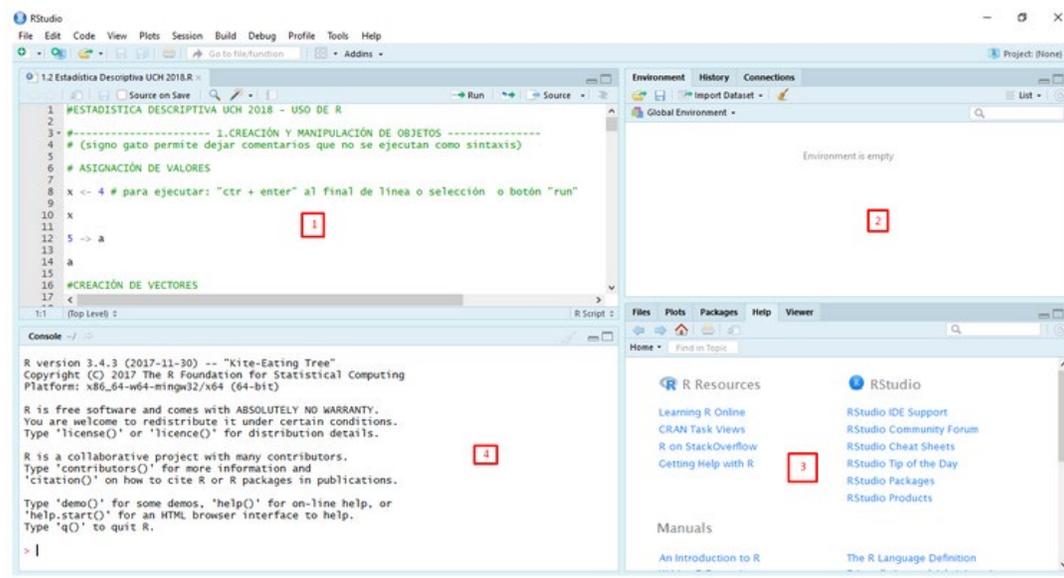
Otra ventaja es que es más o menos sencillo compartir código. Por lo tanto, científicos en cualquier parte del mundo pueden contribuir con sus investigaciones

La interfaz de RStudio

R Studio es un IDE o entorno de desarrollo integrado. En español, eso significa que RStudio es un programa para manejar R y utilizarlo de manera más cómoda en algunos aspectos.

Este software es una interfase - entre otras existentes como R Commander - que permite contar con una interacción más fluida con el programa R. Básicamente se trata de una máscara para visualizar el software que tiene como principales ventajas (1) el orden y (2) la visualización de los procesos que son llevados a cabo con R, todo de manera simultánea.

**FIGURA 5.1 ENTORNO DEL SOFTWARE R STUDIO**



Fuente: Manual de R studio

Se pueden ver 4 ventanas, además de la barra de opciones en la parte superior.

Ventana (1): es el editor de sintaxis: se trata del lugar donde editamos la sintaxis para posteriormente ejecutarla. Al escribir allí no sucederá nada, a no ser que se apriete algún botón para ejecutar los comandos o la tecla ctrl+enter.

Ventana (2): es el “entorno de trabajo” del programa: en este lugar se muestra el conjunto de datos y los “objetos” (resultados, variables, gráficos, etc.) que se almacenan al ejecutar diferentes análisis.

Ventana (3) tiene varias sub pestañas: (i) la pestaña files permite ver el historial de archivos trabajados con el programa; (ii) la pestaña plots permite visualizar los gráficos que se generen; (iii) la pestaña packages permite ver los paquetes descargados y guardados en el disco duro así como gestionar su instalación o actualización; (iv) la ventana help permite acceder al CRAN - Comprehensive R Archive Network (siempre que se cuente con conexión a Internet), página oficial del software que ofrece diferentes recursos para el programa: manuales para el usuario, cursos on line, información general, descarga de paquetes, información de los paquetes instalados, etc. Esta última pestaña es bastante útil: empleando el motor de búsqueda se accede de manera rápida a manuales de uso de los diferentes paquetes (y sus funciones) instalados en el computador (esto no requiere conexión a Internet).<sup>7</sup>; (v) la ventana viewer muestra los resultados al construir reportes mediante funcionalidades tipo markdown.

Ventana (4): es la consola. Corresponde a lo que sería el software R en su versión básica. Allí el software ejecuta las operaciones realizadas desde el editor de sintaxis.

De modo general R, en su versión básica, incluye funciones para crear gráficos. Sin embargo, estas herramientas son bastante limitadas en cuanto a las posibilidades de edición que incluyen. Con todo, resultan válidas para un uso de análisis exploratorio. Esto es, un uso enfocado en la visualización de información que permita dentro del contexto de un proceso de investigación tomar decisiones para posteriores análisis estadísticos.

El uso de la sintaxis en R (en cualquier software similar) y el conocimiento de los comandos de R nos permite las siguientes ventajas:

**Replicabilidad:** Elemento fundamental en la investigación científica ya que permite que cualquier persona a quien enviemos nuestros análisis podrá entender cómo fueron construidos y replicarlos de manera exacta.

**Eficiencia:** En condiciones “reales” de trabajo continuado, el uso de sintaxis representa un incremento exponencial de la eficacia; en una modalidad de definición de procedimientos de análisis estadístico mediante la interfaz, el uso de sintaxis tiende a aminorar la realización de tales tareas, pues puede llegar a tratarse de una sola línea de comandos.

**Control:** Permite un control casi total en el trabajo de análisis, esto además permite detectar errores y potencia el trabajo colaborativo, ya que el lenguaje que diferentes investigadores(as) emplearán es el mismo

### 5.5.1. Instalación y licencia

La lógica de instalación de RStudio es la misma para los software de programación. En la página oficial de RStudio se debe acceder a la pestaña Products y seleccionar la opción RStudio. Dentro de esa página hay que acceder al apartado de descarga del installer presionando el enlace RStudio Desktop

#### FIGURA 5.2 INSTALACION DEL PROGRAMA EN WINDOWS

RStudio is available in open source and commercial editions and runs on the desktop (Windows, Mac, and Linux) or in a browser connected to RStudio Server or RStudio Server Pro (Debian/Ubuntu, RedHat/CentOS, and SUSE Linux).



Fuente: bookdown.org

Luego de seguir todas las instrucciones del proceso de instalación el programa habrá quedado instalado correctamente.

## FIGURA 5.3 VERSIONES DEL PROGRAMA R STUDIO PARA DIFERENTES SISTEMAS OPERATIVOS

RStudio Desktop 1.2.1335 — Release Notes

RStudio requires R 3.0.1+. If you don't already have R, download it here.

Linux users may need to import RStudio's public code-signing key prior to installation, depending on the operating system's security policy.

### Installers for Supported Platforms

Installers	Size	Date	MD5
RStudio 1.2.1335 - Windows 7+	126.9 MB	2019-04-08	d0e2470f1f8ef4cd35a669aa323a2136
RStudio 1.2.1335 - Mac OS X 10.12+ (64-bit)	121.1 MB	2019-04-08	6c570b0e2144583f7c48c284ce299eef
RStudio 1.2.1335 - Ubuntu 14/Debian 8 (64-bit)	92.2 MB	2019-04-08	c1b07d0511469abfe582919b183eee83
RStudio 1.2.1335 - Ubuntu 16 (64-bit)	99.3 MB	2019-04-08	c142d69c210257fb10d18c045fff13c7
RStudio 1.2.1335 - Ubuntu 18 (64-bit)	100.4 MB	2019-04-08	71a8d1990c0d97939804b46cfb0aea75
RStudio 1.2.1335 - Fedora 19+/RedHat 7+ (64-bit)	114.1 MB	2019-04-08	296b6ef88969a91297fab6545f256a7a
RStudio 1.2.1335 - Debian 9+ (64-bit)	100.6 MB	2019-04-08	1e32d4d6f6e216f086a81ca82ef65a91
RStudio 1.2.1335 - OpenSUSE 15+ (64-bit)	101.6 MB	2019-04-08	2795a63c7efd8e2aa2dae86ba09a81e5
RStudio 1.2.1335 - SLES/OpenSUSE 12+ (64-bit)	94.4 MB	2019-04-08	c65424b06ef6737279d982db9eefcae1

Fuente: bookdown.org

Es necesario enfatizar que en lo posterior solamente se ejecutará RStudio, para ello la licencia para la versión de escritorio es libre mientras que para empresas tiene un costo de 995\$/año.

## FIGURA 5.4 LICENCIA DEL PROGRAMA R STUDIO

<b>Support</b>	Community forums only	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priority Email Support</li> <li>• 8 hour response during business hours (ET)</li> </ul>
<b>License</b>	AGPL v3	<a href="#">RStudio License Agreement</a>
<b>Pricing</b>	Free	\$995/year

[DOWNLOAD RSTUDIO DESKTOP](#)

[BUY NOW](#)

Fuente: bookdown.org

Luego de seguir todas las instrucciones del proceso de instalación el programa habrá quedado instalado correctamente. D3

## Capítulo 6 APLICACIÓN PRÁCTICA

### 6.1. LENGUAJE DE OPTIMIZACIÓN DE R STUDIO

A continuación se presenta el lenguaje de predicción para aplicar en el estudio de riesgo de la Planta Guillermo Elder Bell.

Código de programación:

```
xs=rbinom(16,4034129,7.06/100)
ts=0:11
plot(ts,xs, typ='b', lty='dotted', ylab=expression(Omega), xlab="T",
main=expression(X[n](w)))
# abline(v=0,h=10)
for (s in 1:12) text( ts[s]+0.5,xs[s]+0.1, paste("X",s-1), cex=0.7)
```

“Se detalla la función binómica y el intervalo de tiempo para el resultado de las gráfica de probabilidad y riesgo de explosión.” D1

```
t <- 0:150 # time
sig2 <- 0.01 ## first, simulate a set of random deviates
y <- rnorm(n = length(t) - 1, sd = sqrt(sig2)) ## now compute their
cumulative sum
y <- c(0, cumsum(y))
plot(t, y, type = "l", axes=F, ylab=expression(Omega), xlab="Tiempo",
main=expression(X[t](w)))
abline(v=0,h=min(y))
for (s in c(50,100,150)) {
points(s, y[s], pch=16)
```

```

text( 50,y[50]-.1, expression(X[t[1]]))
text(100,y[100]-.1, expression(X[t[2]]))
text(150,y[150]-.1, expression(X[t[3]])) }

```

*“En esta parte se realiza la simulación de la frecuencia acumulada vs el tiempo en días de la probabilidad de riesgo de explosión en intervalo de 50 días.” D1*

```

y2 <- rnorm(n = length(t) - 1, sd = sqrt(sig2)) ## now compute their
cumulative sum

```

```

y2 <- c(0, cumsum(y2))
lines(t,y2, typ='l', col="red")

```

```

y3 <- rnorm(n = length(t) - 1, sd = sqrt(sig2)) ## now compute their
cumulative sum

```

```

y3 <- c(0, cumsum(y3))
lines(t,y2, typ='l', col="green")
lines(t,y3, typ='l', col="red")

```

*“Se define la funciones de las gráficas de frecuencia acumulada vs tiempo” D1*

```

# Definiendo la funcion caminata aleatoria
caminata <- function(n,p){
  trayectoria <- numeric(n)
  trayectoria[1] <- 0
  for(i in 2:n){
    # x <- if(rbinom(1,1,p)==0) 1 else -1
    x <- sample(c(-1,1),1,prob=c(1-p,p))
    trayectoria[i] <- trayectoria[i-1] + x
  }
}

```

```

trayectoria
}
tray1 <- caminata(50, 0.6)
tray2 <- caminata(50, 0.6)
tray3 <- caminata(50, 0.6)
plot(tray1, type = "l",
      ylim=c(min(tray1,tray2,tray3),max(tray1,tray2,tray3)),
      ylab=expression(Omega), xlab="T", lty='dotted')
lines(tray2, type = "l", col="red")
lines(tray3, type = "l", col="blue")

```

“Se define el recorrido/trayectoria de la probabilidad de riesgo de accidentes de la refinería” D1

```

simulacion <- replicate(5000,caminata(10, 0.5) )
dim(simulacion)
class(simulacion)
simulacion[,1:5]
mean(simulacion[10,])
jugada <- function(n,p, k, N){
  #n: tamaño de la cadena
  #p: Probabilidad de accidente
  #k: Riesgo del evento A
  #N: Valor estimado del Riesgo
  trayectoria <- numeric(n)
  trayectoria[1] <- k

```

```

for(i in 2:n){
  # x <- if(rbinom(1,1,p)==0) 1 else -1
  x <- sample(c(-1,1),1,prob=c(1-p,p))
  trayectoria[i] <- trayectoria[i-1] + x
  if (trayectoria[i]==0) break
  if (trayectoria[i]==N | trayectoria[i-1]==N )
    trayectoria[i] <-N
}
trayectoria
}
#old.par <- par(no.readonly = TRUE)
#par(mfrow=c(2,2))
#for (i in 1:4) {plot(jugada(100, 0.5, 5,10), type = "l",
ylab=expression(Omega), xlab="T")}
#mtext("4 realizaciones del proceso", side=3, outer=TRUE, line=-1)
#par(old.par)
par(mfrow=c(1,1))
plot(x<-riesgo(100, 0.5, 5,10), type = "l", ylab=expression(Omega),
xlab="T")

```

“Se define el tamaño de la cadena, la probabilidad de accidente y el valor estimado del Riesgo en función del tiempo” D1

```

simulacion <- replicate(5000riesgo(100, 0.5, 5,10))
dim(simulacion)

```

*# Probabilidad de accidente del evento A después de 10 iteraciones?*

```
mean(simulacion[20,])
```

*# Cual es la probabilidad de daño del evento A.*

```
dim(simulacion)
```

```
simulacion[100,1:10]
```

```
dim(simulacion)[2]
```

*“Se realiza la prueba de probabilidad en 10 iteraciones y su simulación”*

```
peligro = simulacion[100,1:10]
```

```
length(peligro)
```

```
length(peligro [peligro ==0])/length(perdida)
```

*“Se determina la cuantificación de peligro y pérdida” D1*

*#en general para la refinera*

```
peligro = simulacion[100,]
```

```
length(peligro)
```

```
length(peligro [peligro ==0])/length(peligro)
```

*#Número esperado de accidentes antes de la explosión*

```
simulacion[,1:10]
```

```
simx =simulacion[,3]
```

```
length(simx[simx>0])
```

*“Se simula y predice el numero esperado de accidentes antes de la explosión de la refinera” D1*

```
riesgos = numeric(5000)
```

```
for(i in 1:5000){
```

```
simx =simulacion[,i]
```

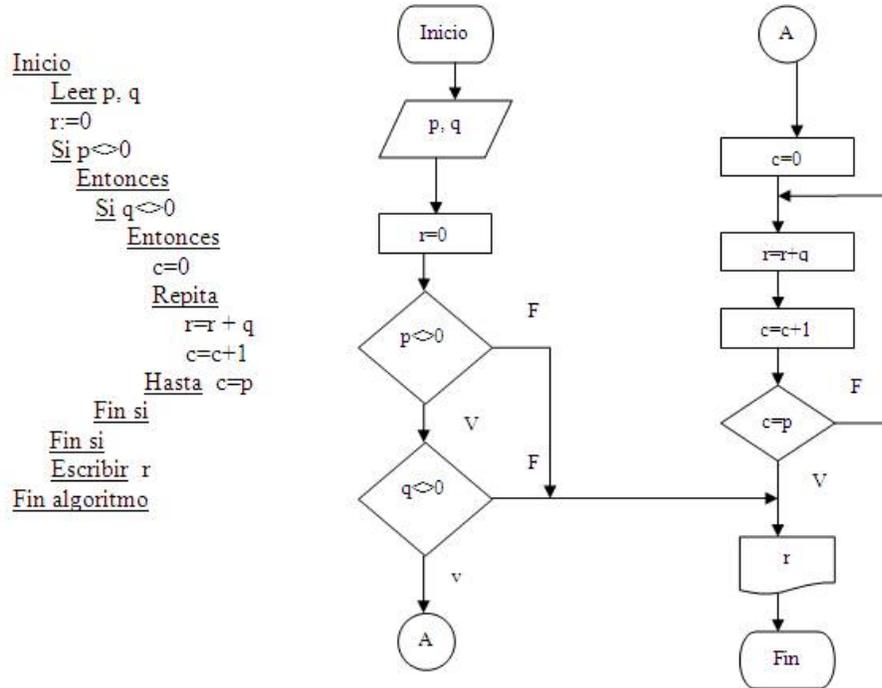
```

riesgos[i]<-length(simx[simx>0])
}
riesgos
mean(riesgos)
mean(riesgos)
#Otra opcion de funcion de riesgo
riesgo <- funcion(n,p, k, N){
  #n: tamaño de la cadena
  #p: Probabilidad de peligro
  #k: riesgo del evento A
  #N: Total de número de accidentes
  trayectoria <- numeric(n)
  trayectoria[1] <- k
  for(i in 2:n){
    # x <- if(rbinom(1,1,p)==0) 1 else -1
    x <- sample(c(-1,1),1,prob=c(1-p,p))
    if (i>2 & trayectoria[i-1]==N)
      trayectoria[i] <- trayectoria[i-1]
    else
      trayectoria[i] <- trayectoria[i-1]+x
    if (trayectoria[i]==0) break
    if (trayectoria[i]==N) trayectoria[i] <-N
  }
  Trayectoria }

```

“Se simula el total de accidentes previstos en la refinería Guillermo Elder Bell”D1

### FLUJOGRAMA GENERAL REPRESENTATIVO DE R-STUDIO



Fuente: Diagrama de decisión en software R-studio

## 6.2. DETERMINACIÓN DEL INCREMENTO DE RIESGO EN LAS ÀREAS DETERMINADAS

### 6.2.1. Área del Mezclador

A continuación, se presentan los riesgos identificados

**TABLA 6.1 CLASIFICACIÓN DE RIESGOS EN ÁREA DE BLENDING**

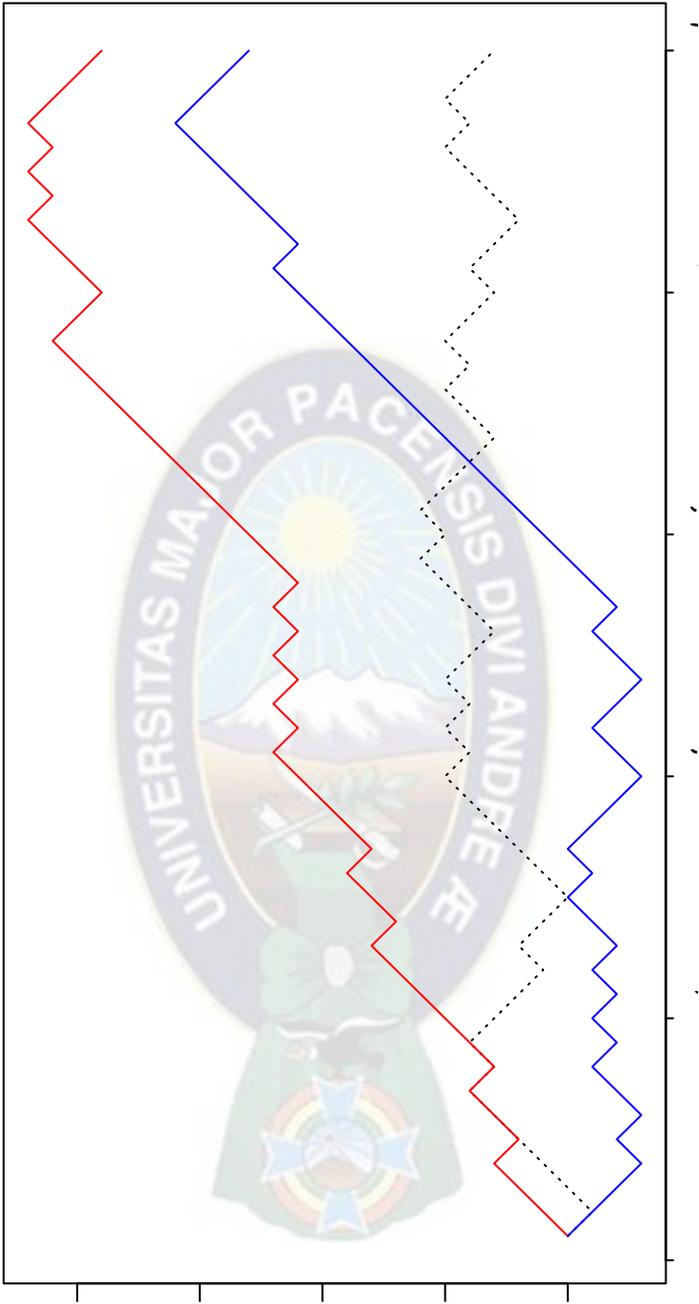
<b>RIESGO</b>	<b>AGENTE</b>	<b>C</b>	<b>P</b>	<b>E</b>	<b>FACTOR</b>	<b>CLASIFICACION</b>
<b>Riesgo mecánico</b>	Corrosión del mezclador	5	3	1	15	TRIVIAL
	Corrosión de las paredes del mezclador	1	3	3	9	TRIVIAL
<b>Riesgo electrónico</b>	Sistema electromecánico	25	3	1	75	MODERADO
<b>Ruidos y vibraciones</b>	Ruido generado por el mezclador	5	6	1	30	TOLERABLE
<b>Riesgo químico</b>	Exposición a los olores de los derivados del petróleo	1	6	3	18	TRIVIAL
	Riesgo por explosión por fuga de gases o liquido	25	6	0.5	75	MODERADO
<b>Termo higrométricas</b>	Calor generado por el mesclador	1	3	1	3	TRIVIAL

<b>Asociado a lugares de trabajos</b>	Objetos sobre el piso	1	3	3	9	TRIVIAL
	Edificación mal construidas	15	6	3	270	IMPORTANTE
<b>Riesgos del ambiente y ecosistemas</b>	Falta de revisión de extintores contra incendios	5	10	1	50	TOLERABLE
<b>Iluminación</b>	Mala iluminación en horario nocturno	5	3	1	15	TRIVIAL
<b>Exigencias derivadas de la organización y control del trabajo</b>	No están bien definidos los procedimientos de prevención	5	10	3	150	MODERADO

*Fuente: Elaboración propia*

Para el estudio predictivo de cada área se presenta

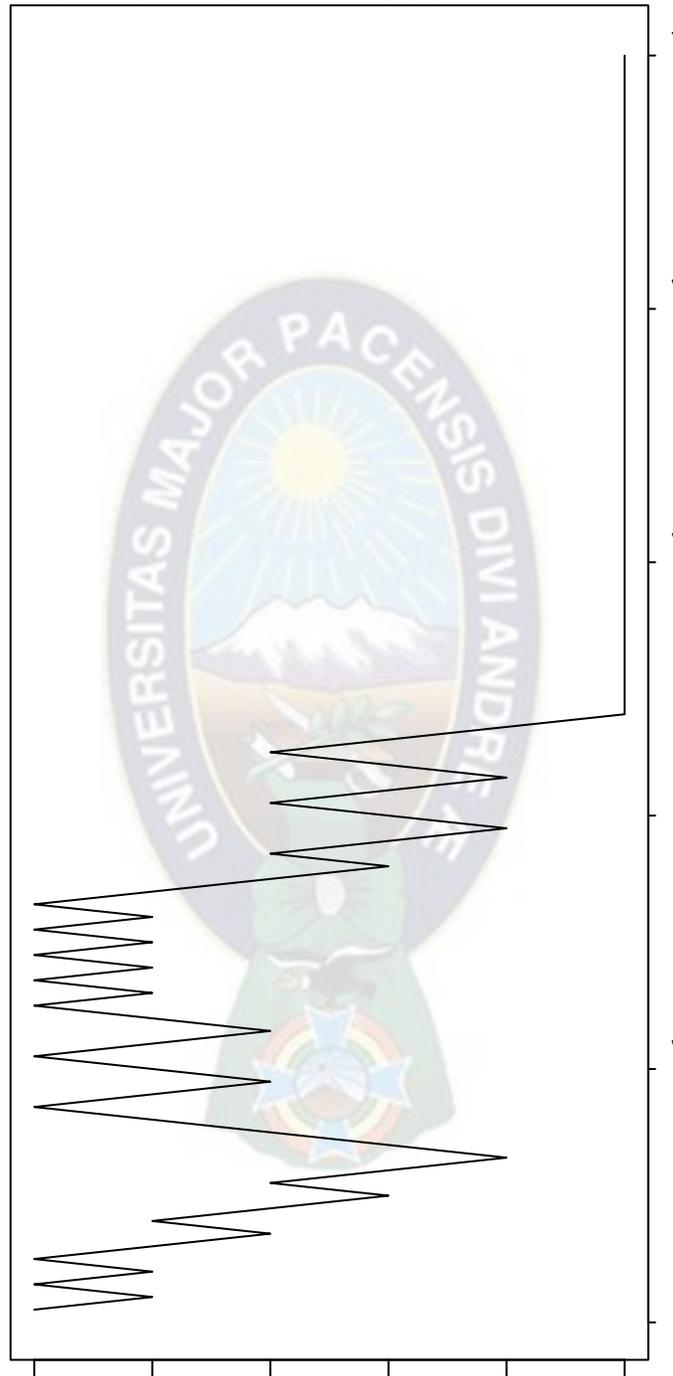
**FIGURA 6-1 ESTUDIO PREDICTIVO DE LA SIMULACIÓN EN ÁREA DE BLENDING EN R-STUDIO**



*Fuente: Simulación en R-studio*

Para el control del riesgo

FIGURA 6-2 CONTROL DE RIESGO ÁREA DE BLENDING



Fuente: Simulación en R-studio

## 6.2.2. UNIDAD DE CRUDO

A continuación, se presentan los riesgos identificados

**TABLA 6.2 CLASIFICACIÓN DE RIESGOS EN LA UNIDAD DE CRUDO**

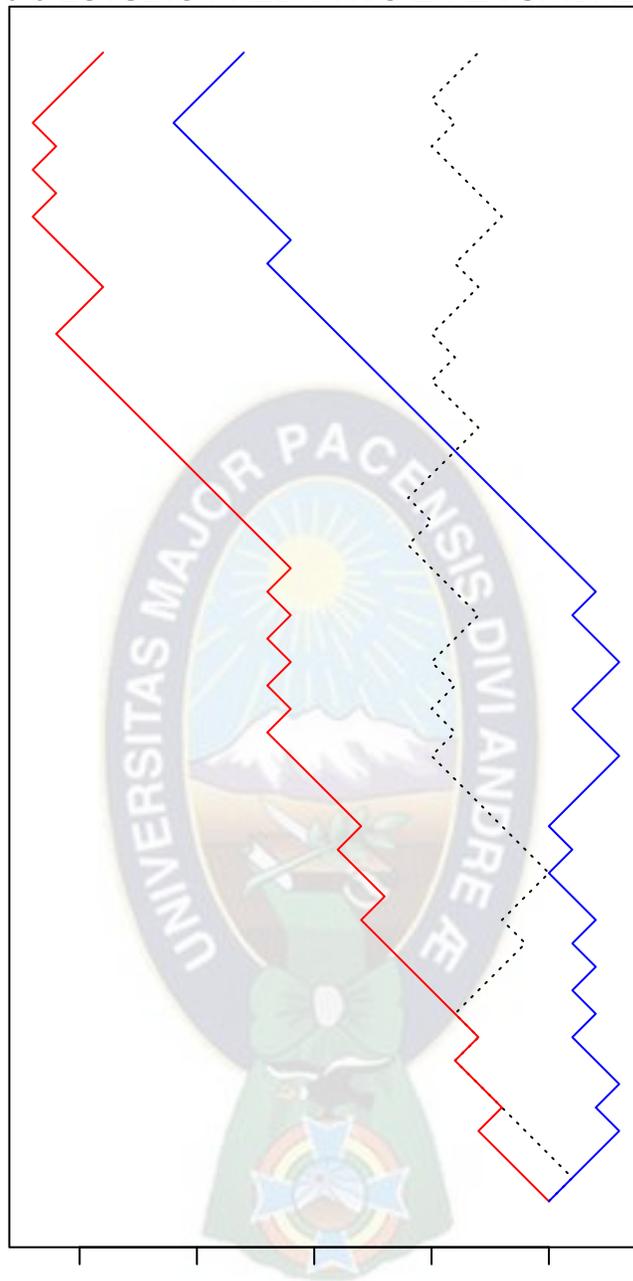
RIESGOS	AGENTES	C	E	P	FACTOR	CLASIFICACION
<b>Riesgos mecánicos</b>	Sistemas de tuberías	15	3	6	270	<b>IMPORTANTE</b>
	Intercambiadores de calor	15	10	1	150	<b>MODERADO</b>
<b>Ruidos y vibraciones</b>	N/a	15	6	6	540	<b>INTOLERABLE</b>
<b>Riesgos químicos</b>	Crudo del petróleo y derivados del petróleo	15	3	3	135	<b>MODERADO</b>
	Exposición a agentes de inhibidores de corrosión	5	3	6	90	<b>MODERADO</b>
	Emisión de gases tóxicos	5	10	3	150	<b>MODERADO</b>
	Emisión de agentes químicos	5	6	6	180	<b>MODERADO</b>
<b>Asociados a lugares de trabajo</b>	Sistema de tuberías	5	6	6	180	<b>MODERADO</b>

	ESCTRUTURA	10	3	6	180	MODERADO
<b>Riesgos eléctricos</b>	Maquinaria energizada	25	3	3	225	IMPORTANTE
<b>Riesgos del ambiente y ecosistemas</b>	Falta de revisión de extintores	15	6	3	270	IMPORTANTE
<b>Exigencias derivadas de la actividad física</b>	Mala postura de los operadores	15	10	3	450	INTOLERABLE
<b>Termo higrométricas</b>	trabajo bajo el sol	15	10	1	150	MODERADO
<b>Iluminación</b>	Mala iluminación en las horas nocturnas	15	6	3	270	IMPORTANTE
<b>Exigencias derivadas de la organización y control del trabajo</b>	No están bien definidos los procedimientos para la prevención de riesgos	5	10	6	300	IMPORTANTE

*Fuente: Elaboración propia*

Para el estudio predictivo de cada área se presenta

**FIGURA 6-3 ESTUDIO PREDICTIVO EN LA UNIDAD DE CRUDO**



*Fuente: Simulación en R-studio*

Para el control del riesgo

FIGURA 6-4 CONTROL DE RIESGOS EN LA UNIDAD DE CRUDO



Fuente: Simulación en R-studio

### 6.2.3. Área de reformación catalítica

A continuación, se presentan los riesgos identificados

**TABLA 6.3 CLASIFICACIÓN DE RIESGOS EN ÁREA DEL REFORMACION CATALITICA**

RIESGOS	AGENTES	C	E	P	FAC TOR	CLASIFICACION
Riesgos mecánicos	Antes de poner en marcha se debe hacer una revisión minuciosa del equipo y comparar la operación de los sistemas de protección y seguridad.	25	0.5	1	12.5	Trivial
Ruidos y vibraciones	Ruidos producidos por la salida del gas por los quemadores.	1	10	6	60	Tolerable
Riesgos químicos	Gases que pueden despedirse durante la operación	5	2	8	145	Importante
Riesgos biológicos	Entre ellos temperatura, ruidos.	5	1	3	15	Trivial
A lugares de trabajo	Los hornos deben ubicarse lejos de áreas de trabajo general en	3	8	2	120	Importante

	un cuarto o área separada.					
Riesgos eléctricos	Los hornos eléctricos deben usarse solamente por operadores capacitados quienes conocen procedimientos seguros de trabajo, uso correcto de los controles y mecanismos de seguridad, y son capaces de reconocer peligros y encargarse de emergencias.	3	5	5	80	<b>Importante</b>
Riesgos del ambiente y ecosistema	Contaminación por los gases que desprende en la combustión.	25	10	1 0	250 0	<b>Intolerable</b>

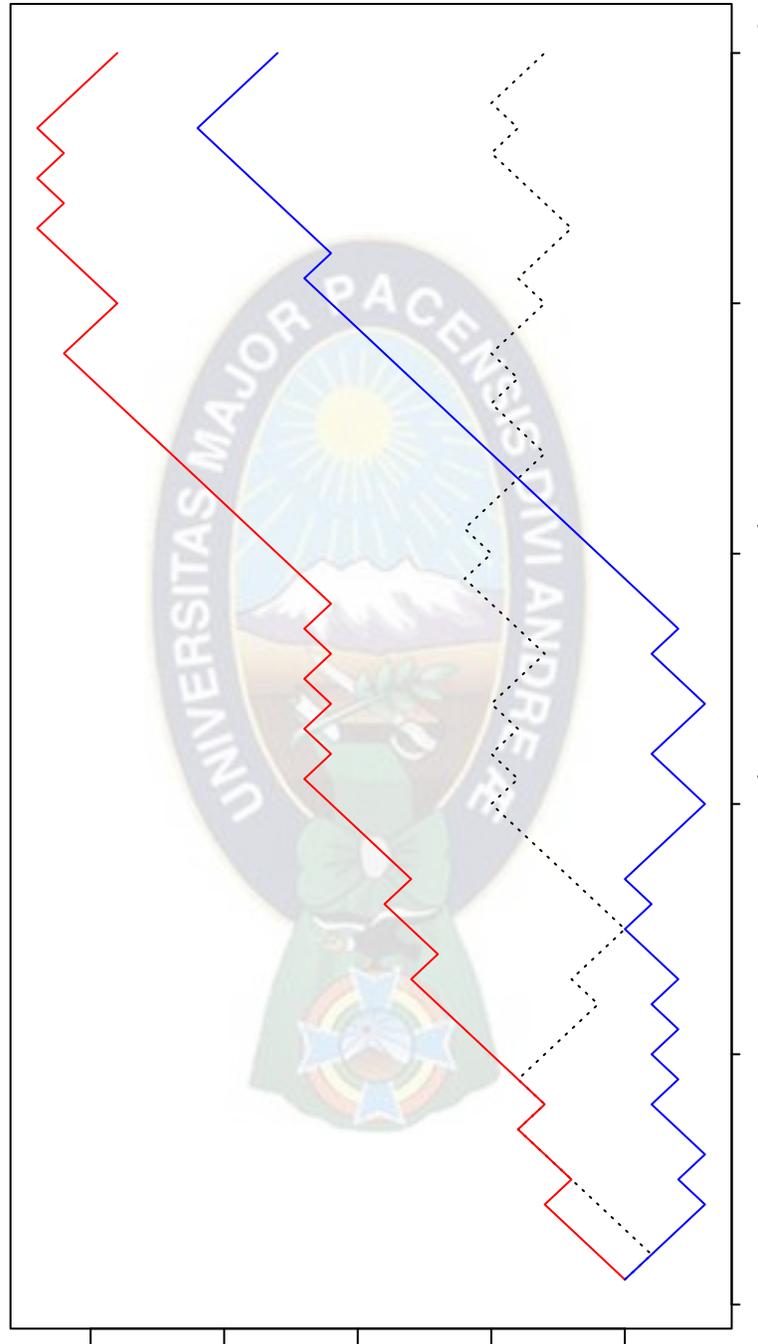
Control de trabajo	problemas de manejo manual asociados con el manejo del producto	4	6	3	90	<b>Moderado</b>
--------------------	---	---	---	---	----	-----------------

*Fuente: Elaboración propia*



Para el estudio predictivo de cada área se presenta

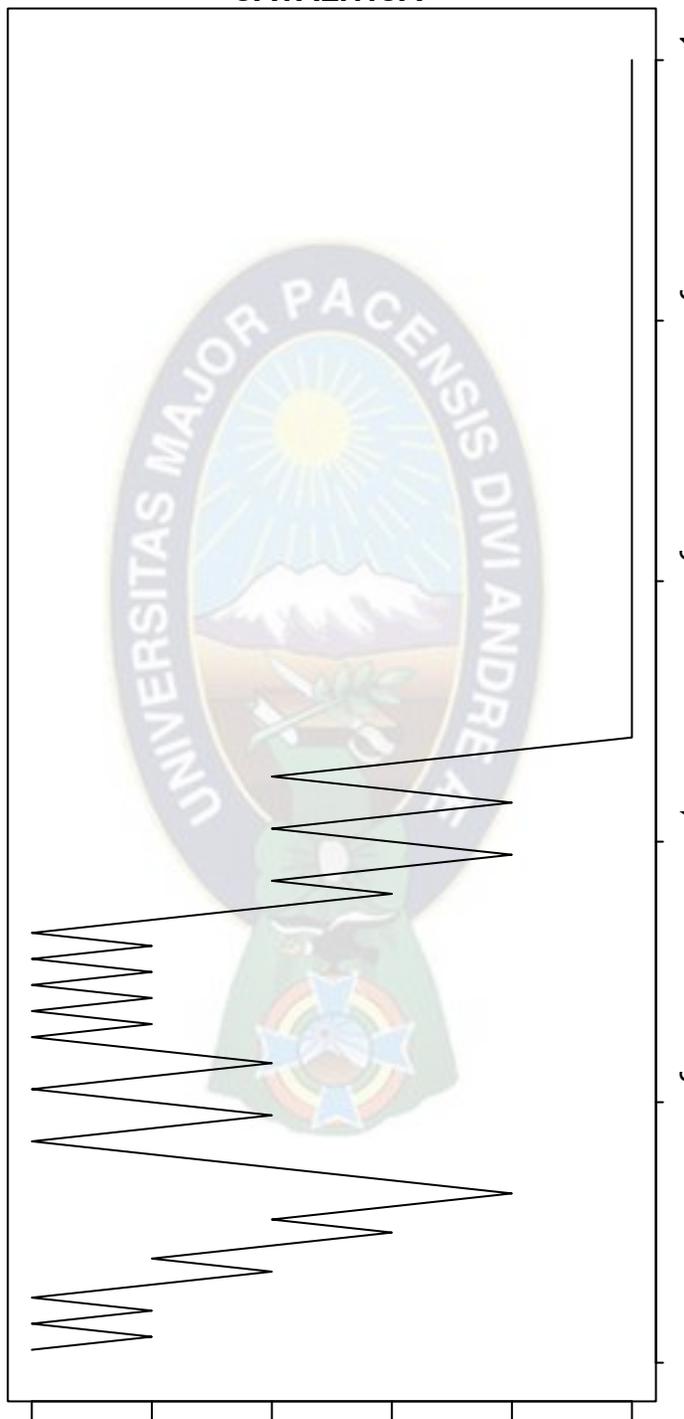
**FIGURA 6-5 ESTUDIO PREDICTIVO ÁREA DE LA REFORMACION CATALITICA**



*Fuente: Simulación en R-studio*

Para el control del riesgo

**FIGURA 6-6 CONTROL DE RIESGO EN ÁREA DE REFORMACIÓN CATALITICA**



*Fuente: Simulación en R-studio*

#### 6.2.4. CALCULO DE LA PROBABILIDAD Y RIESGO D1

Se calculará la distribución de probabilidad de accidentes en la planta aplicando la ecuación de poisson:

$$P(X = x) = \frac{e^k * k^x}{x!}$$

Donde, x denota el número de ocurrencias por tiempo dado y k es la tasa promedio de ocurrencia por tiempo dado

Para x = 1

$$P(X = 1) = \frac{e^{1,779} * 1,779^1}{1!} = 10,531$$

Para x = 2

$$P(X = 2) = \frac{e^{1,174} * 1,174^2}{2!} = 2,228$$

Para x = 3

$$P(X = 3) = \frac{e^{1,33} * 1,33^3}{3!} = 1,482$$

Para x = 4

$$P(X = 4) = \frac{e^{1,613} * 1,613^4}{4!} = 1,414$$

Para x = 5

$$P(X = 5) = \frac{e^{2,003} * 2,003^5}{5!} = 1,989$$

Para x = 6

$$P(X = 6) = \frac{e^{-2,137} * 2,137^6}{6!} = 1,120$$

Para x = 7

$$P(X = 7) = \frac{e^{-2,395} * 2,395^7}{7!} = 0,983$$

Para x = 8

$$P(X = 8) = \frac{e^{-2,825} * 2,825^8}{8!} = 1,694$$

Para x = 9

$$P(X = 9) = \frac{e^{-2,389} * 2,389^9}{9!} = 0,076$$

Para x = 10

$$P(X = 10) = \frac{e^{-4,09} * 4,09^{10}}{10!} = 21,529$$

Tabulando los valores obtenidos en una tabla:

**TABLA 6.4 CALCULO DE LA PROBABILIDAD DE ACCIDENTES D1**

K (Tasa promedio de ocurrencia)	X (Número de accidentes en un mes)	X!	Resultado de probabilidad de accidentes
1,779	1	1	10,5312103
1,174	2	2	2,22825538
1,330	3	6	1,48178573
1,613	4	24	1,41437437
2,003	5	120	1,98961514
2,137	6	720	1,11998578
2,395	7	5040	0,98271896
2,825	8	40320	1,69441829
2,389	9	362880	0,07608496
4,090	10	3628800	21,5291764

Fuente: Elaboración en base a datos recopilados

De la tabla 6.4 se puede resaltar que la probabilidad más alta de ocurrencia son del 21,53 y 10,53 de accidentes en los trabajadores, esto se debe controlar en las áreas con mayor riesgo en la planta.

Luego de los datos de frecuencia y número de accidentes:

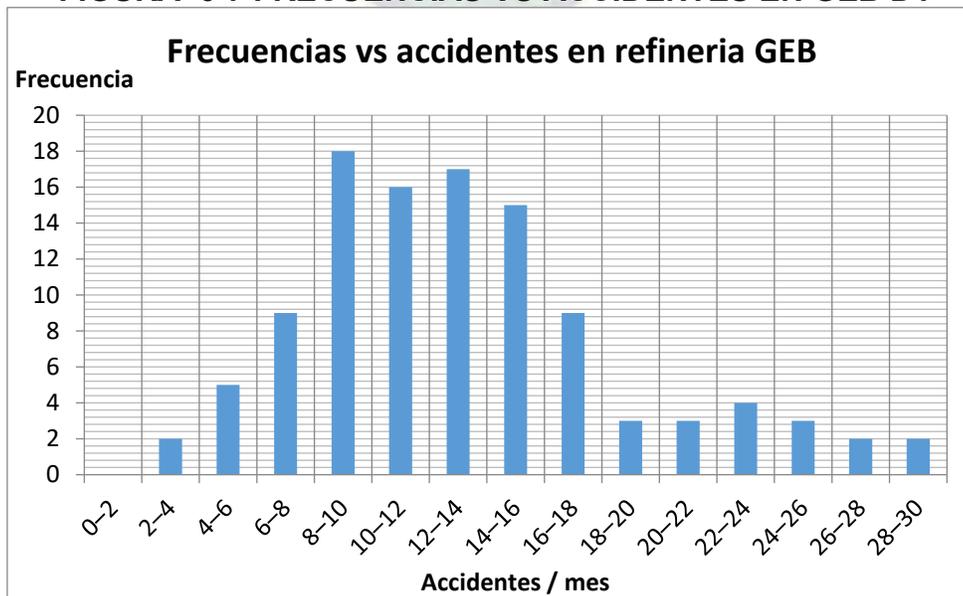
**TABLA 6.5 ACCIDENTES VS FRECUENCIA DE LA REFINERIA GEB D1**

Numero de accidentes/mes	Frecuencia observada
0-2	0
2-4	2
4-6	5
6-8	9
8-10	18
10-12	16
12-14	17
14-16	15
16-18	9
18-20	3
20-22	3
22-24	4
24-26	3
26-28	2
28-30	2

Fuente: Elaborada en base a datos recopilados

Graficando para una mejor representación:

**FIGURA 6-7 FRECUENCIAS VS ACCIDENTES EN GEB D1**



Fuente: En base a datos recopilados de incidentes Refinería GEB

En base a la figura se puede observar que en los meses 5, 6, 7 y 8 se presentan más accidentes en la planta. Se debe tener un control riguroso para reducir esta tendencia.

**TABLA 6.6 CONDICIONES DE OPERACION Y SOBREPRESION D2 Y G2**

Escenario	Equipo	Condiciones de operación		Ø De Fuga (in)	Sobrepresión				
		P (kg/cm <sup>2</sup> )	T (°C)		Centro de explosión	Distancia de afectación a 13 psi (m)	Distancia de afectación a 18 psi (m)	Distancia de afectación a 25 psi (m)	Distancia de afectación a 31 psi (m)
1	UNIDAD DE CRUDO	21.3	340	0.75	50	52	53	54	73
2	DEBUTANIZADORA	15.4	254	1.00	295	29	30	31	37
3	UNIDAD DE RECUPERACION DE GASES	21	215	0.75	50	51	52	53	70
4	SPLITTER	15.1	209	0.75	35	36	37	38	52
5	UNIDAD DE REFORMACION CATALITICA	22.1	148	0.75	22	21	22	23	28

FUENTE: Elaboracion en base a datos recopilados

Los efectos de mayor riesgo se presentan cuando la fuga tiene mayor tamaño de agujero. En caso de pequeño tamaño de fuga (0.75 pulgadas), con la suposición de la liberación de energía explosiva de 5 min, los resultados del accidente son menores (Unidad de crudo, Unidad de recuperación de gases, splitter de nafta, unidad de

reformación catalítica) en caso de una mayor cantidad liberada en diámetros mayores de agujero de 1” presentan un radio mayor alcance de riesgo (Debutanizadora)

En la tabla 6.5 la frecuencia inicial de fuga, significa la tasa de falla de las partes internas de los equipos de la refinería GEB. Es la probabilidad de propagación de material altamente inflamable. Esto significa que la probabilidad de que el accidente resultante procedente de los componentes de la planta se calcula a partir de la frecuencia de falla multiplicado por la probabilidad. D2

**TABLA 6.7 PROBABILIDAD DE EXPLOSION POR FUGA EN LA REFINERIA GEB D2**

Tamaño de orificio de fuga	Frecuencia de falla	Tipo de accidente	Probabilidad asignada			Probabilidad de ignición	Frecuencia resultante
			Ignición inmediata	Ignición tardía	Confinamiento		
<b>0.75”</b>	2.40 E-03	Jet fire	0.0173			0.0173	<b>4.15E-05</b>
		Pool fire	0.9827	0.0173		0.0170	<b>4.08E-05</b>
		UVC E	0.9827	0.0173	0.5	8.50E-03	<b>2.04E-05</b>
		Flash fire	0.9827	0.0173	0.5	8.50E-03	<b>2.04E-05</b>
<b>1.25</b>	2.40 E-03	Jet fire	0.0134			0.0134	<b>3.22E-05</b>
		UVC E	0.9866	0.0134	0.5	6.61E-03	<b>1.59E-05</b>
		<b>Flash fire</b>	<b>0.9866</b>	<b>0.0134</b>	<b>0.5</b>	<b>6.61E-03</b>	<b>1.59E-05</b>

Fuente: En base a datos recopilados

Podemos realizar el siguiente cálculo de riesgo de explosión en la planta GEB:

$$\begin{aligned}\Delta f_{\text{explosión}} &= 2.04E - 5 + 1.59E - 5 + 2.30E - 5 + 1.90E \\ &\quad - 5 + 8.45E - 6 + 3.87E - 5 + 6.41E - 6 \\ &\quad + 4.06E - 6 + 3.71E - 6 + 1.46E - 6 \\ &= 1.41E - 4\end{aligned}$$

$$P = 0.111 * 0.2 * 1 = 0.0222$$

$$\Delta I_{\text{Rexplosión}} = 1.41E - 4 * 0.0222 = 3.13E - 6 \text{ fatalidades/año}$$

$$\Delta I_{\text{Rexplosión}} = 3.13E - 6 \text{ fatalidades/año } \underline{D2}$$



## Capítulo 7 FACTIBILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO G3

El Análisis de Factibilidad Económico es un instrumento que sirve para orientar la toma de decisiones en la evaluación de nuestro proyecto.

En este punto desarrollaremos la estructura de costos asociado al ESTUDIO PREDICTIVO TERMODINÁMICO DE RIESGO DE EXPLOSION EN LA REFINERIA GUILLERMO ELDER BELL. Si bien la planta ya cuenta con algunos de los requerimientos solicitados, se analizará detalle a detalle los costos asociados a la implementación del plan.

### INGRESOS

Se detalla a continuación los ingresos estimados de la planta de GNL de Rio Grande.

Se podrá observar los ingresos de la refinería GEB

**TABLA 7.1 INGRESOS DE LA REFINERA GEB**

DETALLE	VALOR
Volumen de producción de gasolina en M3/MES	29.170
Volumen de producción de Diesel Oil en M3/MES	22.205

Volumen de producción de Gasolina premium en M3/mes	230,4
Precio Gasolina Especial (Bs/L)	3,74
Precio Diesel Oil (Bs/L)	3,72
Precio G. premium (Bs/L)	4,79
Ingreso total por ventas en un año	192.827.000 Bs

Fuente: Recopilación de datos de la ANH, 2020

Para el ingreso por venta se calcula de la siguiente manera:

Gasolina especial ingreso de un año:

$$29.170 \frac{m^3}{año} ** \frac{1000 l}{1 m^3} * \frac{3,74 Bs}{1 l} * \frac{1 MM Bs}{1x10^6 Bs} = 109,1 \frac{MM Bs}{año}$$

Diesel Oil ingreso de un año:

$$22.205 \frac{m^3}{año} ** \frac{1000 l}{1 m^3} * \frac{3,72 Bs}{1 l} * \frac{1 MM Bs}{1x10^6 Bs} = 82,6 \frac{MM Bs}{año}$$

Gasolina premium ingreso de un año:

$$230 \frac{m^3}{año} ** \frac{1000 l}{1 m^3} * \frac{4,79 Bs}{1 l} * \frac{1 MM Bs}{1x10^6 Bs} = 1,127 \frac{MM Bs}{año}$$

Ingreso Total = 192,827 MM Bs al año

## COSTOS DIRECTOS

Se considera a todos aquellos equipos que forman parte del circuito principal de la refinería GEB, se compone de las siguientes áreas

**TABLA 7.2 ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS FIJOS**

REFINERIA GEB	Costo
<b>Intercambiador de calor</b>	2.046.945,57
<b>Silenciador</b>	16.178,41
<b>Silenciador</b>	51.522,43
<b>Pos-tenfriador</b>	555.504,89
<b>Vaporizador tanques</b>	159.199,46
<b>Separadores</b>	181.608,53
<b>Vaporizador Drenaje</b>	159.199,46
<b>Unidad Paquete Compresor</b>	3.600.118,34
<b>Unidad Paquete Booster Expander</b>	961.450,76
<b>Tanques de almacenamiento de combustibles líquidos</b>	5.595.370,67
<b>Evaporador y enfriador</b>	39.804,20
<b>TOTAL EN \$</b>	<b>13.366.902,72</b>

*Fuente: Datos recopilados de YPFB, 2017*

El costo total directo es de 13.366.902,72\$ o 93.300.981,2 Bs

### **COSTOS INDIRECTOS**

Son aquellos que son inexactos de cuantificar, a continuación, se dará a conocer los costos indirectos.

**TABLA 7.3: COSTOS INDIRECTOS**

ITEM	MONTO EN Bs
<b>Resguardos de tanque de almacenamiento de combustibles</b>	7.127
<b>Fallas mecánicas en equipos</b>	19.900
<b>Costo de implementación del software R-STUDIO</b>	1.800

<b>Capacitación al personal para uso del programa</b>	700
<b>Logística, seguridad de la planta</b>	15.345
<b>total costo en Bs</b>	44.872
<b>Total costo en \$</b>	6428,65

*Fuente: Datos recopilados de YPFB, 2017*

El total de los costos indirectos son 44.872 Bs o 6.428,65\$

## **COSTOS DE MANTENIMIENTO**

A continuación, se dará a conocer los costos necesarios para el mantenimiento de los tanques.

**TABLA 7.4: COSTOS DE MANTENIMIENTO**

<b>MANTENIMIENTO</b>	<b>MONTO EN Bs</b>
<b>Unidad de reformatión catalítica, ductos</b>	17.500
<b>Sistema de producción de lubricantes</b>	40.600
<b>Puesta en marcha en planta</b>	10.500
<b>Total</b>	68.600

*Fuente: Elaborado en base a datos de YPFB, 2017*

El costo total de mantenimiento es de 68.600 bs

## **COSTOS TOTALES**

Se podrá apreciar a continuación los costos totales del sistema de GNL de manera resumida.

**TABLA 7.5: COSTO TOTALES**

ÍTEM	MONTO EN Bs
<b>Costo directo</b>	93.300.981,2
<b>Costos indirectos fijos</b>	44.872,00
<b>Costos de mantenimiento</b>	68.600,00
<b>Total</b>	93.414.453,2

*Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados*

En los resultados de la tabla 7.5 se tiene como costo total de 93.414.453,2 Bs o su equivalente 13.383.159,48\$

## ANÁLISIS TIR

Del ingreso total se puede tomar el 20% para el flujo de caja, esto corresponde a 38.565.400 Bs/año para una recuperación en 5 años

$$\text{Ingreso inicial} = 192.827.000 \text{ Bs} * 0,2 = 38.565.400 \text{ Bs}$$

Donde la inversión a realizar es igual al costo total del proyecto =

93.414.453,2 Bs

Para 5 años de implementación del análisis predictivo:

El TIR se calcula con la siguiente formula:

$$NPV(r^*) = \sum_{n=0}^N \frac{FC}{(1+r^*)^n} - I = 0$$

$$0 = -93.414.453,2 \text{ Bs} + \frac{38.565.400}{(1+TIR)^1} + \frac{38.565.400}{(1+TIR)^2} + \frac{38.565.400}{(1+TIR)^3} + \frac{38.565.400}{(1+TIR)^4} + \frac{38.565.400}{(1+TIR)^5}$$

$$TIR = 0,3028 \text{ (PARA 5 AÑOS)}$$

Por lo tanto, como el TIR es > a la Tasa de descuento de 12,5% (0,125). El proyecto es factible.

## ANÁLISIS VAN

Para calcular el VAN se determinan todos los flujos de efectivo y los flujos de efectivo futuros se recalculan al valor actual del dinero descontándolos por la tasa de interés. La fórmula que se suele mencionar para calcular el NVP es:

$$NPV = -I_o + \sum_{t=0}^T \frac{X_t}{(1+r)^T}$$

Donde:

NPV = Valor Actual neto

$I_o$  = Inversión inicial en \$

FC = Flujo de efectivo de cada año en \$

r

= tasa de interés en tanto por 1, en nuestro proyecto se considera del año rentable como %

T = Número de años proyectado

Entonces del análisis anterior del TIR (0,303) tomamos como referencia 5 años para calcular el VAN o NPV

Por lo tanto:

$$NPV = -93.414.453,2 \text{ Bs} + \frac{38.565.400}{(1 + 0,303)^1} + \frac{38.565.400}{(1 + 0,303)^2} + \frac{38.565.400}{(1 + 0,303)^3} + \frac{38.565.400}{(1 + 0,303)^4} + \frac{38.565.400}{(1 + 0,303)^5}$$

$$NPV = 12743,264$$

El proyecto está proyectado para su financiamiento en 5 años; por lo tanto, para hallar el NPV, recurrimos al siguiente criterio:

- Si NPV > 0 ES RENTABLE
- Si NPV = 0 ES INDIFERENTE
- Si NPV < 0 NO ES RENTABLE

Por lo tanto:

NPV=12743,264 >0 Por lo tanto es rentable VER ANEXOS A4 RESPALDO DE LOS COSTOS

## Capítulo 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

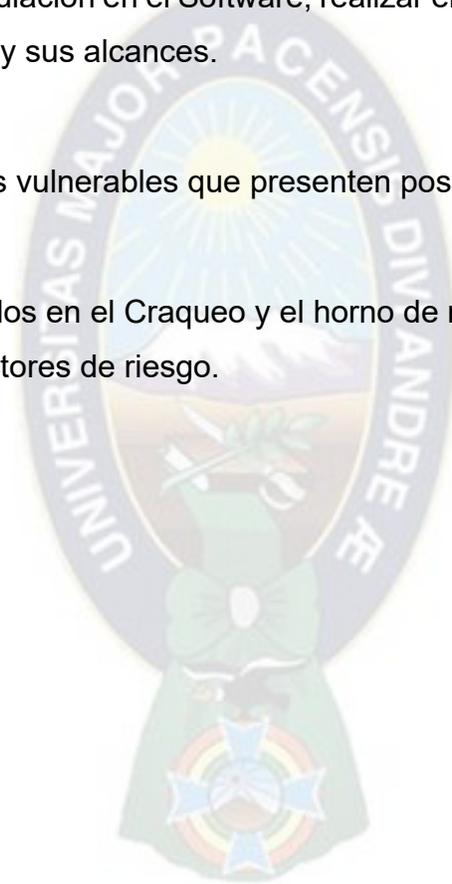
#### 7.1 CONCLUSIONES

- Se Realizó una matriz de análisis de riesgos dentro de los procesos de la refinería, con el fin de encontrar las zonas y áreas vulnerables, por lo cual las zona más propensa a presentar una explosión es la debutanizadora.
- Los efectos de mayor riesgo se presenta cuando la fuga tiene mayor tamaño de agujero. En caso de pequeño tamaño de fuga (0.75 pulgadas), con la suposición de la liberación de energía explosiva de 5 min, los resultados del accidente son menores (Unidad de crudo, Unidad de recuperación de gases, splitter de nafta, unidad de reformación catalítica) en caso de una mayor cantidad liberada en diámetros mayores de agujero de 1" presentan un radio mayor alcance de riesgo (Debutanizadora)
- La probabilidad de incidencia de fatalidades en la refinería  $3.13E-6$  fatalidades/año y la probabilidad más alta de ocurrencia son del 21,53 y 10,53% de accidentes en los trabajadores, esto se debe controlar en las áreas con mayor riesgo en la planta.
- Se Desarrolló una simulación de la probabilidad de explosión aplicando el software R studio.
- Se determinó la factibilidad económica del proyecto con un  $TIR = 0,3028$  y  $NVP = 12743,264$  que son indicadores de factibilidad del proyecto

## 7.2 RECOMENDACIONES

Se recomiendan tener en cuenta los siguientes puntos:

- Realizar la adecuadamente el cálculo de tiempos para la prevención de explosión, una pronta y optima evacuación.
- En base de la simulación en el Software, realizar el perímetro de daño en una posible explosión y sus alcances.
- Reforzar las áreas vulnerables que presenten posibilidades de riesgo.
- Realizar los cálculos en el Craqueo y el horno de manera óptima ya que son los principales factores de riesgo.



## Capítulo 9 BIBLIOGRAFÍA

[1].Assessing the case for EU legislation on the safety of pipelines and the possible impacts of such an initiative. (2011). Obtenido de [http://ec.europa.eu/environment/seveso/pdf/study\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/seveso/pdf/study_report.pdf)[4].Bord Gais, DGC, ENAGAS, Fluxys, Gasum, GRT Gaz,

[2].N.V Nederlandse Gasunie. (n.d.-a). 8 th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group. Obtenido de <https://www.egig.eu/uploads/bestanden/96652994-c9af-4612-8467-9bc6c2ed3fb3>

[3].Bord Gais, DGC, ENAGAS, Fluxys, Gasum, GRT Gaz, ... N.V Nederlandse Gasunie. (n.d.-b). GAS PIPELINE INCIDENTS 9 th. Obtenido de <https://www.egig.eu/uploads/bestanden/ba6dfd62-4044-4a4d-933c-07bf56b82383>

[4].Bajpayee, T., Rehak, T., Mowrey, G., Ingram, D., 2004. Blasting injuries in surface mining with emphasis on flyrock and blast area security.Journal of Safety Research 35, 47–57.

[5].Bhattacharjee, A., Ramani, R.V., Natarjan, R., 1992. Injury experience analysis for risk assessment and safety evaluation. Mining Engineering 44, 1461–1466.

[6].Bowerman, B.L., O'connell, R.T., 1993. Forecasting and Time Series: An Applied Approach, third ed. Duxbury Press, Belmont.

[7].Bozkurt, R., 1993. Application of the Modern Accident Prevention Techniques to OAL Mines (TKI). M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara

[8].Leigh, J.P., Mulder, H.B., Want, G.V., Farnsworth, N.P., Morgan, G.G., 1991. Sprain/strain back injuries in New South Wales underground coal mining. *Safety Science* 14, 35–42.

[9].Myers, J.R., Kisner, S.M., Fosbroke, D.E., 1998. Lifetime risk of fatal occupational injuries within industries by occupation, gender, and race. *Human and Ecological Risk Assessment* 4, 1291–1307.

[10].Ozfirat, M.K., Ozfirat, P.M., Aksoy, C.O., Pamukcu, C., Tatar, C., 2006. Modelling the risk factors of occupational accidents in an underground coal mine in Turkey using regression analysis. *CIM Bulletin* 98, 56–63.

[11].Poplin, G.S., Miller, H.B. Ranger-Moore, J., Bofinger, C.M., Kurzius- Spencer, M., Harris, R.B., Burgess, J.L., in press. International evaluation of injury rates in coal mining: A comparison of risk and compliance-based regulatory approaches. *Safety Science*.

## ANEXOS

### A.1. TABLA DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

DETALLE	HORNO	DESTILACIÓN	CRAKING	MEZCLADORES
a) ¿Existe una fuente de daño?	Si	si	si	Si
b) ¿Quién (o qué) puede ser dañado?	El operario, personas cercanas.	Operarios, visitantes, personas cercanas.	Operarios, visitantes, personas cercanas.	Puede ser dañado el trabajador o los equipos correspondientes para el proceso.
c) ¿Cómo puede ocurrir el daño?	Explosión, caídas de nivel, exposición a agentes químicos, físicos.	Explosión, fuga de combustible, contacto con agentes químicos, objetos a altas temperaturas y golpes.	Explosión, fuga de combustible, contacto con agentes químicos, objetos a altas temperaturas y golpes.	Debido a fallas técnicas del equipo, por la voluntad del trabajador (mala gana) u otros motivos.
a) golpes y cortes.	riesgo alto	riesgo alto	riesgo alto	Si, y demasiados

<b>b) caídas al mismo nivel.</b>	riesgo alto	riesgo alto	riesgo alto	Si
<b>c) caídas de personas a distinto nivel.</b>	riesgo alto	riesgo alto	riesgo alto	Si
<b>d) caídas de herramientas, materiales, etc., desde altura.</b>	Existentes	existentes	existentes	Si, desde una altura considerable
<b>e) espacio inadecuado.</b>	N/A	N/A	N/A	No
<b>f) peligros asociados con manejo manual de cargas.</b>	Existentes	existentes	existentes	No
<b>g) peligros en las instalaciones y en las máquinas asociados con el montaje, la consignación, la</b>	existentes	existentes	existentes	Si, para eso deben tener el uniforme correspondiente
<b>h) peligros de los vehículos, tanto en el transporte interno como el transporte por carretera.</b>	N/A	N/A	N/A	Para el transporte interno, no, pero en la carretera, sí.

<b>i) incendios y explosiones.</b>	riesgo alto	riesgo alto	riesgo alto	Si no se siguen los protocolos necesarios, puede haber peligro de incendios y explosiones
<b>j) sustancias que pueden inhalarse.</b>	Existentes	existentes	existentes	Si
<b>k) sustancias o agentes que pueden dañar los ojos.</b>	Existentes	existentes	existentes	Si
<b>l) sustancias que pueden causar daño por el contacto o la absorción por la piel.</b>	Existentes	existentes	existentes	Si, contacto con los metales o las sustancias cuando están a una temperatura elevada
<b>m) sustancias que pueden causar daños al ser ingeridas.</b>	Existentes	existentes	existentes	Si, todas las sustancias son toxicas
<b>n) energías peligrosas (por ejemplo: electricidad, radiaciones, ruido y vibraciones).</b>	Existentes	existentes	existentes	Si, como la electricidad y el ruido.

<b>o) trastornos músculo-esqueléticos derivados de movimientos repetitivos.</b>	N/A	N/A	N/A	No
<b>p) ambiente térmico inadecuado.</b>	Existentes	existentes	existentes	Si
<b>q) condiciones de iluminación inadecuada.</b>	Existentes	existentes	existentes	No
<b>r) barandillas inadecuadas en escaleras.</b>	Existentes	existentes	existentes	No

## A.2. TABLA DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Detalle	HORNO	TORRE DE DESTILACION	CRACKING	MEZCLADORE S
a) Tareas a realizar Su duración y frecuencia.	Moderado	Frecuente	Frecuente	Mezclar la materia prima donde ya tuvo varios procesos para obtener diferentes productos para la población.
b) Lugares donde se realiza el trabajo.	Unidad de proceso	Unidad de proceso y alrededores	Unidad de proceso y alrededores	En el mezclador y diferentes áreas
c) Quien realiza el trabajo, tanto permanente como ocasional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Trabajadores</li> <li>➤ Mantenimiento</li> <li>➤ técnicos y visitantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Trabajadores</li> <li>➤ Mantenimiento</li> <li>➤ Técnicos y visitantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Trabajadores</li> <li>➤ Mantenimiento</li> <li>➤ Técnicos y visitantes</li> </ul>	El mezclador a través de un supervisor o encargado

<p><b>d) Otras personas que puedan ser afectadas por las actividades.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Trabajadores</li> <li>➤ Mantenimiento o</li> <li>➤ técnicos y visitantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Trabajadores</li> <li>➤ Mantenimiento</li> <li>➤ Técnicos y visitantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Trabajadores</li> <li>➤ Mantenimiento</li> <li>➤ Técnicos y visitantes</li> </ul>	<p>Todos en general</p>
<p><b>e) Formación que han recibido los trabajadores sobre la ejecución de sus tareas.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ingenieros</li> <li>➤ Técnicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ingenieros</li> <li>➤ Técnicos</li> <li>➤ Especialistas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ingenieros</li> <li>➤ Técnicos</li> <li>➤ Especialistas.</li> </ul>	<p>Toda la formación para que el trabajo sea eficiente</p>
<p><b>f) Procedimientos escritos de trabajo, y/o permisos de trabajo.</b></p>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Se reciben todos los permisos de trabajo y se lo analiza cual se aceptara</p>

<p><b>g)</b>  <b>Instalaciones, maquinaria y equipos utilizados.</b></p>	<p>existentes</p>	<p>existentes</p>	<p>existentes</p>	<p>Se instalan los equipos y maquinarias de manera correcta siguiendo un protocolo para que no haya retrasos o accidentes.</p>
<p><b>h)</b>  <b>Herramientas manuales movidas a motor utilizados.</b></p>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Si, en su mayoría</p>
<p><b>i)</b>  <b>Instrucciones de fabricantes y suministradores para el funcionamiento y</b></p>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Se sigue con las instrucciones correspondientes para no sufrir percances más adelante.</p>

<b>mantenimiento de plantas, maquinarias y equipos.</b>				
<b>j) Tamaño, forma, carácter de la superficie y peso de los materiales a manejar.</b>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Si o si tomar en cuenta esos datos para que la producción sea correcta.</p>
<b>k) Distancia y altura a las que han de moverse de forma manual los materiales.</b>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Existentes</p>	<p>Lo más próximo posible para que la producción sea rápida.</p>
<b>l) Energías utilizadas (por ejemplo: aire comprimido).</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Horno</li> <li>➤ Bombas</li> <li>➤ compresores</li> <li>➤ válvulas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Destiladores</li> <li>➤ Servicios auxiliares</li> <li>➤ Enfriadores</li> <li>➤ intercambiadores de calor</li> <li>➤ Válvulas</li> <li>➤ Equipos de control</li> <li>➤ Compresores y bombas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Destiladores</li> <li>➤ Servicios auxiliares</li> <li>➤ Enfriadores</li> <li>➤ intercambiadores de calor</li> <li>➤ Válvulas</li> <li>➤ Equipos de control</li> <li>➤ Compresores y bombas.</li> </ul>	<p>Energía eléctrica y otros más</p>

<p><b>m) Sustancias y productos utilizados y generados en el trabajo.</b></p>	<p>Petróleo crudo y agua tratada</p>	<p>Gasoil, querosene, Crudo reducido, inhibidores corrosivos, agentes químicos de limpieza, metano, butano y asfalto.</p>	<p>Gasolina, combustible de avión y querosén.</p>	<p>Se utiliza petróleo y como productos salen gasolina, diésel, nafta, butano, propano y otros más</p>
<p><b>n) Estado físico de las sustancias utilizadas (humos, gases, vapores, líquidos, polvo, sólidos).</b></p>	<p>Líquidos</p>	<p>Humos, gases, vapores, líquido y solidos</p>	<p>Líquidos</p>	<p>En buen estado para una venta rápida.</p>
<p><b>o) Contenido y recomendaciones del etiquetado de</b></p>	<p>Peligroso</p>	<p>Peligroso</p>	<p>Peligroso</p>	<p>Tener todas las recomendaciones necesarias para que no haya accidentes a la larga.</p>

<b>las sustancias utilizadas.</b>				
<b>p) Requisitos de la legislación vigente sobre la forma de hacer el trabajo, instalaciones, maquinaria.</b>	Necesarias	Necesarias	Necesarias	Todos los requisitos para no violar las normas y reglamentaciones
<b>q) Medidas de control existentes.</b>	Si	Si	Si	Se tiene todas las medidas de control para que los trabajadores no sufran accidentes.
<b>r) Datos reactivos de actuación en prevención de riesgos</b>	Riesgos existentes	Riesgos existentes	Riesgos existentes	Tener los procedimientos y protocolos para no sufrir riesgos laborales como

<b>laborales: incidentes, accidentes.</b>				incidentes y accidentes laborales.
<b>s) Datos de evaluaciones de riesgos existentes, relativos a la actividad desarrollada.</b>	Existentes	Existentes	Existentes	Se tiene todos los datos para tener una buena actividad desarrollada.
<b>t) Organización del trabajo.</b>	Definidos	Definidos	Definidos	Tener una buena organización para no atrasar los trabajos correspondientes.

### A.3. Evaluación de oportunidades

Detalle	HORNO	TORRE DE DESTILACION	CRACKING	MEZCLADORES
	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
<b>a) Áreas externas a las instalaciones de la empresa.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Laboratorio de control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Torre de destilación al vacío</li> <li>➤ Torre de fraccionamiento</li> <li>➤ Laboratorios</li> <li>➤ Sala de monitoreo</li> <li>➤ Sistema de flujos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tanques</li> <li>➤ Sistema de flujos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Área de horno</li> <li>➤ área de torre de destilación.</li> <li>➤ Área de cracking</li> <li>➤ Área de destilación de vacío.</li> </ul>
<b>b) Etapas en el proceso de producción o en el suministro de un servicio.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Procesos de calentamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Procesos de calentamiento</li> <li>➤ Compresión</li> <li>➤ Bombeo</li> <li>➤ Mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Procesos de calentamiento y compresión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Almacenamiento de petróleo</li> <li>➤ Destilador</li> <li>➤ Horno</li> <li>➤ Torre de destilación primaria</li> <li>➤ Cracking</li> <li>➤ Separador de gas</li> </ul>

<b>c) Trabajos planificados y de mantenimiento.</b>	<p>Si</p>	<p>si</p>	<p>si</p>	<p>Todos las áreas y procesos</p>
<b>d) Tareas definidas, por ejemplo: conductores de carretillas elevadoras.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Operarios jefe de planta</li> <li>➤ trabajadores de limpieza</li> <li>➤ técnicos de maquinaria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Operarios</li> <li>➤ Jefe de planta</li> <li>➤ Encargados de monitoreo</li> <li>➤ Personal de laboratorio</li> <li>➤ Trabajadores de limpieza</li> <li>➤ Técnicos de equipos y maquinaria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Operarios.</li> <li>➤ Jefe de planta.</li> <li>Encargados de monitoreo.</li> <li>➤ Personal de laboratorio</li> <li>➤ Trabajadores de limpieza</li> <li>➤ Técnicos de equipos y maquinaria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Conductores de vehículos pesados para el transporte</li> </ul>

### A.3. CODIGO DE PROGRAMACIÓN DEL PROGRAMA

```
xs=rbinom(16,4034129,7.06/100)
ts=0:11
plot(ts,xs, typ='b', lty='dotted', ylab=expression(Omega), xlab="T",
main=expression(X[n](w)))
# abline(v=0,h=10)
for (s in 1:12) text( ts[s]+0.5,xs[s]+0.1, paste("X",s-1), cex=0.7)
```

“Se detalla la función binómica y el intervalo de tiempo para el resultado de las gráfica de probabilidad y riesgo de explosión.”

```
t <- 0:150 # time
sig2 <- 0.01 ## first, simulate a set of random deviates
y <- rnorm(n = length(t) - 1, sd = sqrt(sig2)) ## now compute their
cumulative sum
y <- c(0, cumsum(y))
plot(t, y, type = "l", axes=F, ylab=expression(Omega), xlab="Tiempo",
main=expression(X[t](w)))
abline(v=0,h=min(y))
for (s in c(50,100,150)) {
points(s, y[s], pch=16)
text( 50,y[50]-.1, expression(X[t[1]]))
text(100,y[100]-.1, expression(X[t[2]]))
```

```
text(150,y[150]-.1, expression(X[t[3]])) }
```

*“En esta parte se realiza la simulación de la frecuencia acumulada vs el tiempo en días de la probabilidad de riesgo de explosión en intervalo de 50 días.”*

```
y2 <- rnorm(n = length(t) - 1, sd = sqrt(sig2)) ## now compute their  
cumulative sum
```

```
y2 <- c(0, cumsum(y2))
```

```
lines(t,y2, typ='l', col="red")
```

```
y3 <- rnorm(n = length(t) - 1, sd = sqrt(sig2)) ## now compute their  
cumulative sum
```

```
y3 <- c(0, cumsum(y3))
```

```
lines(t,y2, typ='l', col="green")
```

```
lines(t,y3, typ='l', col="red")
```

*“Se define la funciones de las gráficas de frecuencia acumulada vs tiempo”*

```
# Definiendo la funcion caminata aleatoria
```

```
caminata <- function(n,p){
```

```
  trayectoria <- numeric(n)
```

```
  trayectoria[1] <- 0
```

```
  for(i in 2:n){
```

```
    # x <- if(rbinom(1,1,p)==0) 1 else -1
```

```
    x <- sample(c(-1,1),1,prob=c(1-p,p))
```

```
    trayectoria[i] <- trayectoria[i-1] + x
```

```
  }
```

```
  trayectoria
```

```

}

tray1 <- caminata(50, 0.6)
tray2 <- caminata(50, 0.6)
tray3 <- caminata(50, 0.6)
plot(tray1, type = "l",
      ylim=c(min(tray1,tray2,tray3),max(tray1,tray2,tray3)),
      ylab=expression(Omega), xlab="T", lty='dotted')
lines(tray2, type = "l", col="red")
lines(tray3, type = "l", col="blue")

```

*“Se define el recorrido/trayectoria de la probabilidad de riesgo de accidentes de la refinería”*

```

simulacion <- replicate(5000,caminata(10, 0.5) )
dim(simulacion)
class(simulacion)
simulacion[,1:5]
mean(simulacion[10,])
jugada <- function(n,p, k, N){
  #n: tamaño de la cadena
  #p: Probabilidad de accidente
  #k: Riesgo del evento A
  #N: Valor estimado del Riesgo
  trayectoria <- numeric(n)
  trayectoria[1] <- k
  for(i in 2:n){

```

```

# x <- if(rbinom(1,1,p)==0) 1 else -1
x <- sample(c(-1,1),1,prob=c(1-p,p))
trayectoria[i] <- trayectoria[i-1] + x
if (trayectoria[i]==0) break
if (trayectoria[i]==N | trayectoria[i-1]==N )
  trayectoria[i] <-N
}
trayectoria
}

#old.par <- par(no.readonly = TRUE)
#par(mfrow=c(2,2))
#for (i in 1:4) {plot(jugada(100, 0.5, 5,10), type = "l",
ylab=expression(Omega), xlab="T")}

#mtext("4 realizaciones del proceso", side=3, outer=TRUE, line=-1)
#par(old.par)
par(mfrow=c(1,1))
plot(x<-riesgo(100, 0.5, 5,10), type = "l", ylab=expression(Omega),
xlab="T")

```

*“Se define el tamaño de la cadena, la probabilidad de accidente y el valor estimado del Riesgo en función del tiempo”*

```

simulacion <- replicate(5000riesgo(100, 0.5, 5,10))
dim(simulacion)
# Probabilidad de accidente del evento A después de 10 iteraciones?

```

```
mean(simulacion[20,])  
  
# Cual es la probabilidad de daño del evento A.  
  
dim(simulacion)  
  
simulacion[100,1:10]  
  
dim(simulacion)[2]
```

*“Se realiza la prueba de probabilidad en 10 iteraciones y su simulación”*

```
peligro = simulacion[100,1:10]  
  
length(peligro)  
  
length(peligro [peligro ==0])/length(perdida)
```

*“Se determina la cuantificación de peligro y pérdida”*

```
#en general para la refinería  
  
peligro = simulacion[100,]  
  
length(peligro)  
  
length(peligro [peligro ==0])/length(peligro)  
  
#Número esperado de accidentes antes de la explosión  
  
simulacion[,1:10]  
  
simx =simulacion[,3]  
  
length(simx[simx>0])
```

*“Se simula y predice el numero esperado de accidentes antes de la explosión de la refinería”*

```
riesgos = numeric(5000)  
  
for(i in 1:5000){  
  
  simx =simulacion[,i]  
  
  riesgos[i]<-length(simx[simx>0])
```

```

}

riesgos

mean(riesgos)

mean(riesgos)

#Otra opcion de funcion de riesgo

riesgo <- funcion(n,p, k, N){

  #n: tamaño de la cadena

  #p: Probabilidad de peligro

  #k: riesgo del evento A

  #N: Total de número de accidentes

  trayectoria <- numeric(n)

  trayectoria[1] <- k

  for(i in 2:n){

    # x <- if(rbinom(1,1,p)==0) 1 else -1

    x <- sample(c(-1,1),1,prob=c(1-p,p))

    if (i>2 & trayectoria[i-1]==N)

      trayectoria[i] <- trayectoria[i-1]

    else

      trayectoria[i] <- trayectoria[i-1]+x

    if (trayectoria[i]==0) break

    if (trayectoria[i]==N) trayectoria[i] <-N

  }

  trayectoria

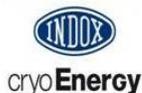
```

## A.4 DATOS TECNICOS DE LA PLANTA GUILLERMO ELDER BELL

		FICHA TÉCNICA		  	
		<b>REFINERÍA GUILLERMO ELDER BELL</b> Inicio de Operaciones Gestion 1979 Capacidad 19.000 BPD			
DATOS GENERALES		RENDIMIENTOS Y PRODUCCIÓN PROMEDIO			
Provincia:	Santa Cruz de la Sierra	PLANTA DE CARBURANTES	UNIDAD	PRODUCCIÓN Promedio 2020	ENTREGAS Promedio 2020
Departamento:	Santa Cruz	Gasolina Especial	m3/mes	29.170	29.937
Zona:	Palmasola	Diesel Oil	m3/mes	22.205	22.070
Año de operación	1979	Gasolina Premium	m3/mes	230,4	226,2
Estado actual según cronograma:	En Operación	Kerosene	m3/mes	769	769
Empresa Operadora:	YPFB	Jet Fuel	m3/mes	4.330	4.111
Superficie:	370 km <sup>2</sup>	GLP	TMD	118	117
Coordenadas:	16.7476° S, 62.0751° W	Crudo Reconstituido	m3/mes	2.116	2.390
Altitud:	416 m.s.n.m.	Gasolina Base 81	m3/mes	7.416	7.377
					
<b>CAPACIDAD DE PROCESO INICIAL</b>					
Unidad de Crudo	16000 BPD			Gestión 2005	
Unidad de Crudo	3000 BPD			Gestión 2005	
<b>CAPACIDAD DE PROCESO REVAMP</b>		PRODUCTO	TK	CAPACIDAD NOMINAL (M3)	CARGA MUERTA (M3)
Unidad de Crudo	18.500 BPD	Petróleo Crudo	TK-10002	16.000	1.500
Unidad de Crudo	6.000 BPD	Petróleo Crudo	TK-2900	16.000	1.500
Capacidad de Diseño	24.500 BPD	Petróleo Crudo	TK-2901	16.000	1.500
Capacidad de Proceso	24.000 BPD	Crudo Reconstituido (B)	TK-2913	9.000	300
<b>PROYECTOS EN EJECUCIÓN</b>		Gasolina Especial	TK-2912	9.000	300
Adecuación del parque de esferas	En curso	Gasolina Especial	TK-2915	4.000	150
		Gasolina Especial	TK-2916	4.000	150
		Gasolina Premium	TK-2938	700	20
		Jet Fuel	TK-2920	6.000	200
		Jet Fuel	TK-2927	1.800	70
		Jet Fuel	TK-2928	1.800	70
		Diesel Oil	TK-2918	9.000	300
		Diesel Oil	TK-2919	9.000	300
		Gas Licuado de Petróleo	TK-2934	700	30
		Gas Licuado de Petróleo	TK-2947	700	30



La fuerza que transforma Bolivia



# Planta de Refinación GEB

PLANTA DE REFINACIÓN  
GUILLERMO ELDER BELL

Doc. N°.: P227538- USIME2-  
GEN00-IN-0001

Rev. 1

Fecha: 03/06/2014

LISTA DE EQUIPOS, EDIFICACIONES Y REPUESTOS DE LA PLANTA		COSTO POR EQUIPOS
<b>Area 02: Purificación GN / Pretratamiento</b>		
	Filtro coalescentes 02-F-01/02	154.721,16
	Separador lloviznos 02-V-01	189.698,14
	Deposito Agua Desmineralizada (02-T-08)	167.941,28
	Bidon de Espuma (02-T-01)	6.044,24
	Caldera de Pretratamiento (02-Z-05)	262.826,28
	Deposito Condensados Caldera (02-Z-06)	30.221,19
	Unidad Remocion Mercurio (02-Z-02)	794.333,82
	Unidad Paquete Adsorcion H2O (02-Z-04)	2.906.670,19
	Unidad Paquete Adsorcion CO2 (02-Z-03)	4.685.344,53
	Medidor Ultrasonido de Gas (02-FT-0201/0101-01)	198.471,14
<b>Area 03: Refinación</b>		
	Intercambiador de calor	2.046.945,57
	Silenciador (03-X-01)	16.178,41
	Silenciador (03-X-03)	51.522,43
	Postenfriador (03-E-05)	353.504,89
	Vaporizador de drenaje	159.199,46
	Unidad paquete compresor	3.600.118,34
	Unidad Booster, expander	961.450,76
	Tanques de almacenamiento de combustibles	5.595.370,67
	Evaporador y enfriador	39.804,10
	Resguardo en tanques de combustible	7.127,00
	Fallas mecánicas en equipos	19.900,00
	Logística y seguridad de la planta	13.345,00
	Mantenimiento de la Unidad de reformación catalítica, ductos	17.500,00
	Sistema de producción de lubricantes	40.600,00
	Puesta en marcha	10.500,00