

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA



PROYECTO DE GRADO

**“CONTROL DEL RIESGO DE EXPLOSIÓN DEL POZO SMG X2,
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE REDES BAYESIANAS
DINÁMICAS DURANTE LA OPERACIÓN DE PERFORACIÓN.”**

Proyecto de Grado presentado para optar por el título de Licenciatura en
Ingeniería en Petróleo Gas y Procesos

POSTULANTE: WILMAR ANDRES RODAS CASTRO

TUTOR: ING. WILSON MEDINACELI MENDOZA

La Paz Bolivia

2024



**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.

ÍNDICE DEL PROYECTO

SIMBOLOGÍA.....	1
RESUMEN EJECUTIVO	2
1 CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 ANTECEDENTES.....	4
1.2.1 Antecedentes generales	4
1.2.2 Antecedentes académicos	4
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.3.1 Identificación del problema.....	6
1.3.2 Formulación del problema.....	8
1.4 OBJETIVOS.....	8
1.4.1 Objetivo general	8
1.4.2 Objetivos específicos.....	8
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	9
1.5.1 Justificación teórica.....	9
1.5.2 Justificación técnica.....	10
1.5.3 Justificación económica.....	10
1.5.4 Justificación socio – ambiental.....	11
1.6 ALCANCE	11
1.6.1 Alcance temático	11
1.6.2 Alcance temporal.....	12
1.6.3 Alcance geográfico.....	12

1.7	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	13
1.7.1	Hipótesis de investigación científica	13
1.7.2	Enfoque de investigación científica.....	13
1.7.3	Tipo de investigación	14
1.7.4	Métodos de investigación científica	14
1.7.4.1	Método inductivo	14
1.7.4.2	Método sintético	14
2	CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	15
2.1	CONTROL DE PRESIÓN DURANTE LA PERFORACIÓN.....	15
2.1.1	Definición	15
2.2	SURGENCIAS	15
2.2.1	Indicadores de presión durante la perforación.....	16
2.2.1.1	Variación en la velocidad de penetración:.....	16
2.2.1.2	Derrumbes	17
2.2.1.3	Incremento en el contenido de gas	17
2.2.1.4	Variación en el tamaño de los recortes.....	17
2.2.1.5	Aumento del torque y del arrastre.....	17
2.2.1.6	Disminución de la densidad de lutita	18
2.2.1.7	Incremento en la temperatura de la línea de flujo	18
2.2.2	Causas de una surgencia	18
2.2.2.1	Densidad insuficiente de lodo	18
2.2.2.2	Efecto de pistoneo y compresión.....	19
2.2.2.3	Obstrucciones en el pozo	19

2.2.2.4	Problemas con el equipamiento	19
2.2.3	Blowout o reventón	19
2.3	DEFINICIÓN DE MPD	20
2.3.1	Evitación del ciclo pérdida/surgencia	20
2.3.2	Perforación con tapón de lodo presurizado PMCD	21
2.3.3	MPD: beneficios significativos	22
2.4	EQUIPO DE SUPERFICIE	22
2.4.1	Preventor de reventones	22
2.4.2	Preventor anular	23
2.4.3	Esclusas de corte	24
2.4.4	Rams ciegos o de cierre total	24
2.4.5	Esclusa de diámetro variable	25
2.4.6	Unidades acumuladoras de presión	25
2.4.6.1	Requisitos de volumen	26
2.4.6.2	Fluidos de carga del acumulador	26
2.4.6.3	Precarga de nitrógeno	27
2.5	EVALUACIÓN DEL RIESGO	27
2.5.1	Fundamentos del riesgo	27
2.5.2	Matriz de riesgos	28
2.5.2.1	Riesgo aceptable	29
2.5.2.2	Riesgo tolerable	29
2.5.2.3	Riesgo inaceptable	29
2.5.3	Matriz de aceptabilidad de riesgos	29

2.6	ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA PERFORACIÓN DE POZOS.....	30
2.6.1	Evaluación de la amenaza	30
2.6.1.1	Identificación de causas y eventos amenazantes durante la perforación de pozos exploratorios.....	31
2.6.1.2	Amenazas exógenas.....	32
2.6.1.3	Amenazas operacionales	32
2.6.2	Evaluación de la vulnerabilidad	35
2.6.2.1	Salud y vidas humanas	35
2.6.2.2	Medio Ambiente	35
2.6.2.3	Infraestructura y/o condición operativa.....	36
3	CAPÍTULO III: MODELO DINÁMICO DE RIESGO DE REVENTÓN PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DURANTE UNA OPERACIÓN DE PERFORACIÓN	38
3.1	PROBABILIDAD BAYESIANA	38
3.1.1	Teorema de Bayes	38
3.1.2	Análisis Bayesiano Jerárquico.....	39
3.2	REDES BAYESIANAS	40
3.2.1	Red convencional bayesiana.....	40
3.2.2	Red Bayesiana dinámica	43
3.2.2.1	Intervalo de la red Bayesiana.....	44
3.2.2.2	Análisis instantáneo de la dinámica Bayesiana.....	45
3.3	MODELO DE RIESGO DE EXPLOSIÓN DINÁMICA EN EL SISTEMA DE CONTROL MPD	46
3.3.1	Control de presión.....	46
3.3.2	Modelos numéricos para simulación de control de kick	46

4	CAPITULO IV: MARCO PRÁCTICO	51
4.1	DESCRIPCIÓN DEL POZO	51
4.1.1	Cuantificación de profundidades respecto a las formaciones....	53
4.1.2	Descripción litológica	54
4.2	REQUERIMIENTOS GENERALES	57
4.3	ANÁLISIS DINÁMICO DE RIESGOS.....	59
4.3.1	Desarrollo del nudo de corbata para identificar causas de Overbalance y Underbalance	59
4.3.2	Diagrama del proceso	59
4.3.3	Matriz de riesgos generales	61
4.3.4	Identificación causas principales y secundarias.....	62
4.3.4.1	Análisis de los diagramas	71
4.3.5	Modelos predictivos con redes bayesianas.....	72
4.3.5.1	Ecuación Bayesiana para cada evento	72
4.3.6	Probabilidad de falla para el Over Balance	73
4.3.7	Probabilidad de falla para el Under balance	74
4.3.8	Descripción de la validación del modelo	75
4.3.9	Validación del. Modelo dinámico de riesgos	76
4.4	PREDICCIÓN DE VARIABLES DE POZO EN EL TIEMPO CONTINUO.	76
4.4.1	Variación de la presión del espacio anular en el tiempo	76
4.4.2	Variación de la presión del chocke en el tiempo	78
4.4.3	Simulación del modelo de flujo de estrangulamiento de dos fases	79

4.4.4	Validación del modelo bayesiano aplicado al MPD.....	80
4.4.5	Simulación dinámica de riesgo en MATLAB.....	82
4.5	Propuesta de control de riesgos durante la perforación.....	85
4.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	86
5	CAPITULO V: ANÁLISIS DE VIABILIDA TÉCNICA Y ECONÓMICA	88
5.1	COSTOS FIJOS.....	88
5.2	COSTOS VARIABLES	88
5.3	DEPRECIACIÓN DEL PROYECTO.....	89
5.4	INVERSIÓN INICIAL.....	90
5.5	ESTUDIO DE TIR Y VAN.....	90
5.5.1	Estudio del Van.....	90
5.5.2	Estudio del TIR	92
5.6	ANÁLISIS DE COSTO Y BENEFICIO.....	93
5.7	RESUMEN DE LAS VARIABLES DE RENTABILIDAD.....	94
6	CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
6.1	CONCLUSIONES	95
6.2	RECOMENDACIONES.....	96
	BIBLIOGRAFÍA	98
	ANEXOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I:

Figura 1. 2: Variación de la presión de poro Pozo SMG – X2	7
--	---

Capítulo II:

Figura 2. 1: Perforación convencional vs Perforación con MPD	21
Figura 2. 1: Preventor anular.....	23
Figura 2. 2: Esclusa de corte.....	24
Figura 2. 3: Esclusa de diámetro variable	25
Figura 2. 4: Botellones del acumulador	27
Figura 2. 5: Identificación de amenazas en perforación.....	31

Capítulo III:

Figura 3. 1: Red bayesiana	41
Figura 3. 3: Modelo de Grüne y Oannek	47
Figura 3. 4: Modelo de control de presión.....	48

Capítulo IV:

Figura 4. 1: Esquemática propuesta de pozo.....	51
Figura 4. 2: diagrama de flujo del proceso	60
Figura 4. 3: Diagramas de árbol de Riesgos presentes de Perforación	68
Figura 4. 4: Diagramas de árbol de Riesgos presentes de Perforación – Parte B	69
Figura 4. 5: Diagramas de árbol de Riesgos presentes de Perforación – Parte C	70
Figura 4. 6: Variación de la presión del espacio anular en el tiempo	77
Figura 4. 7: Variación de la presión del Choke en el tiempo	79
Figura 4. 8: Validación del Proyecto.....	81
Figura 4. 8: Función dinámica en el espacio	82
Figura 4. 8: Variación de la probabilidad en Matlab	84
Figura 4. 9: Proceso de análisis de probabilidad dinámica	86

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo I:

Tabla 1. 1: Características del pozo.....	12
---	----

Capítulo II:

Tabla 2. 1: Matriz de riesgo.....	28
Tabla 2. 2: Matriz de aceptabilidad de riesgo.....	30
Tabla 2. 3: Probabilidades en función de la frecuencia del evento amenazante...	31
Tabla 2. 4: Amenazas por accidentes operacionales en cada etapa	33
Tabla 2. 5: Criterios de calificación de vulnerabilidad	36

Capítulo IV:

Tabla 4. 1: Información de Pozo	52
Tabla 4. 2: Topes formacionales del pozo SMG-X2.....	53
Tabla 4. 3: Descripción Litológica	54
Tabla 4. 4: Descripción Litológica II	54
Tabla 4. 5: Descripción litológica III.....	56
Tabla 4. 6: Análisis de causas inmediatas	61
Tabla 4. 7: Matriz de Riesgos.....	61
Tabla 4. 8: Análisis de causas principales y secundarias	62
Tabla 4. 9: Cadena de causas	63
Tabla 4. 10: Rango de causas de cuarto nivel	63
Tabla 4. 11: Análisis para la otra causa principal ue es el incremento de la presión de poro.....	64
Tabla 4. 12: Análisis de origen de las causas para el under balance.....	66
Tabla 4. 13: Probabilidad de falla para el Over Balance	73
Tabla 4. 14: Probabilidad de falla para el Under balance.....	74
Tabla 4. 15: Variación de la presión del espacio anular en el tiempo	77
Tabla 4. 16: Análisis para la otra causa principal que es el incremento de la presión de poro.....	78

Tabla 4. 17: Iteración del modelo probabilístico	80
Tabla 4. 18: Validación del modelo	80
Tabla 4. 19: Predicción de eventos de blue out para futuros diferentes pozos con Matlab	85
Tabla 4. 19: Análisis para la otra causa principal ue es el incremento de la presión de poro.....	87

Capítulo V:

Tabla 5. 1 Análisis de costos fijos	88
Tabla 5. 2 Costos variables.....	89
Tabla 5. 3 Depreciación anual del proyecto	89
Tabla 5. 4 Capital de trabajo.....	90
Tabla 5. 5 Flujo de caja por año para demostrar el VAN	91
Tabla 5. 6 Interpretación de Costo y beneficios	93
Tabla 5. 7 Parámetros económicos	94

ÍNDICE DE ECUACIONES

Capítulo II:

Ecuación 2. 1: Función del riesgo	28
---	----

Capítulo III:

Ecuación 3. 1: Función de distribución probabilística desarrollada por Bayes	38
Ecuación 3. 2: Función de distribución probabilística con valores discretos	39
Ecuación 3. 3: Función hiperparamétrica de distribución	40
Ecuación 3. 4: Distribución informativa de θ	40
Ecuación 3. 5: Teorema de Bayes respecto a más observaciones E'	40
Ecuación 3. 6: Probabilidades de los nodos	42
Ecuación 3. 7: Probabilidad total de una red bayesiana	42
Ecuación 3. 8: Probabilidad del sistema de perforación respecto a la variable X	42
Ecuación 3. 9: Modelo de transición $P (Z_t Z_t 1)$	43
Ecuación 3. 10: Distribución de probabilidad conjunta secuencia de T tramos de longitud	44
Ecuación 3. 11: Modelo de transición $P (Z_t Z_t 1, Z_t 2, \dots, Z_t k)$	44
Ecuación 3. 12: Tiempo de falla de X_1	45
Ecuación 3. 13: Tiempo de falla de X_1 para n intervalos	45
Ecuación 3. 14: Cambio por un determinado periodo de tiempo de toda la red bayesiana	45
Ecuación 3. 15: Presión de bomba dinámica	49
Ecuación 3. 16: Flujo dinámico del Bit	49
Ecuación 3. 17: Presión dinámica del choque	49
Ecuación 3. 18: Factor de arreglo	49
Ecuación 3. 19: Modelo de flujo de pase para dos chockes	50
Ecuación 3. 20: Densidad de gas y líquidos	50
Ecuación 3. 21: Presión de fondo	50
Ecuación 3. 22: Afluencia del reservorio	50

SIMBOLOGÍA

ω	Factor de peso
b	Término de sesgo
C	Constante de regularización
e_k	Función de error de entrenamiento
ρ	Densidad del fluido de perforación estimada y experimental
c_1 y c_2	Constantes positivas
r_1 y r_2	Funciones aleatorias en el rango [0,1]
$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$	i-ésima partícula
$p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$	Función probabilística de presión

RESUMEN EJECUTIVO

En este trabajo de grado se controla el riesgo de explosión del pozo SMG X2 mediante la aplicación de una red bayesiana dinámica durante las operaciones de perforación. El proyecto se realizó definiendo primero los conceptos de análisis dinámico de riesgos y redes bayesianas con respecto a las operaciones de prevención de reventones en la perforación. Posteriormente, se describen de forma fácil de entender los diferentes parámetros que afectan a la pérdida de control, patadas o amenazas de explosión.

En el capítulo propuesto, se desarrolla un modelo dinámico avanzado de riesgo de explosión basado en parámetros que afectan la amenaza de pérdida de control o explosión.

En la parte práctica se calcularon parámetros como caudal de circulación, resistencia y presión de la bomba en condiciones de no control del pozo. En el mismo desarrollo, el software MATLAB se puede utilizar para predecir los parámetros de falla de control del pozo y el riesgo de explosión en función de los parámetros de control de explosión durante la perforación del pozo SMG – X2. La probabilidad de pérdida de circulación y la probabilidad de que se produzca una explosión se representan gráficamente en función del tiempo.

Finalmente, se puede proponer de manera efectiva un plan dinámico de prevención y control de riesgos para controlar las explosiones que puedan ocurrir durante el proceso de perforación del pozo SMG X2.

El capítulo final realiza un estudio de viabilidad económica eficaz del proyecto propuesto, confirmando la viabilidad del proyecto.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN.

El monitoreo de los pozos es uno de los trabajos más complicados dentro de la perforación; particularmente en las zonas de explotación y producción en el litoral. Incluso más, la gran mayoría de los enfoques de recursos de hidrocarburos se originan por la exploración hacia aguas profundas (Graham et al., 2011) o presentan dificultades operativas que van desde los reservorios que tienen ventanas de presión muy estrechas hasta los que tienen alta presión.

Los sucesos de control, como las expulsiones, son comunes y pueden afectar los costos de operación (p. Ej., un Periodo de Tiempo No Productivo –NPT) y el peligro. Varias investigaciones han buscado maneras de aumentar la potencia de detección de kicks y también de dirigir barriles.

El análisis de riesgos también es una herramienta importante en las industrias de procesos de petróleo y gas para identificar y analizar todos los riesgos asociados con las operaciones y desarrollar estrategias para prevenir y mitigar estos riesgos. En las operaciones de perforación, el riesgo de accidentes por reventones es fundamental para las estrategias de control de pozos y la seguridad operativa general, ya que los reventones pueden causar consecuencias catastróficas como incendios y explosiones, múltiples muertes, daños ambientales, pérdidas de activos y multas (Graham et al., 2017).

El control de la presión de fondo de pozo en pozos problemáticos, como formaciones agotadas, formaciones fracturadas, formaciones sobre-presionadas o formaciones con ventanas de perforación estrechas, se ha descrito claramente en la literatura (He et al., 2017; Khakzad et al., 2013),b; Gala y Toralde, 2011; Rohani, 2012; Malloy y McDonald, 2008; Kok y Tercan, 2012).

Los beneficios de seguridad de métodos numéricos de control de presión aportan a la perforación convencional pueden medirse o evaluarse a través de la mejora de las barreras de seguridad del control de pozo primario convencional.

Finalmente, el presente proyecto propone un modelo dinámico avanzado de riesgo de reventón para evaluar el riesgo en la operación de control de golpes de gas la perforación del pozo SMG – X2, simulando numéricamente y evaluar la seguridad de una operación de perforación a presión administrada como elemento de barrera de control de pozo durante la perforación.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Antecedentes generales

En Bolivia, la predicción de explosiones o reventones por cambios de presión generalmente se realiza mediante ecuaciones estándar, pero la elección del método depende de la empresa que brinda el servicio de registro de presión. Además, debido a que utilizan procedimientos complejos, resulta muy costoso calcular estos cambios y predecir sus riesgos.

El objetivo de la perforación es la de investigar el potencial hidrocarburífero en el Devónico Inferior del campo San Miguel, como objetivo secundario, evaluar los posibles niveles de sistemas Terciario y Cretácico a través de registros eléctricos.

1.2.2 Antecedentes académicos

Eren (2018) propuso un nuevo método de cálculo de tolerancia al retroceso para ayudar a los ingenieros de perforación a planificar adecuadamente operaciones y actividades de perforación más seguras. Ojinnaka y Beaman (2018) propusieron un enfoque de modelado holístico que incluye un modelo hidráulico y considera las interacciones de las capas del pozo que conducen a golpes de pozo y pérdida de

circulación en el pozo, para mejorar el control del pozo. Zhang et al. (2019) establecieron un modelo de transferencia de calor de formación y del pozo para detectar el retroceso del pozo mediante el monitoreo de los cambios de temperatura del anillo; sin embargo, el modelo no consideró la presión de fondo.

Muchos estudios han evaluado el riesgo de incidentes de control de pozos utilizando diversas herramientas de análisis de riesgos. Las técnicas tradicionales de evaluación de riesgos, incluidos los árboles de fallas (AF), los árboles de eventos (AE) y Nudo de Corbata Bow Tie (BT), no logran capturar los efectos dinámicos de los riesgos operativos, como los cambios en las condiciones del pozo debido a los Kicks. O el equipo falla repentinamente durante el funcionamiento. operaciones de perforación y la incapacidad de evaluar dependencias secuenciales entre variables de proceso en la estimación de riesgos (Barua et al., 2016).

La red bayesiana (RB) es un método de modelado más flexible que puede realizar análisis hacia adelante y hacia atrás y es adecuado para análisis dinámicos de riesgo y seguridad (Bobbio et al., 2001; Khakzad et al., 2011, 2013^{a, b}; Cai et al. , 2013; Barua et al., 2016; Sule et al., 2018).

Los modelos bayesianos dinámicos se han utilizado para el análisis probabilístico de sistemas y operaciones dinámicos en muchas industrias, incluidas las de petróleo y gas, procesos, fabricación, informática y más. Por ejemplo, Cai et al. Usaron MDB. (2013) Evaluación cuantitativa de riesgos de factores humanos en explosiones marinas; Wu et al. (2016) Predicción y diagnóstico de accidentes de perforación en alta mar; Dong y Yue (2016) sobre la identificación de conexiones funcionales en redes neuronales biológicas; Amin et al. (2018) Sobre la evaluación dinámica de la disponibilidad de sistemas críticos para la seguridad; Zhu et al. (2019) Evaluación de daños por fatiga de plataformas de acero ortotrópicas; Luque y Straub (2019) Sobre estrategias óptimas de inspección de sistemas estructurales.

Sin embargo, hasta ahora, estos modelos bayesianos se han limitado a un post análisis de un solo paso y no pueden modelar explícitamente cambios en la probabilidad o correlación de eventos a lo largo del tiempo.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.3.1 Identificación del problema.

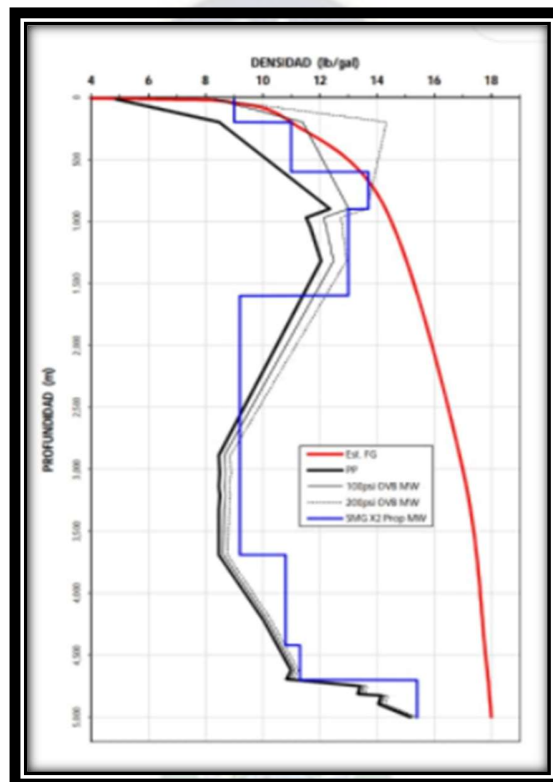
La estabilidad del pozo, es crucial para prevenir reventones y explosiones, está fuertemente influenciada por varios factores bajo condiciones límite. Estos factores incluyen presión, tensiones in situ, temperatura y tiempo. Dentro de estas condiciones límite, se pueden controlar eficazmente el tipo y las características del fluido del pozo, así como el régimen de presión. Además, las propiedades químicas del lodo, la densidad de circulación equivalente (ECD), la reología del fluido, la velocidad de circulación y la presencia de una fase gaseosa son factores importantes dentro de este grupo.

El diseño de pozos abarca varios factores mecánicos controlables, como la trayectoria del pozo, el diámetro del pozo, la profundidad del revestimiento y la vibración de la sarta.

La perforación en formaciones compuestas principalmente de lutitas o arcillas, como la formación Iquiri, a menudo genera problemas de inestabilidad en el pozo. Estas formaciones litológicas, particularmente aquellas con altas presiones de poro conocidas como formaciones sobre-presionadas, plantean desafíos importantes en términos de estabilidad de los pozos. Las fracturas naturales dentro de estas formaciones pueden provocar sucesos riesgosos como afluencias, pérdidas de circulación y atascos de tuberías, lo que genera tiempos no productivos (NPT) durante las operaciones de perforación. En casos extremos, incluso pueden ocurrir explosiones, lo que resulta en la pérdida del pozo, millones de dólares y daños potenciales a los operadores y al medio ambiente.

Para mantener la integridad del pozo, la presión dentro del pozo debe controlarse cuidadosamente a diferentes profundidades. A una profundidad de 1500 m, la presión aumenta y se requiere una densidad de lodo de 12 ppg. A medida que el pozo alcanza una profundidad de 2800 m, la presión de poro disminuye y se necesita un lodo con una densidad de 8 ppg. Más allá de los 4.000 metros, la presión de la formación vuelve a aumentar.

Figura 1. 1: Variación de la presión de poro Pozo SMG – X2



Fuente: YPFB CHACO, 2021

El gráfico presentado anteriormente, ilustra la fluctuación de los registros de pozo, lo que sugiere una variabilidad significativa en los datos. En consecuencia, se vuelve esencial utilizar una herramienta programada para estimar con precisión la presión de perforación, teniendo en cuenta las variables operativas y de control de perforación.

Por lo tanto, se puede decir que el principal problema de este trabajo de grado es que no existe un método efectivo para predecir los cambios de presión que conducen a

reventones y explosiones durante la perforación del pozo SMG X2 en el campo San Miguel.

1.3.2 Formulación del problema.

A partir de la identificación previa del problema se pueden plantear las siguientes preguntas de investigación para la realización del proyecto de titulación:

- ¿Cómo se controlar los distintos parámetros que provocan amenazas de pérdida de control, patadas o explosiones durante la perforación adjunta al pozo SMG-X2 en el campo San Miguel?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Controlar el riesgo de explosión del pozo SMG X2 mediante la aplicación de redes bayesianas dinámicas durante la operación de perforación.

1.4.2 Objetivos específicos

- Describir los conceptos de análisis dinámico de riesgos y redes bayesianas relacionados con operaciones de prevención de reventones en perforación.
- Describir los diferentes parámetros que influyen en la amenaza de pérdida de control, patadas o explosión en el sistema MPD.
- Desarrollar modelos dinámicos avanzados de riesgo de explosión basados en parámetros que afectan las amenazas de fuga, patada o explosión. Evaluación de la seguridad durante las operaciones de perforación a presión controlada en el pozo SMG – X2.

- Calcular los parámetros como flujo de circulación, altura de caja de lodo, resistencia y presión de bomba en condiciones de pozo no controladas.
- Utilizar una simulación en Excel para predecir los parámetros de falla del control del pozo y el riesgo de explosión en función de los parámetros de control de la explosión durante la perforación del pozo SMG – X2.
- Graficar la probabilidad de pérdida de circulación y la probabilidad de explosión a lo largo del tiempo.
- Proponer un plan dinámico de prevención y control de riesgos para controlar posibles explosiones durante la perforación del pozo SMG X2.
- Realizar estudios de viabilidad técnica y económica del proyecto propuesto.

1.5 JUSTIFICACIÓN.

1.5.1 Justificación teórica

El objetivo de este proyecto es utilizar modelos analíticos para evaluar la probabilidad de que ocurra una explosión durante el proceso de perforación del pozo planificado. Para lograr esto, tomaremos en cuenta los cambios en el volumen y las presiones del fluido dentro del estrato, que están influenciados por la interacción entre el pozo y la formación, así como la expansión que ocurre dentro del pozo. Además, emplearemos un enfoque de cálculo numérico programado que aprovecha el algoritmo dinámico de red bayesiana. La metodología propuesta ofrece las siguientes ventajas:

La perforación en un sistema complejo con numerosas variables se convierte en un proceso fluido y eficiente, gracias a su funcionalidad rápida y fácil de usar.

Este escenario se aplica a situaciones en las que múltiples causas y efectos pueden provocar la explosión de un pozo durante la perforación. La estimación de la probabilidad de que ocurra un suceso desfavorable a medida que avanza el tiempo, será necesario evaluar para poder realizar otras perforaciones cercanas a este pozo.

1.5.2 Justificación técnica.

Al incorporar los modelos propuestos en sistemas de perforación automatizados, es posible pronosticar con precisión la probabilidad de que ocurran incidentes indeseables en tiempo real, todo a un costo razonable. Además, estos modelos ofrecen una alternativa rentable a las complejas herramientas de software, reduciendo efectivamente el tiempo de inactividad al identificar y prevenir de manera preventiva las complicaciones de la perforación.

Al implementar medidas apropiadas y prevenir problemas potenciales como patadas, reventones y pérdida de circulación, la utilización de modelos puede mejorar efectivamente las operaciones de perforación, tanto técnica como económicamente, abarcando las operaciones durante la perforación y el diseño previo a la perforación.

1.5.3 Justificación económica.

El objetivo del análisis realizado en este estudio es mostrar la importancia y la utilización de metodologías y cálculos cuantitativos para predecir explosiones de perforación de pozos y reventones causados por fluctuaciones de presión. El empleo de técnicas cuantitativas y métodos de cálculo agilizará las operaciones y minimizará el tiempo requerido, contribuyendo en última instancia a la rentabilidad de los pozos.

A la luz de las próximas perforaciones en la región del Campo San Miguel, existe la posibilidad de explorar pozos de desarrollo, lo que requiere un examen exhaustivo de los posibles beneficios económicos que esta propuesta puede ofrecer en el futuro.

1.5.4 Justificación socio – ambiental

Al gestionar eficazmente las fluctuaciones de presión durante la fase de perforación, el proyecto garantiza un entorno de trabajo seguro y previene posibles accidentes que podrían dañar al personal. Además, este minucioso análisis no tiene ningún impacto negativo sobre el medio ambiente y previene eficazmente cualquier contaminación mediante el control de accidentes y explosiones.

1.6 ALCANCE

1.6.1 Alcance temático

El núcleo del proyecto gira en torno a la identificación de un enfoque matemático para calcular la presión de poro en el Campo San Miguel. Con la existencia de pozos perforados, este esfuerzo resultará invaluable para validar la precisión de estos modelos matemáticos, teniendo en cuenta las condiciones y limitaciones únicas de cada pozo individual. Además, se introducirán técnicas cuantitativas para ayudar a predecir los valores de presión de poro específicamente para el pozo SMG-X2.

En cambio, el proyecto centra su atención en la perforación, la seguridad industrial, la simulación numérica y la programación aplicada. Nuestra metodología de investigación es cuantitativa, ya que analizamos datos precisos de pozos para generar nueva información cuantitativa. Específicamente, el alcance principal es determinar la probabilidad de que ocurra una explosión debido a la presión de formación en el pozo SMG-X2 ubicado en el campo San Miguel y pozos cercanos, así como en potenciales pozos futuros en el mismo campo. Este enfoque permite una comprensión y evaluación integral de los riesgos involucrados.

1.6.2 Alcance temporal

Para preparar el proyecto se iniciará un período de 3 meses a partir de este mes de 2023, con datos históricos de enero de 2021 a diciembre de 2022.

1.6.3 Alcance geográfico.

Campo San Miguel está ubicado en el departamento Carrasco de Cochabamba y forma parte del complejo Chimoré. Estos datos corresponden a datos obtenidos del Departamento de Ingeniería de Perforación de la Sede del CNIH de YPFB en Santa Cruz.

Tabla 1. 1: Características del pozo

Datos del pozo	
Ubicación:	Cochabamba, Bolivia
Nombre:	SMG-X2
Campo:	San Miguel
Operadora:	YPFB CHACO S.A.
Categoría:	Pozo exploratorio
Tipo de Pozo:	Vertical
Objetivo:	Arenisca Roboré
Tipo de terminación:	Simple o simple selectivo (13Cr)
Ubicación del pozo:	
Proyección:	UTM Zona 20S (66 W to 60 W)
Datum:	PSAD 1956 - Bolivia
Formación Objetivo:	Roboré
Coordenadas de Superficie:	UTM Norte: 8,089,259.85 UTM Este: 332,313.02

Coordenadas de Sub Suelo:	UTM Norte: 8,089,259.85 UTM Este: 332,313.02
Tamaño Objetivo:	E-O 100 m Largo & N-S 80 m Ancho
Profundidad Final (m MD/TVD):	5,000.00
Pozos de Referencia:	CRE-X1, CRE-X2D, CRC-X1, CRC-10, CRC-6 y KTR-2

Fuente: YPFB Chaco S.A., 2015

1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

1.7.1 Hipótesis de investigación científica

Al implementar redes bayesianas dinámicas durante todo el proceso de perforación, es posible gestionar y mitigar eficazmente el riesgo de explosión asociado con el pozo SMG X2.

1.7.2 Enfoque de investigación científica

En este caso particular, el enfoque de investigación es cuantitativo, lo que implica un método sistemático de recopilación y análisis de información de múltiples fuentes, como secciones de perforación y porcentajes de riesgo de explosión.

La cuantificación de los parámetros de falla del control del pozo y el riesgo de explosión durante la perforación del pozo SMG-X2 se logra mediante la utilización de herramientas matemáticas como modelos bayesianos y cálculos de probabilidad.

1.7.3 Tipo de investigación

La metodología de investigación utilizada en este estudio es descriptiva, ya que examina los atributos del riesgo de explosión y la probabilidad de que tal evento ocurra a diferentes profundidades. A través de esta investigación se establecerán los parámetros de posibles amenazas a los pozos, los riesgos se clasificarán como altos, medios o bajos y se detallarán los plazos en los que puede ocurrir una potencial explosión.

1.7.4 Métodos de investigación científica

1.7.4.1 Método inductivo

Al utilizar el método inductivo, se puede emplear un proceso lógico que implica analizar datos para llegar a una conclusión amplia derivada de casos específicos. En este escenario particular, se sacará la conclusión sobre la ocurrencia de explosiones o reventones a diversas presiones durante futuras operaciones de perforación y en pozos posteriores, con base en los datos iniciales sobre la probabilidad de escalada de riesgo del pozo SMG-X2.

1.7.4.2 Método sintético

En este caso, el método de los algoritmos bayesianos dinámicos se dilucidará mediante el uso de diagramas de flujo, que proporcionarán una explicación detallada de todo el proceso, desde la introducción de datos hasta el cálculo y la iteración, lo que en última instancia conducirá a recomendaciones para una gestión eficaz del pozo. Este enfoque sintético implica reconstruir una comprensión integral mediante el análisis y la integración de distintos elementos.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 CONTROL DE PRESIÓN DURANTE LA PERFORACIÓN

2.1.1 Definición

Un método de perforación adaptativo utilizado para controlar la presión anular con precisión en todo el pozo. Después de determinar el ambiente de presión de fondo de pozo, los perforadores manejan la presión del pozo acotada por los límites de las propiedades de las formaciones. La presión anular se mantiene levemente por encima de la presión de poro para prevenir el influjo de los fluidos de la formación en el pozo, pero se mantiene bien por debajo de la presión de iniciación de la fractura. A menudo, pueden implementarse acciones correctivas rápidas para encarar las variaciones de presión observadas. El proceso MPD puede utilizar una diversidad de técnicas, incluyendo en la construcción del pozo el control de la contrapresión, el ajuste de la densidad del lodo, la modificación de la reología de los fluidos, el ajuste del nivel del fluido anular, el control de la fricción por circulación y la incorporación de la geometría del pozo (YPFB, 2023), además que es posible aplicar las Redes Bayesianas para un análisis dinámico de riesgo a este método de perforación.

Se ha convertido en práctica común la utilización del proceso de control de pozos para controlar los riesgos y costos de perforar pozos que poseen límites estrechos de presión de fondo, mediante el manejo activo del perfil de presión del pozo. El control dinámico de las presiones anulares permite la perforación de pozos que de otro modo resultarían impracticables. (YPFB, 2023)

2.2 SURGENCIAS

Es una entrada no deseada de fluidos de la formación dentro del pozo. Si se la reconoce y se controla a tiempo, una surgencia puede ser manejada y eliminada del

pozo en forma segura. Si se la deja proseguir su curso, puede tornarse incontrolable, que es lo que se conoce con el nombre de REVENTÓN.

La mejor manera de evitar una surgencia es que el fluido del pozo sea lo suficientemente pesado para controlar las presiones de formación y liviano para evitar que se pierda circulación o que se disminuya la velocidad de perforación. Existen procedimientos para predecir las presiones de formación que son útiles para evitar surgencias, las siguientes son fuentes para predecir las presiones de formación:

1. Indicación geológica sísmica e histórica.
2. Indicadores obtenidos durante la perforación.
3. Perfiles de pozo obtenidos mediante cable.

2.2.1 Indicadores de presión durante la perforación

A continuación, se detallan las señales más habituales que indican una zona de presión anormal:

2.2.1.1 Variación en la velocidad de penetración:

Es uno de los métodos más ampliamente aceptados para determinar cambios en la presión de poro. Un abrupto cambio en la velocidad de perforación, indica que estamos perforando una nueva formación que podría ser permeable. Sin embargo, existen otros factores que afectan la velocidad de penetración: Cambios en la formación, factores hidráulicos, peso sobre el trepano, tipo de trepano, estado del trepano, velocidad de rotación, propiedades del fluido, peso del lodo, el perforador.

2.2.1.2 Derrumbes

A medida que la presión de formación supera la presión de la columna de lodo, esta pierde eficacia para sostener las paredes del pozo y eventualmente al material pelítico a desmoronarse de las paredes del pozo, este derrumbe también depende del grado de buzamiento de la formación, compactación etc.

2.2.1.3 Incremento en el contenido de gas

Incremento del contenido de gas en el fluido de perforación constituye una buena señal para detectar zonas de presión anormal, sin embargo, los recortes con gas no siempre son consecuencia de una condición no balanceada.

2.2.1.4 Variación en el tamaño de los recortes

Los recortes son fragmentos de roca desprendidos de la formación por la acción del trepano, el tamaño o forma de los recortes depende en gran medida del tipo de formación del tipo de trepano, peso sobre el trepano, desgaste del trepano y de la diferencia de presión.

2.2.1.5 Aumento del torque y del arrastre

Durante una perforación normal, el torque rotativo aumenta gradualmente a medida que se gana profundidad debido al contacto entre las paredes del pozo y la herramienta. El incremento en la presión de formación provoca una mayor cantidad de recortes.

2.2.1.6 Disminución de la densidad de lutita

En condiciones normales de presión, las Lutitas sufren una consolidación normal y su densidad aumenta uniformemente a medida que aumenta la profundidad. Este aumento uniforme permite predecir la densidad de la arcilla. Cualquier reducción en la tendencia puede ser interpretada como una zona de alta presión.

2.2.1.7 Incremento en la temperatura de la línea de flujo

El sello existente en la parte superior de la zona de transición limita el movimiento de agua y como resultado, se registran temperaturas por encima de lo normal tanto en la zona de transición como en la formación con alta presión que está por debajo.

2.2.2 Causas de una surgencia

Siempre que la presión de formación exceda la presión que ejerce la columna de fluido del pozo puede ocurrir que el fluido entre en el pozo. Esto puede tener su origen en uno o una combinación de los siguientes factores: Densidad insuficiente de lodo; Llenado deficiente del pozo; Pistoneo compresión, Pérdida de circulación;

2.2.2.1 Densidad insuficiente de lodo

Una causa habitual de surgencias es la densidad del fluido que no tiene el peso suficiente para controlar la formación. El fluido del pozo debe ejercer suficiente presión hidrostática para al menos igualar la presión de formación. Puede haber muchas causas para una densidad incorrecta de fluido y estas son: Penetración de agua de lluvia al sistema de circulación, Corte del peso de fluido por agregar agua intencionalmente en el sistema. Cada vez que se mezcle, se agregue o se transfiera fluido a las piletas se debe notificar al responsable del pozo.

2.2.2.2 Efecto de pistoneo y compresión

Cada vez que se mueva el sondeo a través del fluido aparecen fuerzas de pistoneo (swab) o de compresión (surge). Estos están relacionados con las siguientes variables que los afectan: Velocidad de movimiento de la herramienta; Espacio entre la herramienta y las paredes del pozo; propiedades del fluido; complicaciones que restringen el espacio entre herramienta y pozo.

2.2.2.3 Obstrucciones en el pozo

Cuando hay obturación del pozo se debe recordar que puede haber presión atrapada bajo la misma debido a un packer, un tapón de cemento o una cañería colapsada.

2.2.2.4 Problemas con el equipamiento

El equipamiento suele estar diseñado para condiciones de trabajo duras. Esta siempre sujeto a desgaste rotura. Hasta la herramienta mejor diseñada se desgasta eventualmente, o sufre fatiga aun con los mayores cuidados.

El agua salada, el H₂S, la exposición a fluidos de formación corrosivos, el traslado de equipo, etc.; todos estos elementos contribuyen al deterioro. Se debe realizar pruebas del equipo en cada pozo, cada dos semanas o de acuerdo a las políticas que maneja la empresa operadora.

2.2.3 Blowout o reventón

Flujo descontrolado de fluidos de formación proveniente de un pozo. Un flujo descontrolado de fluidos de formación desde el pozo o hacia las zonas menos presurizadas del subsuelo (reventón subterráneo). Los flujos descontrolados no pueden ser contenidos utilizando barreras instaladas previamente y requieren la intervención de servicios especiales (YPFB, 2023)

2.3 DEFINICIÓN DE MPD

La perforación con presión controlada es una forma avanzada de control primario de pozo que utiliza un sistema de fluido cerrado y presurizable para controlar la presión del pozo de una manera más precisa.

El objetivo de MPD es utilizar un sistema cerrado y presurizable de retorno de lodos para controlar la presión de fondo de pozo (bottom hole pressure, BHP) en una forma que elimina muchos de los problemas de perforación y estabilidad del pozo que son inherentes a las técnicas de perforación convencional. Dos ejemplos: presión de fondo de pozo constante (constant bottom hole pressure, CBHP) y perforación con tapón de lodo presurizado (pressurized mud cap drilling, PMCD).

2.3.1 Evitación del ciclo pérdida/surgencia

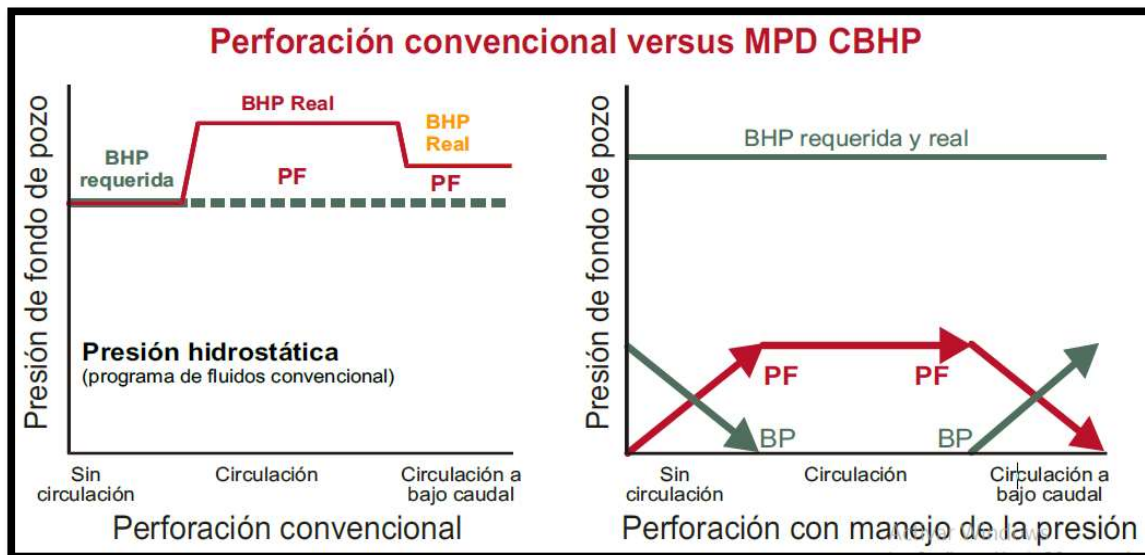
Al perforar dentro de ventanas de perforación estrechas, al detener las bombas de lodo (para realizar conexiones o por otros motivos) se genera la posibilidad de producir un ciclo de pérdida/surgencia. Cuando las bombas se detienen, el fluido de perforación pierde la componente de fricción en el anular (FP) de su densidad equivalente de circulación (DEC). Cuando no se está circulando, la DEC consiste únicamente en la presión hidrostática del lodo. Si la presión hidrostática del fluido ya está cerca de la presión del reservorio, existe la posibilidad de que se produzca un influjo de hidrocarburos. Cuando las bombas vuelven a arrancar, la DEC aumenta.

Si la misma ya está cerca del gradiente de fractura de la formación existe el riesgo de pérdida de fluidos, aprisionamiento diferencial y rotura por torsión.

El MPD resuelve el problema aplicando la variante CBHP por que la DEC—y la PF (presión en fondo de pozo, BHP) efectiva—se encuentran bajo un control exacto en todo momento. Cuando las bombas se detienen, el sistema puede aplicar una contrapresión en superficie para compensar la diferencia por la pérdida de fricción en

el anular PF. Cuando las bombas arrancan, el sistema puede reducir la presión para compensar, a medida que la fricción vuelve a convertirse en un componente de la DEC.

Figura 2. 1: Perforación convencional vs Perforación con MPD



Fuente: Manual básico de control de pozo petrolero, isuu.com, 2020

Resultados: perfil de presión de pozo más constante, no se producen kicks por disminución de la presión cuando no hay circulación y no se producen pérdidas durante la circulación.

2.3.2 Perforación con tapón de lodo presurizado PMCD

La PMCD (pressurized mud cap drilling) resuelve el problema de las pérdidas de lodo en las fracturas, cavernas u otros posibles riesgos de perforación cuando hay pérdidas de circulación. Al utilizar PMCD, se bombea un lodo pesado y viscoso por el anular y ese lodo funciona como un tapón sobre la zona de pérdida de circulación. Luego, se utiliza un fluido de perforación "de sacrificio" de bajo costo (como el agua de mar) para perforar. La perforación se agiliza con un fluido liviano, y tanto el fluido como los recortes terminan en la zona de pérdida de circulación;

no se producen problemas de eliminación de los recortes ni de gases nocivos que alcancen la superficie. En muchos casos, los recortes y el fluido de perforación también ayudan a estabilizar la formación.

2.3.3 MPD: beneficios significativos

- Evitando los problemas de TNP (Tiempo No Productivo) que produce la perforación convencional, como la pérdida de circulación, los kicks o golpes de presión, las zonas de gas problemáticas y el aprisionamiento por presión diferencial¹;
- Aumentando la ROP y extendiendo la vida útil de la broca, eliminando la necesidad de bajar y sacar la herramienta reduciendo el TNP (Tiempo No Productivo);
- Permitiendo el acceso a posibles activos y reservorios que anteriormente se consideraban imposibles de perforar;
- Reduciendo la cantidad de tuberías de revestimiento y en algunos casos, logrando una mayor profundidad para el asentamiento de las zapatas de las mismas;
- Reduciendo los efectos y los riesgos para la salud, la seguridad y el medioambiente al controlar los fluidos y las presiones en todo momento. Más progreso y desarrollo

2.4 EQUIPO DE SUPERFICIE

2.4.1 Preventor de reventones

Se trata de una parte del equipo de perforación que consiste en un juego de Válvulas hidráulicas con orificios de tamaño considerable, niveles de alta presión y además accionan con rapidez.

¹ NTP o tiempo no productivo, es cualquier evento que interrumpe el progreso de una operación planificada causando un retraso de tiempo.

2.4.2 Preventor anular

Son a veces denominadas tipo Bolsa, tipo esféricas o simplemente Hydrill.

Se utiliza para cerrar sobre cualquier diámetro de tubería que este en el pozo.

Se utiliza como lubricador para bajar o sacar herramienta bajo presión.

El Preventor anular consiste en un empaquetador circular de caucho, un pistón un cuerpo y una tapa.

La presión máxima de cierre para estos preventores es de 1500psi. Una presión de cierre mínima mantendrá el empaquetador en buenas condiciones.

En general para mover la tubería bajo presión, la presión de cierre debe ser regulada en aproximadamente 800 a 900 Psi.

El elemento empaquetador está fabricado de un Caucho de alta resistencia o de un material tipo caucho que por lo general moldea alrededor de una serie de lengüetas. Aunque el anular puede cerrar sobre una multitud de tuberías y formas solo debe probarse utilizando el cuerpo de la sarta de trabajo. Hay ocasiones en que un sello particular resulta necesario tal es el caso cuando se cierra alrededor de un cable de perfilaje o vástago. La mayoría de los fabricantes de equipos de BOP poseen una gran variedad de preventores anulares de propósito especial. En general. la función específica de cada uno se reconoce por su denominación.

Figura 2. 2: Preventor anular

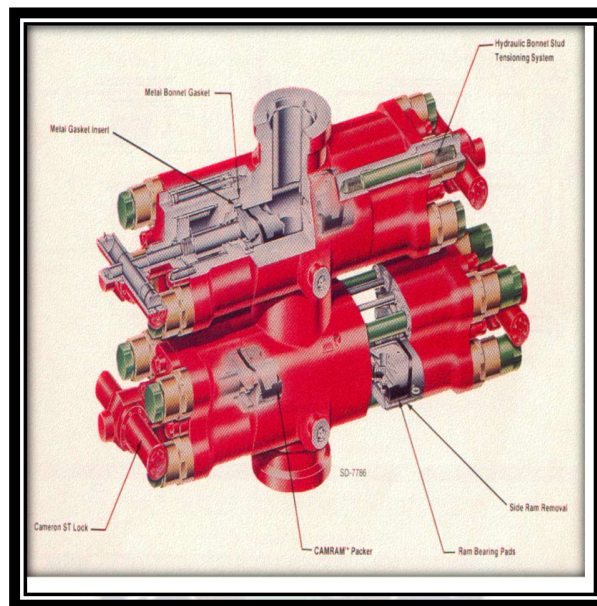


Fuente: Manual básico de control de pozo petrolero, isuu.com, 2020

2.4.3 Esclusas de corte

Son otro tipo de rams ciegos que tiene hojas filosas especiales para cortar tubulares (tubería, sondeo, portamechas). Deben utilizarse presiones mayores que las reguladas normales y/o potenciadores hidráulicos.

Figura 2. 3: Esclusa de corte



Fuente: Manual básico de control de pozo petrolero, isuu.com, 2020

En el momento de probar su funcionamiento no deben cerrarse bruscamente sino a través de una presión reducida de más o menos 200psi. Cuando se prueban estas el material de la empaquetadura se extruye, no se recomienda ensayos de presión de las esclusas de corte mas de lo necesario.

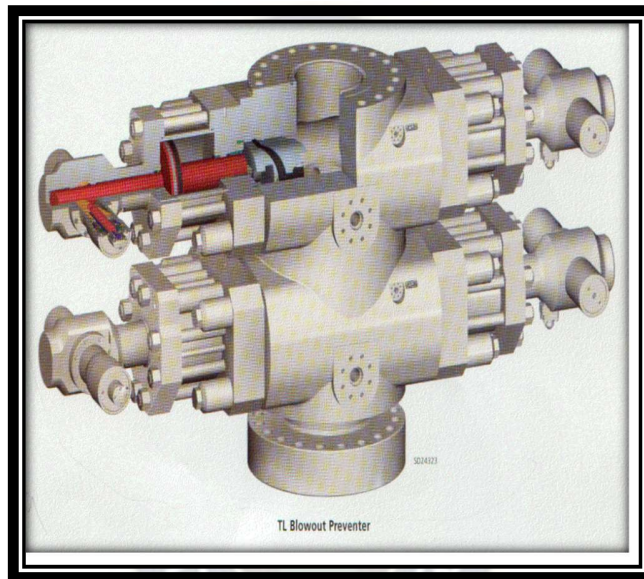
2.4.4 Rams ciegos o de cierre total

Las esclusas ciegas cuentan con elementos empaquetadores de buen tamaño y están diseñadas para cerrar sobre el pozo abierto.

2.4.5 Esclusa de diámetro variable

Los rams de diámetro variable sellan sobre distintos diámetros de tubería o vástagos hexagonales, sirven también como esclusa primaria para un diámetro de tubería y de reserva o alternativo para otro diámetro distinto.

Figura 2. 4: Esclusa de diámetro variable



Fuente: Manual básico de control de pozo petrolero, isuu.com, 2020

En aquellos pozos con columnas de diámetro combinados y en los que el espacio resulta muy importante, utilizar rams de diámetro variable.

2.4.6 Unidades acumuladoras de presión

Al producirse una surgencia es esencial cerrar el pozo lo mas rápido posible para evitar una surgencia mayor. En general los sistemas manuales son mas lentos que las unidades hidráulicas.

Hoy en día, el equipo estándar utiliza un fluido de control que puede consistir en un aceite hidráulico o una mezcla especial de productos químicos y agua que almacena en botellones o cilindros del acumulador a 3000psi.

Una cantidad suficiente de fluido se almacena bajo presión para que todos los componentes del conjunto de BOP puedan funcionar con presión y además mantener siempre una reserva de seguridad. A medida que la presión en los botellones del acumulador disminuye, las bombas de aire o eléctricas instaladas para recargar la unidad arrancan en forma automática.

2.4.6.1 Requisitos de volumen

El sistema del acumulador debe tener capacidad suficiente para proveer el volumen necesario para cumplir o superar los requerimientos mínimos de los sistemas de cierre. La mayoría de los operadores y contratistas prefieren usar un factor de tres veces del volumen necesario para cerrar y mantener cerradas todas las válvulas de los preventores. La idea principal es mantener una reserva energética suficiente que la restante de la precarga de Nitrógeno.

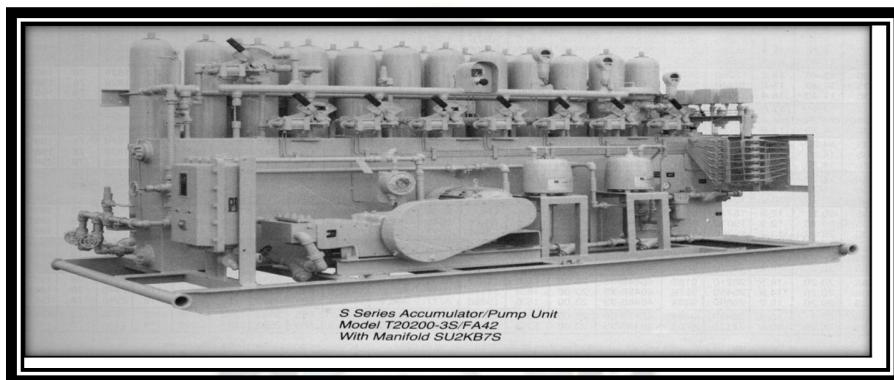
2.4.6.2 Fluidos de carga del acumulador

El fluido utilizado para el acumulador será un lubricante anticorrosivo anti espumoso y resistente al fuego y a las condiciones climáticas adversas. Además, debe impedir el resquebrajamiento de los elementos selladores de caucho. El Aceite hidráulico posee estas características.

2.4.6.3 Precarga de nitrógeno

Un elemento importante del acumulador es la precarga de Nitrógeno de 1000psi en los botellones en caso de que los botellones pierdan la carga por completo no podrá almacenarse ningún fluido adicional bajo presión.

Figura 2. 5: Botellones del acumulador



Fuente: Manual básico de control de pozo petrolero, isuu.com, 2020

2.5 EVALUACIÓN DEL RIESGO

2.5.1 Fundamentos del riesgo

De acuerdo con la normativa técnica boliviana NTS – 009/23 TODOS LOS PROCESOS INDUSTRIALES Y EMPRESAS, en este caso el proceso de perforación exploratoria está sujeta a un análisis y evaluación del riesgo, teniendo como base las circunstancias, eventualidades o contingencias que en el desarrollo de las obras civiles, transporte y movilización de equipos, perforación y pruebas de producción puedan generar emergencias que afecten vidas humanas, el medio ambiente o la infraestructura asociada. Estos procesos están obligados a cumplir normas de seguridad en base a un análisis de riesgo identificando sus parámetros operativos.

El **riesgo** (R) se define como la probabilidad de que una amenaza se haga realidad provocando daños sobre las personas, el ambiente y los bienes materiales. Se obtiene

de relacionar la **amenaza** (A) con la **vulnerabilidad** (V) de los elementos expuestos en la presente norma. El riesgo (R) es, por tanto, función de la frecuencia de ocurrencia de un peligro potencial o un evento amenazante y de la vulnerabilidad de los elementos ante el evento amenazante.

$$Riesgo = Amenaza \times Vulnerabilidad$$

Ecuación 2. 1: Función del riesgo

2.5.2 Matriz de riesgos

Para la valoración del riesgo se plantea una matriz, en donde se enfrenta un valor de amenaza (número matricial de amenaza) con un valor de vulnerabilidad (número matricial de gravedad de consecuencias). El valor máximo del riesgo es de 100, correspondiente a una amenaza cuyo valor de probabilidad máximo sea 5, multiplicado por una vulnerabilidad con gravedad máxima de 20.

A continuación, se presentan la matriz para la valoración de riesgos.

Tabla 2. 1: Matriz de riesgo

PROBABILIDAD RELATIVA DE AMENAZA		GRAVEDAD RELATIVA DE VULNERABILIDAD				
		Insignificante	Marginal	Significativo	Crítico	Desastroso
		1	2	5	10	20
Muy probable	5	5	10	25	50	100
Probable	4	4	8	20	40	80
Ocasional	3	3	6	15	30	60
Muy eventual	2	2	4	10	20	40
Improbable	1	1	2	5	10	20

Fuente: Organización y funcionamiento del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, 2013

Para cada riesgo en particular pueden establecerse las siguientes categorías:

2.5.2.1 Riesgo aceptable

Un escenario situado en esta región de la matriz significa que la combinación de la probabilidad-vulnerabilidad no representa un riesgo significativo por lo que no amerita la inversión inmediata de recursos y no requiere una acción específica para la gestión sobre el factor de vulnerabilidad considerado en el escenario. Numéricamente, se trata de un riesgo con una calificación ≤ 5 unidades.

2.5.2.2 Riesgo tolerable

Un escenario situado en esta región de la matriz significa que aunque deben desarrollarse actividades para la gestión sobre el riesgo, éstas tienen una prioridad de segundo nivel. Son riesgos cuya calificación está entre 6 y 20 unidades.

2.5.2.3 Riesgo inaceptable

Un escenario situado en esta región de la matriz significa que se requiere siempre desarrollar acciones prioritarias e inmediatas para su gestión, debido al alto impacto que tendrían sobre el sistema, la salud humana y/o el medio ambiente. Son riesgos cuya calificación está por encima de 20 unidades.

2.5.3 Matriz de aceptabilidad de riesgos

A continuación, se presenta la matriz de aceptabilidad de riesgos para cada nivel.

Tabla 2. 2: Matriz de aceptabilidad de riesgo

PROBABILIDAD RELATIVA		GRAVEDAD RELATIVA				
		Insignificante	Marginal	Significativo	Crítico	Desastroso
		1	2	5	10	20
Muy probable	5	Aceptable	Tolerable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
Probable	4	Aceptable	Tolerable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
Ocasional	3	Aceptable	Tolerable	Tolerable	Inaceptable	Inaceptable
Muy eventual	2	Aceptable	Aceptable	Tolerable	Tolerable	Inaceptable
Improbable	1	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Tolerable	Tolerable

Fuente: Organización y funcionamiento del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres,

2013

2.6 ANÁLISIS DE RIESGOS EN LA PERFORACIÓN DE POZOS

2.6.1 Evaluación de la amenaza

La amenaza es la condición física, química o biológica de origen natural, tecnológico o humano, con el potencial destructivo de causar consecuencias no deseables o daños serios sobre la población, la infraestructura o el ambiente. Su magnitud se expresa en términos de probabilidad de ocurrencia, la cual, a su vez, es función de la frecuencia de ocurrencia del evento peligroso dentro de un lapso específico o tiempo en un área determinada.

A continuación, se presentan los criterios de clasificación de las amenazas identificadas de acuerdo con la probabilidad y frecuencia de ocurrencia del fenómeno:

Tabla 2. 3: Probabilidades en función de la frecuencia del evento amenazante

ÍNDICE	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	Improbable	Menos de 1 caso cada 50 años
2	Muy Eventual	Hasta 1 caso cada 50 años
3	Ocasional	Hasta 1 caso cada 20 años
4	Probable	Hasta 1 caso cada 5 años
5	Muy probable	Más de 1 caso al año

Fuente: Organización y funcionamiento del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, 2013

La evaluación de la probabilidad se basa en las experiencias y estadísticas existentes para situaciones similares y en este caso hace referencia a la probabilidad de materialización de las amenazas identificadas.

2.6.1.1 Identificación de causas y eventos amenazantes durante la perforación de pozos exploratorios

Para la perforación del pozo exploratorio y teniendo en cuenta que las causas o eventos amenazantes se pueden asociar de acuerdo al sujeto generador de la amenaza, estas se dividieron en los siguientes grupos:

Figura 2. 6: Identificación de amenazas en perforación



Fuente: Organización y funcionamiento del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, 2013

2.6.1.2 Amenazas exógenas

2.6.1.2.1 Fenómenos naturales

En este grupo se incluyen las amenazas de fenómenos naturales como las inundaciones, eventos torrenciales, fenómenos de remoción en masa, incendios forestales y sismicidad, entre otros, que, aunque son factores exógenos, en determinado momento pueden afectar las instalaciones, actividades y al personal que se encuentra laborando durante el desarrollo de las obras de infraestructura y/o perforación.

2.6.1.2.2 Daños por terceros

Son aquellas acciones ejecutadas por personal ajeno a la empresa que algunas veces pueden ser con mala intención como: robo de elementos, atentados, vandalismos, accidentes por el desarrollo de otras actividades en áreas cercanas, invasión de terrenos de la empresa, quema de basuras, presencia de fumadores, entre las más importantes.

2.6.1.3 Amenazas operacionales

En este grupo se presentan las amenazas asociadas a accidentes operacionales por fallas humanas (técnicas) o daños en los sistemas operativos requeridos por las actividades del proyecto, susceptibles de generar emergencias que afecten al personal, a la comunidad y al medio ambiente. Entre estos accidentes se pueden contemplar mala operación de equipos o elementos, corrosión de tuberías y componentes de los sistemas, defectos en la construcción, y rupturas superficiales por causas diversas. El descuido, negligencia, desconocimiento o mala intención por parte del personal, son las razones más importantes por las cuales se pueden presentar este tipo de situaciones. De acuerdo con esta metodología, las principales amenazas identificadas en cada una de las etapas del proyecto se presentan a continuación.

Tabla 2. 4: Amenazas por accidentes operacionales en cada etapa

ETAPA DEL PROYECTO	AMENAZAS POR ACCIDENTES OPERACIONALES
Obras civiles	Accidentes de los vehículos Accidentes de trabajo
Perforación del pozo	Accidentes de los vehículos Accidentes de trabajo Incendio y explosión Reventones del pozo (<i>Blowout</i>) Derrames de almacenamiento y manejo de químicos y combustibles.
Pruebas de producción	Accidentes de trabajo Incendio y explosión Reventones del pozo (<i>Blowout</i>) Derrames de almacenamiento y manejo de químicos y combustibles. Derrames de hidrocarburo en suelo y cuerpos de agua

Fuente: Organización y funcionamiento del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, 2013

A continuación, se realiza una descripción de las principales amenazas identificadas en la tabla anterior, que tienen el potencial de desencadenarse en una o más etapas del proyecto de perforación.

2.6.1.3.1 Accidentalidad de vehículos

Durante las obras civiles y la perforación, se requerirá el movimiento de maquinaria pesada y vehículos para el transporte de personal, lo cual puede conllevar a accidentes de tránsito con pérdidas humanas y deterioro de infraestructura transportadora y transportada. Estos accidentes se pueden presentar por altas velocidades, excesos de confianza de los conductores, mal estado mecánico de los vehículos, deficiencias en la señalización, lluvias fuertes y mal estado de las vías.

2.6.1.3.2 Accidentes de trabajo

Este ítem se refiere a los accidentes que se pueden presentar directamente en el personal de campo como mutilaciones, fracturas, lesiones, golpes, quemaduras, choques eléctricos, intoxicación, etc. Pueden ocurrir por falta de capacitación, entrenamiento y elementos de protección personal (EPP's), incompetencia, descuidos, etc. Para este riesgo en particular, las variables de amenaza y vulnerabilidad están directamente asociadas, ya que hay eventos cuya amenaza es muy eventual pero de vulnerabilidad crítica (ejemplo la muerte de algún operador); y a su vez es muy probable que se presenten amenazas de vulnerabilidad marginal (cortadas, raspaduras, golpes leves, etc.).

2.6.1.3.3 Incendio y/o explosión de instalaciones

La ocurrencia de fugas o volatilización de gases generadas por el manejo de combustibles puede dar lugar a incendios o explosiones que provoquen lesiones o pérdidas humanas, deterioro de la infraestructura y contaminación del área. La fuente de este evento está dada por la inadecuada disposición y utilización de equipos, el inadecuado manejo de plantas generadoras de energía o cables de conducción eléctrica, unido a la presencia de gas en la locación durante la ejecución de las pruebas de producción.

2.6.1.3.4 Reventones del pozo ("BlowOut")

La ocurrencia de sobre-presión proveniente de la formación objetivo puede dar lugar a irrupciones abruptas de hidrocarburos en la cabeza del pozo y generar un reventón o explosión provocando lesiones, pérdidas humanas y contaminación del área circundante.

2.6.1.3.5 Derrames en el almacenamiento y manejo de químicos y combustibles

La necesidad de almacenar y manipular productos como combustibles y sustancias químicas irritantes o inflamables genera un riesgo de derrame, con alto potencial de afectación al medio ambiente.

2.6.1.3.6 Derrames de hidrocarburo

El principal evento amenazante es la manipulación del crudo mismo durante las actividades del proyecto, lo que puede llevar a derrames en tierra o en cuerpos de agua, desencadenados principalmente por fallas o accidentes de los carrotanques que transportan el crudo hasta la estación seleccionada.

2.6.2 Evaluación de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad es la susceptibilidad de un elemento o conjunto de elementos de un sistema a sufrir daños o fallas ante la presencia de un fenómeno que, por su magnitud, es potencialmente destructivo o desestabilizador. La identificación de las categorías de consecuencias o factores de vulnerabilidad, dentro de un análisis de riesgo, permiten determinar los efectos negativos que sobre el sistema puedan tener los siniestros que llegaran a presentarse.

2.6.2.1 Salud y vidas humanas

Se refiere al número, tipo y gravedad de las víctimas que se pueden producir entre empleados, personal de emergencia y la comunidad.

2.6.2.2 Medio Ambiente

Observa la magnitud relativa de la gravedad del evento, que al igual que en la evaluación ambiental es función de la cobertura y la gravedad del impacto generado por la amenaza.

2.6.2.3 Infraestructura y/o condición operativa

Se refiere a la gravedad del evento con respecto a la suspensión de las actividades del proyecto de perforación, en función de daños totales o parciales de los equipos y la infraestructura en general.

A continuación, se presentan los criterios para la clasificación de la vulnerabilidad en los 3 factores previamente definidos.

Tabla 2. 5: Criterios de calificación de vulnerabilidad

CALIFICACIÓN	GRAVEDAD DE LAS VÍCTIMAS
20	DESASTROSA (Más de una muerte o más de veinte heridos)
10	CRÍTICA (Una muerte y/o hasta veinte heridos)
5	SIGNIFICATIVA (Incapacidad permanente)
2	MARGINAL (Una o más lesiones leves con incapacidad temporal)
1	INSIGNIFICANTE (Sin lesiones o lesiones sin incapacidad)
CALIFICACIÓN	GRAVEDAD PARA LA OPERACIÓN
20	DESASTROSA (Suspensión mayor de 60 días)
10	CRÍTICA (Suspensión entre 30 y 60 días)
5	SIGNIFICATIVA (Suspensión entre 5 y 30 días)
2	MARGINAL (Suspensión entre 2 y 5 días)
1	INSIGNIFICANTE (Suspensión hasta de 2 días)
CALIFICACIÓN	GRAVEDAD PARA EL MEDIO AMBIENTE
20	DESASTROSA (Impactos graves o irreversibles de cobertura regional)
10	CRÍTICA (Impactos significativos de cobertura regional y local)
5	SIGNIFICATIVA (Impactos significativos de cobertura puntual)
2	MARGINAL (Impactos significativos a medios, de cobertura puntual)
1	INSIGNIFICANTE (Impactos medios y no significativos)

Fuente: Organización y funcionamiento del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, 2013

Cuando una amenaza puede comprometer vidas humanas, la operación y el medio ambiente en condiciones diferentes de vulnerabilidad, para efectos de la evaluación del riesgo se tomará la máxima calificación, con el fin de cubrir la condición más crítica.



CAPÍTULO III: MODELO DINÁMICO DE RIESGO DE REVENTÓN PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DURANTE UNA OPERACIÓN DE PERFORACIÓN

3.1 PROBABILIDAD BAYESIANA

3.1.1 Teorema de Bayes

El mayor enfoque que se hace en un análisis dinámico de riesgos es predecir en prioridad la probabilidad de ocurrencia de un evento, que en este caso es un accidente (Skolagden, 2012). Es necesario entonces obtener una función de probabilidad en función de una variable θ (por ejemplo, la distribución de probabilidad de falla de una válvula de control dentro de la planta de Río Grande).

La función de distribución de probabilidad, puede ser estimada de muchas formas, como ser por análisis histórico de datos, monitoreo y registro de datos, razonamiento deductivo a través de análisis cuantitativo y cualitativo y etc. Para el análisis de riesgos, se utiliza como teorema central la función de distribución probabilística desarrollada por el teorema de Bayes y se expresa como:

$$f_1(\theta/E) = \frac{f_0(\theta)L(E/\theta)}{\int f_0(\theta)L(E/\theta)d\theta}$$

Ecuación 3. 1: Función de distribución probabilística desarrollada por Bayes

Donde:

$f_1(\theta/E)$, es la función de probabilidad posterior de θ dada un dato de evidencia E .

$f_0(\theta)$, es la función de probabilidad de θ

$L(E/\theta)$, es la función de probabilidad de una evidencia E respecto a θ

En el caso de tener valores discretos de probabilidad, la ecuación (3.1) se puede simplificar como la siguiente expresión:

$$P(\theta/E) = \frac{P(\theta)L(E/\theta)}{\sum P(\theta)L(E/\theta)}$$

Ecuación 3. 2: Función de distribución probabilística con valores discretos

En las ecuaciones (3.1) y (3.2) el denominador suele normalizarse para simplificar los cálculos; por tanto, los denominadores $f_1(\theta/E) \propto f_0(\theta)L(E/\theta)$ son directamente proporcionales y son funciones conjugadas. Por ejemplo, si consideramos la función de distribución de probabilidad de falla de una válvula como una distribución β , tenemos que: $f_0(\theta) \propto \theta^\alpha(1-\theta)^\beta$ y la función de probabilidad puede ser estimada utilizando una función binomial de distribución: $L(E/\theta) \propto \theta^m(1-\theta)^{m-n}$. Los parámetros de la distribución beta son α y β , los parámetros de la función binomial son m y n .

Como el resultado de la fusión de ambas funciones probabilísticas, se deduce que la distribución de θ será: $f_1(\theta/E) \propto \theta^{\alpha+m}(1-\theta)^{\beta+n-m}$, que se denomina como una función beta con parámetros actualizados $\alpha' = \alpha + m$ y $\beta' = \beta + n - m$.

3.1.2 Análisis Bayesiano Jerárquico

Un análisis Bayesiano puede ser extendido como un análisis bayesiano jerárquico (ABJ), la función se analiza respecto al parámetro θ utilizando validación de datos. Esta función genérica de distribución de probabilidad puede ser ajustada y corregida en función del caso de análisis. Por ejemplo, se puede hacer y construir una función de probabilidad de daños para una válvula de control de amago en específico y ajustarla en función a sus variables operativas. (Khakzad N., 2018). Para construir la función de distribución, θ es considerada como una variable genérica de distribución con sus parámetros propios α y β como: $f_g(\theta/\alpha, \beta)$; α y β son referidas usualmente como hiperparámetros

La función hiperparamétrica de distribución se considera como $\pi_0(\alpha, \beta)$. Y para una función hiperparamétrica posterior $\pi_1(\alpha, \beta/E)$ se cuenta con la siguiente relación:

$$\pi_1(\alpha, \beta/E) = \frac{\pi_0(\alpha, \beta)L(E/\alpha, \beta)}{\iint \pi_0(\alpha, \beta)L(E/\alpha, \beta)d\alpha d\beta}$$

Ecuación 3. 3: Función hiperparamétrica de distribución

La distribución informativa de θ puede ser expresada como:

$$f_0(\theta/E) = \iint f_g(\theta/\alpha, \beta) \pi_1(\alpha, \beta/E)d\alpha d\beta \quad (4)$$

Ecuación 3. 4: Distribución informativa de θ

Donde:

$f_0(\theta/E)$, es la distribución informativa de θ

Pero para más informaciones respecto a más observaciones E' se considera el siguiente teorema de Bayes:

$$f_1(\theta/E') = \frac{f_0(\theta/E')L(E'/\theta)}{\int f_0(\theta/E)L(E'/\theta)d\theta}$$

Ecuación 3. 5: Teorema de Bayes respecto a más observaciones E'

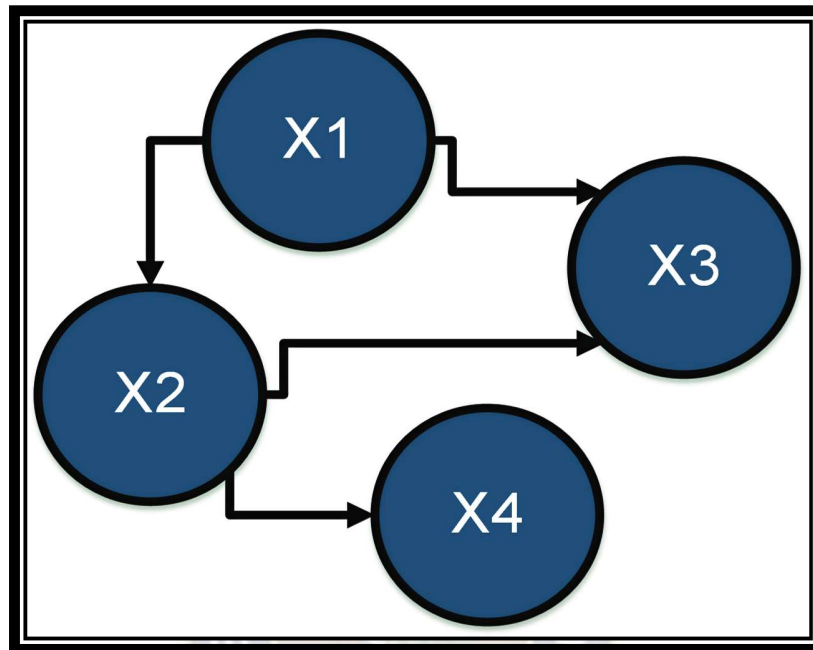
3.2 REDES BAYESIANAS

3.2.1 Red convencional bayesiana

Una red bayesiana es un arreglo acíclico para determinar parámetros desconocidos. Donde los nudos representan variables aleatorias (función correcta de una válvula/ función incorrecta de una válvula) y se interconecta entre sí. Las conexiones denotan dependencia de variables entre sí y se asemeja a un árbol de fallas. En una red

bayesiana se pueden interconectar varias redes y nodos, derivando de nudos principales a nudos secundarios.

Figura 3. 1: Red bayesiana



Fuente: Elaboración propia, 2023

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un típico arreglo de red bayesiana para cuatro nodos, donde X_1 es el nodo de ruta; X_2 es el nodo intermedio X_3 y X_4 son nodos terminales.

Para comprender mejor de una manera aplicada a un análisis de falla de explosión de un tanque de almacenamiento; el detector de llama será la variable (X_1), el actuador será (X_2), la alarma será (X_3) y el tanque de almacenamiento será denominado como el nodo (X_4). Dado entonces el incendio del tanque, el detector de fuego activará el actuador ($X_1 \rightarrow X_2$) y suena la alarma ($X_1 \rightarrow X_3$): el actuador controlará el incendio ($X_2 \rightarrow X_4$). Para incrementar la eficiencia del sistema, el actuador puede interconectarse con la alarma ($X_2 \rightarrow X_3$).

Las redes bayesianas simplifican las funciones de distribución de variables aleatorias (nodo) $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ como la multiplicación de las probabilidades de los nodos y se da como la siguiente expresión:

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(X_i/P_a(X_i)) \quad (6)$$

Ecuación 3. 6: Probabilidades de los nodos

Donde:

$P(U)$, es la probabilidad total de distribución de las variables

$P_a(X_i)$, es la probabilidad aparente de X_i

La aplicación más importante de una red bayesiana en un análisis de seguridad dinámico es actualizar las funciones de probabilidad, observando las variaciones que presenten como en el caso de fallo de válvulas de control. La probabilidad total de una red bayesiana se puede expresar como la siguiente función:

$$P(U/E) = \frac{P(U)P(E/U)}{\sum P(U)P(E/U)} = \frac{P(U, E)}{\sum P(U, E)} \quad (7)$$

Ecuación 3. 7: Probabilidad total de una red bayesiana

Por otra parte, si asumimos la probabilidad del sistema de perforación respecto a la variable X_4 tenemos la siguiente expresión:

$$P(X_1 = x_1/X_4 = x_4) = \frac{\sum P(X_1, X_2, X_3, X_4)_{X_2, X_3}}{\sum P(X_1, X_2, X_3, X_4)_{X_1, X_2, X_3}}$$

Ecuación 3. 8: Probabilidad del sistema de perforación respecto a la variable X

A partir de la anterior deducción, se pueden combinar varias variables para determinar rangos de probabilidad de fallas dentro de una red de nodos. (Sklet S., 2006).

3.2.2 Red Bayesiana dinámica

Una red bayesiana dinámica ofrece una estructura flexible para modelar la variación de las probabilidades en función al incremento del tiempo. Es necesario realizar este tipo de aplicaciones debido a que las variables de control de los equipos cambian constantemente en el tiempo. La red bayesiana dinámica es una red bayesiana estocástica

Generalmente, las redes bayesianas dinámicas presentan dos principales ventajas:

- Variación del intervalo de la red
- Variación instantánea de las variables

El modelo RBD consta de intervalos de tiempo en los que cada intervalo de tiempo contiene sus propias variables e implementa los supuestos de Murphy (2002) de que: un modelo DBN se define como un modelo de Markov de primer orden (es decir, $P(Z_t | Z_1, \dots, Z_{t-1}) = P(Z_t | Z_{t-1})$) y un modelo de transición $P(Z_t | Z_{t-1})$ es constante para todos los intervalos de tiempo, t . El modelo de transición $P(Z_t | Z_{t-1})$ se define de la siguiente manera:

$$P\left(Z_t \mid Z_{t-1}\right) = \prod_{i=1}^N P\left(Z_t^i \mid Pa\left(Z_t^i\right)\right)$$

Ecuación 3. 9: Modelo de transición $P(Z_t | Z_{t-1})$

Donde:

$Pa(Z_t)$ son los patrones de Z_t en el mismo segmento de tiempo t o en el segmento de tiempo anterior $t-1$

N es el número de variables aleatorias en Z_t (Hulst, 2006).

Mientras que los nodos en el primer segmento de tiempo no tienen parámetros asociados con ellos, los nodos en el segundo segmento de tiempo BN (2TBN) tienen tablas de probabilidad condicional (CPT). Así, para una DBN con una secuencia de T

rebanadas de longitud, la distribución de probabilidad conjunta puede obtenerse desplegando la red 2TBN (Hulst, 2006) como:

$$P(Z_{1:T}) = \prod_{t=1}^T \prod_{i=1}^N P(Z_t^i | Pa(Z_t^i))$$

Ecuación 3. 10: Distribución de probabilidad conjunta secuencia de T tramos de longitud

Sin embargo, para mejorar el poder de modelado DBN de Murphy, que está restringido a 2TBN, Hulst (2006) desarrolló un modelo DBN de Murphy extendido con un proceso de Markov de k-ésimo orden donde B se define como (k + 1)TBN en lugar de 2TBN. Así, el modelo de transición $P(Z_t | Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-k})$ para un proceso de Markov de k-ésimo orden se define:

$$P(Z_t | Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-k}) = \prod_{i=1}^N P(Z_t^i | Pa(Z_t^i))$$

Ecuación 3. 11: Modelo de transición $P(Z_t | Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-k})$

Visualización de DBN con (k+1) TBN, es decir, (k+1) segmentos de tiempo definiendo: un arco temporal con un índice que indica el orden temporal o el tiempo de retraso entre un nodo padre y un nodo hijo; una placa temporal para evitar que cada nodo se copie en cada segmento de tiempo al desenrollar la DBN para la inferencia; y nodos contemporáneos para todos los nodos fuera de la placa temporal que permanecen constantes en el tiempo.

3.2.2.1 Intervalo de la red Bayesiana

En este punto la línea de tiempo es particionada en n + 1 intervalos de tiempo, cada uno como una variable de estado aleatorio. Entonces la línea [0, T] se divide en n intervalos, donde el último intervalo de tiempo [T, +∞] se deja para el último estado n + 1.

Por otra parte, cada variable aleatoria (nodo) en una red bayesiana dinámica tiene un número finito de estados iguales al número de intervalos de tiempo.

Entonces, el tiempo de falla de X_1 se puede expresar como t_{X_1} . Entonces:

$$P(X_1 = i) = \int_{(i+1)\Delta}^{i\Delta} f_{X_1}(t) dt = F_{X_1}(i\Delta) - F_{X_1}((i+1)\Delta)$$

Ecuación 3. 12: Tiempo de falla de X_1

Donde:

t_{X_1} : es el tiempo de falla de X_1

$f_{X_1}(t)$, es la función de probabilidad en función de t

De manera similar expresando la anterior función para n intervalos se tiene:

$$P(X_1 = n + 1) = P(t_{X_1} > T) = 1 - F_{X_1}(T)$$

Ecuación 3. 13: Tiempo de falla de X_1 para n intervalos

3.2.2.2 Análisis instantáneo de la dinámica Bayesiana

La variación instantánea es el cambio por un determinado periodo de tiempo de toda la red bayesiana y se puede expresar como la siguiente expresión

$$P(U^{t+\Delta}) = (X_1^{t+\Delta}, X_2^{t+\Delta}, \dots, X_n^{t+\Delta}) = \prod_{i=1}^n P(X_i^{t+\Delta} / X_t^t, P_a(X_t^t), P_a(X_t^{t+\Delta})) \quad (10)$$

Ecuación 3. 14: Cambio por un determinado periodo de tiempo de toda la red bayesiana

Estos modelos se resuelven con sistemas computacionales como Matlab y se obtienen gráficas donde se explica el incremento de la falla en el tiempo.

3.3 MODELO DE RIESGO DE EXPLOSIÓN DINÁMICA EN EL SISTEMA DE CONTROL MPD

Uno de los sistemas CBHP comunes disponibles es un control de presión anular dinámico (DAPC) y está adaptado para el estudio actual. Una técnica MPD utiliza modelos hidráulicos y un controlador para establecer la presión en la cabeza del pozo y mantiene una densidad de circulación equivalente (ECD) y un gradiente de presión anular adecuados en el pozo.

3.3.1 Control de presión

El control de presión del sistema sirve para sellar y permitir la presurización del espacio anular del pozo y desviar los retornos de lodo hacia el colector de estrangulación. El colector de estrangulación se utiliza para aplicar contrapresión hidráulica en el espacio anular para controlar la presión de fondo de pozo.

Cuando es necesario, la bomba de contrapresión se activa para complementar el fluido anular requerido para aplicar una contrapresión precisa y el NRV evita el reflujo de lodo hacia la sarta de perforación.

En la anterior figura se muestra las interacciones entre los componentes durante la operación de control y detección de kicks. Las rutas de flujo indicadas en líneas discontinuas representan el suministro de energía y la transmisión de datos en todo el sistema, mientras que las rutas indicadas en líneas gruesas muestran el movimiento hidráulico a través del sistema.

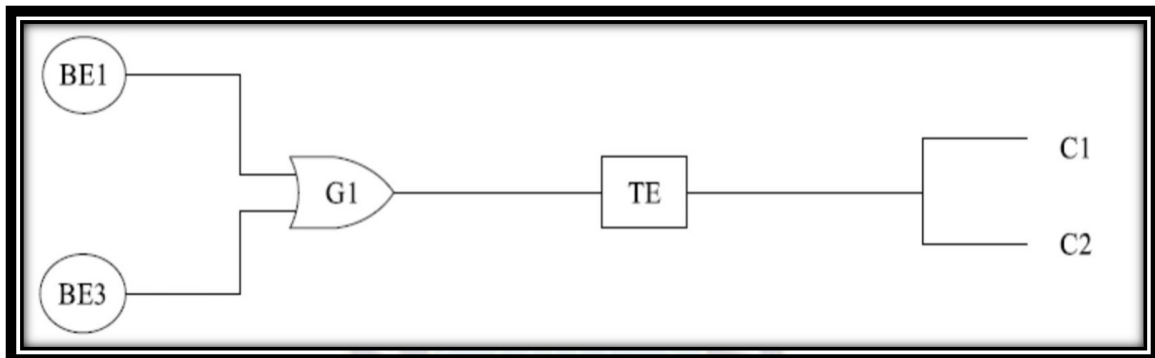
3.3.2 Modelos numéricos para simulación de control de kick

La simulación del modelo numérico implementa un modelo de control MPD propuesto en un trabajo anterior por los autores (Sule et al., 2019) que utiliza un controlador predictivo de modelo no lineal (NMPC) y un modelo de flujo hidráulico de dos fases

para calcular la presión anular y la dinámica de la válvula de estrangulación. durante la operación de control de kick.

El controlador NMPC se ejecuta usando un código MATLAB basado en Grüne y Pannek (2017).

Figura 3. 2: Modelo de Grüne y Oannek



Fuente: Sule et al. (2018).

La ventana de presión y la capacidad de flujo de la bomba, que se utilizan para establecer el ancho de banda del controlador (o las restricciones), se basan en la presión del yacimiento (poral), la presión de fractura y el rango de funcionamiento seguro del equipo de superficie.

Si bien el objetivo del controlador es detectar y atenuar el golpe de forma segura mientras se mantiene una ventana de presión de fondo de pozo, la simulación numérica empujará al controlador más allá de sus umbrales operativos seguros para el propósito del trabajo actual.

$$P_B = K_{vol}(q_p - q_b)$$

Pero el factor volumétrico:

$$K_{vol} = \frac{\beta_d}{V_d}$$

Reemplazando:

$$P_p = \frac{\beta_d}{V_d}(q_p - q_b)$$

Entonces se realizan los balances para cada punto de la anterior gráfica y se obtiene las siguientes relaciones:

$$\frac{dp_p}{dt} = \dot{P}_p = \frac{\beta_d}{V_d}(q_p - q_b)$$

Ecuación 3. 15: Presión de bomba dinámica

$$q_b = \frac{1}{M}(P_p - P_c - F_{dq_b}^2 - F_a(q_{res} + q_b)^2 + (\rho_d - \rho_a)gh_{TVD})$$

Ecuación 3. 16: Flujo dinámico del Bit

$$\frac{dp_c}{dt} = \dot{P}_c = \frac{\bar{\beta}}{V_a}(q_b + q_{bpp} + q_{res} - q_c + T_{XEW})$$

Ecuación 3. 17: Presión dinámica del choque

Para el factor de compression, según Sule (2018) se tiene:

$$\bar{\beta} = \frac{\beta_L}{1 + \frac{\beta_L}{L} \int_0^L \frac{C_0 \alpha_G}{y^p} dx}, \alpha_G + \alpha_L = 1$$

Ecuación 3. 18: Factor de arreglo

$$q_c = u_c A_o C_d \left(\frac{x_L}{\rho_L} + \frac{x_G}{\rho_G} \right) \sqrt{\frac{2(P_c - P_0)}{\frac{x_L}{\rho_L} + \frac{x_G}{y^2 \rho_G}}}$$

Ecuación 3. 19: Modelo de flujo de pase para dos choques

$$\rho_G = \frac{P}{C_G^2}, \rho_L = \rho_{L_0} + \frac{P}{C_L^2}$$

Ecuación 3. 20: Densidad de gas y líquidos

$$P_b = \begin{cases} P_c + F_a q_b^2 + \rho_a g h_{TVD} \\ P_p - F_a q_b^2 + \rho_a g h_{TVD} \end{cases}$$

Ecuación 3. 21: Presión de fondo

$$q_{res} = k_P (P_{res} - P_{bh})$$

Ecuación 3. 22: Afluencia del reservorio

Dónde:

d y a son el módulo aparente del lodo en la sarta de perforación y en el espacio anular respectivamente (Bbl/m²)

q_b es el flujo a través del trépano (GPM)

P_c es la presión del estrangulador aguas arriba (Psi)

q_c es el flujo a través del estrangulador (GPM)

q_{res} es la tasa de flujo de entrada al yacimiento (GPM)

F_d y F_a son la pérdida de presión por fricción en la sarta de perforación y el espacio anular respectivamente (Psi)

L es la fracción de masa líquida (%)

G es la fracción de masa de gas (%)

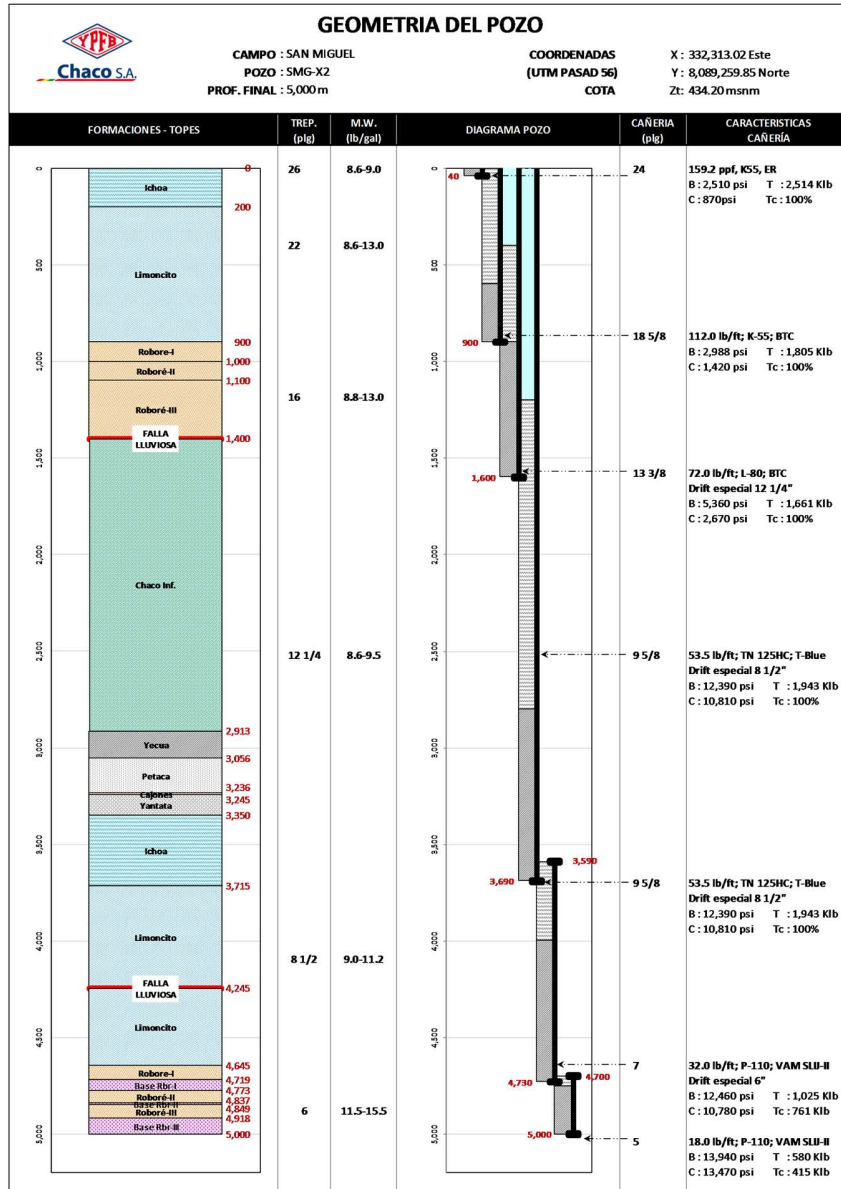
u_c [0,1] es la apertura del estrangulador (o control del estrangulador).

CAPITULO IV: MARCO PRÁCTICO

4.1 DESCRIPCIÓN DEL POZO

A continuación, se presenta la propuesta de pozo

Figura 4. 1: Esquemática propuesta de pozo



Fuente: YPFB chaco S.A. (Programa de perforación de pozo SMG-X2, 2021)

Tabla 4. 1: Información de Pozo

Datos del Pozo	
Ubicación:	Cochabamba, Bolivia
Nombre:	SMG-X2
Campo:	San Miguel
Operadora:	YPFB CHACO S.A.
Socios:	Ninguno
Categoría:	Pozo Exploratorio
Tipo de Pozo:	Vertical
Objetivo:	Arenisca Roboré
Tipo de Terminación:	Simple o simple selectivo (13Cr)
Datos del Equipo de Perforación	
Numero:	SNP-164
Contratista:	SINOPEC
Altura a mesa rotaria (m):	10.7
Elevación sobre el nivel del mar (m MSL):	434.2
Ubicación del Pozo	
Proyección:	UTM Zona 20S (66 W to 60 W)
Datum:	PSAD 1956 - Bolivia
Formación Objetivo:	Roboré
Coordenadas de Superficie:	UTM Norte: 8,089,259.85 UTM Este: 332,313.02
Coordenadas de Sub Suelo:	UTM Norte: 8,089,259.85 UTM Este: 332,313.02
Tamaño Objetivo:	E-O 100 m Largo & N-S 80 m Ancho
Profundidad Final (m MD/TVD):	5,000.00
Pozos de Referencia:	CRE-X1, CRE-X2D, CRC-X1, CRC-10, CRC-6 y KTR-2

Fuente: YPFB chaco S.A. (Programa de perforación de pozo SMG-X2)

4.1.1 Cuantificación de profundidades respecto a las formaciones

Tabla 4. 2: Topes formacionales del pozo SMG-X2

FORMACION / MIEMBRO	Buz. (°)	Acimut (°)	Profundidad medida desde Zt: 434.2			
	Aprox.	Aprox.	MD (m)	Variación (m)	D (m)	TVDSS (m)
ICHOA	35-38°	10°	10.70	+/-200	10.70	434.20
LIMONCITO			200	+/-200	200	245
Robore-I			900	+/-200	900	-455
Robore-II-III			1000	+/-200	1000	-555
FALLA LA LLUVIOSA 1			1400	+/-300	1400	-955
CHACO INFERIOR	0°-40°	190° - 10°	1400	+/-200	1400	-955
YECUA	30°-25°	350°-10°	2913	+/-200	2913	-2468
PETACA	30°-25°	350°-10°	3056	+/-200	3056	-2611
CAJONES	30°-25°	350°-10°	3236	+/-200	3236	-2792
YANTATA	30°-25°	350°-10°	3245	+/-200	3245	-2800
ICHOA	30°-25°	350°-10°	3350	+/-200	3350	-2905
LIMONCITO	30°-25°	350°-10°	3715	+/-200	3715	-3270
FALLA LA LLUVIOSA 2			4245	+/-200	4245	-3800
LIMONCITO	20°-25°	350°-10°	4245	+/-200	4245	-3800
ROBORE	20°-25°	350°-10°	4645	+/-200	4645	-4200
Ar. Robore I	20°-25°	350°-10°	4645	+/-200	4645	-4200
Base. Ar. Robore I	20°-25°	350°-10°	4719	+/-200	4719	-4274
Ar. Robore II	20°-25°	350°-10°	4773	+/-200	4773	- 4328
Base. Ar. Robore II	20°-25°	350°-10°	4837	+/-200	4837	-4392

Ar. Robore III	20°-25°	350°-10°	4849	+/-200	4849	- 4404
Base. Ar. Robore III	20°-25°	350°-10°	4918	+/-200	4918	-4473
TD FINAL	20°-25°	350°-10°	5000	+/-200	5000	-4555

Fuente: YPFB chaco S.A. (Programa de perforación de pozo SMG-X2), 2021

4.1.2 Descripción litológica

A continuación, se presenta las siguientes descripciones litológicas del anterior pozo que conforma en el proyecto de grado.

Tabla 4. 3: Descripción Litológica

Topo Formación	Descripción Litológica
Ichoa	Esta formación presenta en la zona superior una intercalación de areniscas con delgadas capas de arcilitas; la parte media es predominantemente arenosa, culminando en la sección basal con una intercalación de areniscas gris blanquecina a gris verdosas, de grano fino a medio, las limolitas son de color marrón rojizo. Ocasionalmente presenta fragmentos de caliza en la parte basal.

Fuente: YPFB chaco S.A. (Programa de perforación de pozo SMG-X2)

Tabla 4. 4: Descripción Litológica II

Topo Formación	Descripción Litológica
Limoncito	Su topo es discordante con la Formación Ichoa, esta formación es una secuencia pelítica compuesta de limolitas marrón rojizas y violáceas en la parte superior, Lutitas y limolitas gris oscuras a claras en la parte media, y Lutitas Gris oscuras en la parte basal. Estas pelitas son micáceas y compactas, e intercalan con delgados niveles de areniscas gris claras, de grano muy fino a fino, subangulares y

	de regular selección
Roboré	<p>El tope de esta formación está definido por la aparición de un banco de areniscas denominadas como Arenisca Roboré I, que es el nivel reservorio objetivo.</p> <p>La Arenisca Roboré-I, está compuesta por areniscas silíceas gris blanquecinas, friables, de grano fino a medio, sub-redondeados en la parte central, bien seleccionadas, con escasa matriz limosa, cemento silíceo, algunos niveles con presencia de pirita nodular, presenta UV uniforme amarillo pálido, corte lento amarillo blanquecino</p>
Chaco Inferior	Las rocas del Grupo Chaco, de edad Terciaria (Oligoceno), conforman una espesasecuencia de 2700 m de espesor constituida por una sucesión monótona de pelitas marrón rojizas intercalada por areniscas blanquecinas y marrón rojizas
Yecua	La Formación Yecua constituye una secuencia pelítica conformada limolitas y arcillitas de tonalidades marrón rojizas y gris verdosas, este último nivel pelítico es característico de la parte basal de la formación y presenta horizontes calcáreas, intercaladas esporádicamente por bancos de areniscas blanquecinas de grano fino a medio
Petaca	Conformada por una secuencia psamo-pelítica de ambiente fluvial entrelazado. Petrográficamente se define como areniscas subarcólicas de color gris blanquecino a gris verdoso, de grano fino a medio, escaso grueso, son subredondeados a subangulares, con regular a buena selección. Ocasionalmente en la parte basal presenta un nivel conglomerádico, que limita la transición Petaca-Yantata
Cajones	Se desarrolla en la parte inferior de la Formación Petaca. Está conformada por arcillitas gris verdosas en el tope, y marrón rojizas

	hacia la parte media – basal
Yantata	Su tope está definido por una capa de calizas y chert de 5 a 7 m de espesor, este nivel representaría a un vestigio de la Formación Cajones. Se compone principalmente de areniscas de color marrón rojizo, de grano fino a grueso, subangular a subredondeados, presenta matriz arcillosa de tono rojizo. La sección inferior presenta ocasionalmente limolitas marrón rojizas y arcilitas blanquecinas y trazas de chert blanquecino y fragmentos de calizas de ligero tono rosáceo.

Fuente: YPFB chaco S.A. (Programa de perforación de pozo SMG-X2)

Tabla 4. 5: Descripción litológica III

Tope Formación	Descripción Litológica
Ichoa	Esta formación presenta en la zona superior una intercalación de areniscas con delgadas capas de arcilitas; la parte media es predominantemente arenosa, culminando en la sección basal con una intercalación de areniscas gris blanquecina a gris verdosas, de grano fino a medio, las limolitas son de color marrón rojizo. Ocasionalmente presenta fragmentos de caliza en la parte basal.
Limoncito	Su tope es discordante con la Formación Ichoa, esta formación es una secuencia pelítica compuesta de limolitas marrón rojizas y violáceas en la parte superior, Lutitas y limolitas gris oscuras a claras en la parte media, y Lutitas Gris oscuras en la parte basal. Estas pelitas son micáceas y compactas, e intercalan con delgados niveles de areniscas gris claras, de grano muy fino a fino, subangulares y de regular selección

Roboré	<p>El tope de esta formación está definido por la aparición de un banco de areniscas denominadas como Arenisca Roboré I, que es el nivel reservorio objetivo.</p> <p>La Arenisca Roboré-I, está compuesta por areniscas silíceas gris blanquecinas, friables, de grano fino a medio, subredondeados en la parte central, bien seleccionadas, con escasa matriz limosa, cemento silíceo, algunos niveles con presencia de piritita nodular, presenta UV uniforme amarillo pálido, corte lento amarillo blanquecino</p>
--------	---

Fuente: YPFB chaco S.A. (Programa de perforación de pozo SMG-X2)

4.2 REQUERIMIENTOS GENERALES

- ✓ Todos los componentes de la sarta de perforación, deberán ser inspeccionados (DS-1 Cat 4) antes de ser enviados a pozo y ser bajados a agujero abierto. Asegurarse que toda la porta mechas tengan ranuras de alivio de stress¹. Así mismo, si hay disponibilidad, asegurarse de que todos los porta-mechas y barras pesadas sean espiralados. Ninguna herramienta deberá ser utilizada si no cuenta con registro de inspección reciente. Las hojas de inspección y certificación deberán acompañar a todas las herramientas que son despachadas al pozo.
- ✓ El stock mínimo de químicos para el lodo de perforación mantenido en pozo, deberá ser:
 - Suficiente material de peso y otros químicos para subir el peso de lodo en el sistema activo al menos 2 ppg y mantener características reológicas.
 - Un stock de baritina de al menos 40 MT,

¹ Los portamechas son drill collar con cuerpos más pesados que la tubería de perforación.

- Suficiente y adecuado material sellante para combatir problemas de pérdida de circulación,
 - Suficiente cemento y químicos de cementación para colocar 2 tapones de cemento clase A de 150 m cada uno en el agujero en perforación,
 - Suficiente diésel para operar a consumo máximo por un mínimo de 5 días,
-
- ✓ Válvulas flotadoras deberán ser instaladas en todos los arreglos de perforación luego de la instalación del conjunto de preventores BOP.
 - ✓ La velocidad de bajada y sacada de tubería deberá ser restringida a las presiones de pistoneo calculadas. Estas serán determinadas con el software de la compañía de lodos.
 - ✓ Simulacros de control de pozo deberán ser realizados constantemente a intervalos regulares de acuerdo a la operación. El tiempo de reacción de las cuadrillas deberá ser registrado en el reporte de perforación diario.
 - ✓ Las presiones de circulación a bajo caudal, deberán ser tomadas y registradas:
 - Cada cambio de turno o cada 300 m perforados,
 - Seguido de un cambio de una propiedad significativa del lodo o peso,
 - Seguidos a cambios en el arreglo de fondo,
 - ✓ Una reunión de inicio de operaciones deberá ser realizada en pozo y por sección, con la participación del personal relevante de las compañías de servicio y contratista de perforación.
 - ✓ Realizar charlas pre operativas previo al inicio de operaciones.
 - ✓ Asegurarse de que todas las hojas de seguridad (MSDS) de los químicos

de lodos y otros, estén en locación y se encuentren en un lugar accesible y bien resguardado.

- ✓ Instalar dos magnetos en salida de lodos. Limpiar magnetos cada 12 horas y registrar el peso mojado y seco en reporte diario de perforación. Así mismo graficar los kg de metal recuperados vs las revoluciones para establecer una tendencia.

4.3 ANALISIS DINÁMICO DE RIESGOS

4.3.1 Desarrollo del nudo de corbata para identificar causas de Overbalance y Underbalance

Para el modelo determinamos el diagrama de eventos para dos tipos de efectos principales:

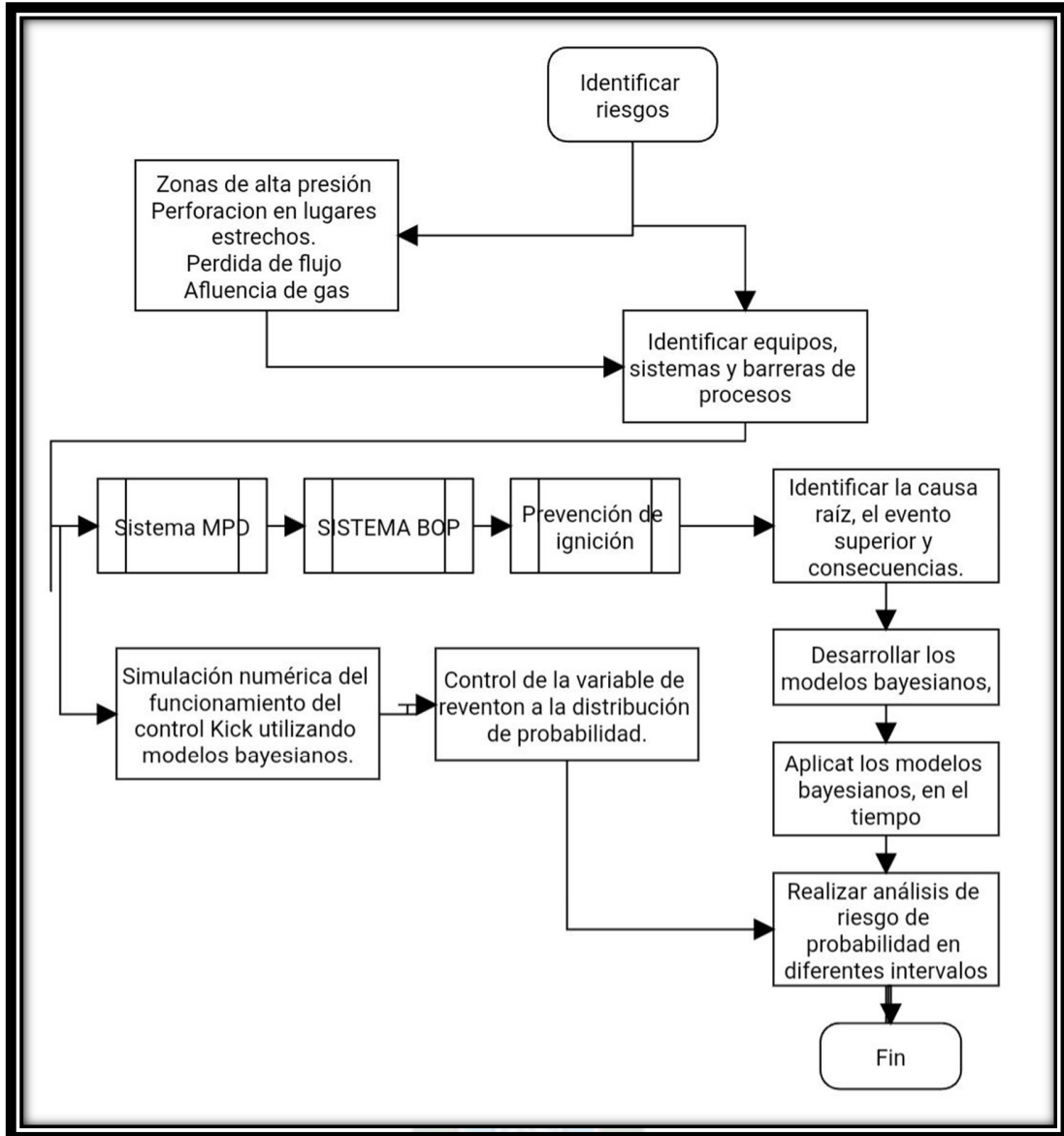
- El diagrama de eventos para un UNDERBALANCE
- El diagrama de eventos para un OVERBALANCE

La base del árbol de problemas que es utilizado dentro del análisis HAZOP y todo método de estudio de riesgo. Primero e identifica el suceso o evento que provoca el daño. En el caso de un Blowout, se identifican los dos eventos anteriormente propuestos, entonces; dichos eventos son por donde se origina la ramificación. Ahora, para cada evento se anotan sus antecedentes, en este caso, las causas inmediatas

4.3.2 Diagrama del proceso

A recién se presenta un diagrama de flujo del proceso para su mejor entendimiento:

Figura 4. 2: diagrama de flujo del proceso



Fuente: Elaboración propia, 2023

Para que la presión del lodo sea menor a la presión del poro se debe a un Under balance y otra causa es debido a una falla en el MPD para prevenir esta disminución de la presión de lodo. En otras palabras, estamos afirmando que el pozo se puede venir y ocurrir un derrumbe en el fondo si la presión del fluido de perforación es menor a la presión de la formación. Entonces colocamos las dos causas inmediatas

Tabla 4. 6: Análisis de causas inmediatas

EVENTO	CAUSAS PRINCIPALES
Derrumbe del pozo (La formación se viene adentro, ocurre un derrumbe que puede generar un Blowout debido a la intrusión de fluido)	Under Balance (La presión del lodo es menor a la de la formación)
	Mal manejo del MPD para controlar el Under Balance.

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3 Matriz de riesgos generales

Por lo tanto, se presenta la siguiente matriz de riesgos con los eventos que pueden presentarse en el trabajo diario durante la perforación

Tabla 4. 7: Matriz de Riesgos

EVENTO		PROBABILIDAD	CONSECUENCIA	RIESGO
		D	S	
Extra operacional	Lluvia torrencial	B	III	Alto
	Sismo de máxima intensidad	D	II	Bajo
	Aluvión	D	III	Bajo
	Fallas geomecánicas y sobrepresión	D	III	Alto
	Incendio del sistema de gas por fugas	B	I	Alto
Operacional	Defectos de diseño y construcción/fallas de materiales	D	IV	Bajo
	Descontrol de válvulas	A	IV	Medio
	Falla operacional producto de error humano	A	IV	Medio
	Daños por terceros	A	II	Alto

	Deficiencias causadas por falta de mantenimiento	A	II	Alto
	Falla prolongada de suministro	A	IV	Alto

Fuente: Elaboración propia en base a propuesta planteada, 2023

4.3.4 Identificación causas principales y secundarias

El análisis puede terminar ahí, pero se sigue estudiando otras causas que generen las causas principales, es decir causas secundarias, terciarias, hasta el nivel que sea necesario. En otras palabras, se busca la causa hasta que ya no existan más ramificaciones.

Entonces obtenemos el origen de las causas principales. Analizamos para la primera causa principal que es el Under balance o bajo balance del lodo.

Para que la presión generada por el fluido de perforación sea menor a la presión de poro de la formación, se pueden considerar las siguientes causas

Tabla 4. 8: Análisis de causas principales y secundarias

CAUSAS PRINCIPALES	CAUSAS SECUNDARIAS
Under Balance (La presión del lodo es menor a la de la formación)	Balaneo
	Peso del lodo insuficiente
	Influjo de gas
	Presión de poro elevada en la formación
	Flotación
	Pérdida de circulación desde la superficie hacia el fondo de pozo

Fuente: Elaboración Propia

Ahora identificamos si las causas secundarias tienen más causas, o causas terciarias en éste caso y vamos desglosando más la cadena de causas

Tabla 4. 9: Cadena de causas

CAUSAS SECUNDARIAS	CAUSAS TERCIARIAS
Balaneo	No tiene más causas
Peso del lodo insuficiente	No tiene más causas
Influjo de gas	No tiene más causas
Presión de poro elevada en la formación	El sistema MPD está fallando
	Presión anormal en la formación que no se controló
Flotación durante la perforación con la tubería de pozo	No hay más causas
Pérdida de circulación desde la superficie hacia el fondo de pozo	Fisuras en los equipos
	Falla del sistema MPD

Fuente: Elaboración Propia

Y seguimos desglosando hasta un rango de causas de cuarto nivel y completamos nuestra tabla de causas para el bajo peso de lodo durante la perforación

Tabla 4. 10: Rango de causas de cuarto nivel

CAUSAS PRINCIPALES	CAUSAS SECUNDARIAS	CAUSAS TERCIARIAS	CAUSAS CUATERNARIAS
Under Balance (La presión del lodo es menor a la de la formación)	Balaneo	No tiene más causas	
	Peso del lodo insuficiente	No tiene más causas	
	Influjo de gas	No tiene más causas	

	Presión de poro elevada en la formación	El sistema MPD está fallando	Falla del operador
			Falla del MPD
		Presión anormal en la formación que no se controló	No tiene más causas
	Flotación	No hay más causas	
	Pérdida de circulación desde la superficie hacia el fondo de pozo	Fisuras en los equipos	No tiene más causas
		Falla del sistema MPD para control de fugas	Falla del operador
			Falla de los equipos

Fuente: Elaboración Propia

De ésta forma se identifican todas las causas que pueden hacer que el lodo tenga un menor peso para resistir la presión de poro en fondo de pozo durante la perforación.

Sin redundar en lo mismo, realizamos el mismo análisis para la otra causa principal qué es el incremento de la presión de poro debido al mal manejo del MPD y tenemos la siguiente tabla:

Tabla 4. 11: Análisis para la otra causa principal ue es el incremento de la presión de poro

CAUSAS PRINCIPALES	CAUSAS SECUNDARIAS	CAUSAS Terciarias	CAUSAS CUATERNARIAS	CAUSAS DE QUINTO NIVEL
Under Balance (Mal manejo del MPD)	No se sigue el procedimiento en orden	No tiene más causas		

	Falla en la operación del MPD	No tiene más causas			
	Falla del equipo MPD	Falla de la recirculación	No tiene más causas		
		Presión de fondo de pozo	Disminuye la presión de fondo de pozo debido al MPD	Falla en la herramienta	Falla manifold
				Falla bombas	
				Disminuye la presión de fondo debido al manejo de flujo	Falla de válvulas
		Falla de la bomba	No tiene más causas		
	Fuente de alimentación	Falla en la fuente principal de energía	No tiene más causas		
Falla en los equipos que generan la energía		No tiene más causas			

Fuente: Elaboración Propia

Se asigna una variable a todas las últimas causas que se identificaron. Por ejemplo, para el UNDER BALANCE, se asignaría de la siguiente forma:

Tabla 4. 12: Análisis de origen de las causas para el under balance

CAUSAS PRINCIPALES	CAUSAS SECUNDARIAS	CAUSAS TERCIARIAS	CAUSAS CUATERNARIAS	
Under Balance (La presión del lodo es menor a la de la formación)	Balaneo (X1)	No tiene más causas		
	Peso del lodo insuficiente (X2)	No tiene más causas		
	Influjo de gas (X3)	No tiene más causas		
	Presión de poro elevada en la formación	El sistema MPD está fallando	Falla del operador (X4)	
			Falla del MPD (X5)	
		Presión anormal en la formación que no se controló (X6)	No tiene más causas	
	Frotación (X7)	No hay más causas		
	Pérdida de circulación desde la superficie hacia el fondo de pozo	Fisuras en los equipos (X8)	No tiene más causas	
		Falla del sistema MPD para control de fugas	Falla del operador (X9)	
			Falla de los equipos (X10)	

Fuente: Elaboración Propia

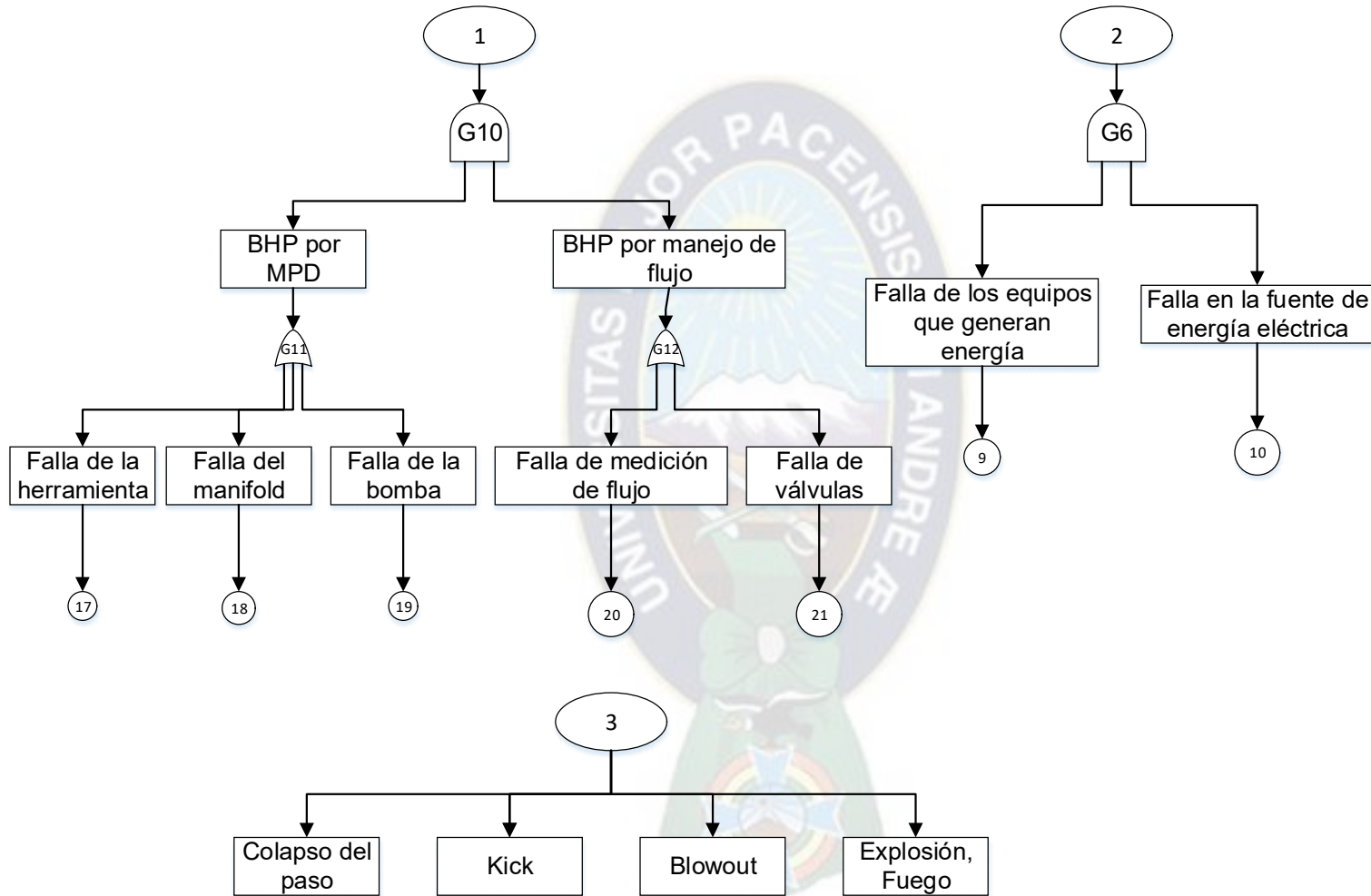
De ésta forma se identifican las variables que originan el evento de pérdida de balance del lodo, o sea cuando el lodo tiene baja presión que la presión de poro de la formación. Más adelante se muestran las tablas para todas las variables encontradas para el evento Under Balance y Over Balance. A continuación, se muestran y representan los eventos que se generan durante el proceso de MPD. En este análisis, las consecuencias van a generar el principio de las variables de los modelos matemáticos encabezando desde la parte inferior y culminando en el último bloque.

De esta forma cada nodo del análisis de riesgo representa a la causa principal X_i que representan las principales causas para que se de este evento, y a partir de estas variables. Con estas variables definidas se arman las fusiones probabilísticas que determinaran los daños y los posibles crecimientos de riesgo. Y se obedece al principio de redes bayesianas para poder interactuar y relacionar dichas variables.

La identificación de estas variables: $X_1, X_2, X_3...X_n$ se obedece en principios bibliográficos , donde se evidencia que las fallas de un sistema de control solo obedece a las variaciones del equipo y fallas, mal manejo del sistema y mal desempeño del control operativo, estas causas se presentan en el área de la petrolera sobretodo en el área de perforación aplicando diferentes metodologías.

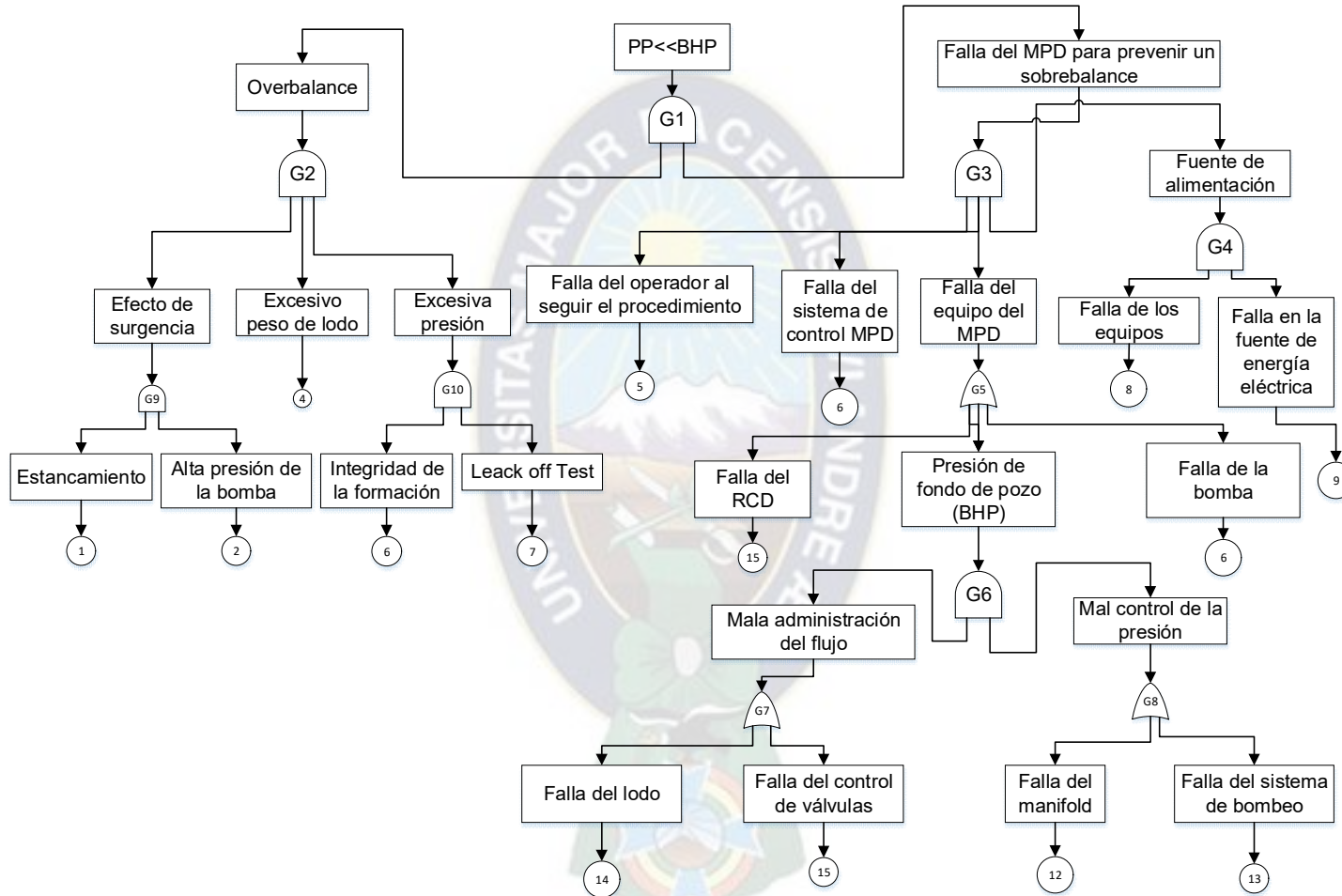


Figura 4. 4: Diagramas de árbol de Riesgos presentes de Perforación – Parte B



Fuente: Elaboración propia, 2023

Figura 4. 5: Diagramas de árbol de Riesgos presentes de Perforación – Parte C



Fuente: Elaboración Propia

4.3.4.1 Análisis de los diagramas

Estas ramificaciones se las realizaron porque es necesario encontrar las causas principales de un evento que genera el accidente, que en éste caso se debe a un Blowout.

Sólo existen dos eventos principales que ocasionarían un Blowout durante un proceso MPD:

- Under Balance: Debido a que la presión del lodo es inferior a la presión de la formación.
- Over Balance: Debido a que la presión del lodo de perforación es mayor a la presión de formación y esto daña a la formación y ocasionaría un flujo que genere un reventón o Blowout.

Por lo tanto, los eventos de riesgo son simplemente éstos dos y las consecuencias, serían el reventón y las explosiones dentro el pozo. Pero sabemos que el riesgo responde a la siguiente relación:

$$R = P \times C$$

Entonces es necesario encontrar las probabilidades de éstos riesgos. Dichas probabilidades se relacionan a las causas de éstos riesgos. Es entonces que en los anteriores diagramas se identifican todas las causas para que se generen éstos eventos.

Si las causas son varias y mayor es el valor de su probabilidad, entonces con mayor razón se genera éste riesgo. Además, que ayuda a identificar cual es la mayor causa de los Blowouts dentro del proceso MPD. A partir de éstos análisis se arman los modelos matemáticos probabilísticos Bayesianos

4.3.5 Modelos predictivos con redes bayesianas

4.3.5.1 Ecuación Bayesiana para cada evento

Para que se dé la alta presión de la bomba dado un problema de surgencia, se relaciona:

$$f_1(\theta/E) = \frac{f_0(\theta)L(E/\theta)}{\int f_0(\theta)L(E/\theta)d\theta}$$

Para que se dé el daño de la bomba dado la alta presión de la bomba, se relaciona:

$$P(x1/x2) = \frac{f_0(\theta)L(E/\theta)}{X_2}$$

De manera dinámica se calcula la variación de éstos parámetros en e tiempo, es decir:

$$P(x2/x1)_{(t)} = \frac{P(x2,x1)}{x1}_{(t)} ; P(x1/x2)_{(t)} = \frac{P(x1,x2)}{x2}_{(t)}$$

Es decir, estas relaciones se van calculando en función de los tiempos de operación y se van representando gráficamente en un plano para ver cómo varía la probabilidad en el tiempo a distintas profundidades y densidades. A continuación, entonces se identifican las probabilidades estándar de cada evento después de planear la red bayesiana:

4.3.6 Probabilidad de falla para el Over Balance

Tabla 4. 13: Probabilidad de falla para el Over Balance

Evento	Descripción	Probabilidad estándar (P _i)
1	Atascamiento de válvula	$P(x1/x2) = \frac{P(x1, x2)}{x1}$
2	Peso de lodo excesivo	$P(x2/x1) = \frac{P(x1, x2)}{x2}$
3	Presión excesiva de la bomba	$P(x3/x2) = \frac{P(x1, x2)}{x3}$
4	Falla del operador para seguir los procedimientos	$P(x4/x3) = \frac{P(x3, x4)}{x4}$
5	Falla del sistema de control MPD	$P(x5/x2) = \frac{P(x2, x3, x4, x5)}{x5}$
6	Falla de la Evaluación de la integridad de la formación	$P(x6/x5) = \frac{P(x5, x6)}{x6}$
7	Leak off Test (LOT)	$P(x7/x4) = \frac{P(x4, x5, x6, x7)}{x7}$
8	Falla en el Sistema de energía	$P(x8/x2) = \frac{P(x1, x2)}{x1}$
9	Falla en el Sistema eléctrico	$P(x9/x8) = \frac{P(x8, x8)}{x9}$
10	Falla del RCD	$P(x10/x9) = \frac{P(x9, x10)}{x10}$
11	Falla de la bomba	$P(x11/x10) = \frac{P(x9, x10, x11)}{x11}$
12	Falla de la PWD	$P(x12/x11) = \frac{P(x11, x12)}{x12}$
13	Falla del Sistema de válvulas	$P(x13/x12) = \frac{P(x12, x13)}{x13}$
14	Falla del Sistema de bombeo de lodo	$P(x14/x12) = \frac{P(x, 12, x13, x14)}{x14}$

15	Falla de la preparación del lodo	$P(x_{15}/x_{14}) = \frac{P(x_{14}, x_{15})}{x_{15}}$
16	Falla del manifold	$P(x_{16}/x_{15}) = \frac{P(x_{14}, x_{15}, x_{16})}{x_{16}}$

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se identifican las probabilidades estándar de cada evento después de planear la red bayesiana:

4.3.7 Probabilidad de falla para el Under balance

Tabla 4. 14: Probabilidad de falla para el Under balance

Evento	Descripción	Probabilidad estándar (P _i)
1	Atascamiento de válvula	$P(x_1/x_2) = \frac{P(x_1, x_2)}{x_1}$
2	Bajo peso de lodo	$P(x_2/x_1) = \frac{P(x_1, x_2)}{x_2}$
3	Baja presión de la bomba	$P(x_3/x_2) = \frac{P(x_1, x_2)}{x_3}$
4	Falla del operador para seguir los procedimientos	$P(x_4/x_3) = \frac{P(x_3, x_4)}{x_4}$
5	Falla del sistema de control MPD	$P(x_5/x_2) = \frac{P(x_2, x_3, x_4, x_5)}{x_5}$
6	Falla de la Evaluación de la integridad de la formación	$P(x_6/x_5) = \frac{P(x_5, x_6)}{x_6}$
7	Leak off Test (LOT)	$P(x_7/x_4) = \frac{P(x_4, x_5, x_6, x_7)}{x_7}$
8	Falla en el Sistema de energía	$P(x_8/x_2) = \frac{P(x_1, x_2)}{x_1}$
9	Falla en el Sistema eléctrico	$P(x_9/x_8) = \frac{P(x_8, x_9)}{x_9}$
10	Falla del RCD	$P(x_{10}/x_9) = \frac{P(x_9, x_{10})}{x_{10}}$

11	Falla de la bomba	$P(x_{11}/x_2) = \frac{P(x_9, x_{10}, x_{11})}{x_{11}}$
12	Falla del Sistema de válvulas	$P(x_{13}/x_{12}) = \frac{P(x_{12}, x_{13})}{x_{13}}$
13	Falla del Sistema de bombeo de lodo	$P(x_{14}/x_2) = \frac{P(x, 12, x_{13}, x_{14})}{x_{14}}$
14	Falla de la preparación del lodo	$P(x_{15}/x_{14}) = \frac{P(x_{14}, x_{15})}{x_{15}}$
15	Falla del manifold	$P(x_{16}/x_{15}) = \frac{P(x_{14}, x_{15}, x_{16})}{x_{16}}$
16	Falla de operarios	$P(x_{16}/x_{15}) = \frac{P(x_{14}, x_{15}, x_{16})}{x_{16}}$
17	Falla del equipo de bombeo	$P(x_{17}/x_{16}) = \frac{P(x_{14}, x_{15}, x_{16})}{x_{16}}$
18	Falla de manejo de herramientas	$P(x_{18}/x_{17}) = \frac{P(x_{14}, x_{15}, x_{16})}{x_{16}}$
19	Falla del control manual de manifold	$P(x_{19}/x_{18}) = \frac{P(x_{14}, x_{15}, x_{16})}{x_{16}}$
29	Falla de la medición de flujo	$P(x_{20}/x_{17}) = \frac{P(x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17})}{x_{17}}$
21	Falla de válvulas	$P(x_{21}/x_{16}) = \frac{P(x_{14}, x_{15}, x_{16})}{x_{16}}$

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Todas estas anteriores variables se predecirán con el teorema de bayes, y se grafica e sistema de redes bayesiano.

4.3.8 Descripción de la validación del modelo

Para validar el modelo es necesario aplicar las siguientes condiciones para el análisis y validación del modelo:

$$P_{\text{poro}} \ll P_{\text{estabilidad pozo}} \ll BHP \ll P_{\text{dif}} \ll P_{\text{circulación perdida}} \ll P_{\text{fractura}}$$

El lado izquierdo de la ecuación, el límite inferior, que incluye la presión de poro y la inestabilidad del pozo, define las condiciones de perforación desequilibradas, mientras que el lado derecho de la variación, el límite superior, que se compone de presión diferencial, presión de pérdida de circulación y presión de fractura, que describe a la perforación desequilibrada.

4.3.9 Validación del Modelo dinámico de riesgos

Para realizar ésta validación se comparará un estudio convencional de riesgos de los tramos de perforación con un análisis dinámico de riesgos. Se deben seguir los siguientes pasos para realizar la validación:

- Calcular la presión de pozo para cada tramo para una densidad de lodo A
- Determinar si la presión del lodo durante la perforación es mayor o menor que la presión de formación
- generar una simulación dinámica
- Volver a realizar esta simulación para una densidad B, luego para una densidad de lodo C, hasta N densidades,

4.4 PREDICCIÓN DE VARIABLES DE POZO EN EL TIEMPO CONTINUO

4.4.1 Variación de la presión del espacio anular en el tiempo

Se utiliza la ecuación 3.15 que se muestra a continuación

$$\frac{dp_p}{dt} = P_p = \frac{\beta_d}{V_d} (q_p - q_b)$$

Discretizando se tiene:

$$p_p = p_{po} + t \left[\frac{\beta_d}{V_d} (q_p - q_b) \right]$$

Luego se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 4. 15: Variación de la presión del espacio anular en el tiempo

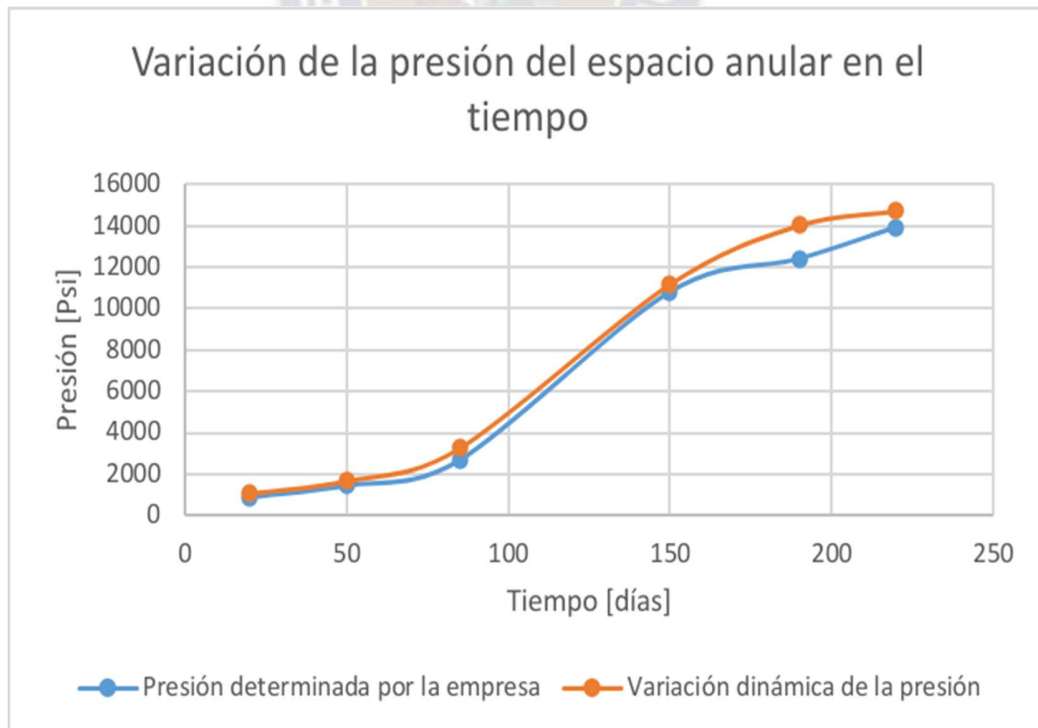
H [m]	Tiempo de perfo [días]	Presión determinada por la empresa (Psi)	Variación dinámica de la presión (Psi)
40	20	870	1040
900	50	1420	1650
1600	85	2670	3248
3690	150	10810	11188
4750	190	12410	14034
5000	220	13940	14729

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Se puede observar el anterior tabla que existe una variación de la presión para tiempos de perforación establecidos y los incrementos son altos pero la variación dinámica hace que esta presión varíe a la presión estimada Y puede que se generen accidentes

Graficando:

Figura 4. 6: Variación de la presión del espacio anular en el tiempo



Fuente: Elaboración propia, 2023

4.4.2 Variación de la presión del choque en el tiempo

Se utiliza la ecuación 3.17 que se muestra a continuación

$$\frac{dp_c}{dt} = \dot{P}_c = \frac{\bar{\beta}}{V_a} (q_b + q_{bpp} + q_{res} - q_c + T_{XEW})$$

Discretizando se tiene:

$$p_c = p_{co} + t \left[\frac{\bar{\beta}}{V_a} (q_b + q_{bpp} + q_{res} - q_c + T_{XEW}) \right]$$

Luego se obtiene la siguiente tabla:

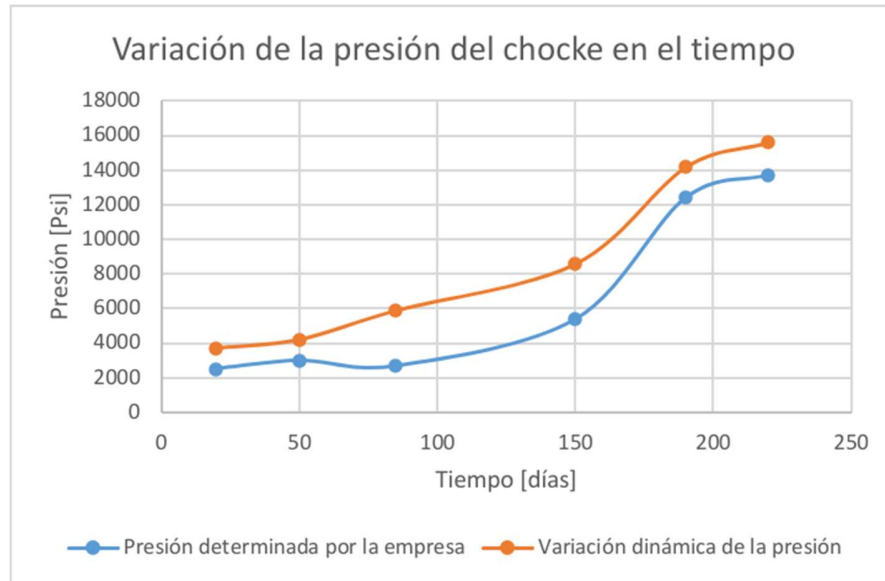
Tabla 4. 16: Análisis para la otra causa principal que es el incremento de la presión de poro

H (días)	Tiempo de perfo. (días)	Presión determinada por la empresa (Psi)	Variación dinámica de la presión (Psi)
40	20	2510	3710
900	50	2988	4188
1600	85	2670	5870
3690	150	5360	8560
4750	190	12390	14170
5000	220	13700	15600

Fuente: Elaboración propia, 2023

Graficando:

Figura 4. 7: Variación de la presión del Choke en el tiempo



Fuente: Elaboración Propia, 2023

4.4.3 Simulación del modelo de flujo de estrangulamiento de dos fases

Utilizamos la anterior ecuación planteada en el capítulo III.

$$q_c = u_c A_o C_d \left(\frac{x_L}{\rho_L} + \frac{x_G}{\rho_G} \right) \sqrt{\frac{2(P_c - P_0)}{\frac{x_L}{\rho_L} + \frac{x_G}{y^2 \rho_G}}}$$

Aplicando en el modelo bayesiano dinámico:

$$p = p_o + t\alpha \left(1 + \frac{p}{p_{max}} \right)$$

Reemplazando con una probabilidad máxima de alcance del 95% y 5 % de margen de seguridad se tiene:

$$p = u_c A_o C_d \left(\frac{x_L}{\rho_L} + \frac{x_G}{\rho_G} \right) \sqrt{\frac{2(P_c - P_0)}{\frac{x_L}{\rho_L} + \frac{x_G}{y^2 \rho_G}}} + t\alpha \left(1 + \frac{u_c A_o C_d \left(\frac{x_L}{\rho_L} + \frac{x_G}{\rho_G} \right) \sqrt{\frac{2(P_c - P_0)}{\frac{x_L}{\rho_L} + \frac{x_G}{y^2 \rho_G}}}}{0,95} \right)$$

Iterando varias veces se tiene la siguiente tabla:

Tabla 4. 17: Iteración del modelo probabilístico

tiempo (s)	Probabilidad
0	0.05
20	0.05357895
40	0.06127665
60	0.07458338
80	0.09646275
100	0.13259032
120	0.19423739
140	0.30559819

Fuente: Elaboración propia, 2023

4.4.4 Validación del modelo bayesiano aplicado al MPD

Se compara entonces valores promedio de riesgo y los modelos propuestos para diferentes variables operativas:

Tabla 4. 18: Validación del modelo

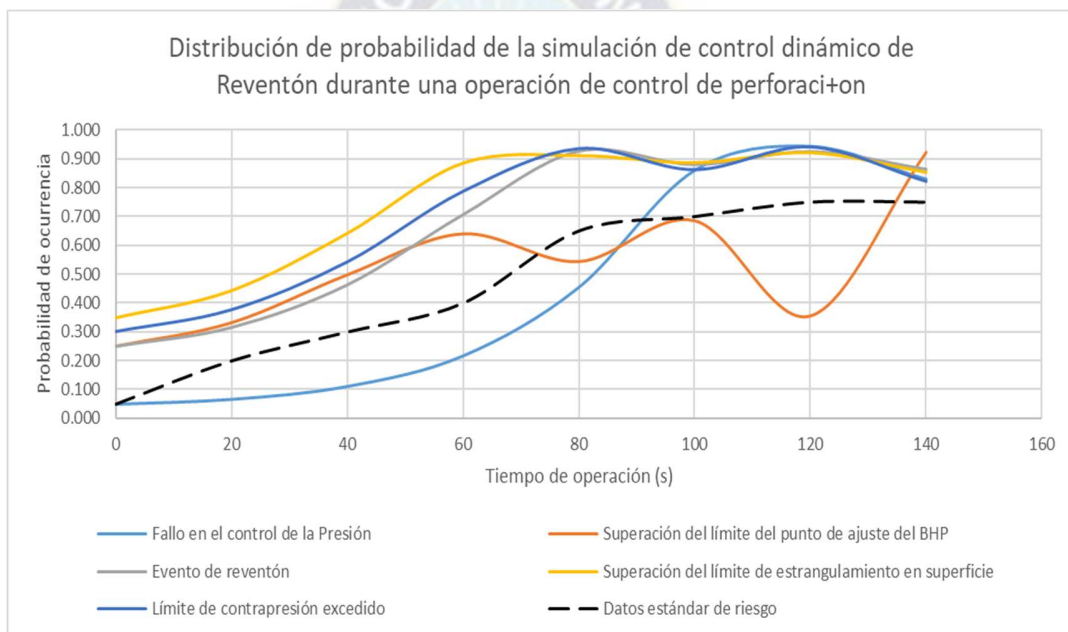
tiempo (s)	Fallo en el control de la Presión	Superación del límite del punto de ajuste del BHP	Evento de reventón	Superación del límite de estrangulamiento en superficie	Límite de contrapresión excedido	Datos estándar de riesgo
0	0.050	0.250	0.250	0.350	0.300	0.050
20	0.067	0.332	0.315	0.444	0.376	0.200
40	0.112	0.498	0.462	0.642	0.542	0.300
60	0.217	0.640	0.705	0.885	0.788	0.400
80	0.455	0.544	0.925	0.911	0.937	0.650
100	0.860	0.686	0.879	0.887	0.864	0.700
120	0.943	0.355	0.924	0.922	0.943	0.750
140	0.830	0.923	0.863	0.854	0.823	0.750

Fuente: Elaboración propia, 2023

Se hizo entonces una aplicación de las redes bayesianas al sistema MPD para evitar explosiones en futuros pozos a partir del análisis de este pozo ya perforado y se puede observar que se puede predecir y controlar de mejor manera el control de la presión y también eventos no deseados de y también eventos no deseados. Varios factores se han podido controlar desde la superación de límite del punto de ajuste seguido del evento del reventón, hasta el evento de estrangulamiento para evitar que otros futuros pozos se vengan abajo Durante este proceso de control.

Graficando, se tiene:

Figura 4. 8: Validación del Proyecto



Fuente: Elaboración Propia, 2023

En la anterior figura se puede ver la comparación de varios eventos que se controlan con el sistema MPD para evitar explosiones y se analizan con los modelos bayesianos. Se puede observar en la anterior figura que la probabilidad del evento Se incrementa en un 90 por ciento máximo para la superación del límite de ajuste del BHP y para el estrangulamiento; lo que significa que no van a soportar un tiempo más de 60 segundos seguido sin control de operación. Por lo tanto, es recomendable controlar cada 30 segundos con el sistema instalado y se evitará todo tipo de explosiones lo que muestra el modelo.

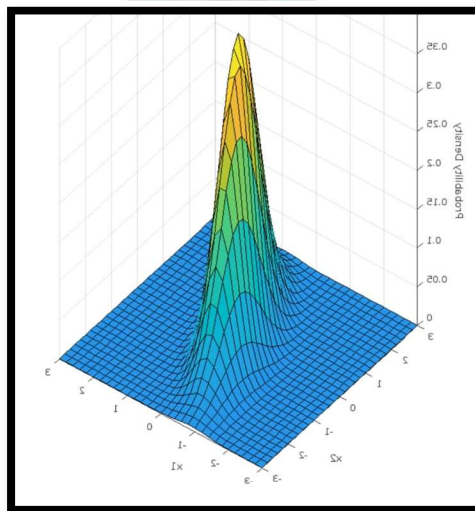
4.4.5 Simulación dinámica de riesgo en MATLAB

A continuación, se propone los anteriores modelos en código Matlab

```
clc
clear all
close all
mu = [0 0];
Sigma = [.25 .3;.3 1];
x1 = -3:.2:3; x2 = -3:.2:3;
[X1,X2] = meshgrid(x1,x2);
F = mvnpdf([X1(:) X2(:)],mu,Sigma);
F = reshape(F,length(x2),length(x1));
surf(x1,x2,F);
caxis([min(F(:))-5*range(F(:)),max(F(:))]);
axis([-3 3 -3 3 0 0.4])
xlabel('x1')
ylabel('x2')
zlabel('Probability Density');
```

Graficando se tiene:

Figura 4. 9: Función dinámica en el espacio



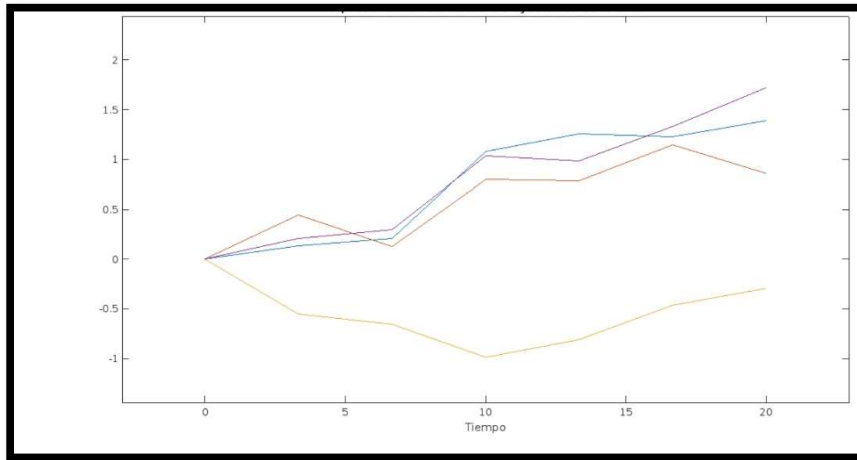
Fuente: Elaboración Propia, 2023

Se observa en la anterior gráfica que los factores se incrementan de manera positiva a medida que se incrementen las variables de tiempo es decir la función proporcional al incremento de las variables mientras mayor el valor mayor la probabilidad de riesgo y se demuestra de que se aproxima a la realidad mientras más tiempo de operación pasa mayores el riesgo.

```
clc
clear all
close all
M=input('ingrese el número de trayectorias deseadas: ')
N=input('ingrese el número de muestras deseadas: ')
B0=0;
mu=0.1; sigma=0.4;
T=input('ingrese el número el tiempo del proceso: ');
DeltaT=T/N;
X = randn(M,N); % vector de variables aleatorias que siguen una distribución normal
A=mu*DeltaT*sigma*sqrt(DeltaT)*X; %función de densidad de probabilidad para una distribución normal
B=B0*ones(M,1); % creación de vector de ceros que inicie la cuenta
C=[B A];
Bt = cumsum(C,2);
plot(0:DeltaT:T, Bt, '-')
title ('Representación del número trayectorias de Wiener');
xlabel('Tiempo');
```

Graficando la variación dinámica en el tiempo, se tiene:

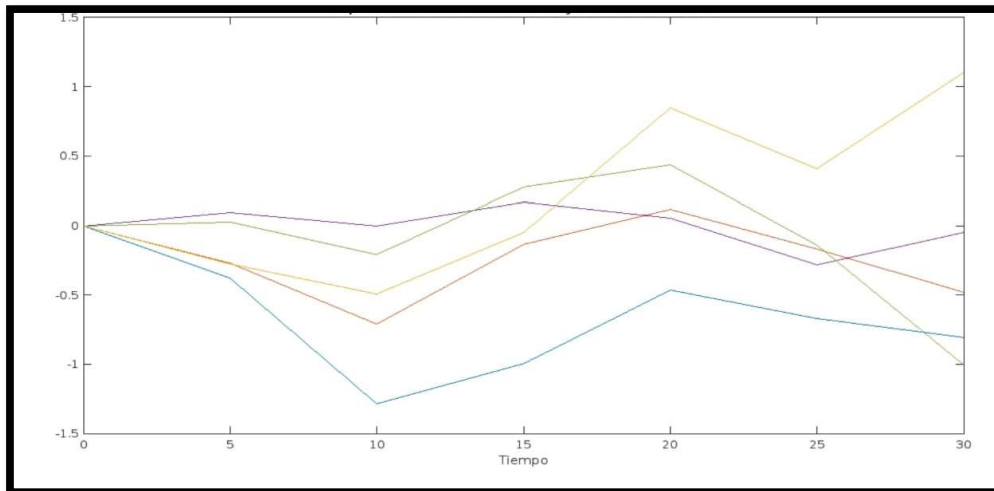
Figura 4. 10: Variación de la probabilidad en Matlab



Fuente: Elaboración Propia, 2023

Para una segunda iteración de variación de probabilidad de blowout:

Figura 4. 9: Variación de la probabilidad en Matlab



Fuente: Elaboración Propia, 2023

De la misma forma se puede demostrar con el software matlab en las figuras 4.8 y 4.9 respectivamente Es que la probabilidad varía dinámicamente en este caso aplicando un control el riesgo varía hasta el 50 a 90% en un tiempo de 30 segundos. Lo que demuestra que es necesario aplicar un sistema de control ya que si se perfora sin ningún control en menos de 50 segundos se viene una explosión en el pozo y en otros pozos relacionados.

Tabla 4. 19: Predicción de eventos de blue out para futuros diferentes pozos con Matlab

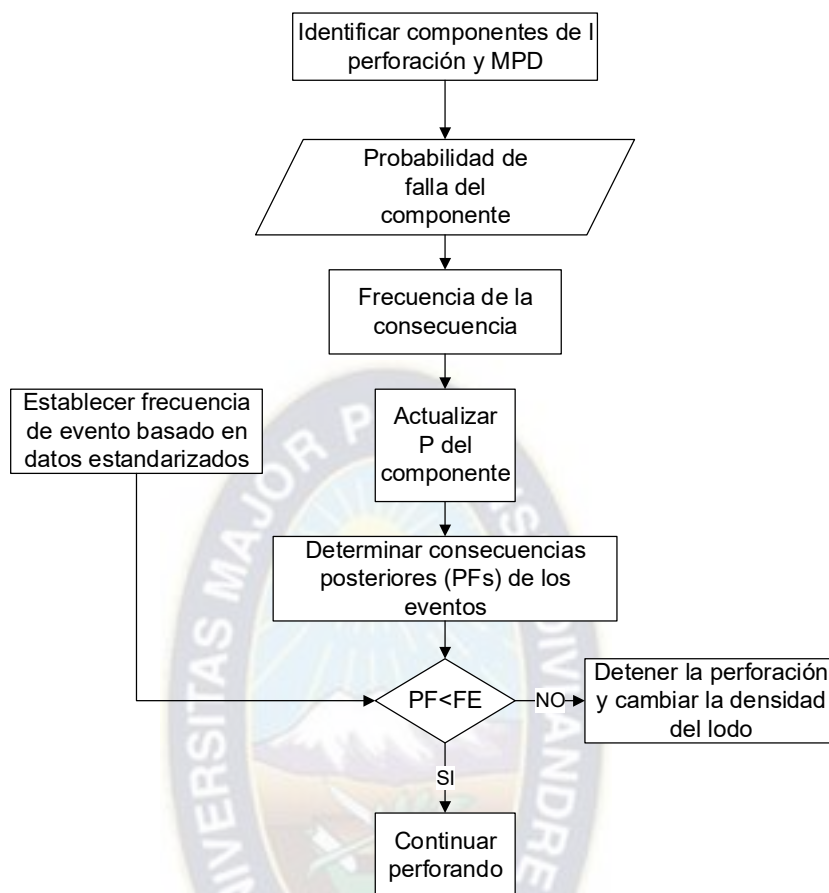
Pozo supuesto	Probabilidad máxima de daños sin MPD	Tiempo en el que se presenta el evento de BO
Pozo 1 (Azul)	0,40	20
Pozo 2 (Rojo)	0,30	30
Pozo 3 (Amarillo)	0,90	20
Pozo 4 (Verde)	0,57	30
Pozo 5 (Lila)	0,65	25

Fuente: Elaboración Propia, 2023

4.5 PROPUESTA DE CONTROL DE RIESGOS DURANTE LA PERFORACIÓN

El análisis del modelo de nudo de corbata sigue el algoritmo que se muestra en la Figura 3.1. Se determinan los componentes adecuados para la tecnología de perforación. Determina la probabilidad de falla previa de estos componentes y barreras de seguridad.

Figura 4. 11: Proceso de análisis de probabilidad dinámica



Fuente: Elaboración Propia, 2023

Donde:

PF: Probabilidad de Falla

FE: Frecuencia del evento

4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presenta las ventajas y desventajas de la aplicación de redes bayesianas propuesto:

Tabla 4. 20: Análisis para la otra causa principal ue es el incremento de la presión de poro

NIVEL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
En superficie	Se identifica fácilmente las causas y consecuencias que podrían ocurrir para cada variable de operación antes de comenzar el proceso de perforación.	Se precisa conocer valores probabilísticos iniciales para poder comenzar con el análisis caso contrario no se puede proceder.
Antes de la perforación	Se puede introducir de manera interactiva valores de presión y otros con una probabilidad inicial de daño para determinar el riesgo a distintas profundidades.	Los valores son iterados y puestos al tanteo lo cual no son muy exactos.
Durante la perforación	Es necesario realizar varias veces los cálculos para evitar fallas y se puede utilizar la base de datos de probabilidades anteriores durante la perforación	Si no se realiza un buen cálculo puede fallar la probabilidad y presentarse un reventón

Fuente: Elaboración propia, 2023

CAPITULO V: ANÁLISIS DE VIABILIDA TÉCNICA Y ECONÓMICA

5.1 COSTOS FIJOS

A continuación, se presentan los costos fijos considerando los costos de simulación y los costos de los equipos de seguridad. En Anexos se encuentra la prueba de dónde se obtuvieron los costos:

Tabla 5. 1 Análisis de costos fijos

COSTOS FIJOS EN BOLIVIANOS		
COSTOS FIJOS	Mensual	Tipo
SERVICIOS BÁSICOS	5.000	adm
SOFTWARE	15.000	Operativo
MANO DE OBRA INDIRECTA (MOI)	10.000	adm
SEGURIDAD INDUSTRIAL	12.500	adm
MANTENIMIENTO DE EQUIPO DE PERFORACION	30.000	Operativo
GASTOS GRALES. DE LEVANTAMIENTO DE DATOS	5.000	Operativo
IMPUESTOS	7.800	Financiero
TOTAL COSTO FIJO MES	107.800	

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis dinámico de riesgos, 2023

El costo fijo de levantamiento del proyecto para el estudio propuesto y proceso de consultoría con la implementación de un software de control es de 122800 bolivianos mensual. Pero el trabajo se lo realizará en un plazo de tres meses por tanto el costo fijo anual es de 368400 bolivianos.

5.2 COSTOS VARIABLES

A continuación, se presentan los costos variables considerando la simulación de la explosión durante el proceso de perforación:

Tabla 5. 2 Costos variables

COSTOS VARIABLES EN BOLIVIANOS			
COSTOS VARIABLES	Cantidad	V/r Unit	Mensual
Accesorios y material de escritorio	10	200,00	2.000
Equipos de seguridad	8	1.000,00	8.000
Equipos electrónicos	6	4.000	24.000
TOTAL COSTO VARIABLE MES			34.000

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis dinámico de riesgos, 2023

El costo variable de levantamiento del proyecto para el levantamiento del proyecto de seguridades de 34000 bolivianos.

5.3 DEPRECIACIÓN DEL PROYECTO

Para la depreciación del proyecto se cuenta con la siguiente tabla:

Tabla 5. 3 Depreciación anual del proyecto

PROPIEDAD	Valor	Vida Útil/ Años	Depreciación Anual
Equipos de control en superficie	1392000	8	174000
Computadora	3800	4	950
Accesorios y material de escritorio	445	10	44,5
Software	15000	10	1689,52
Vehículo	140000	5	28000
Impresoras	1000	5	200
Total	1560245		204884,82

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis dinámico de riesgos, 2023

La depreciación anual del proyecto es de 205884,82 bolivianos

La depreciación es la cantidad que se debe amortiguar ya que todos los equipos y materiales van perdiendo su valor y es necesario pagar esa pérdida y por eso también se hace esa cotización que se debe cubrir con los ingresos.

5.4 INVERSIÓN INICIAL

Se tiene la siguiente tabla donde se describe la inversión total del proyecto, considerando que solo los costos se aplicarán para tres meses ya que ese es el tiempo de levantamiento de datos y estudio:

Tabla 5. 4 Capital de trabajo

COSTOS FIJOS AL MES	107.800,00
COSTOS VARIABLES AL MES	34.000,00
TRES MESES DE COSTOS Y GASTOS	141.800,00
DEPRECIACIÓN UN AÑO	205.884,82
Software	15.000,00
Preventores y herramientas MPD	1.400.000,00
TOTAL INVERSION INICIAL	1.762.684,82

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis dinámico de riesgos, 2023

La inversión inicial del levantamiento de datos, la simulación, la compra de tipos de control en superficie y la instalación de un software de control es de 1762684,82 bolivianos, lo que aproximadamente se iguala al presupuesto calculado.

5.5 ESTUDIO DE TIR Y VAN

5.5.1 Estudio del Van

Se puede desarrollar un proyecto de inversión cuando el valor actual neto total (VAN o NVP) de todos los flujos de efectivo es positivo, y un proyecto de inversión se

rechaza cuando el VAN es negativo. 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 VAN es:

$$VAN = -I_o + \sum_{t=0}^T \frac{X_t}{(1+r)^T} \quad (5.1)$$

Donde:

VAN = Valor Actual neto

I_o = Inversión inicial en \$us

FC = Flujo de efectivo de cada año en \$us cada año en \$us

r = interés en tanto por 1, en nuestro proyecto se considera 15% de interés en tanto por 1, en nuestro proyecto se considera 15%

El flujo de caja será la utilidad estimada en Bs como parte de los ingresos destinados para consultoría y control de la seguridad industrial:

Tabla 5. 5 Flujo de caja por año para demostrar el VAN

Años	Flujo de Caja [Bs]
2024	1.934.400
2025	1.934.400

Fuente: Elaboración propia, 2023

Por lo tanto, proyectando para dos años se tiene:

$$VAN = - 1.762.684,82 \text{ Bs} + \frac{1.934.400}{(1 + 0.15)^1} + \frac{1.934.400}{(1 + 0.15)^2}$$

$$VAN = 1382086$$

El proyecto está proyectado para su financiamiento en 2 años; por lo tanto, para hallar el VAN, recurrimos al siguiente criterio:

- Si $VAN > 0$ ES RENTABLE
- Si $VAN = 0$ ES INDIFERENTE
- Si $VAN < 0$ NO ES RENTABLE

Por lo tanto:

$$VAN = 1382086 > 0 \text{ Por lo tanto es rentable}$$

5.5.2 Estudio del TIR

La TIR se puede definir como la tasa de descuento a la que el valor presente de todos los flujos de efectivo futuros (o beneficios hipotéticos esperados monetizados) es igual a la inversión inicial, es decir, la tasa a la que una inversión se equilibra. Se puede utilizar para medir y comparar la rentabilidad de las inversiones.

El TIR se calcula con la siguiente fórmula:

$$\sum_{n=0}^N \frac{FC}{(1 + TIR)^n} - I_o = 0 \quad (5.2)$$

Reemplazando se tiene:

$$0 = - 1.762.684,82 \text{ Bs} + \frac{1.934.400}{(1 + TIR)^1} + \frac{1.934.400}{(1 + TIR)^2}$$

Resolviendo:

$$1.762.684,82 = \frac{1.934.400}{(1 + TIR)^1} + \frac{1.934.400}{(1 + TIR)^2}$$

$$1.762.684,82(1 + 2 * TIR + TIR^2) = 1934400 * (1 + TIR) + 1934400$$

$$TIR^2 = 1,097 * (2 + TIR) - 2 * TIR - 1$$

$$TIR^2 + 0,903 * TIR - 1,194 = 0$$

$$TIR = 73,08 \%$$

Por lo tanto, como el TIR es > a la Tasa de descuento de 15% (0,15). El proyecto es factible.

5.6 ANÁLISIS DE COSTO Y BENEFICIO

La siguiente tabla puede usarse como indicador para determinar si el costo de implementar de un sistema de control de seguridad bayesiano tiene beneficios:

Tabla 5. 6 Interpretación de Costo y beneficios

CRITERIO	DESCRIPCION	SIGNIFICADO
B/C > 1	Los ingresos son mayores que los egresos	El proyecto es aconsejable
B/C = 1	Los ingresos son iguales que los egresos	El proyecto es indiferente
B/C < 1	Los ingresos son menores que los egresos	El proyecto no es aconsejable

Fuente: Elaboración propia, 2023

Por lo tanto, usando la ecuación:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Inversion inicial}}$$

Para los dos años de financiamiento:

$$\frac{B}{C} = \frac{[(1934400 - 1556830) + 1934400]Bs}{1.762.684,82 Bs}$$

$$\frac{B}{C} = 1,31$$

Sobra el 31 % del presupuesto planteado, por lo tanto, el proyecto es factible ya que sobrar  dinero después de la implementación del proyecto.

5.7 RESUMEN DE LAS VARIABLES DE RENTABILIDAD

Se tiene el siguiente recuadro que relaciona el TIR, el VAN y la relación de costos y beneficios:

Tabla 5. 7 Parámetros económicos

FLUJO DE CAJA LIBRE	
VALOR PRESENTE NETO	1382086
TIR	73,08 %
Rel Ben / Costo	1,31

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2022

Se observa que la relación costo beneficio es de 1,31 lo cuál la utilidad se puede afirmar que es alta y afirmar que el proyecto de control de la seguridad industrial predictivo durante el proceso de perforación se financiará en menos de dos años y el TIR equivale al 73,08 % porque traduciendo que los costos de inversión serán cubiertos cada año. Este costo y análisis se puede aplicar a otros pozos cercanos al pozo descrito ya que se encuentra perforado, pero sirve como un plan de costos para futuras consultorías

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Después de un cuidadoso análisis, se han llegado a las siguientes conclusiones.

- Se ha explicado claramente la descripción del análisis de riesgo dinámico y de las redes bayesianas en relación con el control de explosiones durante la perforación de pozos.
- Se proporcionó una explicación fácilmente comprensible de los distintos factores que influyen en el riesgo de pérdida de control, patada o explosión.
- Para evaluar la seguridad de una operación de perforación con presión controlada en el pozo SMG-X2, se creó un modelo sofisticado y dinámico. Este modelo tiene en cuenta varios parámetros que pueden contribuir al riesgo de una explosión, incluidos factores que pueden provocar una pérdida de control, una patada o una explosión.
- Los parámetros de flujo de circulación, altura de la caja de lodo, arrastre y presión de la bomba se calcularon en condiciones no controladas.
- Al utilizar el software MATLAB, fue factible anticipar los parámetros de falla en el control del pozo y el riesgo potencial de explosión durante el proceso de perforación del pozo SMG-X2, con base en los parámetros de control de explosiones.
- Proponer de manera eficiente un plan dinámico de prevención y control de riesgos puede mitigar efectivamente las posibles explosiones que puedan ocurrir durante la perforación del pozo SMG X2.

- Se ha ilustrado visualmente la aparición tanto de pérdidas de circulación como de reventones, mostrando sus probabilidades durante un período de tiempo determinado.
- El proyecto propuesto fue sometido a un exhaustivo estudio de viabilidad económica, que confirmó su viabilidad de manera eficiente.

6.2 RECOMENDACIONES

Al implementar redes bayesianas dinámicas durante todo el proceso de perforación, es posible gestionar y mitigar eficazmente el riesgo de explosión asociado con el pozo SMG X2 y pozos cercanos a éste.

Es recomendable que la empresa adopte las últimas investigaciones internacionales en el campo de la seguridad industrial en perforación y destine recursos para realizar investigaciones en esta área. Esto es crucial porque los modelos existentes se adaptan a pozos en países específicos y las regulaciones de seguridad industrial son demasiado amplias para atender las condiciones únicas de los pozos en Bolivia. Además, sería beneficioso establecer una base de datos integral que documente los accidentes, las secciones de perforación y las explosiones que ocurren durante diversas operaciones de perforación. Al crear bases de datos numéricas, podemos hacer predicciones precisas sobre futuros proyectos de perforación que aún no se han llevado a cabo.

Para evitar pérdidas económicas durante la perforación, se recomienda implementar análisis de riesgos basados en estándares y estudios cuantitativos. Este enfoque ayuda a mitigar los daños potenciales a los trabajadores y al equipo operativo, así como a minimizar el tiempo no productivo y las pérdidas financieras asociadas causadas por retrasos operativos. Por lo tanto, realizar investigaciones científicas sobre la prevención de reventones es crucial y este proyecto demuestra su viabilidad técnica y económica.

Al construir un modelo dinámico sofisticado e integral que tenga en cuenta los diversos parámetros que influyen en el potencial de pérdida de control, patada o explosión, es posible proporcionar recomendaciones más precisas con respecto a la gestión del equipo de control y el rango óptimo de valores de presión para operación segura, mitigando así todos los riesgos y accidentes potenciales.

Es muy recomendable brindar capacitación a los trabajadores y estudiantes de posgrado en el campo de la fricción, estadística, modelos bayesianos y otras teorías relevantes, que puedan aplicarse utilizando sistemas informáticos para mejorar el control de seguridad dentro de la industria petrolera.



BIBLIOGRAFÍA


- Amin, M.T., Khan, F., Imtiaz, S., 2018. Dynamic availability assessment of safety critical systems using a dynamic Bayesian network. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 178, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.05.017>.
- Barua, S., Gao, X., Pasman, H., Mannan, M.S., 2016. Bayesian network based dynamic operational risk assessment. *J. Loss Prev. Process. Ind.* (41), 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.11.024>.
- Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M., Ciancamerla, E., 2001. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 71, 249–260.
- Cai, B., Liu, Y., Zhang, Y., Fan, Q., Liu, Z., Tian, X., 2013. A dynamic Bayesian networks modeling of human factors on offshore blowouts. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 26 (4), 639–649. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.01.001>.
- Dong, C., Yue, H., 2016. Identification of functional connections in biological neural networks using dynamic bayesian networks. *IFAC-PapersOnLine* 49 (26), 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.122>.
- Eren, T., 2018. Kick tolerance calculations for drilling operations. *J. Pet. Sci. Eng.* 171, 558–569. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.077>.
- Fredericks, P.D., Smith, L., Moreau, K.J., 2011. ECD Management and Pore Pressure Determination with MPD Improves Efficiency in GOM Well. *Society of Petroleum Engineers* <https://doi.org/10.2118/140289-MS>.
- Gabaldon, O., Culen, M., Brand, P., 2014. Enhancing well control through managed pressure drilling. In: OTC-25256-MS, Houston, Texas, USA, 5–8 May 2014.
- Gala, D.M., Toralde, J.S., 2011. Managed pressure drilling 101: moving beyond “It’s always been done that way”. *The Way Ahead* 7 (1).
- Graham, B., Reilly, W.K., Beinecke, F., Boesch, D.F., Garcia, T.D., Murray, C.A., Ulmer, F., 2011. Deep water, the Gulf oil disaster and the future of offshore drilling. National commission on the BP deepwater horizon oil spill and offshore drilling. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/GPO->

- OILCOMMISSION/pdf/GPO-OILCOMMISSION.pdf, Accessed date: 21 December 2016.
- Grayson, B., Gans, A.H., 2012. Closed loop circulating systems enhance well control and efficiency with precise wellbore monitoring and management capabilities. In: SPE/ IADC Conference and Exhibition, Milan, Italy, 20–21 March 2012.
- Grüne, L., Pannek, J., 2017. Nonlinear Model Predictive Control. Theory and Algorithms, second ed. Springer International Publishing Switzerland 978-3-319-46024-6.
- Hannegan D.M., Bailey T.F. , Jacobs M.T. , and White N.A. (2017). US patent No US 9845653B2. Retrieved from Google patent. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a7/6d/01/066b2daf5bf4b8/US9845653.pdf> [Accessed: October 3, 2018].
- He, M., Xu, M., Li, J., Liu, G., 2017. A new two-phase model to simulate sour gas kicks in MPD operations with water based mud. J. Pet. Sci. Eng. 159, 331–343. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.024>.
- Hulst, J., 2006. Modeling Physiological Processes with Dynamic Bayesian Networks. Master Thesis. Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology.
- Fachado. (2018). *Planta de Producción de Paracetamol*. Coruña: Universidad de Santiago de Compostela.
- Laín, Hernán, Valencia, Torres, & Montoya. (2011). *Determinación del tiempo de mezcla en un tanque de almacenamiento para agua potable mediante dinámica de fluidos computacional*. Colombia: Revista Ingenierías Universidad de Medellín.
- Ricaurte, E. (2016). *Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica Del Litoral.
- Salgado. (2017). *Evaluación hidrodinámica de la mezcla de fluidos monofásicos en tanques de mezcla mediante CFD*. BibTeX: Tesis de Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos .

Uribe, Rivera, Aguilera, & Alvarado. (2012). *Agitación y mezclado*. México: Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato.

ANEXOS

Anexos A: Datos del pozo SMG X2



ROP-GAS SMG-X2

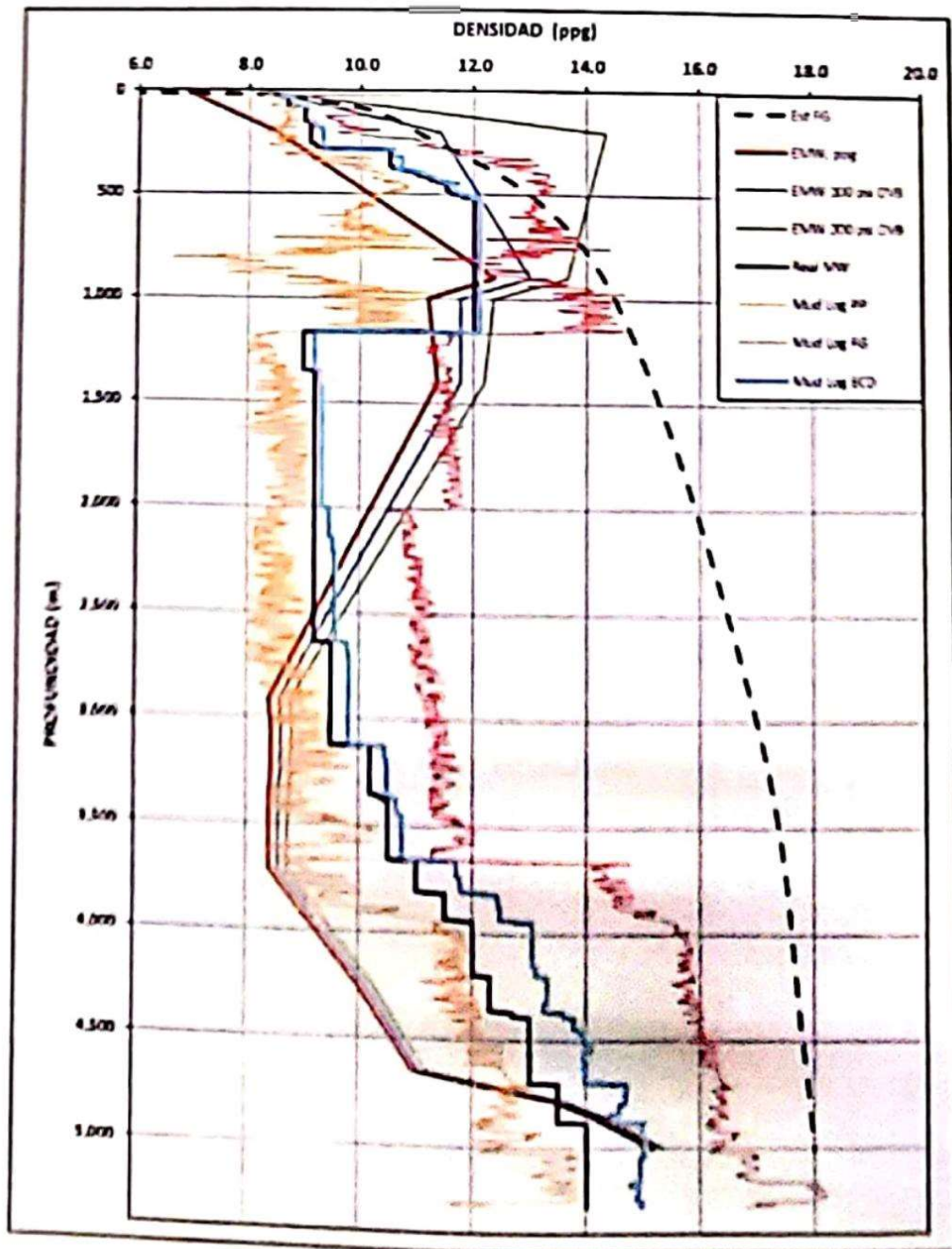
Depth m	ROP m/min	T Gas vol	T Gas ppm	CO ppm	O2 ppm	CS ppm	HC4 ppm	CA ppm	EVALUACION
331	17.2	0	150	150	0	0	0	0	
332	12.6	0	157	157	0	0	0	0	
333	13.4	0	141	141	0	0	0	0	
334	12.1	0	163	163	0	0	0	0	
335	13.3	1	177	177	0	0	0	0	
336	11.3	0	149	149	0	0	0	0	
337	11.7	0	152	152	0	0	0	0	
338	16.3	0	137	137	0	0	0	0	
339	16.4	0	149	145	0	0	0	0	
340	14.7	0	137	137	0	0	0	0	
341	28.4	0	102	102	0	0	0	0	
342	26.0	0	86	86	0	0	0	0	
343	28.5	0	70	70	0	0	0	0	
344	26.3	0	91	91	0	0	0	0	
345	16.8	0	86	86	0	0	0	0	
346	23.3	0	87	87	0	0	0	0	
347	24.6	0	86	86	0	0	0	0	
348	38.9	0	106	106	0	0	0	0	
349	27.1	0	126	126	0	0	0	0	
350	16.2	0	115	115	0	0	0	0	
351	22.5	0	104	104	0	0	0	0	
352	19.3	1	229	229	0	0	0	0	
353	23.6	1	250	250	0	0	0	0	
354	27.7	1	315	315	0	0	0	0	
355	15.3	1	236	236	0	0	0	0	
356	20.7	1	223	223	0	0	0	0	
357	17.3	1	234	234	0	0	0	0	
358	28.3	1	250	250	0	0	0	0	
359	25.3	1	328	328	0	0	0	0	
360	25.1	1	280	280	0	0	0	0	
361	15.6	1	291	291	0	0	0	0	
362	20.0	1	309	309	0	0	0	0	
363	19.7	1	356	356	0	0	0	0	
364	17.7	1	443	443	0	0	0	0	
365	16.8	2	519	519	0	0	0	0	
366	14.3	2	832	788	28	0	0	0	
367	17.4	3	992	932	40	0	0	0	
368	14.9	4	1248	1173	58	0	0	0	
369	12.3	4	1398	1307	74	0	0	0	
370	20.2	5	1874	1583	87	0	0	0	
371	24.6	5	1874	1743	87	0	0	0	
372	15.9	5	1890	1567	95	0	0	0	
373	18.1	6	1928	1783	95	0	0	0	
374	17.6	6	2534	2442	128	0	0	0	
375	19.4	6	2510	2325	123	0	0	0	
376	17.0	6	2587	2401	124	0	0	0	
377	13.7	6	2746	2548	132	0	0	0	SH
378	16.0	7	2458	2251	132	0	0	0	SH
379	16.7	7	2579	2312	147	23	0	0	SH
380	16.2	8	2571	2305	145	24	0	0	SH
381	13.4	8	2621	2349	140	31	0	0	SH
382	14.8	8	2604	2501	138	35	0	0	SH
383	20.0	8	2612	2311	131	37	0	0	SH
384	22.7	7	2486	2207	136	37	0	0	SH
385	34.1	5	1786	1531	108	32	0	0	SH
386	20.6	5	1786	1597	87	28	0	0	SH
387	13.2	5	3047	2739	140	38	0	0	SH
388	10.8	13	4219	3810	202	52	0	0	SH
389	15.8	11	2670	2489	186	51	0	0	SH
390	15.7	10	3346	2949	192	54	0	0	SH
391	26.0	8	2621	2373	150	52	0	0	SH
392	21.7	8	2797	2448	150	52	0	0	SH
393	23.2	12	4082	3511	265	87	0	0	SH

6

ROP-GAS SMG-X2

Depth	ROP	T Gas	T Gas	C1	C2	C3	IC4	NC4	C6
MD	min/m	ugt	PPM	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
709	83.6	5	1763	1703	40	0	0	0	0
710	78.0	7	2436	2350	57	0	0	0	0
711	83.5	6	2165	2084	54	0	0	0	0
712	90.0	6	2004	1930	49	0	0	0	0
713	65.2	7	2335	2257	52	0	0	0	0
714	52.1	7	2375	2286	59	0	0	0	0
715	58.4	7	2445	2361	56	0	0	0	0
716	31.6	8	2672	2574	65	0	0	0	0
717	27.2	6	1894	1834	40	0	0	0	0
718	38.8	4	1331	1281	33	0	0	0	0
719	28.9	5	1563	1515	32	0	0	0	0
720	26.2	5	1773	1722	34	0	0	0	0
721	28.8	5	1519	1465	35	0	0	0	0
722	35.8	4	1322	1278	29	0	0	0	0
723	41.1	5	1531	1474	38	0	0	0	0
724	45.5	4	1284	1234	33	0	0	0	0
725	45.0	5	1681	1615	44	0	0	0	0
726	50.1	6	1875	1809	44	0	0	0	0
727	69.9	6	2048	1980	45	0	0	0	0
728	60.2	6	1870	1792	52	0	0	0	0
729	53.7	5	1644	1579	43	0	0	0	0
730	43.6	5	1763	1697	44	0	0	0	0
731	43.6	6	1988	1926	41	0	0	0	0
732	56.3	5	1509	1446	42	0	0	0	0
733	73.7	4	1411	1328	55	0	0	0	0
734	93.8	4	1479	1413	44	0	0	0	0
735	82.1	5	1600	1543	38	0	0	0	0
736	77.5	3	1133	1079	36	0	0	0	0
737	56.9	3	1081	1028	35	0	0	0	0
738	30.4	5	1675	1607	45	0	0	0	0
739	50.0	4	1459	1397	41	0	0	0	0
740	53.7	5	1643	1577	44	0	0	0	0
741	50.4	5	1508	1448	40	0	0	0	0
742	40.1	6	1838	1779	39	0	0	0	0
743	31.8	6	1839	1770	46	0	0	0	0
744	62.7	6	1865	1803	41	0	0	0	0
745	55.6	4	1286	1229	38	0	0	0	0
746	72.2	4	1490	1439	34	0	0	0	0
747	30.0	3	1054	1000	36	0	0	0	0
748	29.0	3	1085	1034	34	0	0	0	0
749	25.0	4	1190	1139	34	0	0	0	0
750	22.6	3	1120	1072	32	0	0	0	0
751	20.3	3	1152	1059	62	0	0	0	0

Anexos B: Datos de presión



ANEXOS C: Costos de los equipos del pozo SMG – X2

INTERGAS		YPFB		Chaco S.A.			
Grado	OD	ID	Peso	CONEX	Peso TD klb	Peso BHA klb	
S-135	5	4.276	19.5		55	84	
Codigo	BHA : N°	167.25 Tiro	Long Pza. (m)	Long. Tiro (m)	Length Ac. (m)	L. Ac. + BHA	Profundidad Cupla
23C1020	1		9.55		9.55	176.80	
10C1020	2	1	9.42	28.51	18.97	186.22	
126C1020	3		9.54		28.51	195.76	195.76
9C1020	4		9.54		38.05	205.30	
30C1020	5	2	9.54	28.71	47.59	214.84	
96C1020	6		9.63		57.22	224.47	224.47
70C1020	7		9.52		66.74	233.99	
6C1020	8	3	9.43	28.51	76.17	243.42	
100C1020	9		9.56		85.73	252.98	252.98
132C1020	10		9.52		95.25	262.50	
232C520	11	4	9.63	28.70	104.88	272.13	
257C520	12		9.55		114.43	281.68	281.68
64C520	13		9.54		123.97	291.22	
278C520	14	5	9.54	28.61	133.51	300.76	
60C1020	15		9.53		143.04	310.29	310.29
22C1020	16		9.41		152.45	319.70	
58C1020	17	6	9.39	28.35	161.84	329.09	
32C1020	18		9.55		171.39	338.64	338.64
85C1020	19		9.52		180.91	348.16	
36C1020	20	7	9.42	28.49	190.33	357.58	
17C1020	21		9.55		199.88	367.13	367.13
360C520	22		9.53		209.41	376.66	
185C520	23	8	9.52	28.59	218.93	386.18	
164C520	24		9.54		228.47	395.72	395.72
80C921	25		9.57		238.04	405.29	
91C921	26	9	9.53	28.68	247.57	414.82	
85C921	27		9.58		257.15	424.40	424.40
89C921	28		9.52		266.67	433.92	
216C520	29	10	9.53	28.58	276.20	443.45	
198C520	30		9.53		285.73	452.98	452.98
361C520	31		9.53		295.26	462.51	
70C520	32	11	9.64	28.79	304.90	472.15	
46C520	33		9.62		314.52	481.77	481.77
72C520	34		9.54		324.06	491.31	
277C520	35	12	9.60	28.70	333.66	500.91	
68C921	36		9.56		343.22	510.47	510.47
72C921	37		9.58		352.80	520.05	
35C921	38	13	9.53	28.69	362.33	529.58	
39C921	39		9.58		371.91	539.16	539.16
41C921	40		9.58		381.49	548.74	
50C921	41	14	9.67	28.78	391.16	558.41	
51C921	42		9.53		400.69	567.94	567.94
75C921	43		9.53		410.22	577.47	
76C921	44	15	9.56	28.66	419.78	587.03	
59C921	45		9.57		429.35	596.60	596.60
58C921	46		9.56		438.91	606.16	
60C921	47	16	9.52	28.63	448.43	615.68	
64C921	48		9.55		457.98	625.23	625.23
66C921	49		9.55		467.53	634.78	
32C921	50	17	9.53	28.63	477.06	644.31	



2024-TTES-488-D-1

**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-1494/2024
La Paz, 17 de mayo de 2024**

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **14 de mayo de 2024**, por **WILMAR ANDRES RODAS CASTRO** con **C.I. N° 10017593 LP**, con número de trámite **DA 828/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"CONTROL DEL RIESGO DE EXPLOSION DEL POZO SMG X2, MEDIANTE LA APLICACION DE REDES BAYESIANAS DINAMICAS DURANTE LA OPERACION DE PERFORACION"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO:

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los"*



ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO:

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

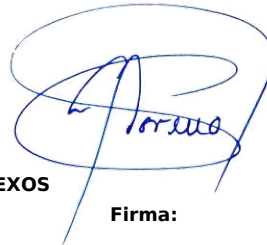
INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: "**CONTROL DEL RIESGO DE EXPLOSION DEL POZO SMG X2, MEDIANTE LA APLICACION DE REDES BAYESIANAS DINAMICAS DURANTE LA OPERACION DE PERFORACION**" a favor del autor y titular: **WILMAR ANDRES RODAS CASTRO** con **C.I. N° 10017593 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

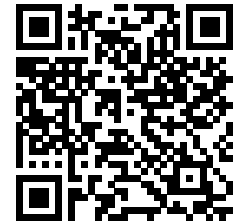
CASA/Im

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI
CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO
DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



PvSkn7Vq5Mo74H

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telfs.: 2115700
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 5B,
Zona 16 de Julio.
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
casi esq. Urriagoitia,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles Ciro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre, N° 5837,
entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14.
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.
Telf.: 72018160



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA PETROLERA**

Nombre: Wilmar Andrés Rodas Castro

CI: 10017593 LPZ

Celular: 71211069

Correo electrónico: wrodascastro@gmail.com