

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
Facultad de Ciencias e Ingeniería



**“PERFORADORA DE ROCAS TELEOPERADA PARA LA MINERÍA  
PROFUNDA, CON CONTROL AUTÓNOMO DEL BRAZO HIDRÁULICO EN  
UN GRADO DE LIBERTAD”**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico, que presenta el  
bachiller:**

**Piero Fabrizzio Mendoza Fuente**

**ASESOR: MEng. Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda**

**Lima, abril del 2017**

## RESUMEN

La perforación y voladura de rocas son procedimientos muy importantes en la minería subterránea para la extracción de minerales, es por esta razón que es importante que estos procedimientos se realicen correctamente, de forma que sean eficientes y brinden la seguridad necesaria para el operario. Casi la mayoría de los jumbos hidráulicos y neumáticos en el mundo son operados manualmente, y en el Perú, ninguna empresa minera tiene como activo una perforadora automática o teleoperada. Esto genera riesgos para su salud, por el riesgo de derrumbes y agentes tóxicos en el ambiente; y además la repetitividad del trabajo depende directamente de la experiencia del operador.

Con este fin se han seleccionado los sensores y actuadores para la teleoperación de la maquinaria y el control del brazo perforador en un grado de libertad, tomando como referencia el jumbo hidráulico Boomer 282, del fabricante Atlas Copco. La selección de este modelo fue para poder probar que se puede realizar un control remoto de cualquier maquinaria con mandos manuales. El sistema cuenta con sensores lineales para medir la carrera de los cilindros hidráulicos, un sistema anti-colisión, cámaras para la visión de operador a distancia y control automático de la posición del brazo perforador para su movimiento vertical.

El resultado es el vehículo teleoperado por medio de WiFi y con el control del movimiento vertical de su brazo perforador, así como el control electrónico de las funciones de perforación por medio de válvulas electrohidráulicas y controladores.

## TEMA DE TESIS APROBADO POR EL DECANO

FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

### TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

Título : "Perforadora de rocas teleoperada para la minería profunda, con control autónomo del brazo hidráulico en un grado de libertad"  
Asesor : MEng. Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda  
Alumno : Piero Fabrizzio Mendoza Fuente  
Código : 20111355  
Tema N° : #133  
Fecha : 30/06/2016



#### Descripción y Objetivos

La perforación y voladura de rocas son procedimientos muy importantes en la minería subterránea para la extracción de minerales, es por esta razón de que estos procedimientos se realicen correctamente, de forma que sean eficientes y brinden la seguridad necesaria para el operario. Casi la mayoría de los jumbos hidráulicos y neumáticos en el mundo son operados manualmente, y en el Perú, ninguna empresa minera tiene en su haber una perforadora automática o teleoperada. Esto genera riesgos para su salud, por el riesgo de derrumbes y agentes tóxicos en el ambiente; y además la repetitividad del trabajo depende directamente de la experiencia del mismo.

Con este fin se han seleccionado los sensores y actuadores para la teleoperación de la maquinaria y el control de un grado de libertad del brazo perforador, tomando como referencia el jumbo hidráulico Boomer 282, del fabricante Atlas Copco. La selección de este modelo fue para poder probar que se puede realizar de un control remoto de cualquier maquinaria con mandos manuales. El sistema cuenta con sensores lineales para medir la carrera de los cilindros hidráulicos, de un sistema anti-colisión, de cámaras para la visión de operador a distancia y del control automático de la posición del brazo perforador para su movimiento vertical.

*Máximo: 100 páginas*

*Erika J. Madrid R.*



11

*[Signature]*



# ÍNDICE

RESUMEN .....	i
TEMA DE TESIS APROBADO POR EL DECANO .....	ii
ÍNDICE .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS .....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. CAPÍTULO 1 – LA PERFORACIÓN HIDRÁULICA .....	3
1.1. La perforación de la roca en la minería subterránea.....	3
1.2. Sistema de perforación por rotopercusión.....	5
1.2.1. Perforadoras hidráulicas.....	7
1.3. Sistemas de montaje.....	9
1.3.1. Jumbos .....	9
1.4. Estado de la tecnología actual .....	11
1.4.1. Sandvik DD422i .....	11
1.4.2. Boomer XE4 C.....	12
1.4.3. Jumbo 6R-2P .....	14
1.4.4. Comparación entre las tecnologías actuales .....	15
2. CAPÍTULO 2 – DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO .....	16
2.1. Requerimientos del sistema .....	16
2.1.1. Requerimientos mecánicos.....	16
2.1.2. Requerimientos eléctricos y electrónicos.....	16
2.1.3. Requerimientos de control .....	17
2.2. Concepto de solución definitivo .....	17
2.3. Análisis del sistema hidráulico .....	19
2.3.1. Válvulas de comando del cilindro perforador.....	19
2.3.2. Válvulas de comando de los actuadores de rotación, avance y percusión ...	23
2.3.3. Sistema de dirección .....	31
2.3.4. Selección de electroválvulas hidráulicas.....	31
2.3.5. Esquemas hidráulicos de los comandos de válvulas.....	34

2.4.	Análisis de la transmisión de las señales en labores subterráneas .....	34
2.5.	Sistema electrónico.....	37
2.5.1.	Sensores y actuadores .....	38
2.5.2.	Comunicación.....	44
2.5.3.	Microcontroladores .....	46
2.5.4.	Diagramas esquemáticos .....	47
2.6.	Protección de los componentes electrónicos .....	52
2.7.	Lógica de Control .....	53
2.7.1.	Diagrama de Bloques .....	53
2.7.2.	Diagramas de Flujo.....	53
2.7.3.	Arquitectura de control .....	60
2.7.4.	Simulación del sistema electrónico.....	62
2.7.5.	Simulación del sistema hidráulico.....	63
3.	COSTOS .....	66
3.1.	Costo de los componentes electrónicos .....	66
3.2.	Costo de los componentes electrohidráulicos.....	67
	CONCLUSIONES.....	68
	RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Características medias de los martillos hidráulicos .....	7
Tabla 1.2: Parámetros técnicos de la perforadora Sandvik DD422i .....	12
Tabla 1.3: Parámetros técnicos de la perforadora XE4 C.....	14
Tabla 1.4: Comparación entre los jumbos automatizados en la minería .....	15
Tabla 2.1: Comparación entre distintas marcas fabricantes de válvulas electrohidráulicas .....	31
Tabla 2.2: Características técnicas de la PVG 32 .....	32
Tabla 2.3: Selección de filtros pasabanda para la conexión inalámbrica. ....	34
Tabla 2.4: Características técnicas del filtro pasabanda BPF24-801A .....	37
Tabla 2.5: Escáneres láser 3D por tiempo de vuelo.....	38
Tabla 2.6: Parámetros técnicos del sensor OS32C.....	39
Tabla 2.7: Cámaras IP.....	40
Tabla 2.8: Parámetros técnicos de la cámara IPM3014.....	40
Tabla 2.9: Sensores Lineales .....	41
Tabla 2.10: Parámetros técnicos del sensor lineal MXRS550 .....	42
Tabla 2.11: Joysticks en el mercado.....	43
Tabla 2.12: Parámetros técnicos del joystick JS6000 de Danfoss.....	43
Tabla 2.13: Datos técnicos del 954U-E.....	45
Tabla 2.14: Selección de microcontroladores.....	46
Tabla 2.15: Parámetros técnicos del ATmega2560.....	47
Tabla 2.16: Características técnicas del modelo DT13-24PAB .....	52
Tabla 3.1: Costo de los componentes electrónicos .....	66
Tabla 3.2: Costo de los componentes electrohidráulicos .....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Intro.1: Ciclo de avance en la minería subterránea .....	1
Figura 1.1: Perforadoras utilizadas en las labores mineras .....	4
Figura 1.2: Método Raise Boring .....	5
Figura 1.3: Funcionamiento básico de un sistema de perforación por rotopercusión .....	6
Figura 1.4: Etapas de ruptura de una roca por sistemas de rotopercusión .....	7
Figura 1.5: Distintos niveles de ruido entre los tipos de perforadora .....	8
Figura 1.6: Comparación entre la transmisión de energía hidráulica y neumática (en orden) . .....	8
Figura 1.7 : Diversos usos de los jumbos en la minería .....	9
Figura 1.8: Partes principales de un jumbo hidráulico .....	10
Figura 1.9: Equipo teleoperado Sandvik DD422i .....	11
Figura 1.10: Estación Sandvik de teleoperación de la perforación .....	12
Figura 1.11: Jumbo de perforación Atlas Copco XE4 C .....	13
Figura 1.12: Interfaz gráfica RCS5 de Atlas Copco .....	13
Figura 1.13: Jumbo 6R-2P del MTI .....	14
Figura 1.14: Brazo 6R-2P para realizar las simulaciones correspondientes .....	15
Figura 2.1: Diseño de la propuesta .....	18
Figura 2.2: Módulo de teleoperación .....	18
Figura 2.3: Comando hidráulico de posicionamiento del brazo perforador .....	20
Figura 2.4: Actuadores del comando de movimiento del brazo perforador y su perforadora . .....	21
Figura 2.5: Accionamiento de los cilindros traseros, donde se encontrarán los sensores de posición .....	22
Figura 2.6: Actuadores y su accionamiento de los sistemas de percusión, rotación y avance del barreno .....	24
Figura 2.7: Bombas de accionamiento del sistema hidráulico .....	25
Figura 2.8: Accionamiento del sistema de rotación en sentido antihorario .....	27
Figura 2.9: Accionamiento del sistema de percusión .....	28
Figura 2.10: Accionamiento del sistema de avance .....	29
Figura 2.11: Posición neutral de la válvula .....	30
Figura 2.12: Operación a media potencia .....	30
Figura 2.13: Operación a plena potencia .....	31
Figura 2.14: Componentes a seleccionar para el armado de los bloques de válvula PVG32 . .....	33
Figura 2.15: Bloque de válvulas 1 para el accionamiento hidráulico del movimiento del brazo perforador.....	35
Figura 2.16: Bloque de válvulas 2 para el accionamiento de las funciones del brazo perforador.....	36
Figura 2.17: Filtro pasabanda Hyperlink BPF24-801A .....	37
Figura 2.18: Dimensiones del sensor Omron OS32C .....	38

Figura 2.19: Asignación de pines del escáner láser OS32C .....	39
Figura 2.20: Cámara IPM314 SamCom .....	40
Figura 2.21: Asignación de pines conector M12 y comparación con el conector RJ-45 .....	41
Figura 2.22: Sensor Lineal Serie MXR .....	41
Figura 2.23: Ensamble del sensor de posición en el cilindro hidráulico 125/85/536 .....	42
Figura 2.24: Asignación de pines con conector M12 para el sensor de posición MXR .....	42
Figura 2.25: Joystick JS6000 .....	43
Figura 2.26: Asignación de pines del Joystick JS6000 .....	44
Figura 2.27: Módulo de transmisión/recepción de datos Eaton 945U-E .....	45
Figura 2.28: Módulo Ethernet de 8 entradas DES-108 .....	46
Figura 2.29: Placa del Arduino Mega 2560 junto al Arduino Ethernet Shield (en orden). ....	47
Figura 2.30: Regulador de voltaje LM2576-5.....	48
Figura 2.31: Conexión del Arduino con los sensores y las válvulas. ....	48
Figura 2.32: Conexión del módulo inalámbrico .....	49
Figura 2.33: Ejemplo de conexión de la válvula proporcional encargada de la dirección del vehículo perforador. ....	50
Figura 2.34: Ejemplo de conexión de la válvula 4/3 ON/OFF encargada de la percusión. ....	50
Figura 2.35: Conexión de los Joysticks con el microcontrolador de la cabina de teleoperación.....	51
Figura 2.36: Cubierta de protección para tarjetas PCB con conectores Deutsch .....	52
Figura 2.37: Diagrama de bloques del sistema .....	54
Figura 2.38: Rutina principal y rutina "Configurar entradas y salidas" (en orden).....	55
Figura 2.39: Rutina "Mover el equipo" .....	56
Figura 2.40: Subrutina "Detectar obstáculos" .....	57
Figura 2.41: Subrutina "Maniobrar sistema de dirección" y rutina "Taladrar la superficie" (en orden) .....	58
Figura 2.42: Subrutina "Posicionar brazo perforador" y subrutina "Perforar agujero" (en orden).....	59
Figura 2.43: Sistema oleohidráulico proporcional con realimentación de posición.....	60
Figura 2.44: Diagrama de bloques del control del brazo perforador .....	61
Figura 2.45: Variación de la extensión del cilindro con la entrada en el tiempo.....	62
Figura 2.46: Dimensiones del brazo perforador BUT 28 de Atlas Copco .....	62
Figura 2.47: Comparación de la entrada al microcontrolador y su salida .....	63
Figura 2.48: Variación de la velocidad del pistón en función del tiempo.....	64
Figura 2.49: Posicionamiento del pistón en el tiempo con cambios en la salida del microcontrolador. ....	64
Figura 2.50: Variación de la velocidad del pistón en función del tiempo.Figura 2.51: Posicionamiento del pistón en el tiempo con cambios en la salida del microcontrolador. ...	64
Figura 2.52: Simulación hidráulica con la válvula proporcional 4/3. ....	65

## LISTA DE SÍMBOLOS

$M_c$ : masa del brazo perforador (kg)

$M_p$ : masa del conjunto pistón – vástago (kg)

$x$ : extensión del cilindro (m)

$x_m$ : transductor de posición del vástago (mA)

$x_v$ : desplazamiento del spool de la servo válvula (m)

$Q_{L1}$ : caudal en la cámara 1 ( $\frac{m^3}{s}$ )

$Q_{L2}$ : caudal en la cámara 2 ( $\frac{m^3}{s}$ )

$A_1$ : Área del cilindro ( $m^2$ )

$A_2$ : Área anular del cilindro ( $m^2$ )

$P_1$ : presión en la cámara 1 (Pa)

$P_2$ : presión en la cámara 2 (Pa)

$V_1$ : volumen de aceite en la cámara 1 ( $m^3$ )

$V_2$ : volumen de aceite en la cámara 2 ( $m^3$ )

$\beta$ : módulo de compresibilidad del aceite (Pa)

$B_p$ : coeficiente equivalente de amortiguamiento viscoso ( $N \frac{s}{m}$ )

$P_s$ : Presión de servicio (Pa)

$P_t$ : Presión de salida (Pa)

$V$ : Tensión de control de la válvula proporcional (V)

$lab^*$ : longitud fija (mm)

$x$ : extensión del cilindro (mm)

$C_q$ : Coeficiente de flujo de la válvula proporcional (–)

$W$ : Ancho de orificio de la válvula proporcional (m)

$\rho$ : Densidad del fluido ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$\tau$ : constante de tiempo de la válvula proporcional (–)

$K_{sp}$ : ganancia del spool de la válvula proporcional(-)

$p_Y$ : Coordenada vertical deseada por el usuario(mm)

$K_n$ : Ganancia "n" del controlador (-)

$K_{sv}$ : Ganancia de control de la válvula proporcional, asumiendo  $V$   
 $= K_{sv} * x(-)$

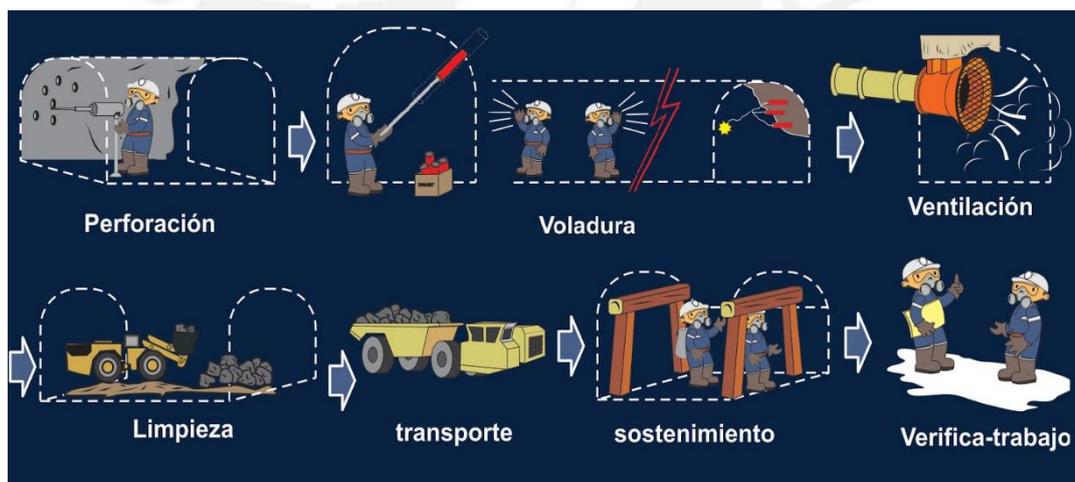


# INTRODUCCIÓN

El ciclo de avance básico de la minería subterránea consiste en 7 operaciones, las cuales se nombrarán a continuación:

- Perforación de roca con martillos neumáticos, para la colocación de la carga explosiva.
- Voladura, que consiste en activar los explosivos.
- Ventilación, donde se evacúan los gases, polvo y partículas generadas por la voladura.
- Limpieza del frente de trabajo, para evitar pequeños desprendimientos.
- Acarreo de la roca y mineral.
- Sostenimiento, en el cual las rocas se perforan y unen para evitar la deformación y su caída.
- Replanteo del avance.

La perforación representa el inicio del ciclo productivo de una mina, donde se crean hoyos, con una disposición que permita la ubicación de los explosivos y su detonación. Una buena técnica de perforación permitirá una voladura de forma correcta, y a su vez el acarreo de material en tamaños permisibles.



**Figura Intro.1:** Ciclo de avance en la minería subterránea [1].

La perforación minera en el Perú se realiza con maquinarias maniobradas con un operador dentro de su cabina, lo cual hace que esté expuesto a diferentes peligros intrínsecos en una labor minera subterránea. Además, al ser una operación muy importante en el ciclo minero, se necesita que se realice con precisión y rapidez para forjar los cimientos de una buena voladura de rocas. Cabe resaltar que los términos y procesos que se mencionarán a continuación son estudiados con mayor detalle en el anexo A.

Alrededor de 75% de los minerales en el mundo son excavados subterráneamente usando el método de perforación y voladura de rocas [2]. Es por ello la importancia de que estas labores se realicen correctamente, de forma que sean eficientes económicamente y provean la seguridad necesaria para el operario. En el Perú, ninguna empresa minera tiene en su haber una perforadora automática o teleoperada [3].

Estos sistemas manuales tienen desventajas basadas en el desempeño y experiencia del operador, ya que se necesita mover manualmente la perforadora hacia un punto específico. Dado que este sistema tiene varios grados de libertad, el proceso puede tomar hasta 15 segundos antes del centrado en el punto de perforación (promedio en función a la experiencia del operador [4]). Además, se debe controlar el ángulo de perforación. Una mala inclinación genera una deficiencia o corte excesivo, lo cual merma la producción [5].

La necesidad de que el operario tenga que estar dentro de la máquina implica un riesgo, reconociendo las distintas variables:

- Incendios: Por el uso de los jumbos hidráulicos, el sobrecalentamiento o una chispa puede generar un amago de incendio, que producen sustancias tóxicas capaces de asfixiar al trabajador. Las instalaciones eléctricas subterráneas también pueden generar esta situación.
- Caída de rocas: La inestabilidad del terreno generada por una voladura mal diseñada o un soporte defectuoso puede conllevar a caída de rocas, mortal para las personas dentro de una excavación subterránea.
- Aire comprimido: Al desconectar la red de aire comprimido, se proyectan partículas a grandes velocidades, lo cual puede desplazar cañerías a gran velocidad que pueden golpear al operario [6].
- Agua: El agua infiltrada por las rocas producto de la evacuación del detrito en algunos sistemas de perforación puede súbitamente escapar hacia la superficie, generando una descarga violenta hacia el operario.
- Ruido: El operario tendrá problemas auditivos si no utiliza los equipos de protección personal para esta labor.
- Vibraciones: Estas ondas físicas pueden causar molestias corporales al trabajador y desarrollar enfermedades crónicas.

Se puede concluir que operar una perforadora en una excavación subterránea conlleva el riesgo de un accidente laboral, lo cual paralizaría la producción ya que la mano de obra calificada no está disponible. A esto se suman los gastos de salud y curación. Por estos motivos la teleoperación o automatización de los equipos mineros para las labores de perforación es más conveniente en términos de rendimiento y seguridad.

# 1. CAPÍTULO 1 – LA PERFORACIÓN HIDRÁULICA

En este capítulo se hará un repaso acerca de la perforación hidráulica en las labores subterráneas, su importancia, sus procedimientos y parámetros a tener en cuenta para el control autónomo del vehículo perforador. Se exponen las definiciones y los tipos de perforación que se emplean en la minería global y, finalmente, se mostrará el estado de la tecnología disponible.

## 1.1. La perforación de la roca en la minería subterránea

Las técnicas de perforación en la minería subterráneas han sido aplicadas en todo tipo de rocas, en contextos distintos en todo el mundo. Esta parte del ciclo minero es básico para poder llevar a cabo una voladura correcta. Los sistemas de perforación han sido clasificados por López [7]:

### a. Métodos mecánicos:

- Rotación
- Percusión
- RotoperCUSión

### b. Métodos térmicos

- Plasma
- Fluido caliente
- Soplete
- Congelación por nitrógeno

### c. Métodos hidráulicos

- Erosión
- Cavitación

### d. Métodos físicos

- Vibraciones de alta frecuencia

### e. Métodos químicos

- Disolución
- Microvoladura

### f. Métodos nucleares

- Fisión

- Fusión

g. Métodos sísmicos

- Rayo láser

Se observa que existen muchos métodos para perforar las rocas, pero son poco prácticas técnicamente, ya que consumen una mayor cantidad de energía que utilizando medios mecánicos. Se analizarán los distintos tipos de perforación, según el tipo de trabajo, siendo válido para labores de tajo abierto y para labores subterráneas:

- a. Perforación de banqueo: Perforaciones verticales o inclinadas, usadas en trabajos a tajo abierto y en labores subterráneas.
- b. Perforación de avance: Para la creación de túneles, pudiendo ser llevadas a cabo en forma manual o forma mecanizada, con el uso de jumbos.



**Figura 1.1:** Perforadoras utilizadas en las labores mineras [8][9].

- c. Perforación de producción: Uso en minería subterránea para la extracción de mineral. Generalmente se dispone de poco espacio disponible, es por ello que se usan equipos diseñados para ese fin.
- d. Perforación de chimeneas: Siendo el método preferido el Raise Boring actualmente, donde no es necesario el uso de explosivos. Se taladra una perforación piloto, con un ángulo que puede ser de hasta 45°. Se perfora hasta llegar al túnel ya existente. Posteriormente se retira la broca piloto y se fija un escariador a la sarta de perforación, que amplía la perforación hacia arriba. En la figura siguiente se mostrará un ejemplo de este método de perforación.



**Figura 1.2:** Método Raise Boring [10].

- e. Perforación de rocas con recubrimiento: En materiales poco consolidados, en pozos de captación de agua y perforaciones submarinas.
- f. Sostenimiento de rocas: Anteriormente descrita, para evitar la deformación y caída del material. Luego se prepara el cementado de las superficies.

Las herramientas de corte mecánico son usadas por dos tipos de sistemas de perforación, que son diferenciados por la forma de interacción sobre el material a cortar. Existen sistemas de perforación por percusión y por rotación, y su campo de aplicación dependerá de los siguientes aspectos [11]:

- Características de la roca (geometría, propiedades físicas)
- Diámetro de la perforación
- Longitud de los taladros

Además de estos, es necesario tomar en cuenta aspectos económicos, de diseño, mantenimiento, operatividad y desempeño para la selección de equipos de perforación.

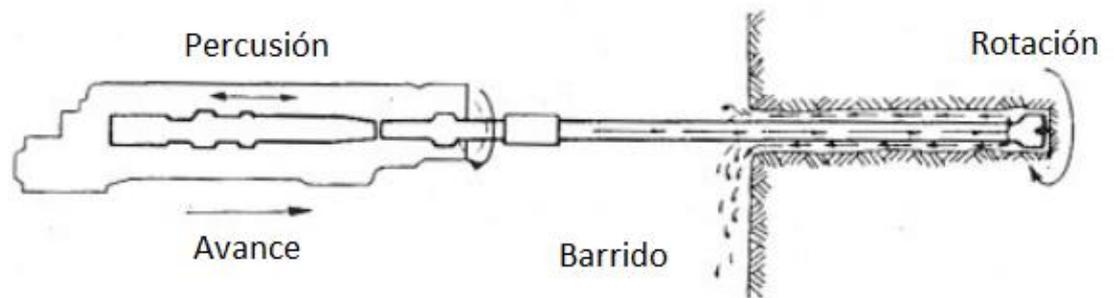
## 1.2. Sistema de perforación por rotopercusión

Este sistema de perforación combina diferentes acciones que se complementan en su funcionamiento:

- a. Percusión: un pistón del sistema golpea la roca por medio de un varillaje hacia la herramienta (boca), propagando las ondas de choque y generando detrito. Parte de la energía se difumina en la roca en sus diferentes tipos, el resto se refleja por el varillaje.
- b. Rotación: su función es la de girar la boca para que las ondas de choque se distribuyan uniformemente en la zona de perforación. La velocidad de giro depende del tipo de boca.

- c. Empuje: Permite el contacto continuo entre la boca y el material a ser perforado. El empuje influye en la velocidad de penetración, la velocidad de perforación y en la vida útil de las herramientas de corte.
- d. Barrido: Extrae el detrito de la zona de trabajo. Es muy importante ya que se utilizará la energía disponible en triturar las partículas ya perforadas en la roca. Generalmente se realiza con agua, aire o espuma, dependiendo de la aplicación.

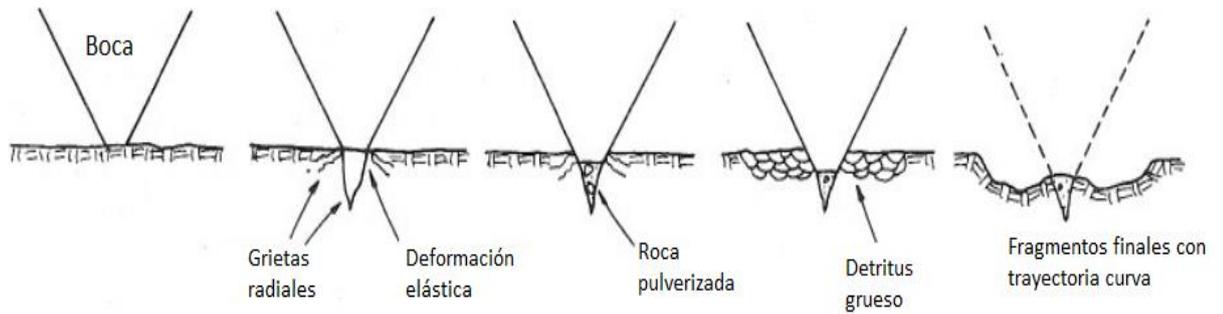
Estas acciones básicas se resumen en la siguiente figura:



**Figura 1.3:** Funcionamiento básico de un sistema de perforación por rotopercusión [12].

A diferencia de los sistemas de rotación, que producen fuerzas de impacto y de corte, lo cual fragmenta a la roca por su empuje axial, los sistemas de rotopercusión se da en diferentes etapas [13]:

1. La fuerza desarrollada por la boca genera compactación y ruptura de las irregularidades de la roca.
2. Debido al rápido aumento de la fuerza, las rupturas internas se propagan hacia los límites con la boca de corte.
3. Dos quebraduras principales se forman a lo largo de la roca, lo cual es resquebrajado y compactado. La fuerza disminuye rápidamente.
4. La zona perforada se extiende en una profundidad mayor a la de la penetración de la boca.
5. Largos fragmentos son fracturados a lo largo de la zona adyacente de la zona de triturado, con una trayectoria curva.



**Figura 1.4:** Etapas de ruptura de una roca por sistemas de rotopercusión [1].

Los equipos de perforación por rotopercusión se clasifican en dos grupos, que dependen de la posición del martillo. Esto se estudiará más a detalle en los siguientes párrafos.

### 1.2.1. Perforadoras hidráulicas

Esta perforadora consta de los mismos elementos mencionados anteriormente, con la diferencia que el primero usa aire comprimido y el segundo aceite para el movimiento de golpeo del pistón. Se resaltarán las características medias de estos martillos hidráulicos para poder compararla con sus variantes neumáticas.

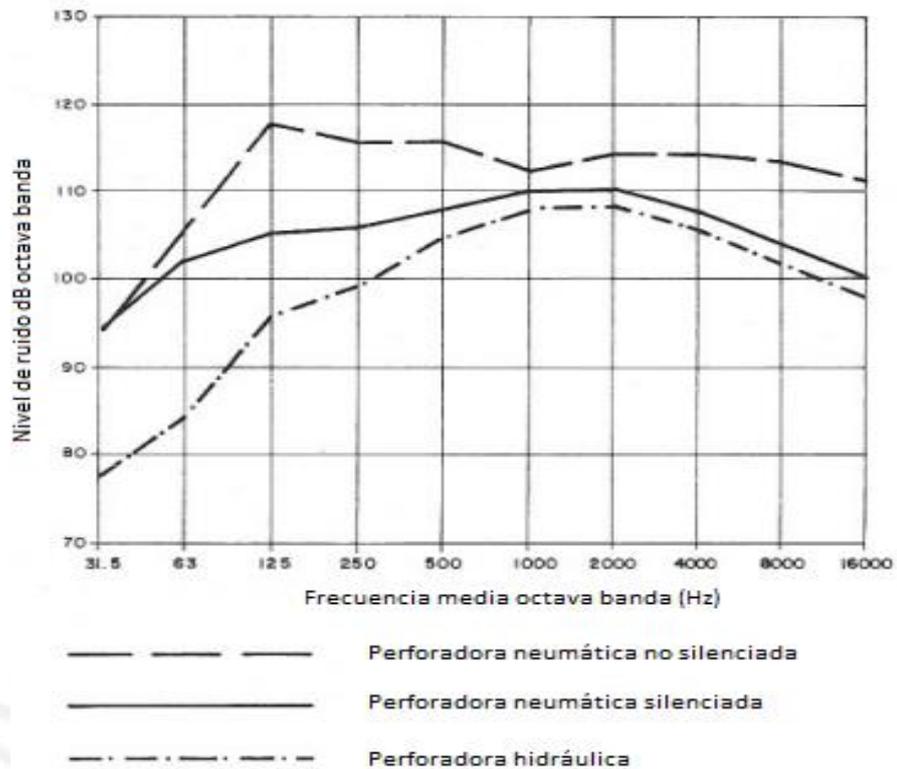
**Tabla 1.1:** Características medias de los martillos hidráulicos [11]

Parámetros de comparación	Valores
Presión de trabajo (bar)	75-250
Potencia de impacto (KW)	6-20
Frecuencia de golpeo (golpes/min)	2000-5000
Velocidad de rotación (rev/min)	0-500
Par máximo (N.m)	100-1800

El diámetro del varillaje es seleccionado, según las recomendaciones del fabricante, por la potencia disponible del martillo hidráulico [14].

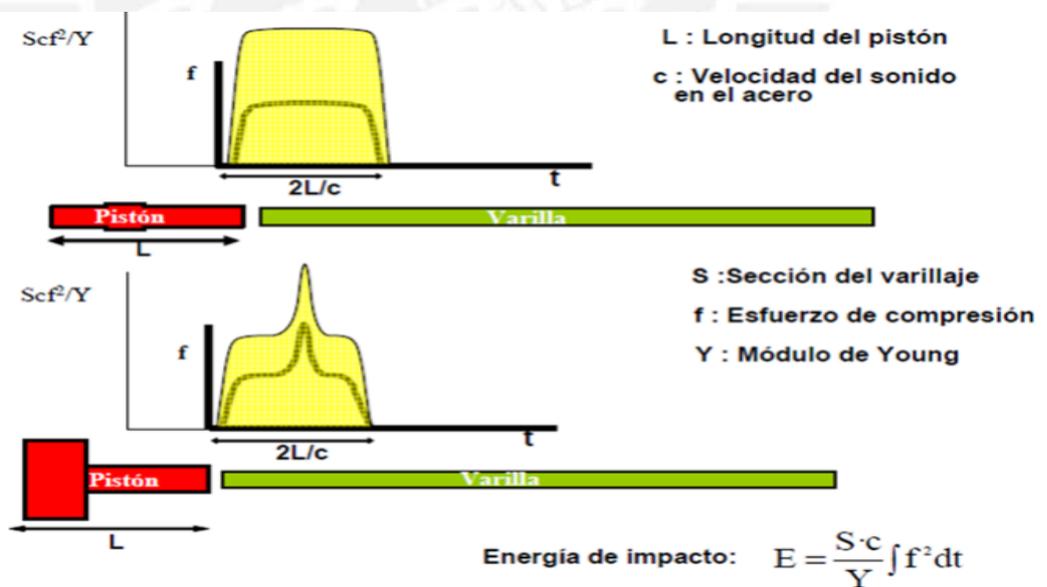
Las características que hacen que este tipo de perforación sea más utilizada que la neumática son las siguientes:

- Menor consumo de energía: por el trabajo con el aceite a presiones mayores a su par neumático.
- Reducción del ruido: el escape de aire genera ruido en los sistemas neumáticos, lo cual se elimina usando aceite como fluido. Además en trabajos subterráneos ya no se produce niebla de agua y aceite, lo cual dificulta la visión del operario.



**Figura 1.5:** Distintos niveles de ruido entre los tipos de perforadora [1].

- Mayor capacidad de perforación: por la mejor transmisión de la energía y forma de la onda, se produce una mayor velocidad de perforación en un 50 a 100% .



**Figura 1.6:** Comparación entre la transmisión de energía hidráulica y neumática (en orden) [1].

- Capacidad de automatización: Los equipos son moldeables a los requerimientos de perforación, tales como cambio de varillaje, mecanismos antitrانque, etc.

Sus desventajas generalmente se basan en el tema económico, debido al mayor costo de los componentes, costo de su mantenimiento y las reparaciones futuras que conlleva.

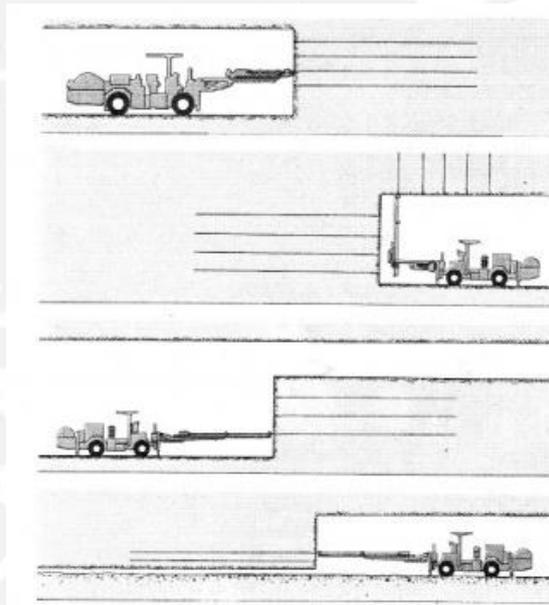
### 1.3. Sistemas de montaje

Está referido a los sistemas que usan los equipos de perforación. Estos se diferencian por la aplicación subterránea o a tajo abierto. Se observarán los equipos que más se utilizan para la minería subterránea.

#### 1.3.1. Jumbos

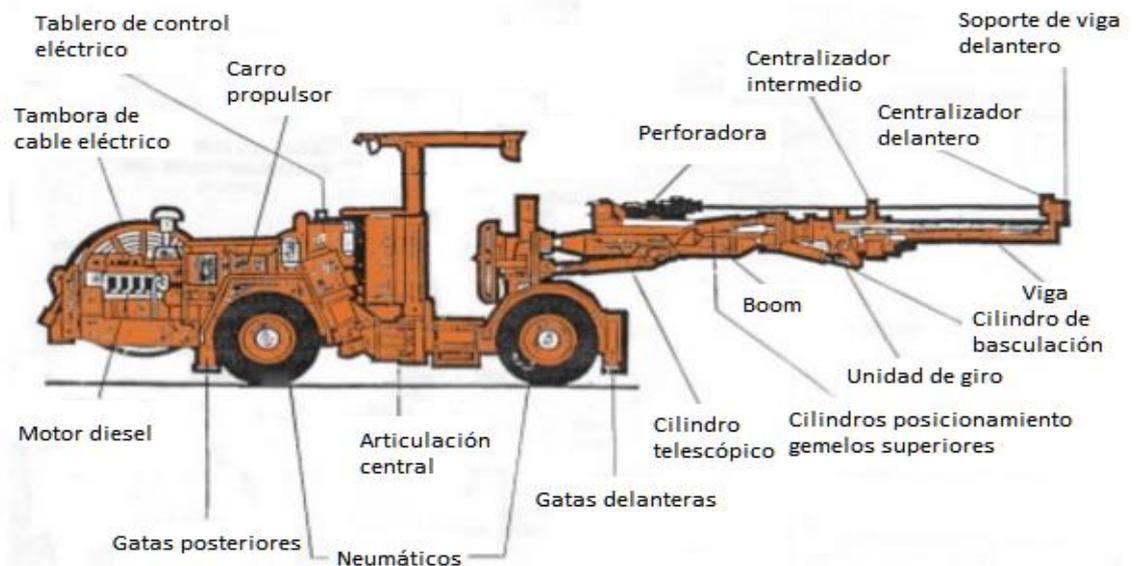
Los jumbos son equipos que emplean martillos perforadores para las siguientes labores subterráneas:

- Avance de túneles y galerías
- Perforación transversal
- Corte y relleno



**Figura 1.7** : Diversos usos de los jumbos en la minería [7].

Esta maquinaria cuenta con su tren de rodaje, siendo lo más común neumáticos, aunque también se puede encontrar con orugas o carriles, dependiendo de la aplicación. Los neumáticos permiten una buena velocidad de movimiento, es resistente y por ello sufre menos desgaste por la fricción del piso irregular. Las orugas se utilizan cuando el suelo presenta una pendiente de 15° a 20°. No son generalmente usados ya que el equipo está diseñado para transitar por un terreno con pocas curvas.



**Figura 1.8:** Partes principales de un jumbo hidráulico [15].

El jumbo posee como fuente de energía un motor de combustión interna que da movimiento al tren de rodadura por transmisión mecánica o hidráulica y para los otros elementos hidráulicos y neumáticos, o también estos elementos pueden ser accionados por un motor eléctrico.

#### 1.3.1.1. Componentes y sistemas de operación de los jumbos hidráulicos

Estos jumbos tienen distintos sistemas para la operación de la perforación. Estos sistemas son:

- Sistema hidráulico: que comanda la percusión, rotación, avance y posicionamiento del brazo. La operación de perforación cuenta con otros sistemas (emboquillado del taladro, antiatasque, enroscado).
- Sistema de agua: para el barrido y evacuación del detrito y enfriamiento del aceite hidráulico.
- Sistema eléctrico: necesario para el control y operación de los motores eléctricos.
- Sistema de aire: lubrica y presuriza el cabezal de la perforadora.

Para poder realizar las operaciones de los distintos sistemas, el jumbo hidráulico necesita de los siguientes elementos:

- Tren de rodaje
- Bombas hidráulicas
- Mangueras hidráulicas
- Brazos de posicionamiento (plumas o pistones)
- Brazo alimentador(deslizadera)
- Pluma de plataforma auxiliar
- Gatos hidráulicos
- Drifter

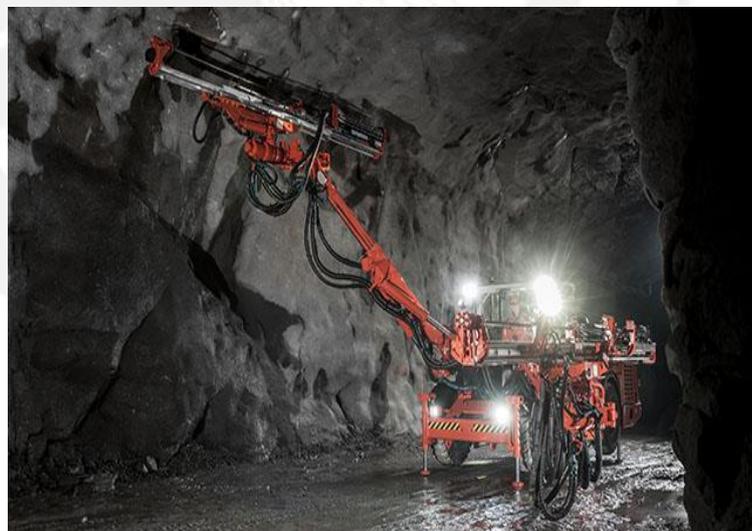
- Barreno o columna de perforación
- Cabina
- Caja de control eléctrico
- Compresores
- Depósito de fluido hidráulico
- Cable eléctrico de traslación (con tambor para cable)
- Luces

#### 1.4. Estado de la tecnología actual

Se presentarán las diversas opciones de perforadoras automatizadas actualmente en el mundo para labores subterráneas, así como su grado de alcance y complejidad.

##### 1.4.1. Sandvik DD422i

Perforadora de roca dura subterránea desarrollada por Sandvik, compañía de Suecia. Esta maquinaria es teleoperada con control de la profundidad de la perforación, ángulo de avance y torque de la perforación, lo cual aumenta la eficiencia de la operación y alarga la vida útil de las herramientas de corte. Posee una transmisión hidrostática para el control de traslado, con un software de monitoreo de condiciones.



**Figura 1.9:** Equipo teleoperado Sandvik DD422i [16].

Este equipo incluye la interconexión con el software Automine Surface Drilling, que consiste en un control remoto de las máquinas perforadoras usando una navegación 3D de la perforadora, mejorando la eficiencia, precisión y seguridad.



**Figura 1.10:** Estación Sandvik de teleoperación de la perforación [17].

El software desarrollado por Sandvik permite la visibilidad a 360°, el sistema de recolección de condiciones, sistema de comunicación y control de los parámetros de perforación. Las características técnicas de la maquinaria son las siguientes:

**Tabla 1.2:** Parámetros técnicos de la perforadora Sandvik DD422i

Parámetros	Valores
Potencia del motor	119 KW
Longitud del barreno	5270 mm
Diámetro de perforación	43-64 mm
Peso	26000 Kg
Tipo de perforadora	SB60
Tipo de motor	Cummins QSB4.5.

#### 1.4.2. Boomer XE4 C

Equipo de perforación frontal de 4 brazos desarrollado por Atlas Copco que puede cubrir secciones de hasta 206 m<sup>2</sup>. La perforación está controlada por el sistema RCS5 (Rig Control System) que promete precisión, productividad, mayor rendimiento y reducción de costos. Este equipo debe ser operado por un trabajador en la cabina. Además, incluye un sistema de escaneo 3D para elaborar el perfil del túnel a perforar.



**Figura 1.11:** Jumbo de perforación Atlas Copco XE4 C [18].

El RCS5 (Rig Control System, versión 5) es un sistema de control computarizado desarrollado desde el 1998 para la automatización de la perforación de la roca. Atlas Copco anuncia que existen 1500 máquinas equipadas con este sistema (Atlas Copco, 2015).



**Figura 1.12:** Interfaz gráfica RCS5 de Atlas Copco [19].

La empresa ofrece tres tipos de automatización, definidos por su complejidad:

- ABC Basic: El operador controla el manejo de la perforadora, la cual cuenta con 3 sensores que presentan la posición y el ángulo del barreno. Estos datos son presentados en una pantalla de control.
- ABC Regular: Se presenta el plan de perforado elaborado en un software de Atlas Copco, el operador posiciona la perforadora hasta los puntos deseados y comienza el proceso.
- ABC Total: el proceso se realiza automáticamente, donde el operador monitorea.

El software para la generación de estos patrones, además para el monitoreo de condiciones es el Tunnel Manager. Las características de la maquinaria son las siguientes:

**Tabla 1.3:** Parámetros técnicos de la perforadora XE4 C

Parámetros	Valores
Potencia del motor	173 KW
Longitud del barreno	1800 mm
Diámetro de perforación	43-64 mm
Tipo de perforadora	COP 3038
Máximo Torque	650 Nm
Rango de rotación	0-280 rpm
Presión máxima de trabajo	140 bar
Tipo de motor	Deutz TCD 2013

#### 1.4.3. Jumbo 6R-2P

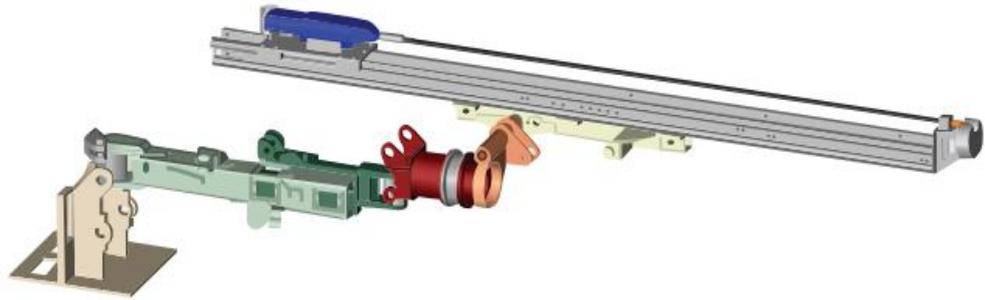
Desarrollado por Mining Technologies International Inc. Para mejorar la eficiencia de las minas subterráneas y las operaciones de apertura de túneles, se desarrolló la automatización de un jumbo con un brazo perforador de 8 grados de libertad. La estrategia de control se implementó con un PID y el modelo de simulación se desarrolló en Simulink.



**Figura 1.13:** Jumbo 6R-2P del MTI [20].

El procedimiento de perforación automático sigue el proceso que se presentará a continuación:

- Colocar la maquinaria en una distancia prudencial hacia la cara a perforar para que el brazo pueda alcanzar toda el área a cubrir.
- Usar un láser para hacer coincidir los marcos de la mina y el jumbo y calcular la posición e inclinación del brazo para perforar un agujero.
- Posicionar el brazo para la perforación.
- Perforar el agujero una profundidad determinada.
- Pasar hacia el otro agujero hasta terminar la operación.



**Figura 1.14:** Brazo 6R-2P para realizar las simulaciones correspondientes [20].

#### 1.4.4. Comparación entre las tecnologías actuales

Con respecto a los equipos anteriormente analizados, se muestra la tabla comparativa entre estos modelos, según sus características técnicas:

**Tabla 1.4:** Comparación entre los jumbos automatizados en la minería

Comparación entre las perforadoras automatizadas en el mercado				
Características técnicas	Modelo	Sandvik DD422i	Boomer XE4 C	Jumbo 6R-2P
	Fabricante	Sandvik	Atlas Copco	MTI
	Potencia	119 KW	173KW	74.5KW
	Longitud del barreno	5,270mm	5,800mm	5,690mm
	Diámetro de perforación	43-64mm	43-64mm	45-65mm
	Peso	26,000Kg	55,000Kg	16,545Kg
Características del sistema	Recolección de datos	x		
	Comunicación	x	x	x
	Control de parámetros	x	x	x
	Elaboración de informes		x	
	Monitoreo de condiciones	x	x	
	Tipo de control	Remoto	Remoto	Autónomo
Costo del 1(más barato) al 5(más caro)		4	5	2

Las diferencias radican en el tipo de control y en sus funcionalidades, siendo el de Atlas Copco el de más funciones controladas, aunque su desventaja radica en el peso del equipo y el costo, a diferencia del Sandvik, el cual implementa un control teleoperado. El equipo manufacturado por MTI podría ser usado para labores mineras de menor costo, donde las dimensiones son importantes en la elección de equipos.

## 2. CAPÍTULO 2 – DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

Este diseño contempla la solución de la teleoperación del jumbo hidráulico en un ambiente fuera de los trabajos de perforación y voladura. Para este fin, la solución se basará en el modelo Boomer 282 de Atlas Copco, el cual tiene en su totalidad mandos manuales. Esto enfrenta a la necesidad de que un equipo con estas características puede ser equipado con actuadores electrónicos para controlar sus funciones a distancia. A continuación, se presentarán los requerimientos del sistema y su concepto de solución.

### 2.1. Requerimientos del sistema

Estos requerimientos fueron elaborados a consecuencia de una lista de exigencias que se encuentra en el Anexo B.

#### 2.1.1. Requerimientos mecánicos

- Los componentes deberán ser ubicados dentro de la cabina del equipo, a excepción de los sensores de ultrasonido y las cámaras, los cuales estarán dispuestos en los flancos y en el techo de la máquina, respectivamente.
- El sistema mecatrónico deberá brindar la seguridad del trabajador limitando su ingreso a las zonas de riesgo cuando el equipo esté operando (donde el perforado y la voladura ocurren).
- El sistema mecatrónico deberá tener la protección adecuada para soportar el ambiente agresivo subterráneo (contra salpicaduras y polvo) de al menos IP 67 (ver anexo J).
- Las dimensiones del túnel máximas en las cuales se podrá usar el sistema de anticolidión son los siguientes: 6000 mm de alto con 8000 mm de largo.

#### 2.1.2. Requerimientos eléctricos y electrónicos

- El sistema deberá contar con el control eléctrico de los sistemas hidráulicos de mandos direccionales.
- Se deberán seleccionar e implementar la protección adecuada contra picos de corriente en el sistema eléctrico.
- El sistema eléctrico deberá tener una opción de parada total, en caso de presencia de un operador o rangos críticos de presión.
- La alimentación del sistema electrónico se hará con una fuente de 24V tomada del vehículo de perforación.
- Se deberá implementar un sistema de transmisión y recepción inalámbrica de datos, con capacidad de comunicación mínima de 11 Mbit/s.
- El sistema deberá tener una pantalla con los videos de las 4 cámaras que se encuentran en el vehículo perforador.

### 2.1.3. Requerimientos de control

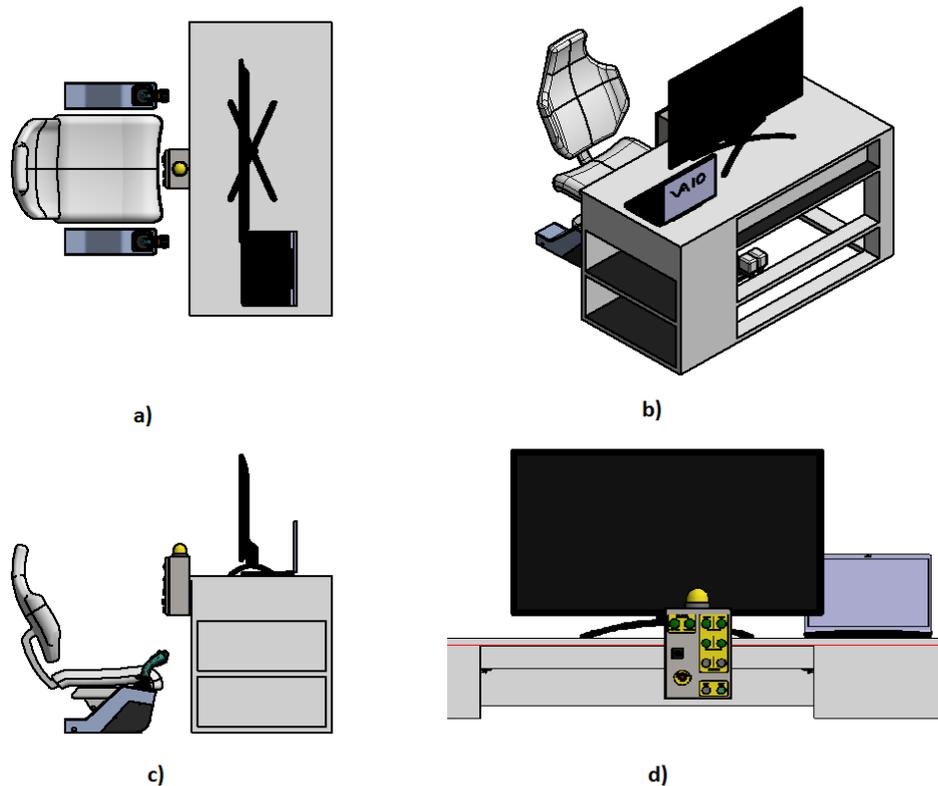
- El sistema mecatrónico deberá asegurar la perforación autónoma con el control del actuador hidráulico de 1 grado de libertad.
- El control de movimiento del sistema deberá tener todas las funciones de dirección del vehículo perforador minero y de su brazo perforador.
- El sistema deberá contar con sistema anti colisión, alertando al operador en caso de existir obstáculos en la ruta o maniobras que generarían en choque del vehículo.

## 2.2. Concepto de solución definitivo

El sistema deberá ser seleccionado para que todos los sensores y circuitos se concentren en el techo del jumbo perforador. Esto es debido a que generalmente esta maquinaria tiene libre este espacio y además se pueden conectar todos estos elementos con cables en un área delimitada. Dada la comunicación inalámbrica con la estación de teleoperación, los elementos se conectarán por sus puertos Ethernet. Se contarán con dos escáneres láser 3D que complementarán su función, cubriendo un rango de 360 grados. Las 4 cámaras proveen una visión de conductor al operador en su estación.

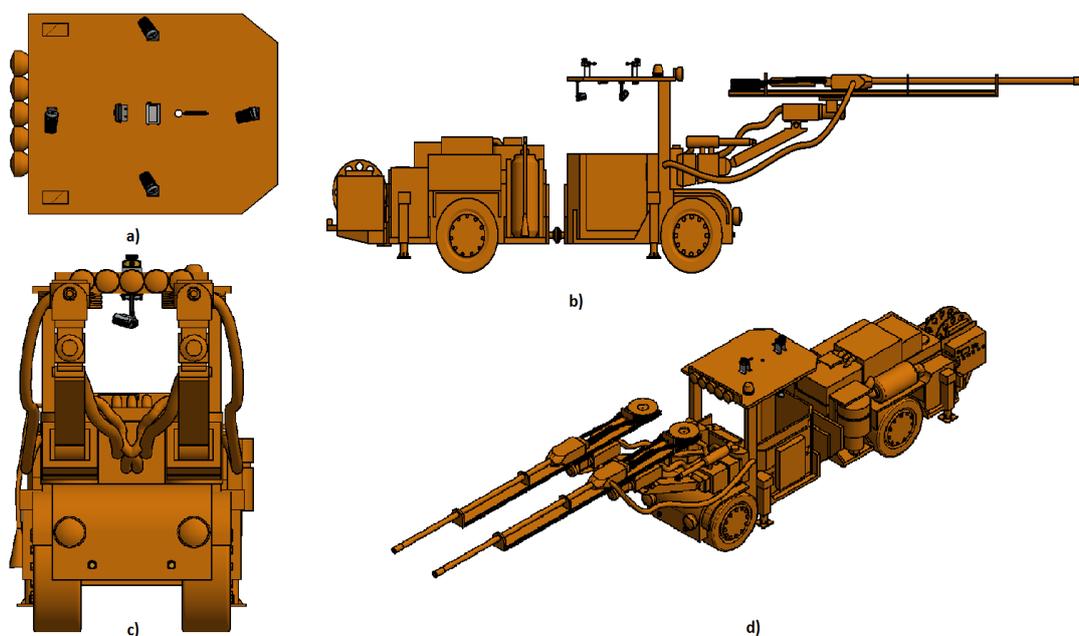
El control central se realizará con una tarjeta y microcontroladores para los procesos de: escanear galerías (láser 3D), teleoperar equipo (cámaras), sensor presión (presostatos) y controlar posición de perforadora (válvula proporcional). Se debe resaltar que todos los elementos contarán con protección mínima IP67 o, en su defecto, con una carcasa metálica acoplable. La protección IP es la definición del índice de protección de acuerdo a la norma DIN EN IEC60529. En el anexo J se muestran los distintos grados de protección que puede cumplir un producto. En este caso, una protección IP67 refiere a una protección total contra la penetración de cualquier cuerpo sólido y protección contra la inmersión temporal de agua.

El módulo de teleoperación de la maquinaria será constituido por dos joysticks dispuestos a ambos lados de un asiento para el comando de la maquinaria y de la perforadora; pedales para el avance y freno de la maquinaria; una botonera para las funciones principales del jumbo hidráulico, con arranque y parada; una pantalla para el acceso a los videos capturados por las cámaras y una laptop que interconectará todos estos elementos y se comunicará con la estación instalada en la máquina. Para este trabajo se diseñarán las conexiones entre estos elementos y su comunicación, mas no el diseño mecánico de este módulo. El concepto de solución óptimo fue consecuencia de aplicar la metodología del diseño mecatrónico. El proceso está documentado en los anexos C, D, E y F



**Figura 2.2:** Módulo de teleoperación

a) Vista horizontal, b) Vista isométrica, c) Vista lateral y d) Vista frontal



**Figura 2.1:** Diseño de la propuesta

a) Vista del techo, b) Vista isométrica, c) Vista frontal y d) Vista Lateral

### 2.3. Análisis del sistema hidráulico

La solución contempla el control del movimiento del brazo perforador, por lo que se analizará el accionamiento de sus actuadores. Además, se controlarán las funciones principales de la perforadora, como la percusión, rotación y avance del barreno, siendo analizados posteriormente. Finalmente, se hará un breve análisis del sistema de transmisión usado en el jumbo Boomer 282.

#### 2.3.1. Válvulas de comando del cilindro perforador

Para el comando electrónico del movimiento del brazo perforador, la rotación de la perforadora y el avance del barreno, es necesario controlar electrónicamente las válvulas de dirección hidráulicas. En la figura 2.3 se observan 3 bloques direccionales:

Bloque 1: control de los pilotos (bloque 2). Este consta de dos partes

- 1A: válvula 3/2 de selección de operación para los cilindros delanteros y traseros
- 1B: válvula de pilotaje 2 ejes inclinados a 45° (patente de Atlas Copco)

Bloque 2: pilotos hidráulicos para el control del posicionamiento del brazo perforador (bloque 3A y 3B)

Bloque 3: control de los actuadores, mostrados en la figura 2.4. Se divide en 5 partes principales:

- 3A: control de la dirección del brazo perforador
- 3B: extensión del barreno
- 3C: desplazamiento de la posición del brazo perforador
- 3D: desplazamiento axial de la perforadora
- 3E: desplazamiento radial de la perforadora

Se desea controlar la dirección del brazo perforador, por lo que se utilizan sensores lineales de desplazamiento para el control de sus cilindros traseros, mostrados en la figura 2.5.

El control de las posiciones de los cilindros hidráulicos estará a cargo de 4 electroválvulas proporcionales, las cuales suplirán las funciones del bloque 3A del sistema hidráulico. Para los demás bloques se usarán electro válvulas direccionales. Por tanto, se deberán anular los bloques 1A, 1B y 2.

El accionamiento de la válvula se hará con una señal PWM de 0.5-4.5V proveniente del microcontrolador, ya que la mayoría de los integrados cuentan con esta señal y las válvulas hidráulicas estándar son controladas por este tipo de señal.

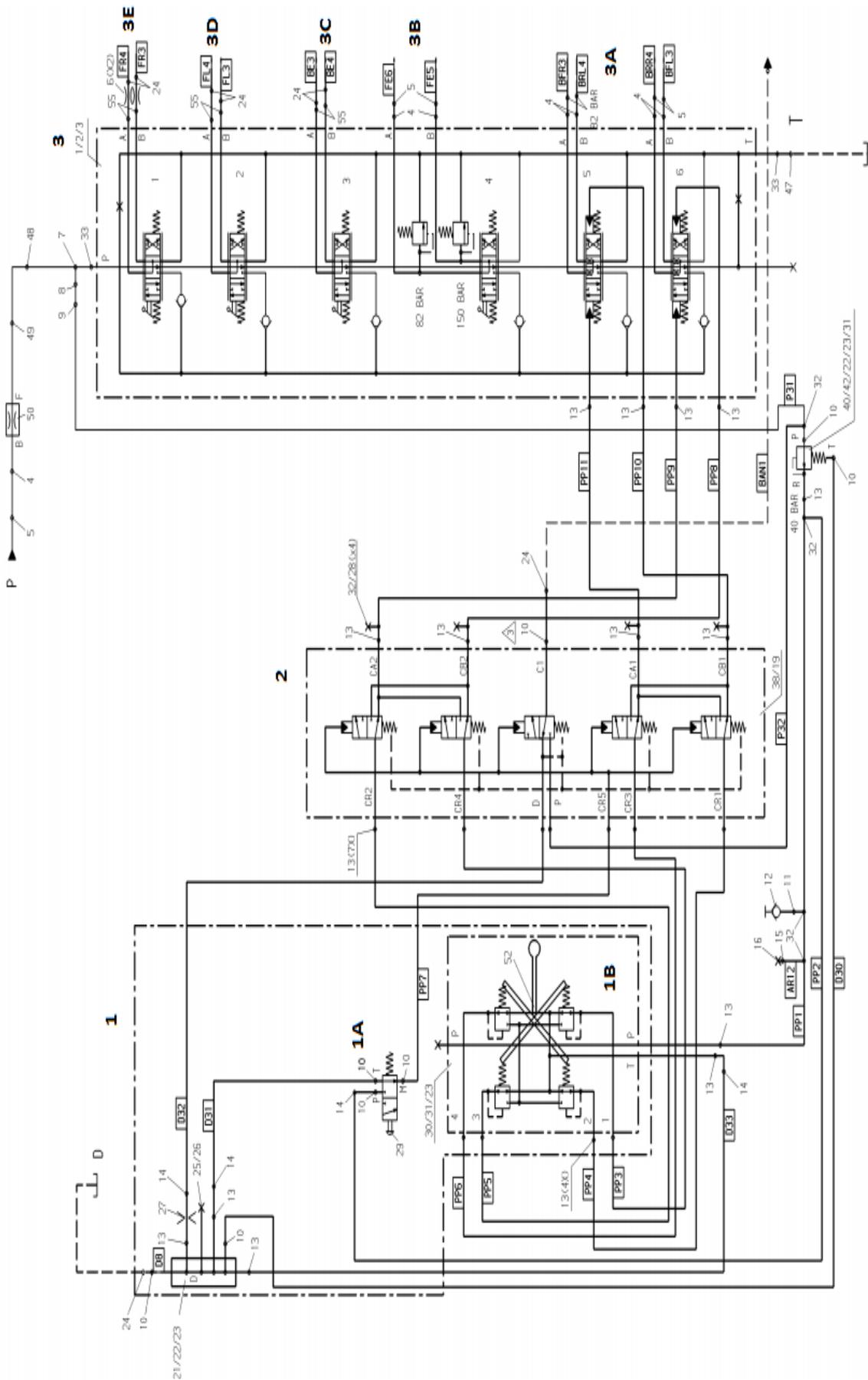


Figura 2.3: Comando hidráulico de posicionamiento del brazo perforador [21].

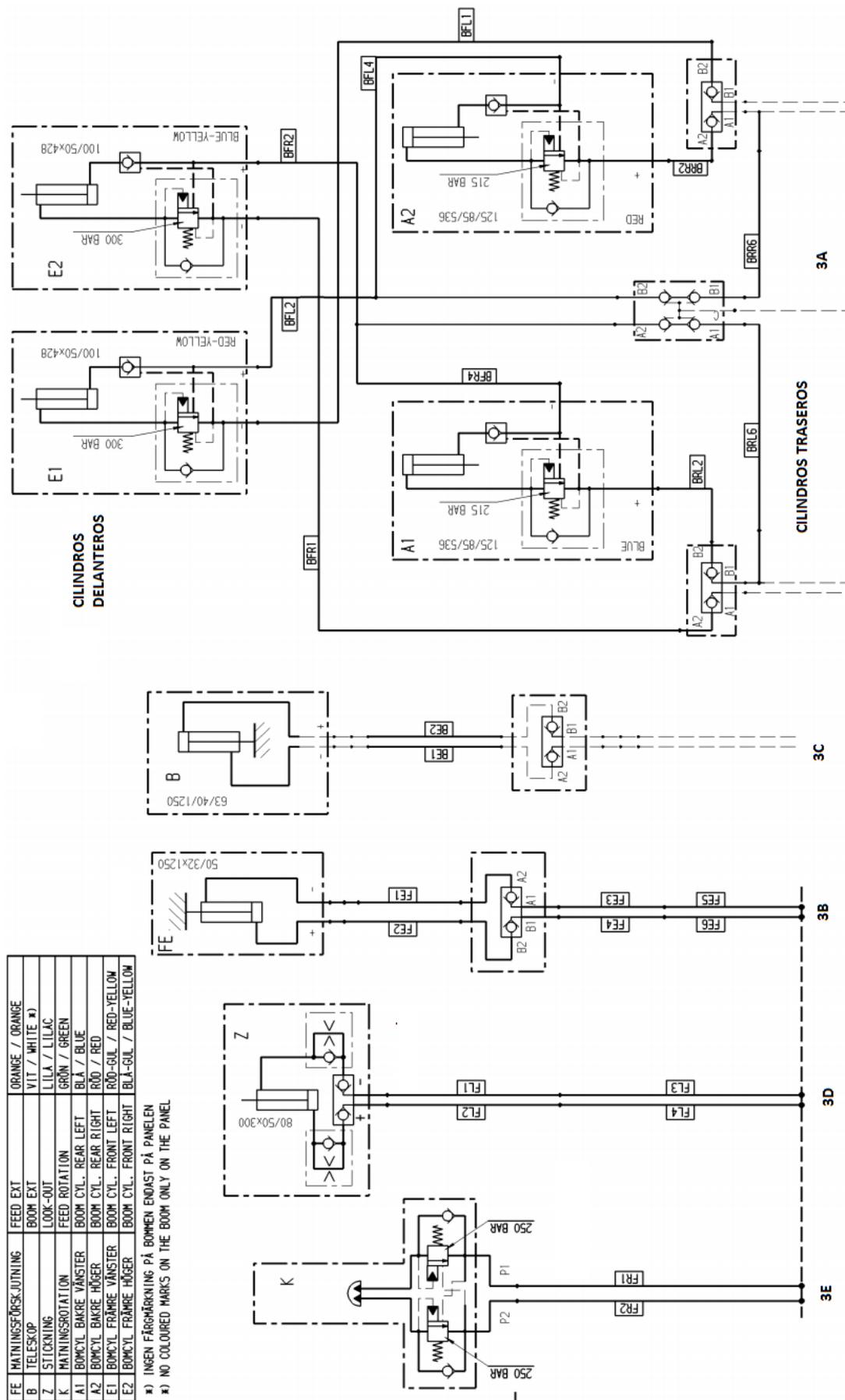


Figura 2.4: Actuadores del comando de movimiento del brazo perforador y su perforadora [21].

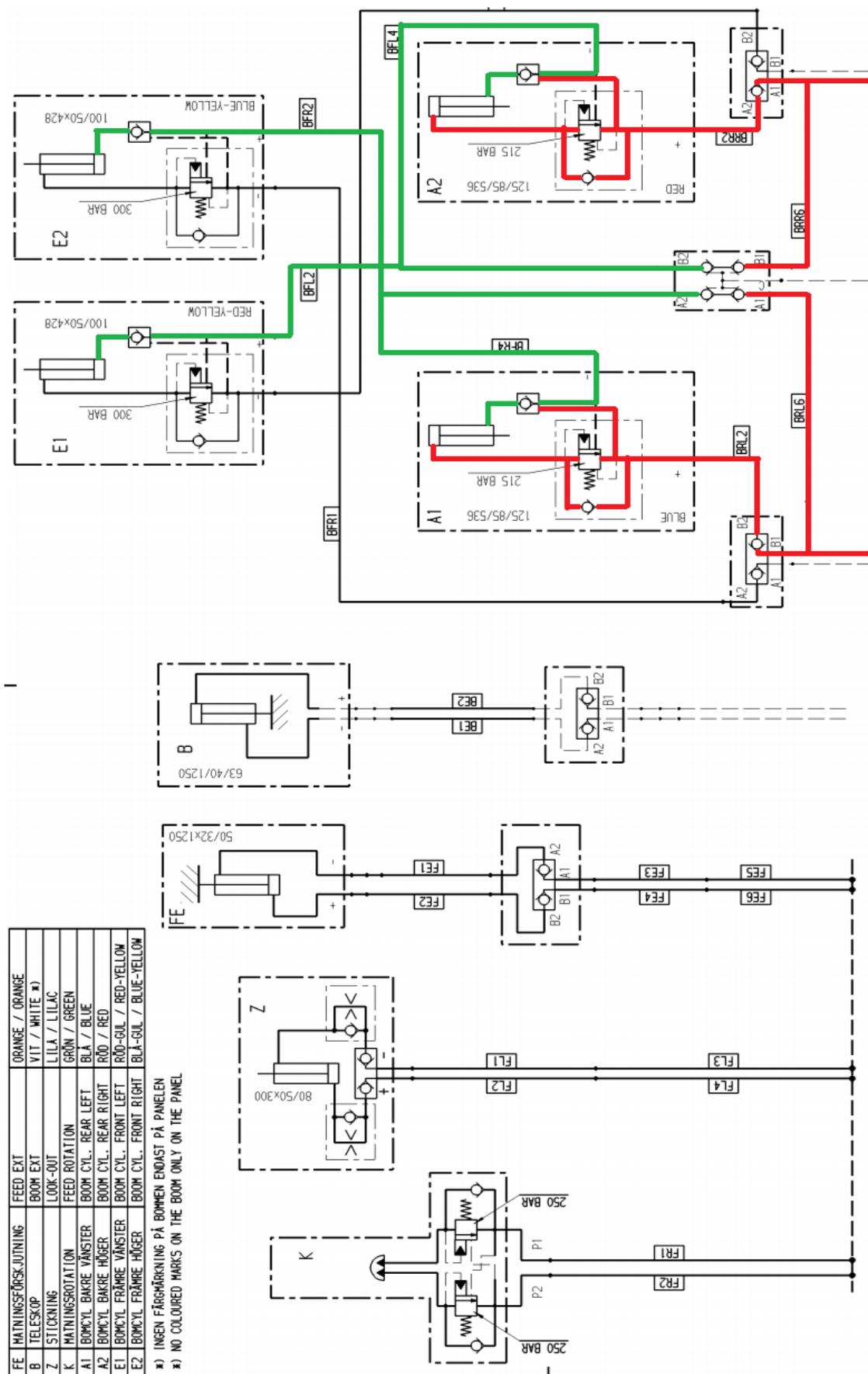


Figura 2.5: Accionamiento de los cilindros traseros, donde se encontrarán los sensores de posición [21].

### 2.3.2. Válvulas de comando de los actuadores de rotación, avance y percusión

Para el control de la rotación, percusión y avance del barreno se tienen otros controles especificados en la figura 2.6. Las bombas que alimentan de aceite hidráulico al circuito se presentan en la figura 2.7.

Entonces, se podrán distinguir los siguientes componentes etiquetados en las figuras anteriores:

Bloque 4: Comando de válvulas direccionales para el control del sistema de perforación

4A: Control del sistema de rotación.

4B: Control del sistema de percusión.

4C: Control del sistema de avance.

Y las bombas:

A: Bomba de engranajes de  $10 \text{ cm}^3/\text{rev}$ .

B: Bomba de engranaje de  $48 \text{ cm}^3/\text{rev}$ , con la función del giro del barreno para el perforado de la superficie.

C: Bomba de pistones axiales A10V100 Rexroth, encargado del sistema de percusión y de avance.

Bloque 5: Sistema antiatasque, donde frente a una elevada presión del sistema de avance (debido a una fuerza contraria a su movimiento generada por una roca o bloqueo de su movimiento) se cambia el sentido de flujo, retrocediendo el cilindro y su movimiento hasta que se normalice la presión.

Bloque 6: Desbloqueo del avance del cilindro.

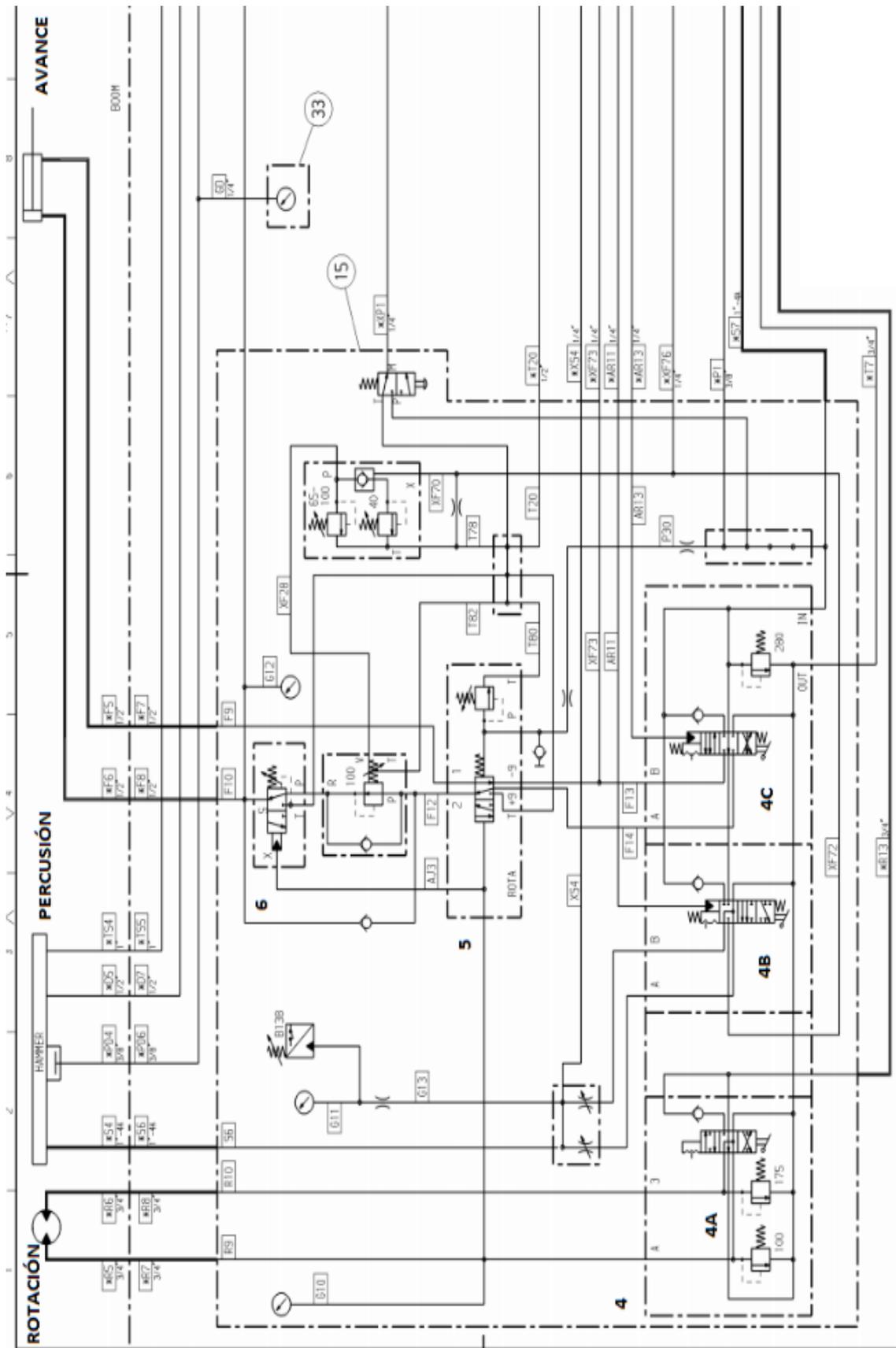


Figura 2.6: Actuadores y su accionamiento de los sistemas de percusión, rotación y avance del barreno [21].

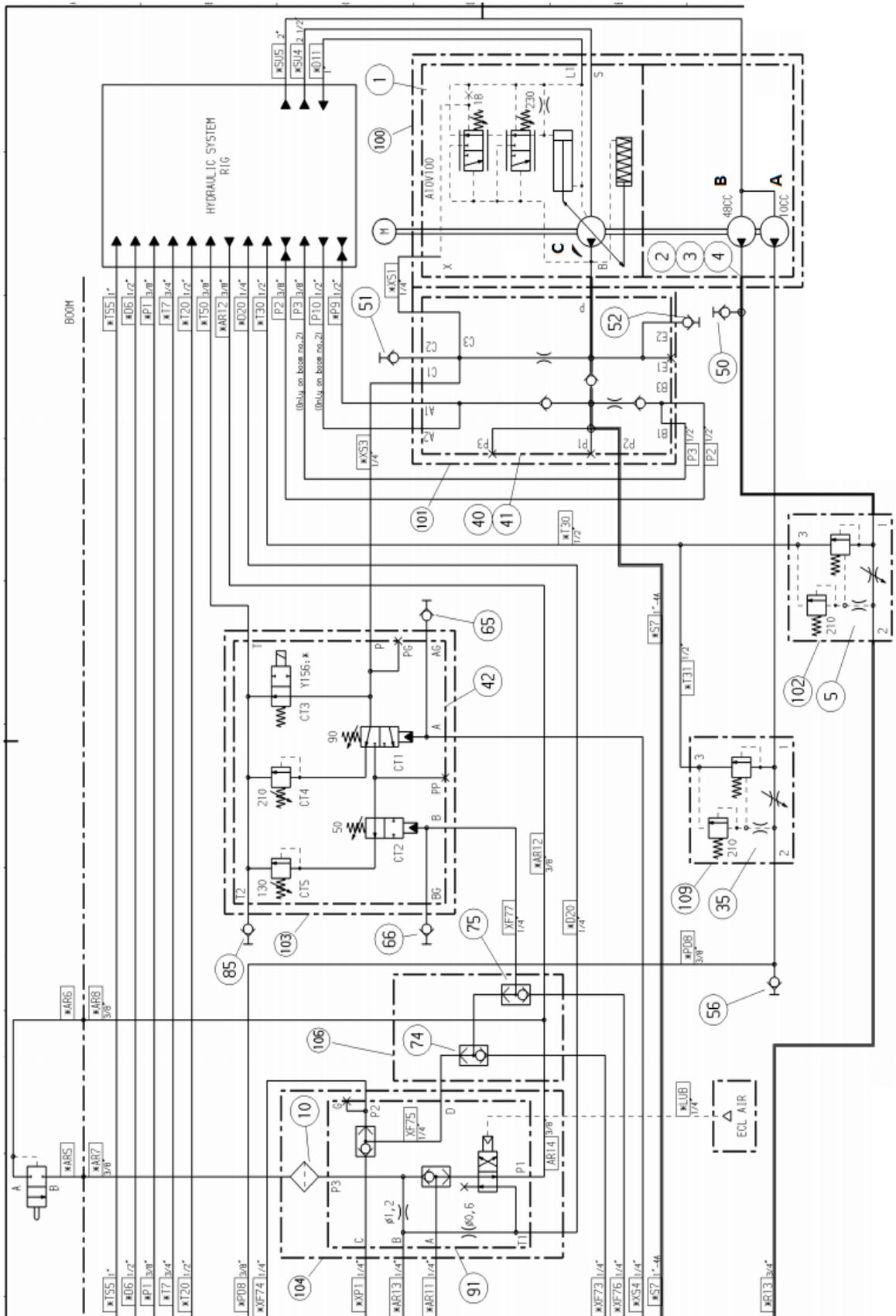


Figura 2.7: Bombas de accionamiento del sistema hidráulico [21].

#### 2.3.2.1. Sistema de rotación

El sistema de rotación está comandado por un cuerpo de válvula hidráulica V20 de la marca Parker (4A). Este cuerpo es 6/3 con accionamiento manual y con enclavamiento en cada posición de trabajo. Para accionar el sistema de rotación, se sigue el circuito en la figura 2.8, donde el sistema empieza a girar hasta que la presión alcanza los 175 bar, y es cuando se acciona la válvula limitadora de presión, lo que mantiene una velocidad de giro constante. Se observa la conexión a un manómetro indicador de presión hacia un piloto de una válvula 3/2 (6) y hacia la válvula antiatasque (5), que controla la salida del cilindro de avance. Estos se activan cuando se acciona el giro horario (presión máxima 100 bar), donde retrocede el barreno.

#### 2.3.2.2. Sistema de percusión

Este sistema se acciona por el cuerpo de válvula 4B y el flujo está afectado por una reguladora de caudal. Esta misma línea está conectada a un manómetro y a un presostato presente en el sistema eléctrico del equipo, el cual funciona como un indicador de presión alta de percusión. El sistema hidráulico se presenta en la figura 2.9.

#### 2.3.2.3. Sistema de avance

Este sistema es accionado por el cuerpo 4C, donde pasa por el sistema antiatasque (6) y la válvula 3/2(5) para que finalmente se active el avance. Está monitoreado por un manómetro (G12) en el panel.

Para el retroceso, se presenta la opción de activar el sistema antiatasque, explicado líneas arriba. El sistema detiene el avance si se manipula la válvula 4C o si el vástago llega a su máximo alcance, donde se activa un limit switch y se conduce hasta el piloto de esta válvula. Esto además desactiva el sistema de percusión. El diagrama hidráulico se presenta en la figura 2.10.



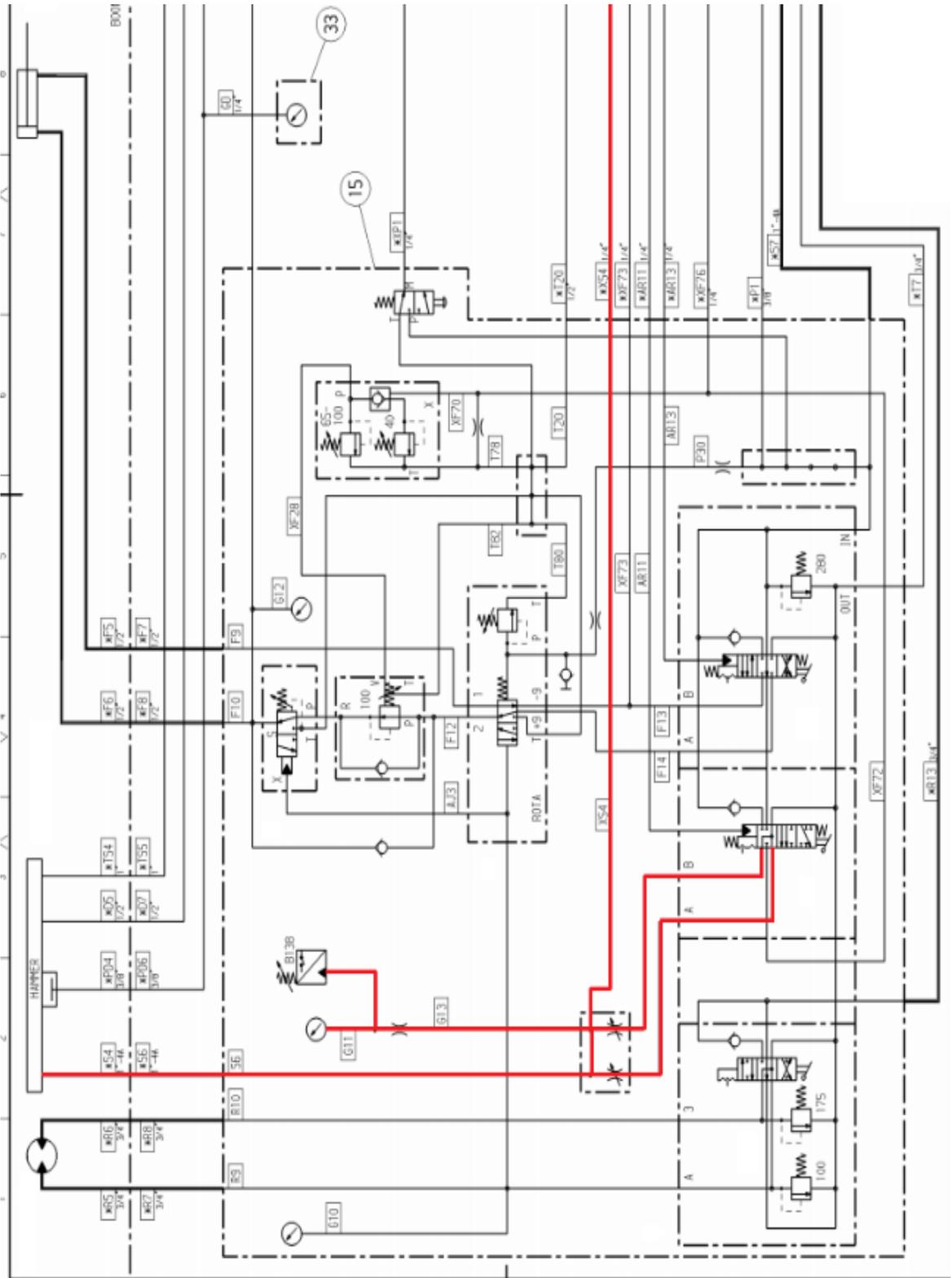


Figura 2.9: Accionamiento del sistema de percusión [21].

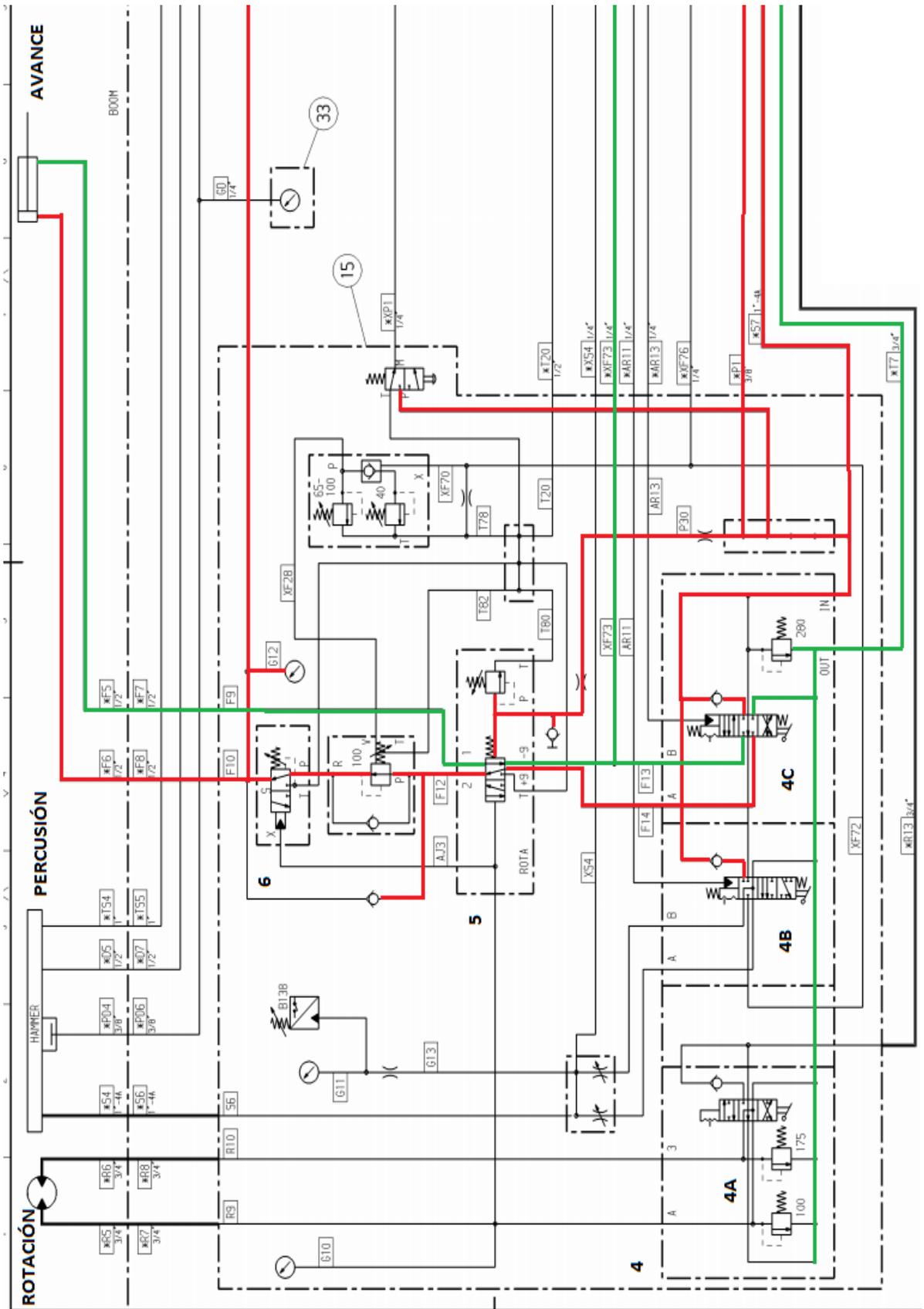
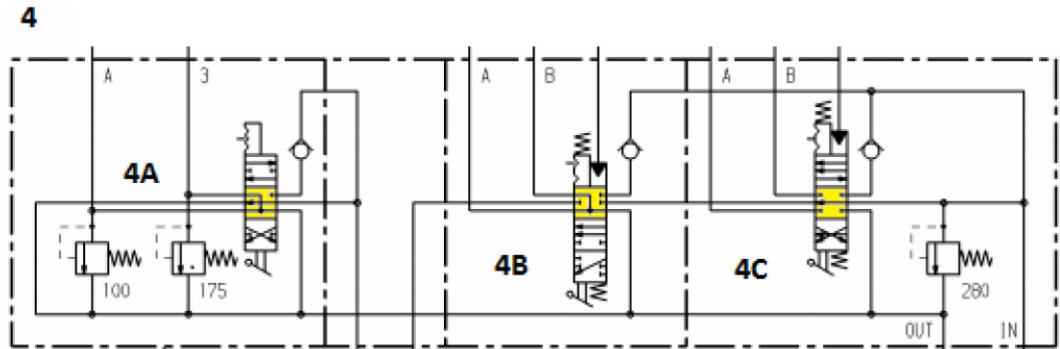


Figura 2.10: Accionamiento del sistema de avance [21].

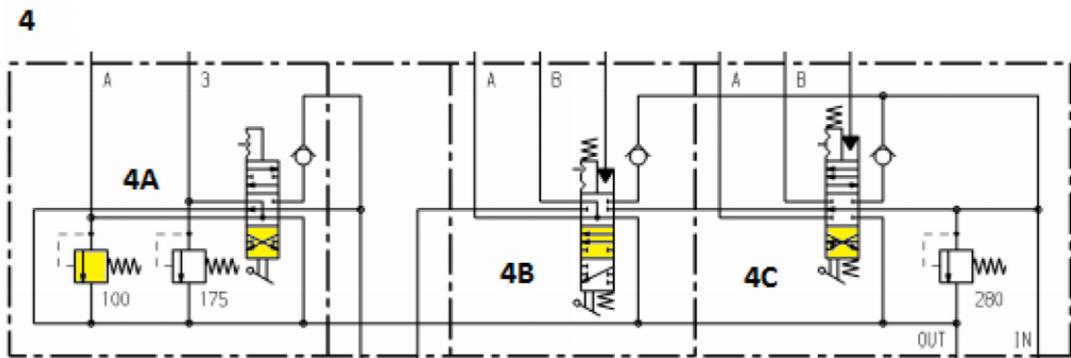
#### 2.3.2.4. Modos de operación

Los modos de operación de la perforación están referido al manejo de los parámetros de rotación, avance y percusión maniobrando las válvulas anteriormente mencionadas. Estos modos de operación se mostrarán a continuación, junto con la activación de las válvulas solenoides:

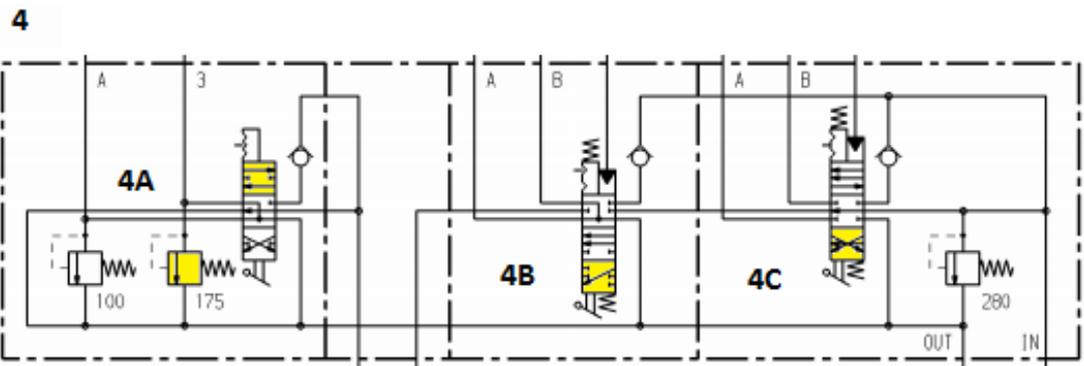
- Posición neutral. Se da cuando ningún sistema está activo o el vehículo está trasladándose. La activación de la válvula es la siguiente:



- Operación a media potencia. Aquí el sistema de rotación alcanza máximo los 100 bar, lo cual activa la válvula limitadora de presión. El sistema de percusión actúa a media potencia regulada por el presostato instalado en la línea. El sistema de avance se encuentra en funcionamiento normal. Este modo es usado para el emboquillado del barreno. La activación de la válvula es la siguiente:



- Operación a potencia completa: El sistema de rotación puede alcanzar los 175 bar, el sistema de percusión pasa por la línea que no está regulada por el presostato y el modo de avance es igual al anterior modo de operación. La activación de la válvula es la siguiente:



**Figura 2.13:** Operación a plena potencia [21].

### 2.3.3. Sistema de dirección

El control de la dirección del jumbo hidráulico Boomer 282 está a cargo de un sistema hidrostático de transmisión marca Clark T12000, el cual está controlado por un timón dentro del vehículo. Debido al requerimiento de poder teleoperar el equipo, se necesita que este sistema sea electrohidráulico, con el fin de variar señales eléctricas usando una válvula servo.

Para este fin, se pueden reemplazar el sistema de dirección actual con uno controlado por señales eléctricas. Las marcas Hydac y Eaton desarrollaron su propio sistema, pero actualmente la marca Danfoss es la más usada, por su facilidad de instalación y uso. El producto de transmisión OSPEC LSRM será sugerida para este fin, que ha sido diseñado para manejar una presión de dirección de 210 bar y un flujo hasta de 50 l/min. Estos productos están preparados para ser controlados por GPS y por joysticks, usando el módulo programable PVED-CLS de la misma marca.

### 2.3.4. Selección de electroválvulas hidráulicas

Teniendo en cuenta de los requerimientos y la cantidad de actuadores a maniobrar observados anteriormente, se hará un breve listado ajustando la cantidad de válvulas necesarias para el control del sistema hidráulico:

- Válvulas electrohidráulicas proporcionales: 4 (para los cilindros de levante)
- Válvulas electrohidráulicas proporcionales: 7 (4 para el movimiento del brazo perforador y 3 para los sistemas de percusión, rotación y avance)

Entonces, estas 11 válvulas serán seleccionadas de entre tres marcas diferentes: Parker, Danfoss y Walvoil. Esto debido a que son marcas reconocidas por el medio local frente a aplicaciones móviles en ambientes mineros. En la tabla a continuación se observarán las características de cada una de ellas y así poder seleccionar a la mejor para esta labor.

**Tabla 2.1:** Comparación entre distintas marcas fabricantes de válvulas electrohidráulicas

Marca	Familia	Presión de trabajo	Caudal máximo de entrada	Catálogos en la red	Repuestos disponibles
Parker	CH60	210 bar	60 l/min	no	si
Danfoss	PVG32	350 bar	140 l/min	si	si
Walvoil	SD18	250 bar	160 l/min	si	si

Se escogerá la marca Danfoss para este fin, dado que sus válvulas soportan una mayor presión de trabajo (presión máxima del sistema=280 bar) y el caudal de entrada es mayor a los 84 l/min, el cual es del circuito hidráulico. A continuación, se mostrará una tabla con las diferentes características de esta válvula electrohidráulica:

**Tabla 2.2:** Características técnicas de la PVG 32 [22]

<b>Presión Máxima</b>	Puerto P, continua	350 bar
	Puerto A/B	350 bar
	Puerto T, dinámica	25 bar/40 bar
<b>Caudal de aceite</b>	Puerto P	140-230 l/min
	Puerto A/B, compensada	100 l/min
	Puerto A/B, no compensada	125 l/min
<b>Viaje del Spool</b>	Rango Proporcional	+/-4.8
<b>Viscosidad del aceite</b>	Operación	12-75 mm <sup>3</sup>
<b>Máxima Contaminación</b>	Grado de filtración	19/16
<b>Tiempo de reacción</b>	Proporcional	0.7 s

Las válvulas on/off y proporcionales serán las 4/3 PVG 32 con accionamiento eléctrico, los cuales será especificado a continuación. Se escogieron los códigos para armar las válvulas de rotación, percusión y avance y de los mandos de los bloques 3A, 3B, 3C, 3D y 3E.

Cuerpo de entrada: 1574B5010.

Cuerpo de trabajo: 157B6130.

Válvula shock y anti cavitación (reguladora de presión, para los demás no son necesarios):

Rotación: 157B2100 (A), 157B2175 (B).

Avance: 157B2280.

Bloque 3B: 157B2080 (A), 157B2150 (B).

Spool: 157B7004.

Cuerpo de salida: 157B2000.

Kit de armado: 157B8003 (para sistemas de rotación, avance y percusión), 157B8008 (para el bloque 3).

Actuador eléctrico: 157B4228 (para las ON/OFF), 157B4128 (para las proporcionales).

Símbolo	Descripción	Código														
 157-22.10	Módulo de centro abierto para bombas con desplazamiento fijo. Con piloto hidráulico para válvulas actuadas eléctricamente.	P = G 1/2 T = G 3/4														
		P = 7/8-14 T = 1 1/16-12														
		P, T = G 3/4														
		P, T = 1 1/16-12														
157B5010																
157B5210																
157B5110																
157B5310																
Símbolo	Descripción	Código														
 157-20.10	Válvula check para la caída de presión	G 1/2														
		7/8-14														
157B6100		157B6130														
157B6500		157B6530														
PVB está implementada con válvula lógica LS			Código número 157B....			PVB no está implementada con válvula lógica LS										
Flujo compensado: l/min [US gal/min]							Símbolo ISO		Símbolo		Flujo compensado: l/min [US gal/min]					
F	E	D	C	B	A	AA			AA	A	B	C	D	E	F	
130	100	65	40	25	10	5 [1.3]			5 [1.3]	10	25	40	65	100	130	
[34.3]	[26.4]	[17.2]	[10.6]	[6.6]	[2.6]					[2.6]	[6.6]	[10.6]	[17.2]	[26.4]	[34.3]	
7026	7024	7023	7022	7021	7020	7025	 157-02.10	 157-26.10	7005	7000	7001	7002	7003	7004	7006	
							4 vías, 3 posiciones Posición neutral cerrada									
Código 157B....	2032	2050	2063	2080	2100	2125	2140	2150	2160	2175	2190					
Ajuste	bar	32	50	63	80	100	125	140	150	160	175	190				
	[psi]	[460]	[725]	[914]	[1160]	[1450]	[1813]	[2031]	[2175]	[2320]	[2538]	[2755]				
Código 157B....	2210	2230	2240	2250	2265	2280	2300	2320	2350	2380	2400					
Ajuste	bar	210	230	240	250	265	280	300	320	350	380	400				
	[psi]	[3045]	[3335]	[3480]	[3625]	[3845]	[4061]	[4351]	[4641]	[5075]	[5511]	[5801]				
Descripción	Número de Código											Peso kg [lb]				
PVEO, on-off	12 V			157B4216			157B4901			157B4291			0.6 [1.3]			
	24 V			157B4228			157B4902			157B4292						
PVEM, prop. medium - Standard	12 V			157B4116			-			-			0.9 [2.0]			
	24 V			157B4128			-			-						
Código 157B...	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
PVB's	8000	8001	8002	8003	8004	8005	8006	8007	8008	8009	8010	8061	8062			
PVB + PVPVM	-	8021	8022	8023	8024	8025	8026	8027	8028	8029	8030	8081	8082			
Peso kg [lb]	0.1 [0.2]	0.15 [0.3]	0.25 [0.6]	0.30 [0.7]	0.40 [0.9]	0.45 [1.0]	0.50 [1.1]	0.60 [1.3]	0.65 [1.4]	0.70 [1.6]	0.80 [1.7]	0.85 [1.8]	0.9 [2.0]			
Símbolo	Descripción	Montaje	Código													
 V310062.A	PVS, sin elementos activos. Sin conexiones	BSP	157B2000													
		SAE	157B2020													

Figura 2.14: Componentes a seleccionar para el armado de los bloques de válvula PVG32 [22].

### 2.3.5. Esquemas hidráulicos de los comandos de válvulas

Considerando la selección de las válvulas electrohidráulicas para el control de las funciones de la perforadora hidráulica, se diagramó el plano hidráulico de conexiones 2.A. y 2.B, representados en las figuras 2.15 y 2.16. Estos bloques de válvula reemplazarán a los bloques 2,3 y 4 del sistema original.

### 2.4. Análisis de la transmisión de las señales en labores subterráneas

Siendo el modo de transmisión y recepción de datos elegido por WiFi (estándar IEEE 802.11), se necesitará realizar de un breve análisis para verificar si el ruido electromagnético de la maquinaria que funciona en la mina subterránea no interferirá con el manejo del equipo en forma remota. Estudios anteriores realizados en la mina U.S. Steel's Robena No. 4, señalan que el espectro del ruido electromagnético cubría un espacio de frecuencias de 100 Hz a 100 KHz. Esto generalmente provenía de la maquinaria pesada en labores y de la tensión de alimentación, la cual era de 600Vdc. El ruido medido tenía una amplitud de 10 dB a 100KHz y de 35 dB a 10KHz [23]. Esto sugiere que las frecuencias de comunicación mayores a 100KHz son deseables, aunque a mayor frecuencia, menor espacio de propagación tendrá la señal. Siendo la frecuencia WiFi estándar de 2.4GHz, se puede concluir que el ruido no afectará en gran medida la transmisión y recepción de datos.

Entonces, el problema radica más en el espacio de transmisión de datos que en el ruido subyacente a las labores mineras. Para solucionar este punto, muchas mineras utilizaron las soluciones siguientes:

- Red Ethernet por cables de fibra óptica.
- Puntos de acceso repartidos en el subterráneo.
- Sistema redundante de comunicación.
- Filtros pasabanda.

En este particular caso, se usará un filtro pasabanda de 2.4 Ghz bidireccional, con protección IP 67.

**Tabla 2.3:** Selección de filtros pasabanda para la conexión inalámbrica.

Filtro	Ancho de banda	Rizado	Pérdida de retorno	Impedancia	Dimensiones	Peso	Protección
Hyperlink	22 Mhz	< 0.25 dB	>15 dB	50 Ohm	124x74x35 mm	0.71 Kg	IP 67
Pacific Wave	22 Mhz	< 0.25 dB	>15 dB	50 Ohm	150x85x40 mm	0.9 Kg	IP 67
Ocean Link	24 Mhz	<0.25	>20 dB	50 Ohm	120x70x30 mm	0.65 Kg	-

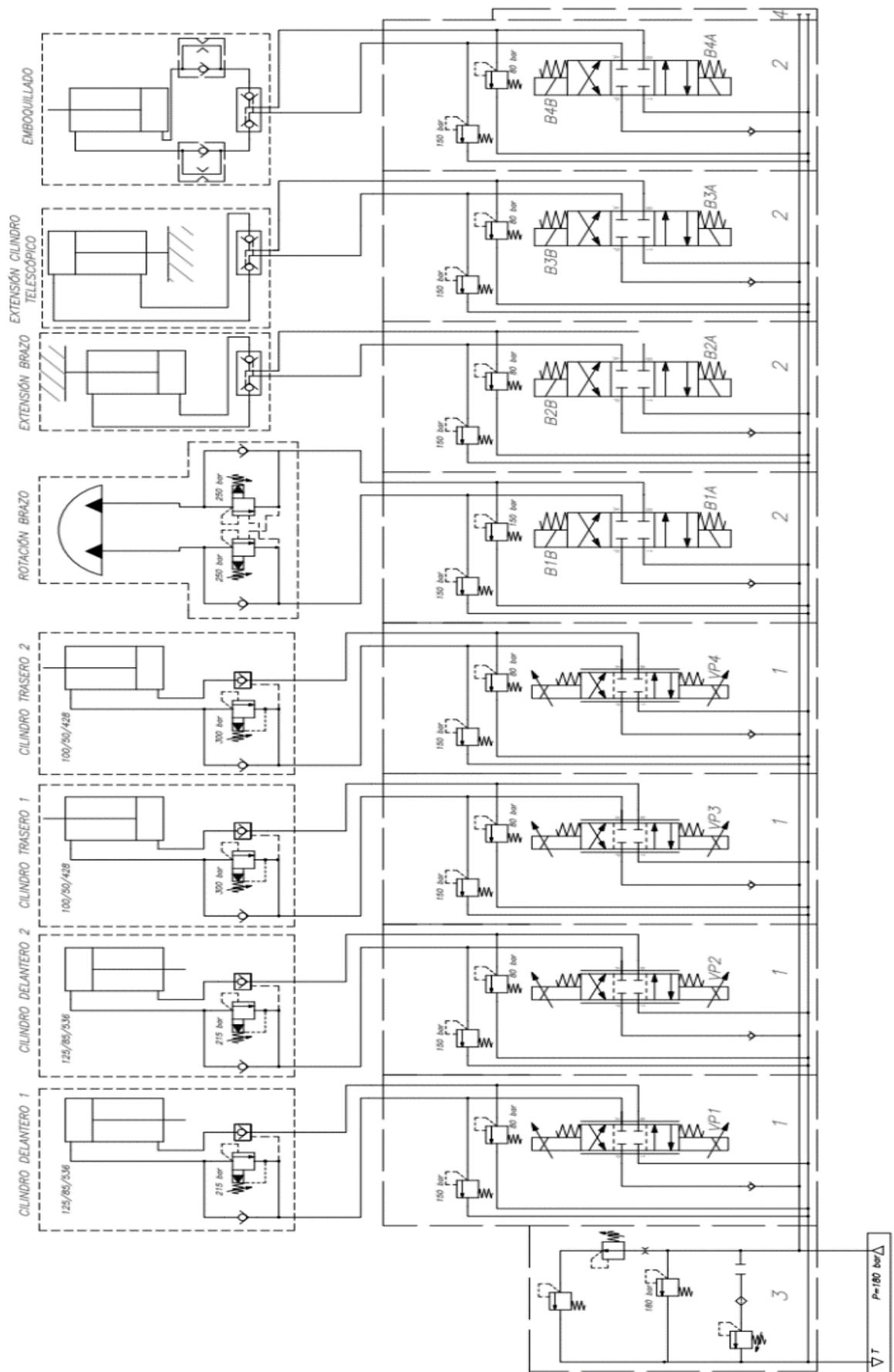
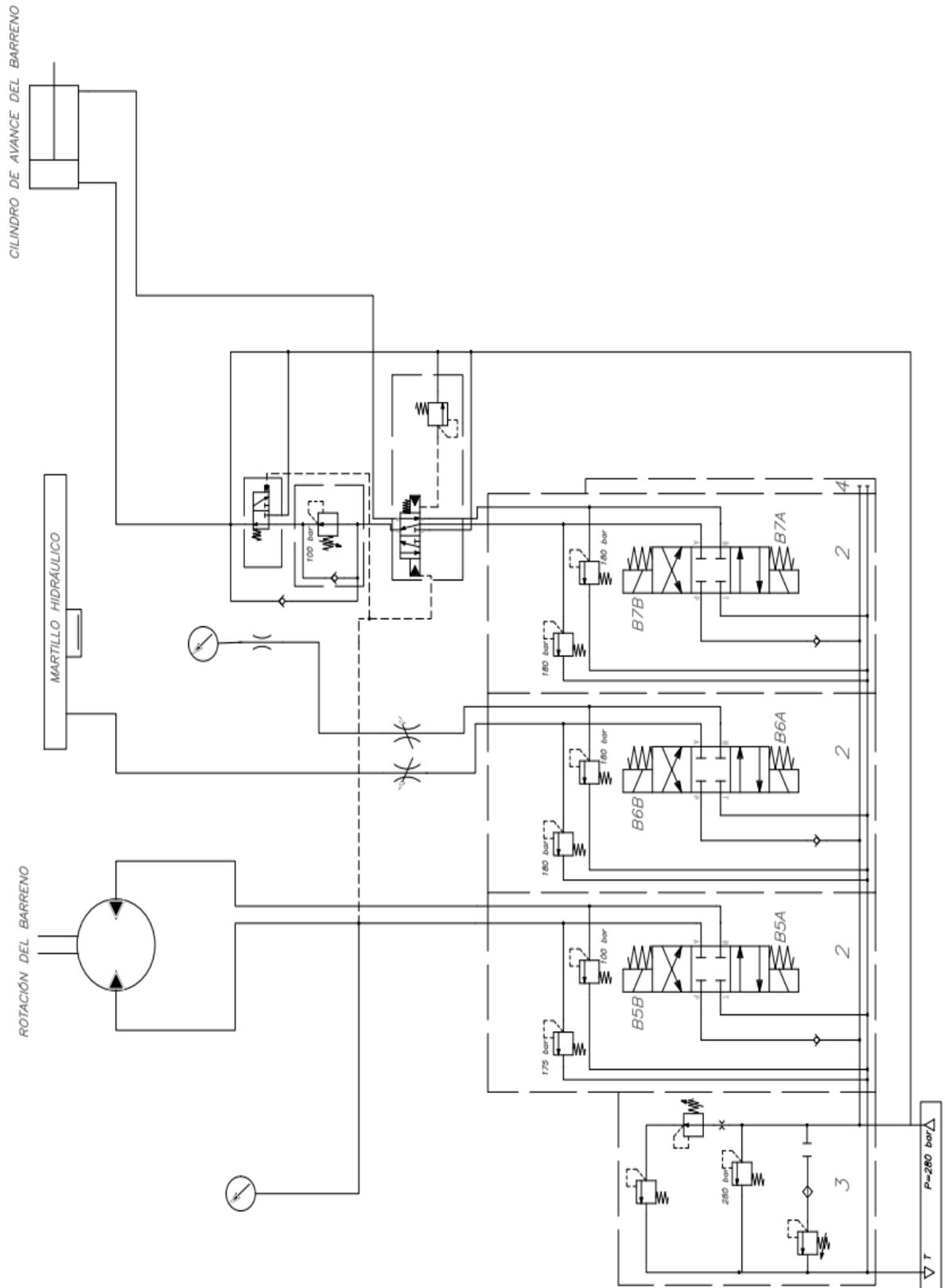


Figura 2.15: Bloque de válvulas 1 para el accionamiento hidráulico del movimiento del brazo perforador.



**Figura 2.16:** Bloque de válvulas 2 para el accionamiento de las funciones del brazo perforador.

De los tres productos comerciales, se escogerá el Hyperlink BPF24-801A, por sus mejores características técnicas y menores dimensiones, aparte de contar con la protección requerida.



**Figura 2.17:** Filtro pasabanda Hyperlink BPF24-801A [24].

Sus características técnicas se detallarán a continuación:

**Tabla 2.4:** Características técnicas del filtro pasabanda BPF24-801A [24]

Frecuencia de centrado	2412 MHz - Canal 1
Banda de rechazo	>60 dB a 2387 Mhz
	>60 dB a 2437 Mhz
Ancho de banda (-3 dB)	22 MHz
Pérdida de inserción	3 dB nominal
Rizado	<0.25 dB
Pérdida de retorno	> 90 dBc
Impedancia	50 Ohm
Potencia	50 W
Dimensiones	124x74x35mm
Peso	0.71 Kg.

## 2.5. Sistema electrónico

Para el diseño de este sistema, se seleccionarán los diferentes sensores y actuadores contemplados en el concepto de solución óptimo, para luego interconectarlos. Por seguridad de la operación, en caso de falla del sistema de comunicación inalámbrica, la maquinaria desactivará todas sus válvulas hidráulicas y los actuadores mantendrán su posición hasta que este problema sea subsanado.

## 2.5.1. Sensores y actuadores

### 2.5.1.1. Escáner 3D

El escáner láser por triangulación que se seleccionará deberá brindar datos del entorno a una distancia de 8 metros, con un ángulo de barrido de 270 grados. Además, su comunicación será por Ethernet, y deberá poseer una protección mínima de IP65. Este sensor tendrá que filtrar las señales erróneas provenientes de partículas suspendidas en el aire, propio de las labores subterráneas. Los tipos de escáneres láser que existen en el mercado se capitularon en el anexo A.5.

**Tabla 2.5:** Escáneres láser 3D por tiempo de vuelo

Sensor	Marca	Ángulo de barrido	Rango de operación	¿Robusto?	Protección
330 HDR	Faro	360°	330 m	si	IP67
TX8	Geotronics	360 °	120 m	no	IP65
OS32C	Omron	270°	15 m	si	IP67

Se seleccionaron dos escáneres láser OS32C de Omron por la posibilidad de programar zonas de alerta, además de su bajo costo y por cubrir el rango de operación. Las zonas de alerta se programarán remotamente, y en ellas se distinguirán tres zonas: una de operación, la cual estará fijada por una sección rectangular de 12 m de largo con 3.2 m de ancho (esto de acuerdo a las dimensiones del jumbo hidráulico); la zona de riesgo, la cual es una sección similar a la anterior, con dimensiones de 9.6 m de largo con 2.8 m de ancho (mínimas para asegurar la reacción del operador antes de una colisión); y por último la zona de parada, con sección de 9 m de largo y 2.65 m de ancho, donde la máquina deberá de cesar su operación. Las especificaciones técnicas del sensor se detallarán en la tabla 2.6.

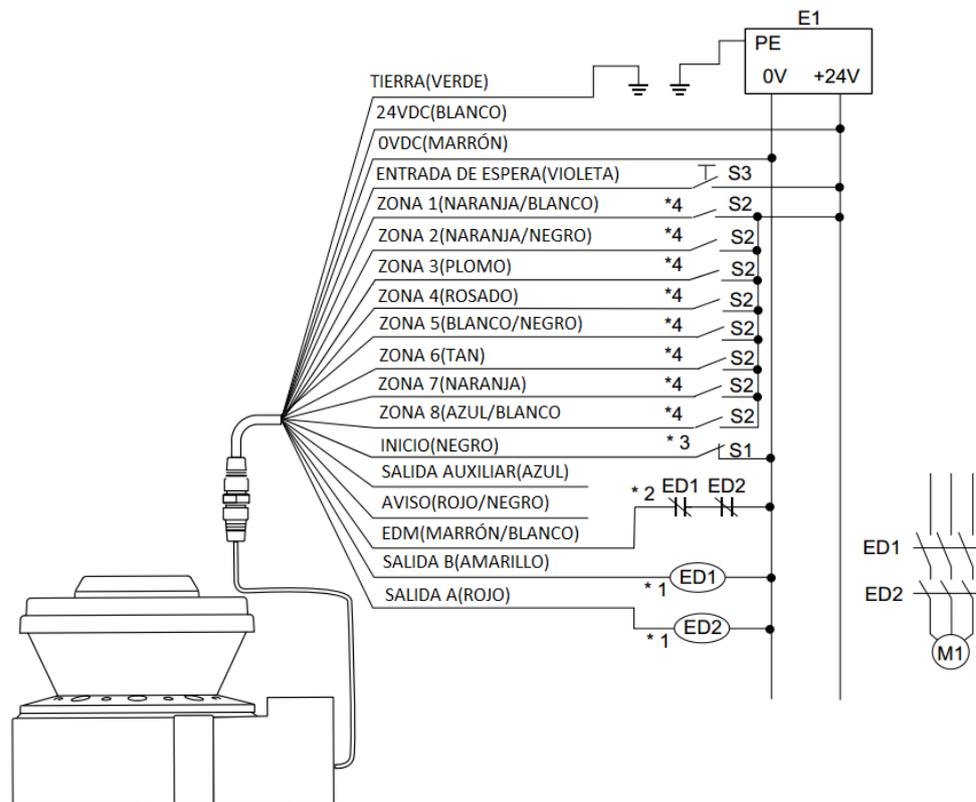


**Figura 2.18:** Dimensiones del sensor Omron OS32C [25].

**Tabla 2.6:** Parámetros técnicos del sensor OS32C

Rango de operación	Zona de seguridad	Resolución 30 mm	1.75 m
		Resolución 40 mm	2.5 m
		Resolución 50 mm	3 m
		Resolución 70 mm	4 m
	Zona de peligro	15 m	
Ángulo de detección	270°		
Resolución angular	0.4°		
Alimentación	24 V		
Consumo	5 W		
Conexión	M12 o RJ45		
Peso	1.3 Kg		

La asignación de pines del escáner láser se presentará en la siguiente imagen:



**Figura 2.19:** Asignación de pines del escáner láser OS32C [25].

Para esta aplicación se usarán dos zonas de seguridad, la zona de riesgo (Zone Select 1) y la zona de peligro y cese de operaciones (Zone Select 2). Las demás zonas no serán conectadas.

### 2.5.1.2. Cámaras IP

Las cámaras contempladas en el diseño definitivo servirán como el sistema de visión que necesitará el operador para poder maniobrar el jumbo correctamente. Para ello el ángulo de visión horizontal deberá ser de un mínimo de 90° y emplear una resolución de 1280x800, con el fin de poder visualizarlas en una pantalla de 42 pulgadas. Deberán tener un diseño para funcionar sin problemas en un entorno minero, lo cual se traduce en una protección de IP68 y soportar una temperatura media de 40° C. Los fotogramas serán transmitidos vía Ethernet y serán descargados por una dirección IP en el módulo de teleoperación.

**Tabla 2.7:** Cámaras IP.

Sensor	Marca	Ángulo de visión	Temperatura	Resolución	Protección
IPM 3014	Samcom	90°	-30 a 50 °C	1280x800	IP68
AX-F200	Anson	80°	0 a 50°C	1920x1080	IP67
IMT-IP	IMT	90°	-20 a 50 °C	1280x800	IP67

Para tal fin se seleccionaron 4 cámaras ExCam IPM3014 de la compañía Samcom, las cuales cubrirán los 360 grados de visión, además tienen la protección necesaria.



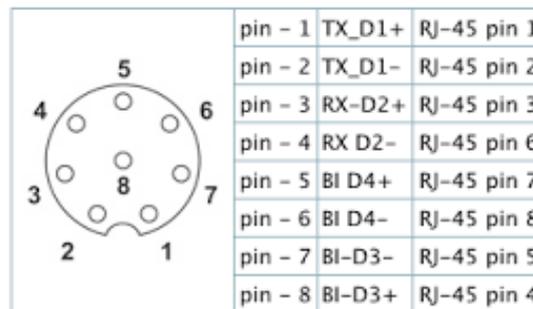
**Figura 2.20:** Cámara IPM314 SamCom [26].

Las especificaciones técnicas de la cámara se detallarán en la tabla líneas abajo.

**Tabla 2.8:** Parámetros técnicos de la cámara IPM3014

Sensor de Imagen	RGB CMOS 1 Mpx
Lente	2.8 mm
Resolución	1280x800 a 160x90
Fotogramas	30 fps
Tensión	24 VDC
Potencia Consumida	20 W
Protección	IP68
Conector	RJ45

Para los sensores anteriormente señalados, se requerirán conectores hembras M12 de 8 pines, ya que con estos se puede lograr la protección IP67. La asignación de



**Figura 2.21:** Asignación de pines conector M12 y comparación con el conector RJ-45 [26].

pines se mostrará en la figura a continuación:

### 2.5.1.3. Sensor Lineal

El sensor lineal contemplado deberá tener un montaje externo a los 2 cilindros hidráulicos que controlan el ángulo de inclinación del brazo perforador, para así controlar un grado de libertad del jumbo hidráulico. De acuerdo con los planos hidráulicos del equipo analizado en el apartado 3.2, se podrán controlar los movimientos horizontales y verticales del brazo perforador con dos pistones HC09 de 125 mm de diámetro exterior, 85 mm de diámetro interior y 536 mm de carrera. En la siguiente tabla se mostrarán las alternativas consideradas:

**Tabla 2.9:** Sensores Lineales

Sensor	Marca	Resolución	Rango de operación	Protección
Li-Q25L	Turck	100 mm	1000mm	IP67
MXR	Temposonics	0.1mm	500mm	IP69
TP1	novotechnik	25mm	4250mm	IP67

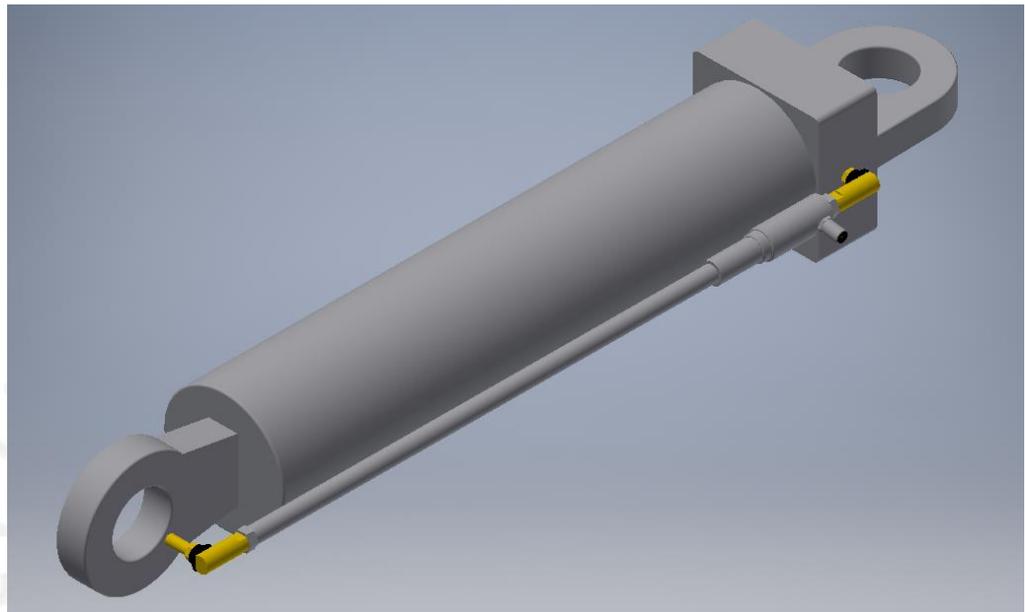
Se escogió el sensor lineal MXRS550, ya que tiene un rango de medición de 550 mm, suficiente para la carrera del pistón. Cuenta con protección de IP69 y salida de 0.5-9.5 V para su medición en un microcontrolador. Si resolución es de 0.1mm, por lo que tendrá un posicionamiento fino. Las especificaciones técnicas del sensor lineal se detallarán en la tabla líneas abajo.



**Figura 2.22:** Sensor Lineal Serie MXR [27].

**Tabla 2.10:** Parámetros técnicos del sensor lineal MXRS550

Precisión	0.6 mm
Resolución	0.4 mm
Voltaje de Operación	24 VDC
Potencia Consumida	1 W
Rango de temperatura	-40 °C a 105 °C
Protección	IP69



**Figura 2.23:** Ensamble del sensor de posición en el cilindro hidráulico 125/85/536

Este sensor utiliza un conector M12, el cual tiene la asignación de pines de la siguiente manera:

REFERENCIA PARA LA ASIGNACIÓN DE PINES DEL CONECTOR		
 <p>CONECTOR INTEGRADO MACHO, VISTO DESDE EL SENSOR</p>		
ESTÁNDAR	CONECTOR INTEGRADO	ASIGNACIÓN DE PINES Y FUNCIÓN
N_E	4-pin M12 x 1	2-3-4; VCC, GND, salida
N_G	4-pin M12 x 1	1-3-4; VCC, GND, salida
N_H	4-pin M12 x 1	1-3-2; VCC, GND, salida

**Figura 2.24:** Asignación de pines con conector M12 para el sensor de posición MXR [27].

#### 2.5.1.4. Joystick

Serán seleccionados dos elementos: el primero que estará encargado del movimiento vertical del brazo perforador y tendrá botones de control para las funciones de avance, percusión y rotación de la perforadora; y el segundo para el control de la dirección del vehículo perforador.

**Tabla 2.11:** Joysticks en el mercado

Sensor	Marca	Direcciones	Salida
JS6000	Danfoss	X-Y	Analógica
Ic5	Parker	X-Y	Analógica

Para este sistema se elegirán dos joysticks bidireccionales JS6000 de la marca Danfoss. Ambos tendrán salidas analógicas (tensión de entrada=24VDC) actuando como potenciómetros, ya que este sistema es más preciso que una salida digital.

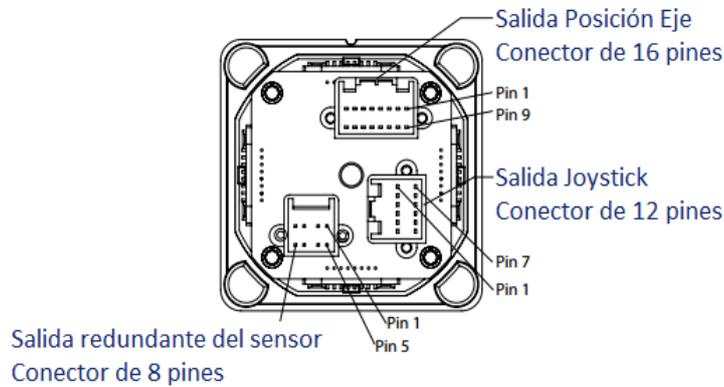


**Figura 2.25:** Joystick JS6000 [28].

**Tabla 2.12:** Parámetros técnicos del joystick JS6000 de Danfoss

Operación	Bidireccional (ejes X e Y)
Tensión de entrada	9-36 Vdc
Salida	Analógica independiente de cada eje, 10-90% del V de alimentación
Alineamiento	+2.5°

La salida de este elemento tiene la siguiente asignación de pines a continuación:



Pin	Descripción del Pin
1	Señal N/A eje Y dirección adelante
2	Señal N/C eje X centrada
3	Referencia eje X
4	Señal de posición eje X
5	Tensión de alimentación eje X
6	Tensión de alimentación rectificada eje X
7	Tensión de alimentación switches de dirección eje X
8	Señal N/A dirección izquierda eje X
9	Referencia eje Y
10	Señal de posición eje Y
11	Tensión de alimentación eje Y
12	Tensión de alimentación rectificada eje Y
13	Tensión de alimentación switches de dirección eje Y
14	Señal N/A dirección atrás eje X
15	Señal N/A dirección derecha eje X
16	Señal N/C eje Y centrada

**Figura 2.26:** Asignación de pines del Joystick JS6000 [28].

### 2.5.2. Comunicación

La comunicación entre los sensores y actuadores presentes en el equipo minero con la estación de teleoperación será inalámbrica, entonces se seleccionaron 3 equipos, uno encargado de la transmisión y recepción de datos; otro como uso de puertos de entrada y salida para los distintos actuadores; y el tercero para los conectores Ethernet de las cámaras de video instaladas en el equipo.

### 2.5.2.1. Módulo inalámbrico de transmisión/recepción de datos

El módulo seleccionado es el 945U-E de la marca Eaton, el cual soporta la conexión serial y Ethernet para la transmisión de datos por Wireless. Se usarán 2 elementos para la interconexión de la máquina y del módulo de teleoperación.



**Figura 2.27:** Módulo de transmisión/recepción de datos Eaton 945U-E [24].

**Tabla 2.13:** Datos técnicos del 954U-E

<b>Puertos</b>	Ethernet, Rs232,I/O
<b>Tamaño</b>	114 mmx168 mmx30 mm
<b>Peso</b>	0.5 Kg
<b>Tensión de alimentación</b>	9-30 Vdc
<b>Consumo</b>	6W
<b>Alcance</b>	100m

Este módulo se interconectará a la red Inalámbrica mediante el protocolo IEEE.802.11e, el cual también brindará conexión con el módulo Ethernet del microcontrolador Arduino Mega 2560 a través de su Ethernet Shield. La red inalámbrica también soportará a las 4 cámaras.

### 2.5.2.2. Módulo Ethernet Switch

Este módulo Ethernet servirá para la conexión de las 4 cámaras IP con el módulo inalámbrico de transmisión/recepción de datos. El producto elegido será el D-Link DES-108. Este módulo tiene 7 conectores RJ45 disponibles para la conexión de los elementos.



**Figura 2.28:** Módulo Ethernet de 8 entradas DES-108 [26].

### 2.5.3. Microcontroladores

Según los sensores y actuadores a controlar, además de la necesidad de tener dos estaciones interconectadas, se elegirán dos microcontroladores: uno ubicado en el vehículo perforador, y otro en la estación de perforación. El primero tendrá que tener la capacidad de controlar los 5 solenoides de las válvulas hidráulicas 3/2, los 6 solenoides presentes en las 3 válvulas 6/3 y 1 válvula proporcional 4/3. Además, tendrá la capacidad de tomar la señal analógica proveniente del sensor lineal y de 2 pines de entrada y salida para los escáneres láser que se encuentran en el equipo (total 16 pines I/O, 1 ADC y puerto RS232). El otro microcontrolador deberá recibir las señales de los dos joysticks y conexión serial (total 8 pines I/O y puerto RS232).

**Tabla 2.14:** Selección de microcontroladores

Microcontrolador	Comunicación UART	Pines Digitales	Pines Analógicos
Arduino Mega 2560	SI	54	16
Raspberry Pi 2	SI	40	7
Beaglebone Black A8	SI	65	7

Para este caso se utilizarán dos microcontroladores ARDUINO 2560, basados en el microprocesador ATMEGA 128, por sus distintas librerías libres para su uso. Las características técnicas se presentarán a continuación.

Este microcontrolador tendrá pines libres para que se puedan contemplar otros sensores o actuadores adicionales en mejoras futuras.

**Tabla 2.15:** Parámetros técnicos del ATmega2560

Frecuencia del Reloj	16 Mhz
Tensión	7-12Vdc
Pines Digitales I/O	54
Pines de entrada analógicos	16
Corriente por Pin I/O	20 mA
Memoria Flash	256 KB

Este microcontrolador necesita de un módulo adicional para la conexión con la red Ethernet, por lo que se necesitará usar el Arduino Ethernet Shield, el cual brindará una conexión de datos de hasta 100 Mbps. La interconexión de este módulo con la tarjeta será por los puertos SPI.



**Figura 2.29:** Placa del Arduino Mega 2560 junto al Arduino Ethernet Shield (en orden)[29].

#### 2.5.4. Diagramas esquemáticos

Los diagramas eléctricos generales se encuentran en la lista de planos. Se tomarán detalles de conexiones específicas de algunos componentes, así como los reguladores de voltaje. Los cálculos de los componentes de los circuitos que se mostrarán a continuación se encuentran en el anexo G.

##### 2.5.4.1. Regulador de voltaje

Este regulador de voltaje estará encargado de alimentar de 5 VDC al microcontrolador que se encuentra en el vehículo perforador. Este componente necesitará de 1.35 A para poder funcionar correctamente, por lo que se seleccionó un regulador de voltaje LM2576-5, el cual puede entregar una corriente máxima de 3 A, suficientes para la alimentación de los controladores.

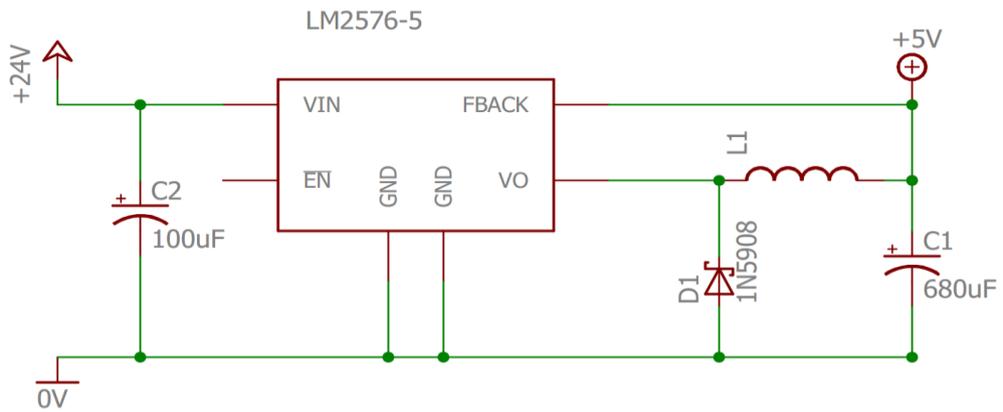


Figura 2.30: Regulador de voltaje LM2576-5.

2.5.4.2. Conexión Arduino con los sensores y las válvulas

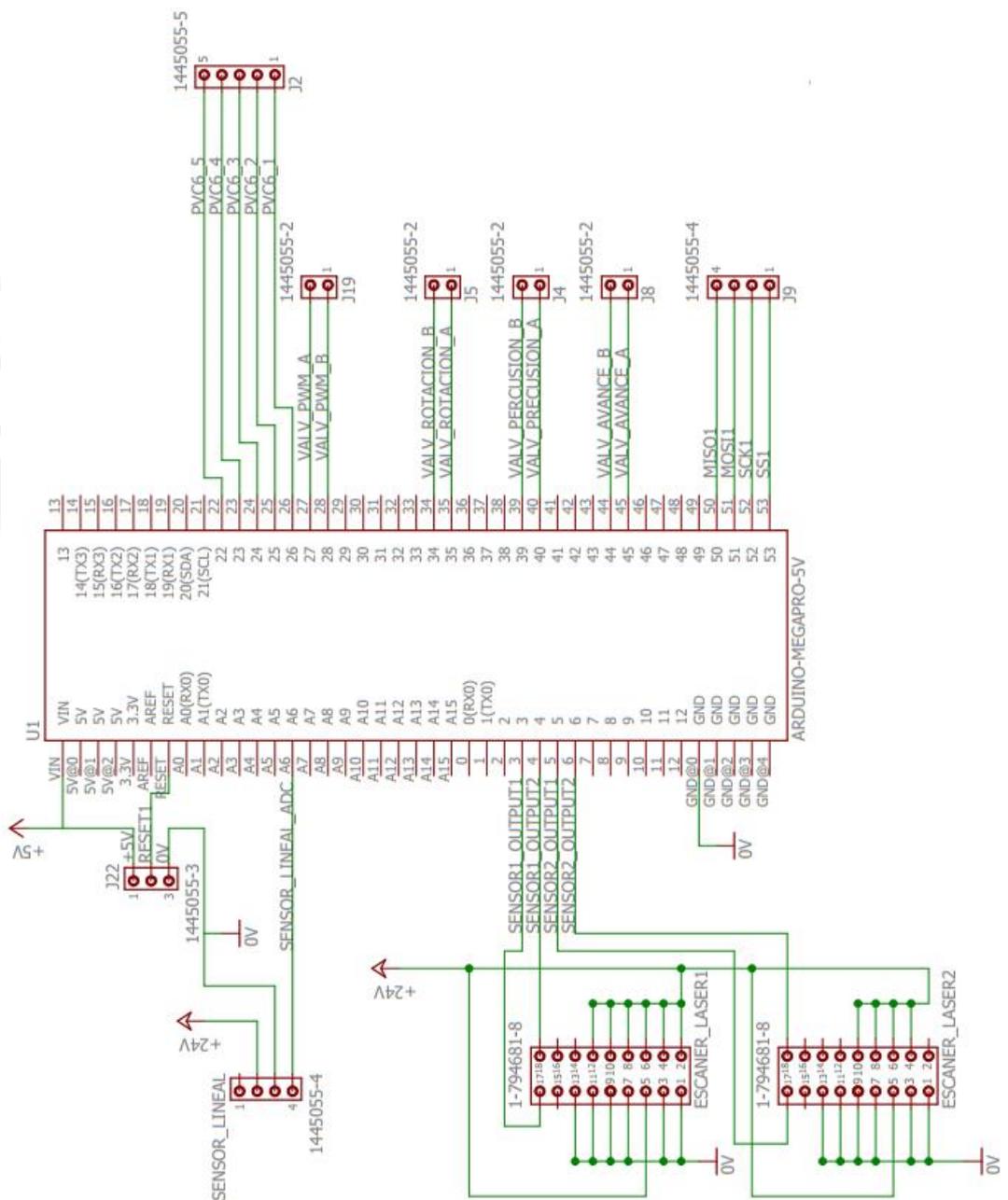


Figura 2.31: Conexión del Arduino con los sensores y las válvulas.

En la figura 2.31 se muestran las conexiones del Arduino con los sensores y electroválvulas hidráulicas. Se usarán los pines ADC para el sensor lineal y los pines I/O para los escáneres láser y las válvulas ON-OFF. Para la válvula proporcional serán necesarias dos salidas PWM. Además, se muestran las conexiones de los pines de transmisión-recepción que irán conectados al módulo WiFi.

### 2.5.4.3. Conexión del módulo inalámbrico

Este módulo conectará los pines de transmisión-recepción del microcontrolador y enviarán los datos a la estación de teleoperación.

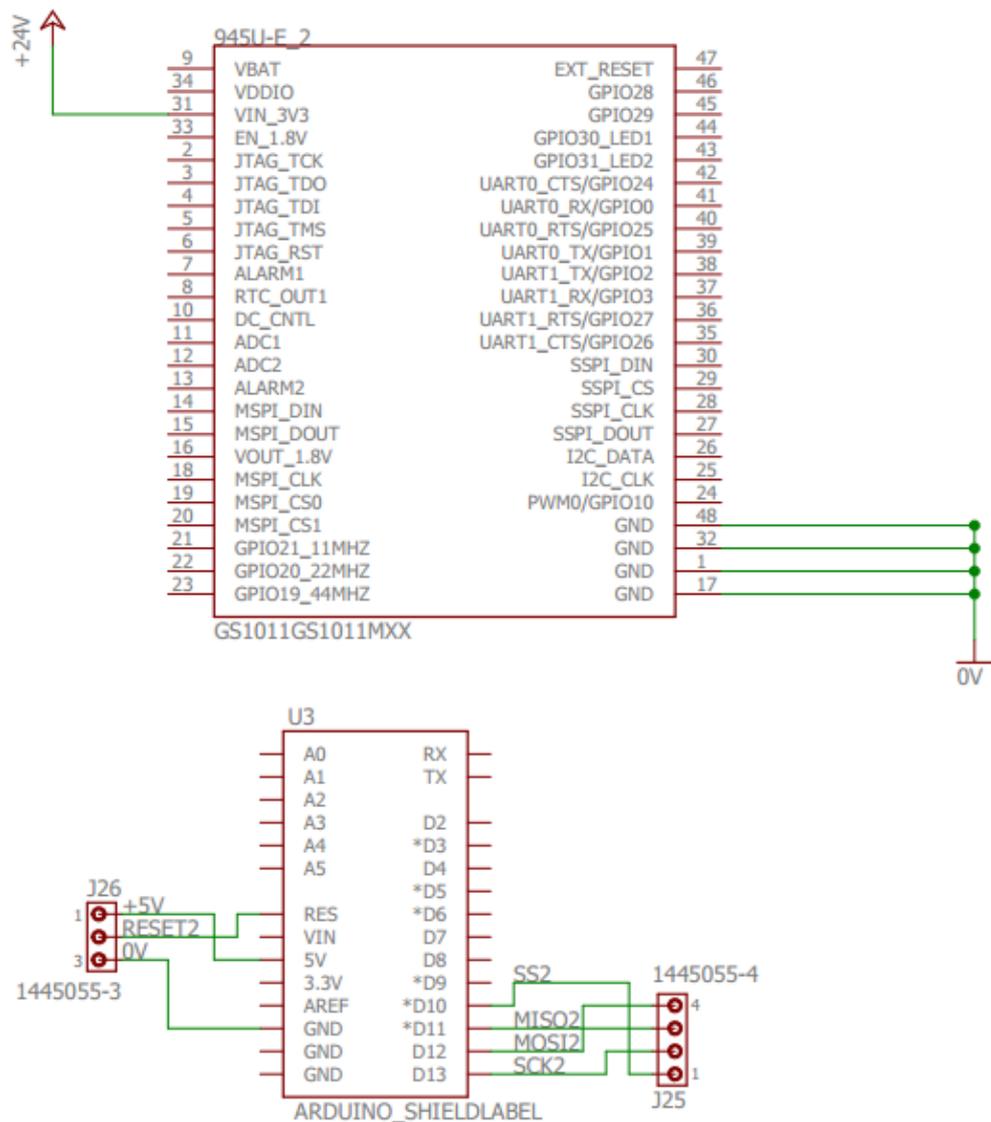


Figura 2.32: Conexión del módulo inalámbrico

#### 2.5.4.4. Conexión de las electroválvulas

Las electroválvulas hidráulicas tendrán conectores AMP, sus pines se mostraron en el apartado anterior. Para su energización se usarán transistores MOSFET IRF 530, para el cual su cálculo de selección se encuentra en el anexo. Para las válvulas proporcionales se necesitará de la señal PWM disponible de los pines del Arduino. Luego, pasará por un filtro pasa bajos y un amplificador operacional (el análisis y la selección de estos componentes se encuentran en los anexos) para obtener una señal analógica de 0-24Vdc.

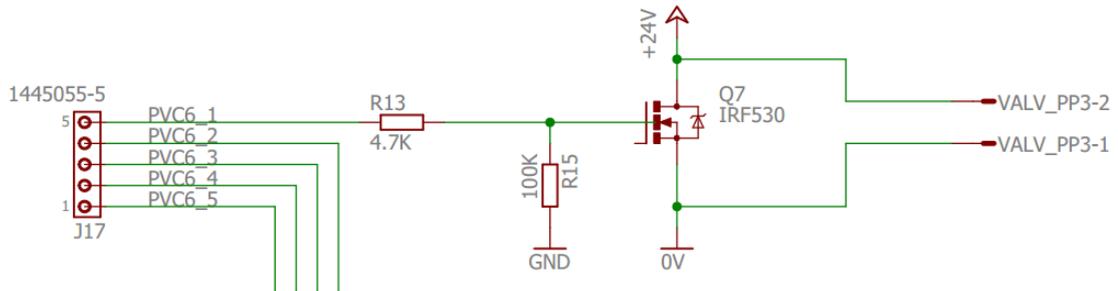


Figura 2.34: Ejemplo de conexión de la válvula 4/3 ON/OFF encargada de la percusión.

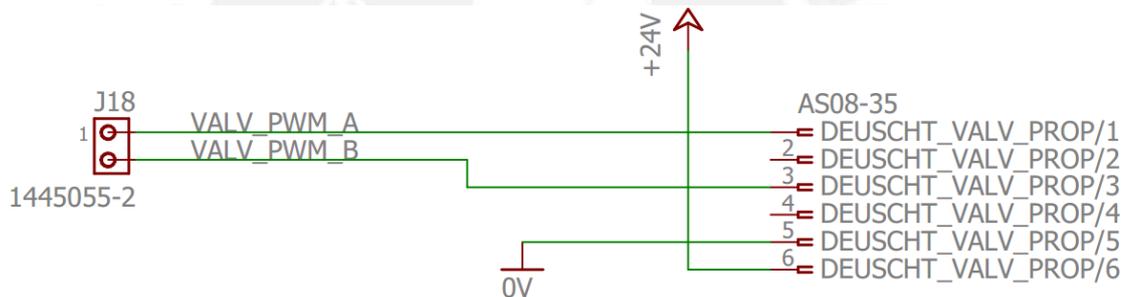


Figura 2.33: Ejemplo de conexión de la válvula proporcional encargada de la dirección del vehículo perforador.

#### 2.5.4.5. Conexión Arduino teleoperación con los joysticks

El microcontrolador de la cabina de teleoperación tendrá como entradas 2 joysticks para el movimiento del brazo perforador y del vehículo, y se tomará la señal de los 4 pines de cada mando para la dirección de éstos, indicando solamente la dirección (arriba-abajo-derecha-izquierda). También se tienen los conectores de transmisión y recepción de datos.

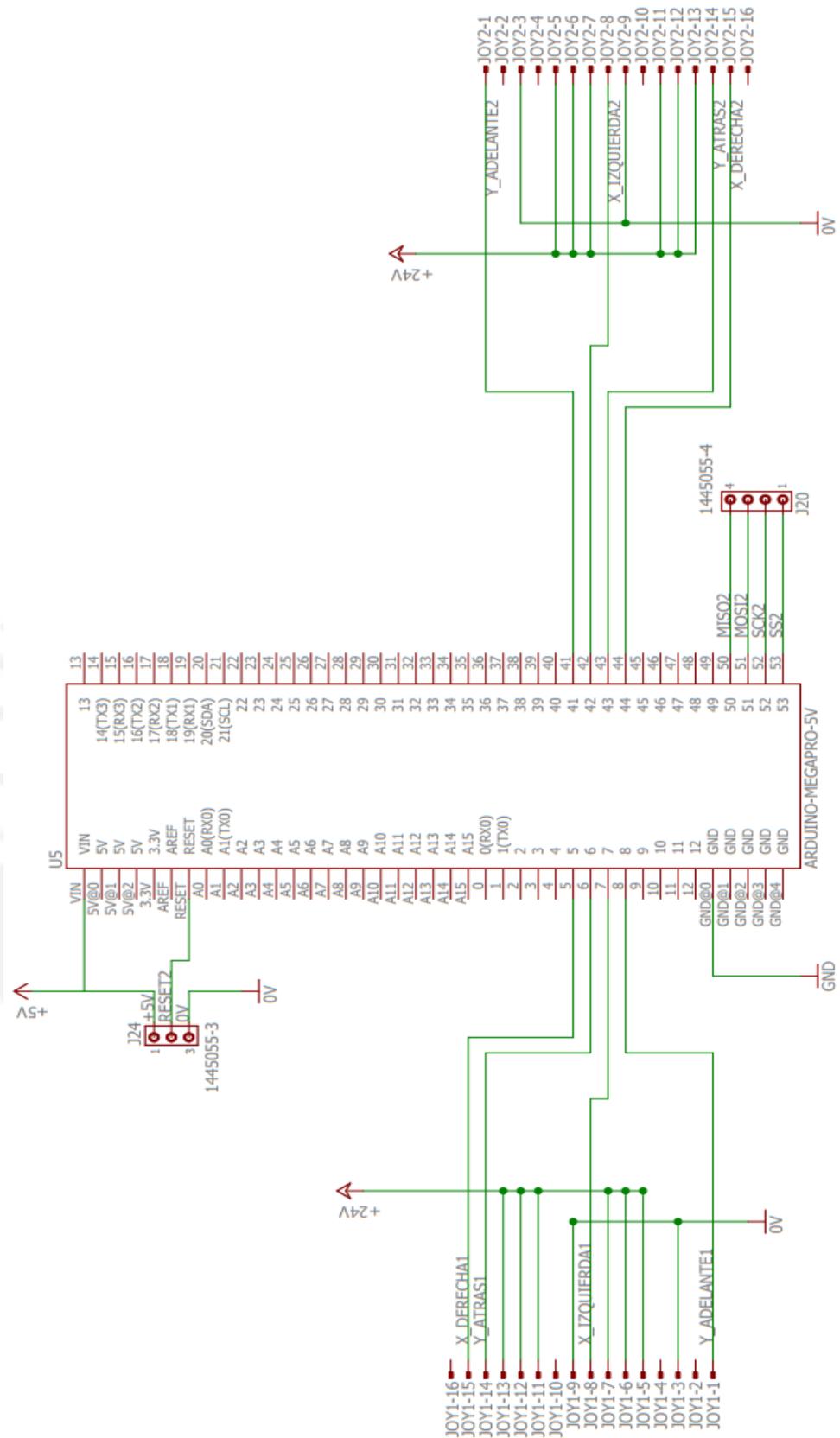
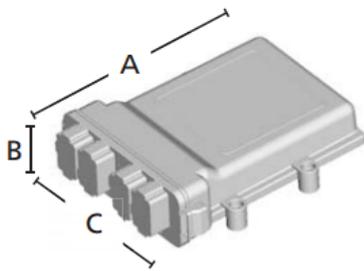


Figura 2.35: Conexión de los Joysticks con el microcontrolador de la cabina de teleoperación

## 2.6. Protección de los componentes electrónicos

Tanto como el microcontrolador como la tarjeta electrónica de potencia y el shield para conexión ethernet no poseen protección alguna, a diferencia de los demás componentes con protección mínima de IP67, por tanto, se necesita de una manera para proveer esta protección adecuada. Existe en el mercado un tipo de protectores para tarjetas con conectores Deutsch, el cual proveerá el aislamiento adecuado para estos dos componentes. Además, se reducen los efectos de la vibración que las tarjetas electrónicas estarán sometidas. Se adjuntará a continuación las características técnicas de este tipo de protección:

### ■ Dimensiones de los protectores serie DT



Protectores de la serie DT con conectores		
Promedio Longitud A	Promedio Longitud B	Promedio Longitud C
7.93 (201.30)	2.15 (54.63)	6.30 (160.00)

**Figura 2.36:** Cubierta de protección para tarjetas PCB con conectores Deutsch [30].

El material que compone este elemento es termoplástico y la medida de tarjetas que pueden alojarse en la cubierta son de 120x180mm. La conexión es con pines Deutsch de tamaño 12 a 16 AWG. El modelo DT13-24PAB de la marca DEUTSCH tiene las siguientes características técnicas:

**Tabla 2.16:** Características técnicas del modelo DT13-24PAB [30].

<b>Durabilidad</b>	Más de 100 ciclos de montaje-desmontaje
<b>Vibraciones</b>	Acepta de 10 a 2000 Hz
<b>Aislamiento</b>	1000 megaohm
<b>Protección</b>	IP67
<b>Rango de temperatura</b>	-55 °C a 125 °C

Además de esta cubierta protectora, se hará uso de conectores DT con capacidad de alojar hasta 48 pines de cobre DT.

## 2.7. Lógica de Control

### 2.7.1. Diagrama de Bloques

Se observa la conexión de los distintos dispositivos en este bloque, donde resaltan dos microcontroladores ATmega 2560, uno en la estación de teleoperación (1) y el otro en el vehículo perforador teleoperado (2). Los joysticks se comunicarán con los pines I/O del microcontrolador 1 y éste tendrá la conexión RS232 con el módulo WiFi 945U-E. Esto mismo ocurre con el controlador del vehículo.

El sensor de posición va conectado al puerto ADC del ATmega 2560, en cambio los escáneres láser van conectados a sus pines digitales. EL control de las válvulas electrohidráulicas se hará con las salidas digitales del microcontrolador y con salidas PWM, en el caso del servo válvula de dirección.

Las 4 cámaras serán accesadas por direcciones IP, para lo cual los módulos WiFi estarán interconectados. Cabe resaltar que la alimentación de todos los periféricos en el vehículo perforador será de 24 Vdc, sin considerar los microcontroladores alimentados por 5V, por lo que se provee de un regulador de voltaje.

### 2.7.2. Diagramas de Flujo

A continuación, se describirán los diagramas de flujo del sistema relacionados con la programación del controlador. La lógica de comunicación remota entre periféricos no se considerará en este trabajo, dado que ya se ha seleccionado un controlador que realizará este trabajo.

#### 2.7.2.1. *Diagrama de flujo principal*

Este diagrama considera las actividades básicas a seguir por el modelo, descritas en la siguiente figura. La función “configurar entradas y salidas” se encarga de inicializar los parámetros del sistema, donde además se prepara el equipo para su operación; luego la función “Mover el equipo” se encarga de la teleoperación del jumbo hidráulico a lo largo del túnel, con ayuda de las cámaras y el sistema anti-colisión; y finalmente la función “Taladrar la superficie”, que está a cargo de la operación del movimiento del brazo perforador y las operaciones básicas para el perforado de la cara del túnel. Este diagrama se muestra en la figura 2.38.

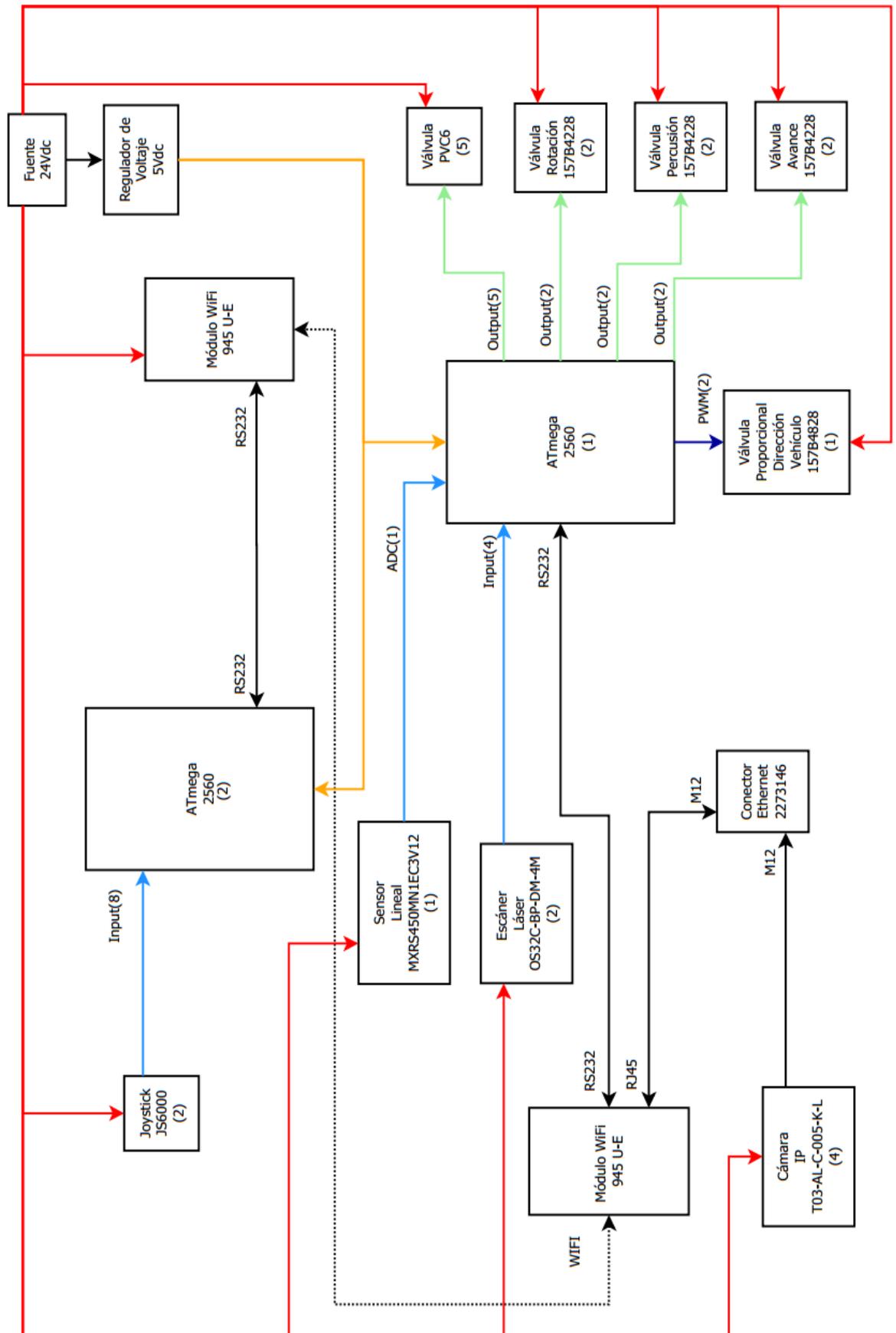
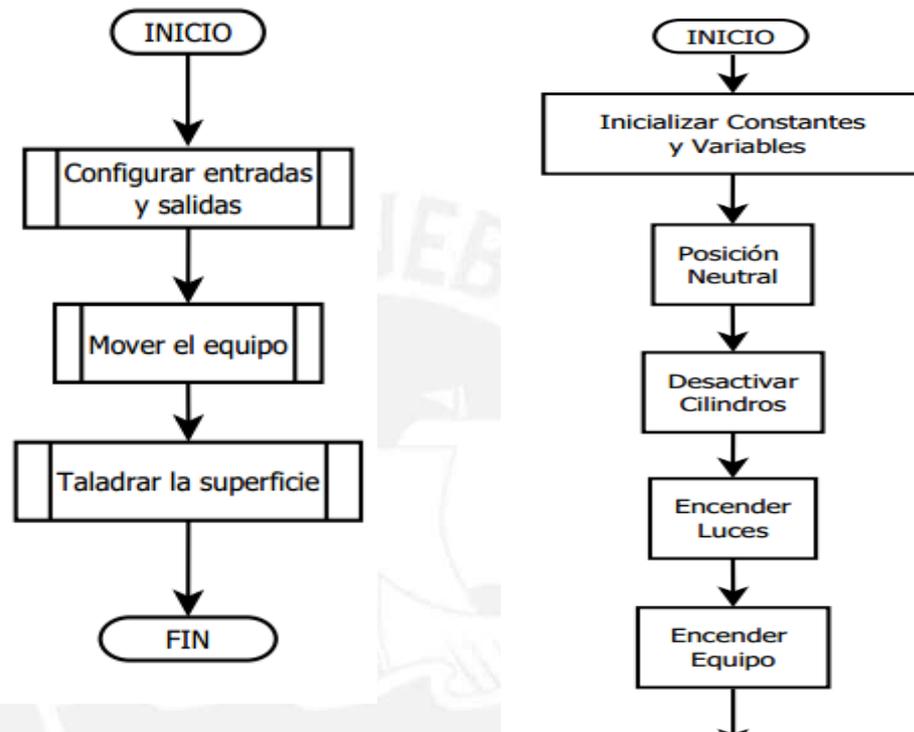


Figura 2.37: Diagrama de bloques del sistema

### 2.7.2.2. Configurar entradas y salidas

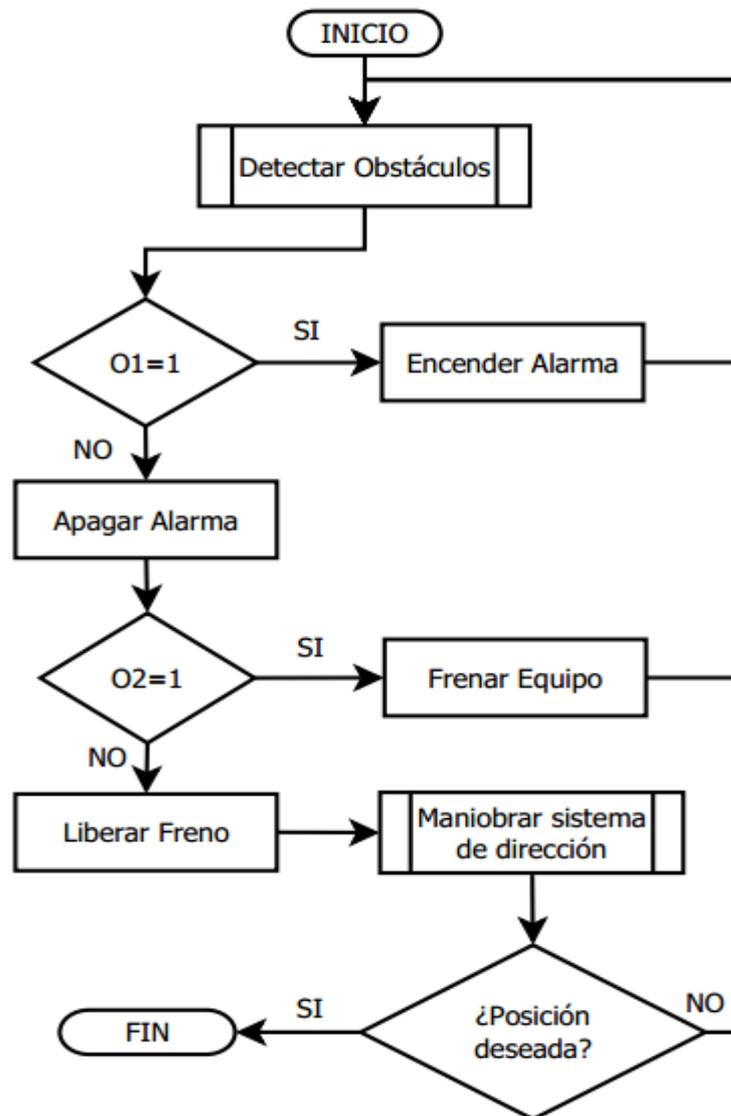
Esta rutina de inicialización configura los pines de entrada y salida del microcontrolador de inicialización y de comunicación, así como de configurar las válvulas de perforación en posición neutral y desactivar los cilindros que comandan el movimiento vertical del brazo perforador. Finalmente se encienden las luces y el equipo para que esté lista su teleoperación.



**Figura 2.38:** Rutina principal y rutina “Configurar entradas y salidas” (en orden)

### 2.7.2.3. Mover el equipo

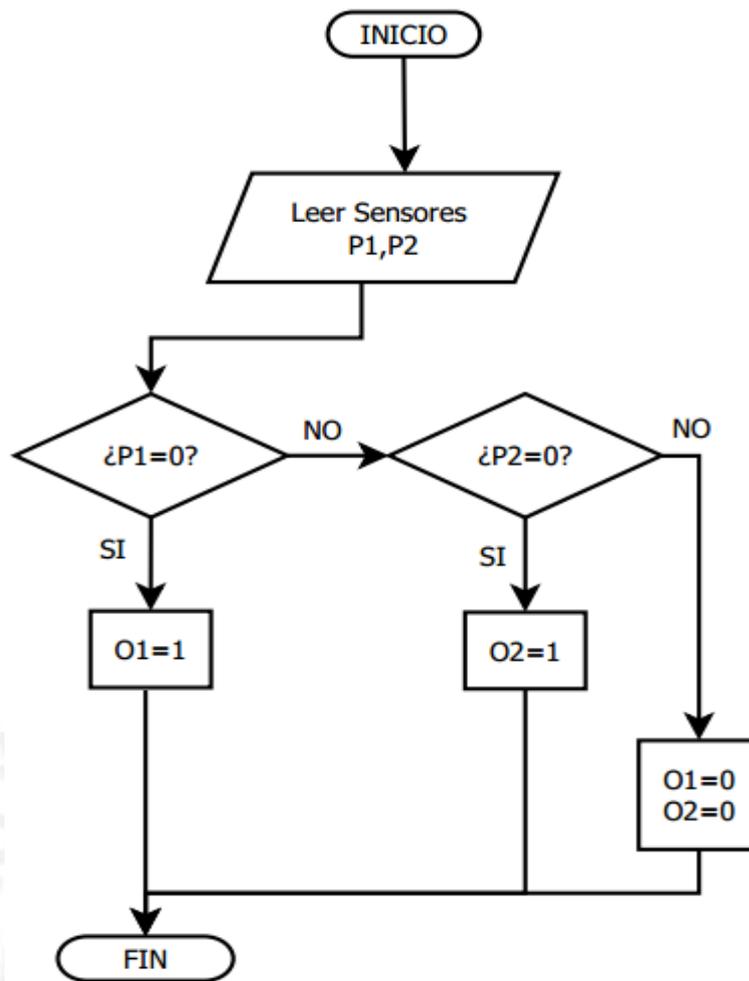
Esta rutina comanda el sistema de dirección junto al sistema anti-colisión para una navegación segura en el túnel. Se verifican dos banderas principales: O1 y O2, las cuales varían de acuerdo al grado de cercanía de posibles objetos alrededor de la maquinaria. Estas activan alarmas o detienen la marcha del equipo. Se maniobrará el sistema de dirección hasta que se haya alcanzado el lugar de operación, donde finalizará esta función. Esta función se presenta en la figura 2.39.



**Figura 2.39:** Rutina “Mover el equipo”

#### 2.7.2.4. Detectar obstáculos

Esta subrutina varía las banderas O1 y O2 señaladas anteriormente de acuerdo al estado de los escáneres láser. Estos activan o desactivan su salida digital auxiliar de acuerdo a la detección de interferencias. Cada sensor tiene una etiqueta P1 o P2, la cual se activará o no de acuerdo a la detección de los obstáculos. En la figura 2.40 se muestra esta subrutina.



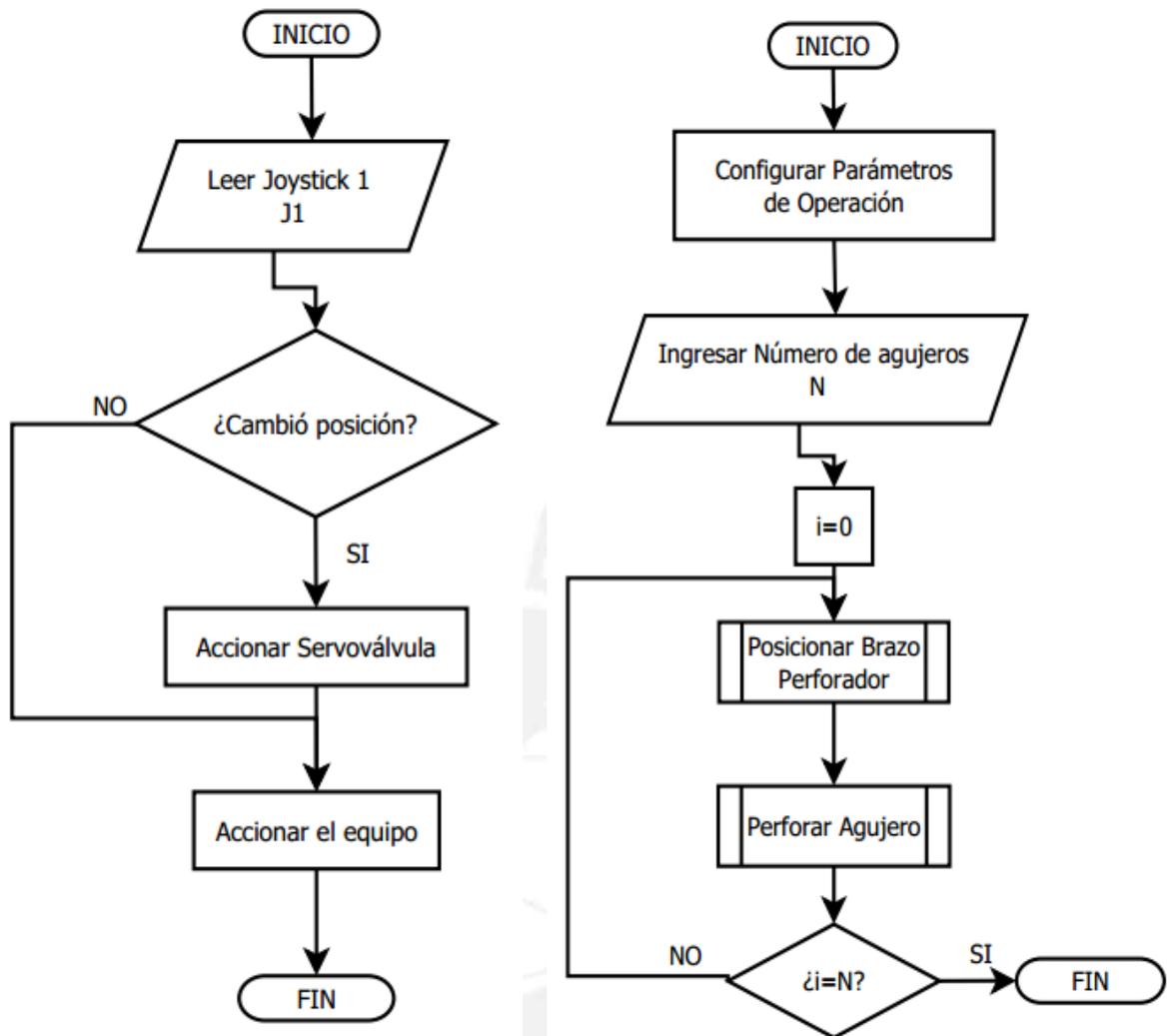
**Figura 2.40:** Subrutina “Detectar obstáculos”

#### 2.7.2.5. Maniobrar sistema de dirección

Esta subrutina está encargada de la lectura del Joystick 1, la cual accionará la servo válvula a cargo del control del sistema de dirección hidráulico del equipo. Luego, se accionará el equipo para que realice el cambio de dirección. Si no hay accionamiento de este joystick, entonces la válvula proporcional mantendrá su posición y seguirá la dirección anterior. Esta subrutina se especifica en la figura 2.41.

#### 2.7.2.6. Taladrar la superficie

Esta rutina en la figura siguiente está a cargo de la perforación de la superficie del túnel. Primero fija los parámetros de operación, como el área de operación y luego el centro de coordenadas, alcanzada por el Joystick 2. Después se ingresan los agujeros con la posición de perforación y se controla la posición del brazo perforador. Se perforan los agujeros y entra en bucle hasta que todas las tareas hayan terminado.



**Figura 2.41:** Subrutina “Maniobrar sistema de dirección” y rutina “Taladrar la superficie” (en orden)

#### 2.7.2.7. Posicionar brazo perforador

El movimiento vertical del brazo perforador está controlado por dos cilindros hidráulicos posteriores, a los cuales se les ha agregado un sensor lineal, por lo que podremos cotejar el error de posición. El movimiento se realizará hasta que este error se haga mínimo, donde se tendrá ya posicionado los actuadores para su operación. El flujo de operación de esta subrutina se encuentra en la figura 2.41.

2.7.2.8. Perforar Agujero

Esta subrutina controlará dos pasos: el emboquillado y el taladrado. Para el primero, posicionará las válvulas solenoides para que la operación se realice a potencia media. Luego de un tiempo determinado, activará el sistema de agua y comenzará el taladrado, hasta que se haya alcanzado la profundidad adecuada. Finalmente llevará las válvulas a su posición neutral para acabar con el proceso. La figura siguiente muestra el flujo de operaciones

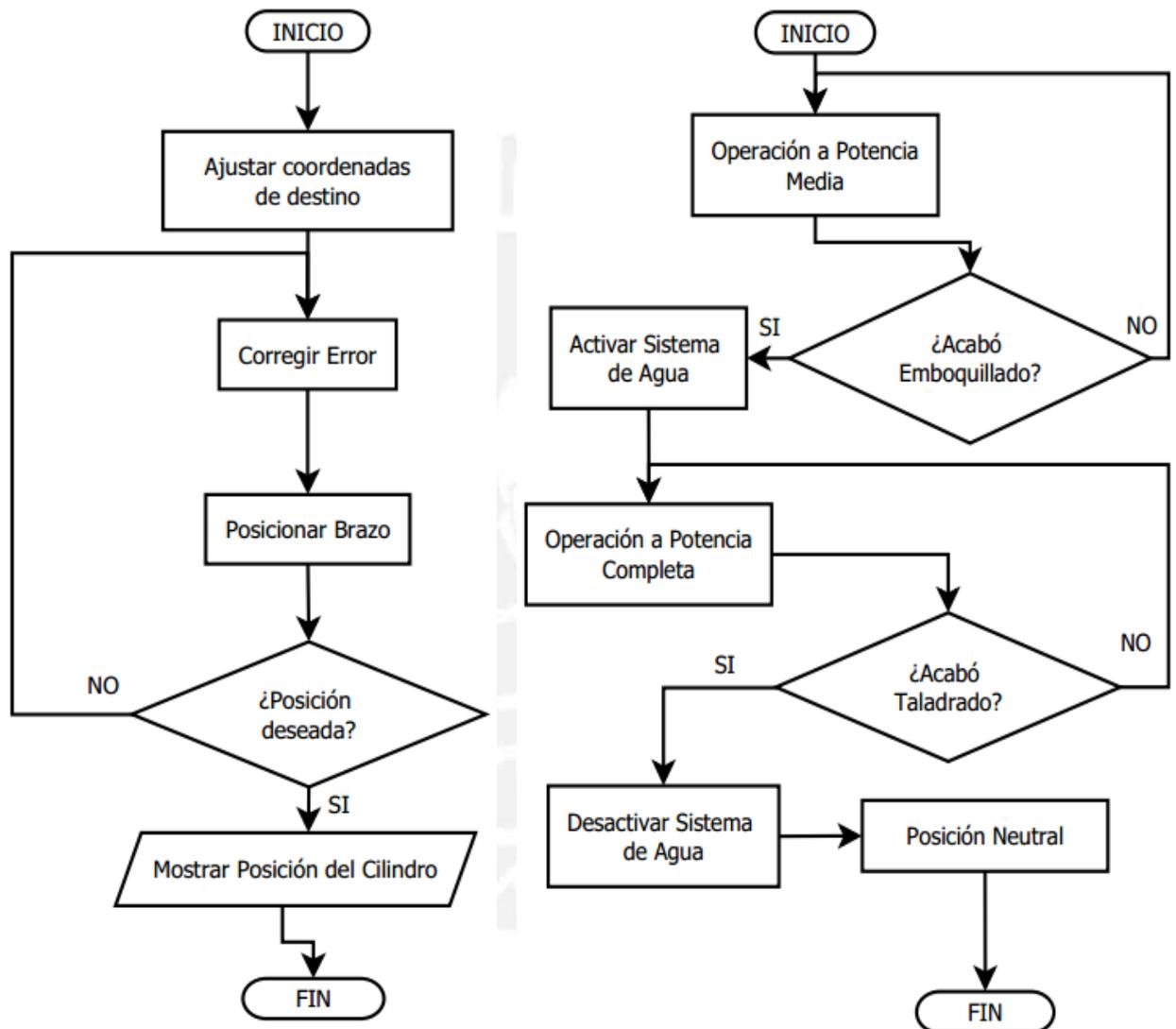
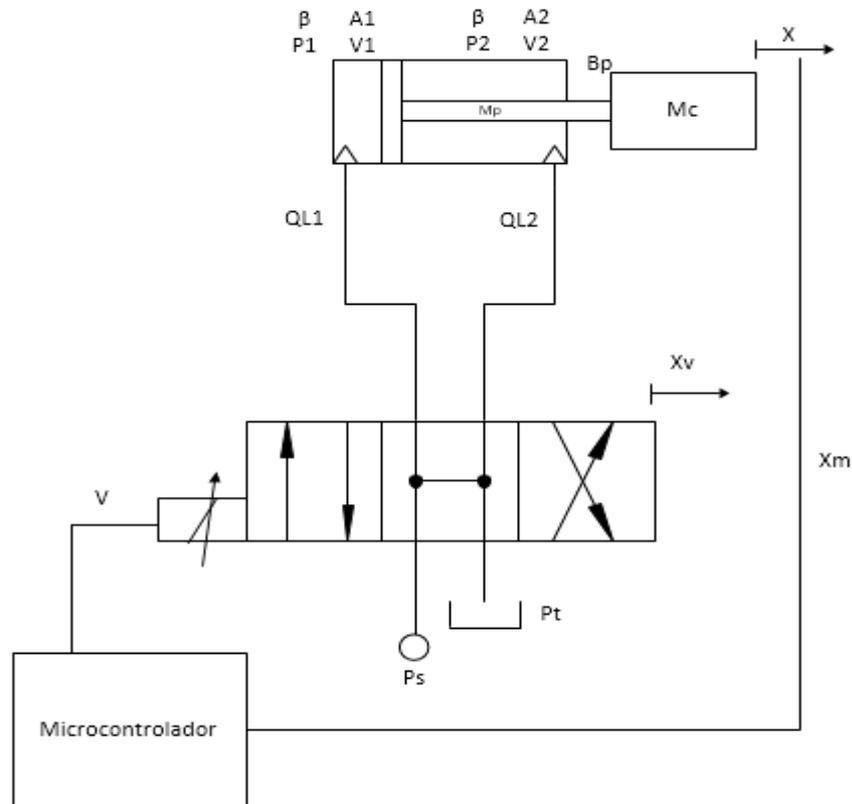


Figura 2.42: Subrutina “Posicionar brazo perforador” y subrutina “Perforar agujero” (en orden)

### 2.7.3. Arquitectura de control

En este apartado se analizará el movimiento de posición del brazo perforador, el cual está controlado por las 4 proporcionales contempladas en la solución. Además, se analizarán los modelos matemáticos de las válvulas y del cilindro hidráulico para controlar su posición. Para el análisis cinemático del brazo perforador, se mostrará un esquema a continuación, donde se podrán observar los distintos parámetros que posee.



**Figura 2.43:** Sistema oleohidráulico proporcional con realimentación de posición

Los cálculos y operaciones para llegar a las siguientes ecuaciones se encontrarán en el Anexo H. Las ecuaciones del sistema son las siguientes:

$$\dot{x} = A * x + B * u + C \quad (1.1)$$

$$y = D * x \quad (1.2)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B_p}{(M_c + M_t)} & 0 & \frac{A_1}{(M_c + M_t)} & -\frac{A_2}{(M_c + M_t)} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\beta * A_1}{V_1} & \frac{\beta * K_{q1}}{V_1} & -\frac{\beta * K_{c1}}{V_1} & 0 \\ 0 & \frac{\beta * A_2}{V_2} & -\frac{\beta * K_{q2}}{V_2} & 0 & -\frac{\beta * K_{c2}}{V_2} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{sp}}{\tau} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ FL \\ (M_c + M_t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$D = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (1.6)$$

Finalmente, el diagrama de control quedará de la siguiente manera:

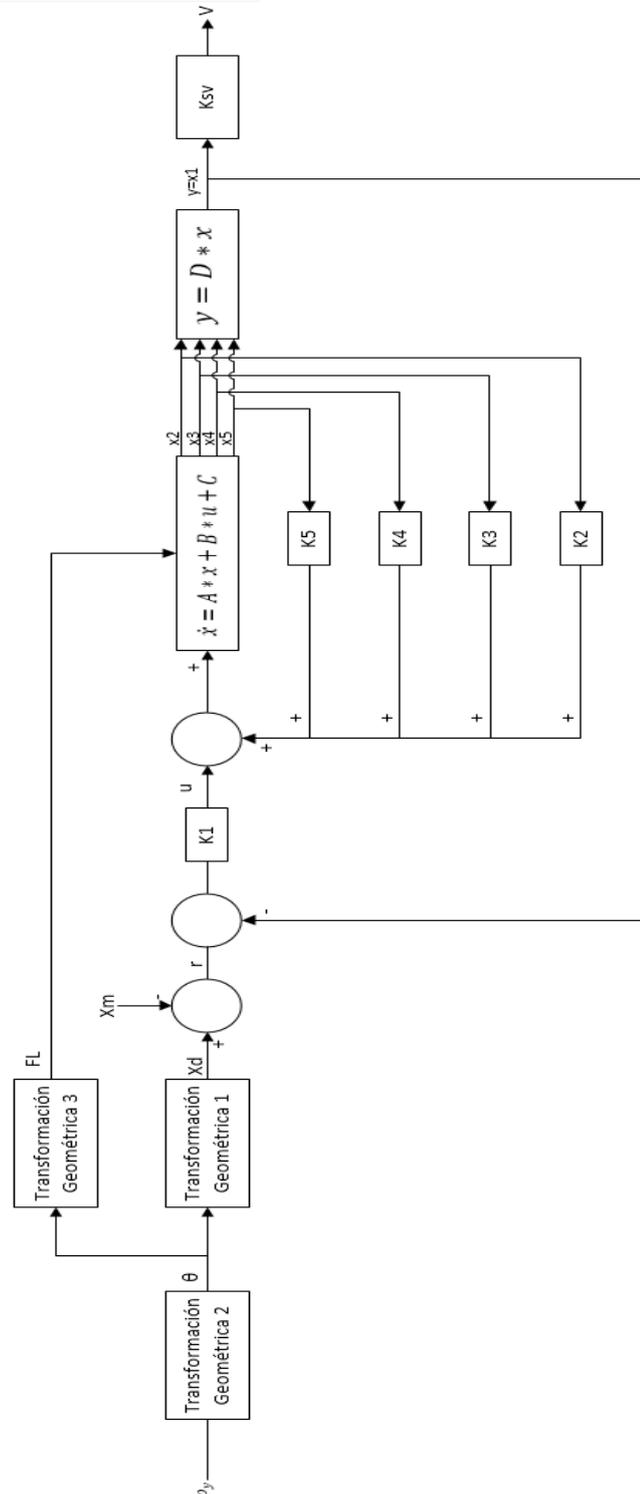


Figura 2.44: Diagrama de bloques del control del brazo perforador

#### 2.7.4. Simulación del sistema electrónico

Para realizar la simulación del sistema en espacios-estado, se utilizó el software Matlab y las dimensiones del brazo perforador BUT 28 de Atlas Copco, el cual es componente de la perforadora hidráulica Boomer 282. Se calcularon las ganancias del sistema en lazo cerrado por el método de ubicación de polos. El sistema deberá alcanzar un máximo sobre impulso menor al 20% y un tiempo de establecimiento menor a los 12 segundos. Los parámetros del sistema fueron obtenidos de trabajos de investigación anteriores, donde se ensayaron el sistema hidráulico y eléctrico [31][32]. Se introdujo una entrada escalón que iba variando a 1s, a 3s y a 6s, además de un retardo a la salida de 0.5s. El código de la simulación se encuentra en el anexo I. La gráfica de la salida con la entrada se mostrará a continuación.

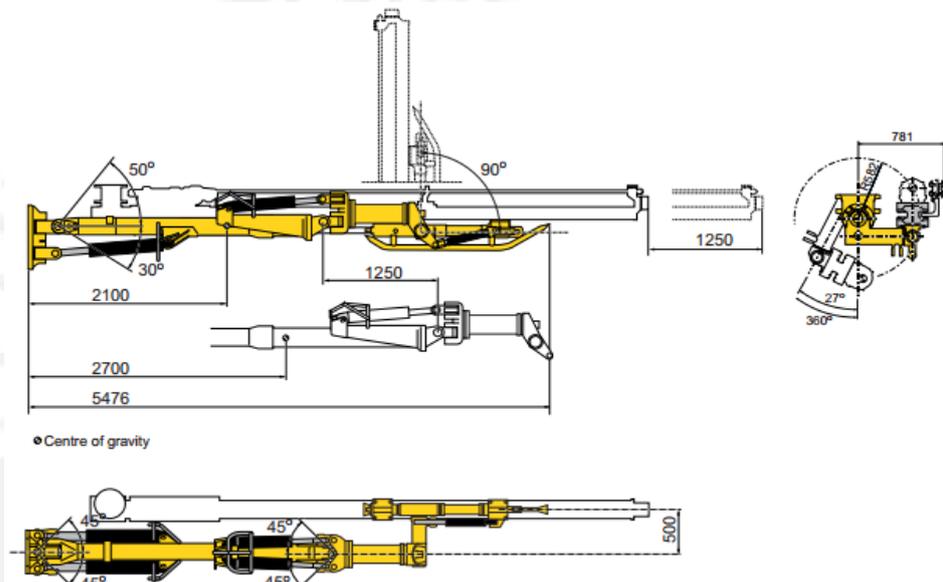


Figura 2.46: Dimensiones del brazo perforador BUT 28 de Atlas Copco [21].

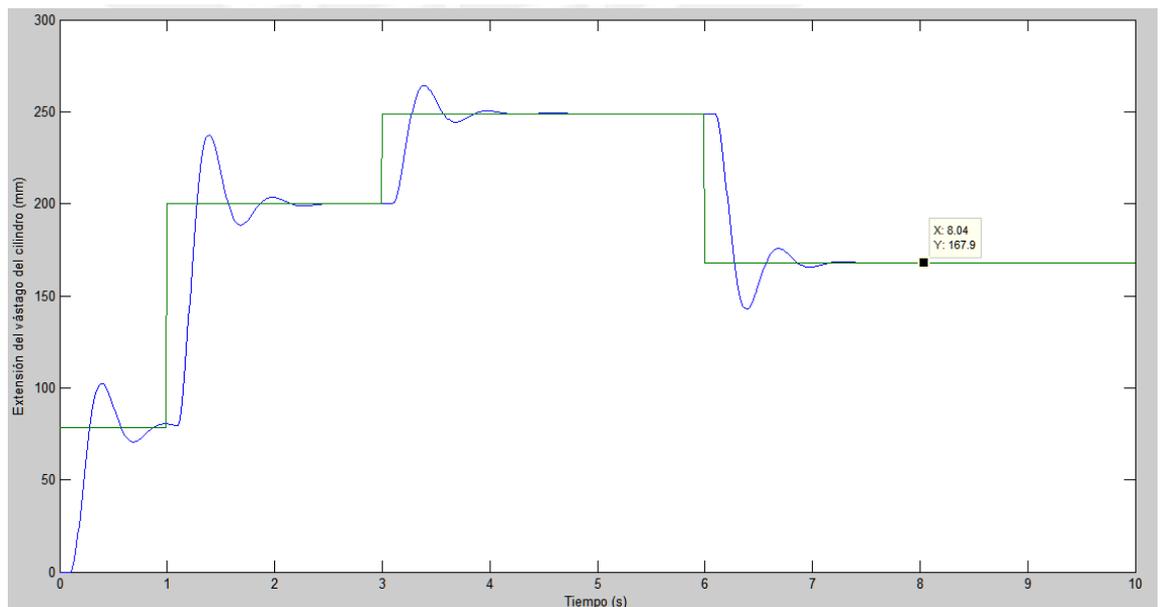
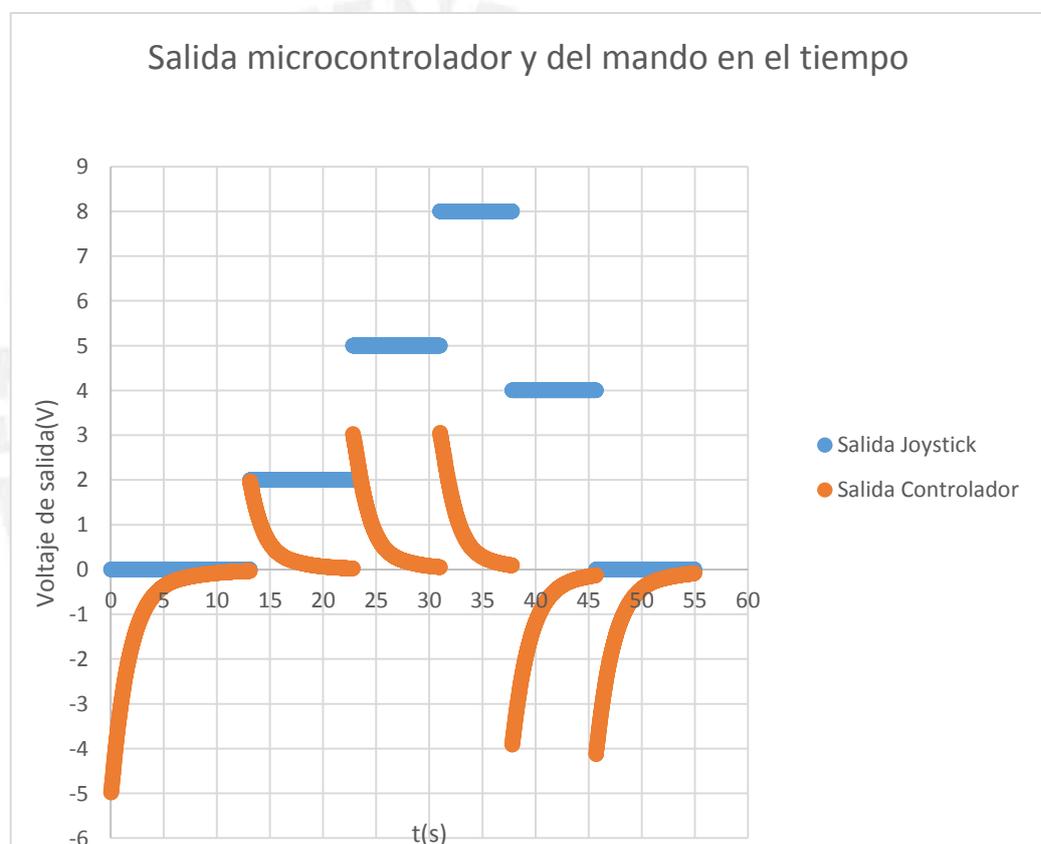


Figura 2.45: Variación de la extensión del cilindro con la entrada en el tiempo

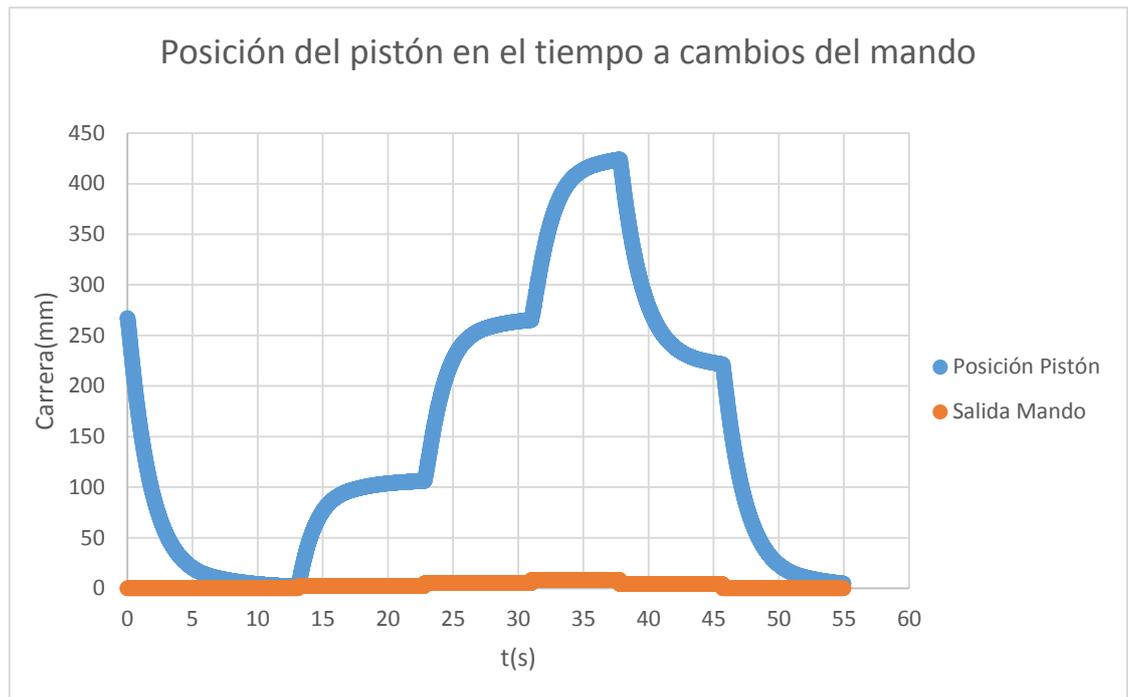
### 2.7.5. Simulación del sistema hidráulico

La simulación se realizó en un lapso de 60s en el programa Automation Studio para un pistón de dimensiones 125/85/536 frente a una carga de 1000Kg. El caudal máximo generado por la bomba fue de 120 l/min y la presión máxima generada fue de 150 bar. La figura 2.47 muestra los componentes que componen el circuito hidráulico simulado.

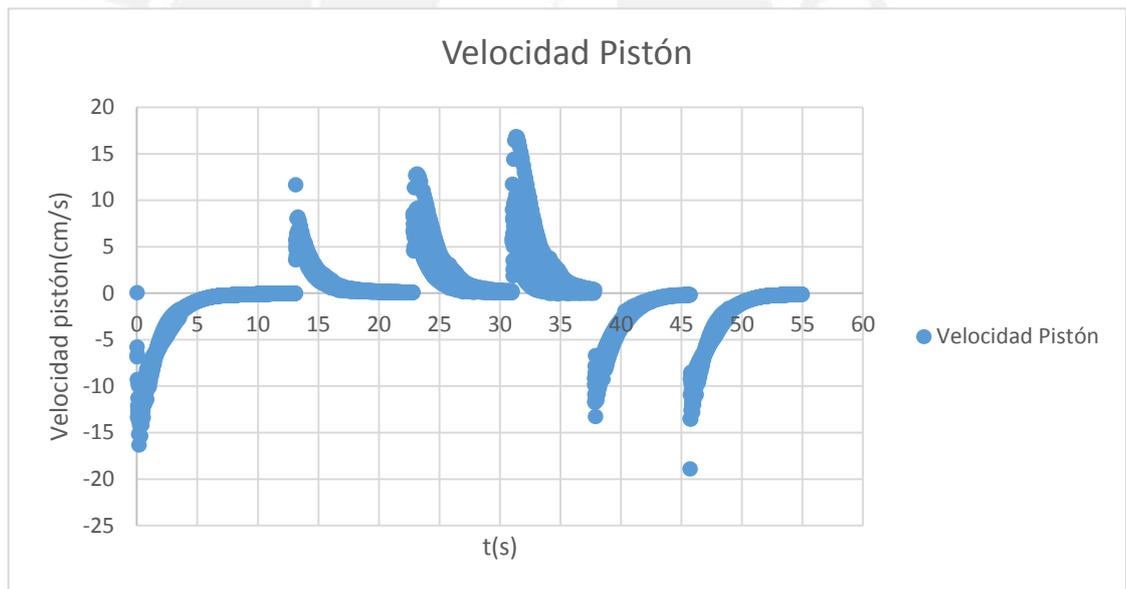
Los parámetros observados fueron los siguientes: Entrada y salida del microcontrolador, posición y velocidad del vástago del pistón hidráulico. Se usó la estrategia de control diseñada y se obtuvieron las siguientes tendencias, graficadas en las figuras 2.47, 2.48 y 2.49:



**Figura 2.47:** Comparación de la entrada al microcontrolador y su salida



**Figura 2.49:** Posicionamiento del pistón en el tiempo con cambios en la salida del microcontrolador.



**Figura 2.48:** Variación de la velocidad del pistón en función del tiempo.

De estos gráficos se obtuvo que el tiempo de establecimiento es de 4s con carga y con sobre impulso del 20%. La velocidad del pistón promedio para el recorrido de toda su carrera fue de aproximadamente 120 mm/s, lo cual se reproduce en 4.5s para lograr toda la extensión del brazo. Comparando con los aproximadamente 12s en que demora un operario para posicionar un brazo perforador, podemos concluir que el sistema autónomo es 2.5 veces más rápido que el manual.

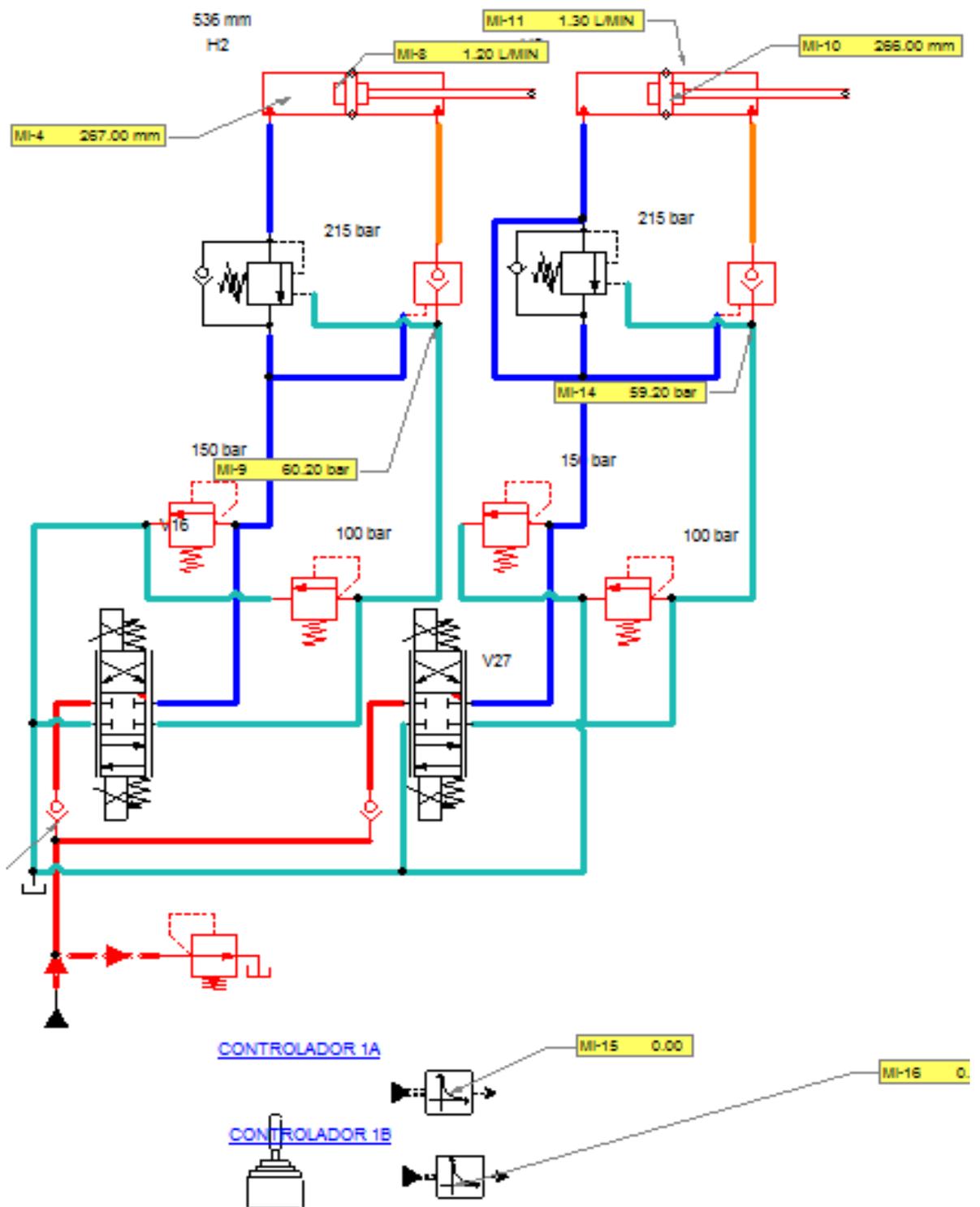


Figura 2.52: Simulación hidráulica con la válvula proporcional 4/3.

### 3. COSTOS

En este presente subcapítulo se presentarán los costos de los componentes necesarios para la implementación del producto. Los componentes electrónicos serán importados con un costo de envío del 60% adicional al precio de venta, lo cual se dividen en gastos administrativos y de aduanas; en cambio, los componentes hidráulicos serán cotizados de manera local. Todas las cifras están en dólares americanos (\$). Las cotizaciones de los productos que no se encontraron sus precios en las páginas de los proveedores se adjuntan en el anexo K.

#### 3.1. Costo de los componentes electrónicos

**Tabla 3.1:** Costo de los componentes electrónicos

Componente	Proveedor	P. Unit.(\$)	Cant.	P. Total(\$)
Arduino Mega 2560	Sparkfun	\$ 45.95	2	\$ 91.90
Arduino Ethernet shield	Sparkfun	\$ 12.90	2	\$ 25.80
Regulador de voltaje LM2576-5	Digikey	\$ 2.68	1	\$ 2.68
Transistor IRF530IR	Digikey	\$ 0.95	14	\$ 13.30
Amplificador LM358	Digikey	\$ 0.47	5	\$ 2.35
ExCam IPM3014	Samcom	\$ 1,838.40	4	\$ 7,353.60
Soporte de pared WMB-S-AL	Samcom	\$ 128.00	4	\$ 512.00
Terminal de cables digitales IPM3014	Samcom	\$ 89.00	1	\$ 89.00
Filtro Pasa Banda BPF24-801A	Hyperlink	\$ 146.95	2	\$ 293.90
Cubierta para PCB EEC-5X650B	Deutsch	\$ 46.15	1	\$ 46.15
Conector Deutsch DT13-48PABCD-R015	Deutsch	\$ 40.32	2	\$ 80.64
Joystick Analógico PVRE 162F1310	Danfoss	\$ 418.97	2	\$ 837.94
Conector Deutsch 155U2600 p. Joystick	Danfoss	\$ 35.64	2	\$ 71.28
Sensor MXRS 500M N1E B 3 V12	Temposonics	\$ 426.90	2	\$ 853.80
Módulo Wireless 945U-E	Eaton	\$ 199.00	2	\$ 398.00
Puertos Ethernet Gigabit DES-108	Digikey	\$ 37.91	1	\$ 37.91
Escáner láser OS32C-BP-DM-4M	RS Components	\$ 3,179.00	2	\$ 6,358.00
Cable OS32C-CBL-03M	RS Components	\$ 73.70	2	\$ 147.40
Cable Ethernet OS32C-ECBL-02M	RS Components	\$ 154.77	2	\$ 309.54
Soporte de montaje OS32C-BKT1	RS Components	\$ 71.38	2	\$ 142.76
SUBTOTAL(COTIZACIÓN AL 01/09/2016)				\$ 17,667.95
COSTOS ARANCELARIOS Y DE ENVÍO(60% DEL SUBTOTAL)				\$ 10,600.77
COSTO TOTAL				\$ 28,268.72

### 3.2. Costo de los componentes electrohidráulicos

Estos componentes hidráulicos serán conseguidos del mercado local.

**Tabla 3.2:** Costo de los componentes electrohidráulicos

Componente	Proveedor	P. Unit.(%)	Cant.	P. Total(\$)
Tapa de entrada PVP-32 Centro Cerrado	Danfoss/HDI	\$ 378.78	11	\$ 4,166.62
Cuerpo con válvula check PVB-32	Danfoss/HDI	\$ 286.50	11	\$ 3,151.53
Válvula anticavitación 100bar PVG-32	Danfoss/HDI	\$ 43.46	1	\$ 43.46
Válvula anticavitación 175bar PVG-33	Danfoss/HDI	\$ 35.88	1	\$ 35.88
Válvula anticavitación 190bar PVG-34	Danfoss/HDI	\$ 45.49	4	\$ 181.97
Válvula anticavitación 80bar PVG-35	Danfoss/HDI	\$ 43.46	7	\$ 304.19
Válvula anticavitación 150bar PVG-36	Danfoss/HDI	\$ 43.46	9	\$ 391.10
Spool Cilindro 100LPM para PVG-32	Danfoss/HDI	\$ 58.37	11	\$ 642.10
Tapa final BSPP PVS-32	Danfoss/HDI	\$ 114.36	11	\$ 1,257.98
Kit de armado 3 cuerpos PVA-32	Danfoss/HDI	\$ 46.30	1	\$ 46.30
Kit de armado 8 cuerpos PVA-32	Danfoss/HDI	\$ 99.67	1	\$ 99.67
Actuador ON/OFF 24V PVEO-32	Danfoss/HDI	\$ 301.69	7	\$ 2,111.80
Actuador proporcional 24V PVEM-32	Danfoss/HDI	\$ 606.41	4	\$ 2,425.64
Costo de armado y pruebas	Danfoss/HDI	\$ 465.50	1	\$ 465.50
SUBTOTAL(COTIZACIÓN AL 01/09/2016)				\$ 15,323.74
IGV(18%)				\$ 2,758.27
COSTO TOTAL				\$ 18,082.01

El costo por el diseño y mano de obra no se tomó en cuenta para este trabajo, por lo que el costo total resulta de sumar los costos de los componentes eléctricos y los componentes electrohidráulicos, lo cual asciende a  $\$28,268.72 + \$18,082.01 = \$46,350.73$ .

## CONCLUSIONES

Luego de haber culminado el desarrollo del presente trabajo, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se llegó a diseñar un control teleoperado en un jumbo hidráulico con controles manuales, utilizado 11 válvulas electrohidráulicas, 4 cámaras y 2 escáneres láser. Se logró diseñar los diagramas hidráulicos y electrónicos para el acoplamiento de este sistema propuesto con el jumbo hidráulico.
- Se logró diseñar y simular el control autónomo de un grado de libertad del brazo perforador con 2 sensores lineales y un microcontrolador. Esto ayuda en parte a que la labor minera sea realizada sin que el operador esté necesariamente dentro del vehículo, brindando seguridad y a la vez exactitud en el proceso, por el uso de un sistema de control con lazo cerrado. Esto cumple el objetivo general del proyecto.
- El control del brazo perforador en un grado de libertad brindará mayor exactitud en el posicionamiento del brazo perforador en su implementación, lo cual se mejorará el proceso total. La simulación del sistema arroja un tiempo de establecimiento de 4s, a comparación de los 15 segundos que demora un operador manual en posicionar el brazo, por lo que el perforado podrá ser más rápido y con mayor exactitud.
- La comunicación inalámbrica propuesta puede ser implementada en labores subterráneas diferentes a la de perforación, como el acarreo de minerales. El ruido en la perforación y la voladura de rocas es el más grande a comparación de los otros procesos, por lo que los filtros pasabanda y la frecuencia de transmisión de datos a 2400MHz funcionarían sin problemas en otras aplicaciones.
- La seguridad en la traslación del equipo fue mejorada, ya que los escáneres láser funcionan como un sistema anti colisión, detectando posibles obstáculos y alertando al operador.

## RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

Las recomendaciones y observaciones que se presentaron durante y después de la elaboración de este trabajo fueron las siguientes:

- Las válvulas proporcionales propuestas en el concepto de solución necesitan de un grado de limpieza de aceite (al menos 18/16/13 según Caterpillar), por lo que si se quisiera cambiar los mandos manuales se necesitarán colocar filtros de mayor finura en las líneas hidráulicas de presión y a tanque. Esto alargará la vida a los elementos de dirección y al sistema hidráulico en general.
- El control del motor diésel no fue contemplado en el trabajo, ya que esto varía en cada maquinaria minera. Para un completo control teleoperado se necesita de estudiar este tema. Si el equipo está equipado con un motor con control de la velocidad de rotación, entonces se podrá controlar el desplazamiento de la totalidad del equipo. En cambio, si no se cuenta, se deberá contemplar la implementación de sensores para completar el control.
- El trabajo puede ser complementado con el análisis cinemático inverso del movimiento del brazo perforador en sus 6 grados de libertad. La exactitud en el control del movimiento podría mejorar con la implementación de controladores difusos y neuronales. Esto agregaría robustez y predictibilidad en el diseño planteado en este trabajo.
- El posicionamiento por GPS de los equipos mineros está siendo aplicados intensivamente en los últimos años por las concesiones mineras, con el fin de analizar el rendimiento del equipo y programar mantenimientos según su horómetro. Para complementar este trabajo, se pueden monitorear condiciones de la maquinaria y transmitir remotamente a través de la red inalámbrica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] GOKHALE, B.  
2011 Rotary drilling y blasting in large surface mines. Boca Raton: CRC Press.
- [2] FINK B. y otros  
1996 Concepts of an advanced Cartesian Control system for a redundant twin boom drill rig. Japan: Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium Automation Robotics Construction, pp. 103–112, Tokyo, Japan.
- [3] LUNA, H.  
2011 *Minería Subterránea y Superficial y Beneficio de Minerales en el Perú* [diapositiva]. Consulta: 20 de setiembre del 2016.
- [4] ATLAS COPCO  
1979 “Compressed air”. *Atlas Copco manual*. Stockholm, Madrid: Atlas Copco S.A.E., pp. 321-356.
- [5] ALI, S.  
2009 *Treasures of the earth: Need, Greed and a Sustainable Future*” [diapositiva]. Consulta: 24 de setiembre del 2016.
- [6] MUÑOZ DEL PINO, E.  
2002 *Riesgos en la Minería Subterránea*. Primera edición. Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, pp.49-58. Consulta: 5 de abril del 2016.  
[http://intrawww.ing.puc.cl/siding/public/ingcursos/cursos\\_pub/descarga.phtml?id\\_curso\\_ic=1781&id\\_archivo=69286](http://intrawww.ing.puc.cl/siding/public/ingcursos/cursos_pub/descarga.phtml?id_curso_ic=1781&id_archivo=69286)
- [7] LÓPEZ, Carlos y Emilio LÓPEZ  
2003 “Sistemas de perforación en minería”. *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: Carlos López Jimeno, pp. 85-99.
- [8] ATLAS COPCO  
*Perforadora de banqueo*. Consulta: 22 de marzo del 2016.  
[http://www.atlascopco.com/microsites/Images/SmartROC\\_T40\\_Tech\\_Spec\\_tcm1395-3565813.pdf](http://www.atlascopco.com/microsites/Images/SmartROC_T40_Tech_Spec_tcm1395-3565813.pdf)
- [9] ATLAS COPCO  
*Perforadora de avance*. Consulta: 22 de marzo del 2016.  
[http://www.atlascopco.com.pe/Images/Boomer\\_282.jpg\\_ac0038284\\_456.jpg](http://www.atlascopco.com.pe/Images/Boomer_282.jpg_ac0038284_456.jpg)

- [10] HERRENKNECHT  
*Método Raise Boring*. Consulta: 22 de marzo del 2016.  
<http://www.tunneltalk.com/images/Herrenknecht/3-Nant-de-Drance-Switzerly-ART.jpg>
- [11] BERNAOLA, Alonso, Juan CASTILLA y Herberth HERRERA  
2013 *Perforación y Voladura de Rocas en Minería*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, pp.1-47.
- [12] WHITE, C.  
1969 *A Rock Drillability Index*. Segunda edición. Quarterly of the Colorado School of Mines, v.61, No.2.
- [13] HARTMAN, Howard  
1992 *SME mining engineering handbook*. Segunda edición. Littleton, Colo.: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- [14] ATLAS COPCO  
2005 *Atlas Copco BOOMER 282: Spare Parts Catalogue*. Sweden: Atlas Copco Rock Drills AB, pp.5-527. Consulta: 11 de mayo del 2016.  
<http://www.atlascopco.com>
- [15] UNI  
*Partes principales de un jumbo hidráulico*. Consulta: 3 de abril del 2016.  
<http://es.slideshare.net/tebanpr/el-jumbo-hidraulico>
- [16] SANDVIK  
*Sandvik DD422i*. Consulta: 5 de abril del 2016.  
<http://mining.sandvik.com/en/products/equipment/underground-drilling-and-bolting/mining-jumbos/dd422i>
- [17] LACH, A.  
*Sandvik AutoMine Surface Drilling Station*. Consulta: 5 de abril del 2016.  
<http://minestories.com/total-control/>
- [18] ATLAS COPCO  
*Boomer XE4 C*. Consulta: 5 de abril del 2016.  
<http://www.atlascopco.cl/cles/products/equipos-de-perforaci%C3%B3n-y-martillos/1401284/1520768/>

- [19] ATLAS COPCO  
*RCS Interface*. Consulta: 5 de abril del 2016.  
<http://miningandconstruction.com/news/new-rig-control-system-offers-unique-operator-interface-2573/>
- [20] WANG, Y. y otros  
2014 *The Automatic Drilling System of 6R-2P Mining Drill Jumbos*. Primera edición. China: Mining Technologies International Inc., pp.1-9. Consulta: 5 de abril del 2016.  
<http://ade.sagepub.com/content/7/2/504861.abstract>
- [21] ATLAS COPCO  
2004 *Atlas Copco Rocket Boomer 282: Diagrams and drawings*. Sweden: Atlas Copco Rock Drills AB, pp.5-27. Consulta: 11 de mayo del 2016.
- [22] DANFOSS  
2016 *PVG 32 Load Independent Proportional Valve: Technical Information Manual*. United States of America: Danfoss Power Solutions, pp.5-75. Consulta: 14 de junio del 2016.  
<http://files.danfoss.com/documents/52010344.pdf>
- [23] MURPHY, J. y H. PARKINSON  
1978 *Underground Mine Communications*. United States of America: IEEE, pp.4-10. Consulta: 115 de junio del 2016.  
[http://www.wvminesafety.org/PDFs/Additional%20Information%20Table/Underground\\_Mine\\_Com\\_1.pdf](http://www.wvminesafety.org/PDFs/Additional%20Information%20Table/Underground_Mine_Com_1.pdf)
- [24] HELLERMANN TYTON  
*2.4 GHz Ultra High Q 8-Pole Outdoor Bandpass Filter*. Consulta: 01 de septiembre del 2016.  
<http://www.l-com.com/>
- [25] OMRON  
2010 *Safety Laser Scanner OS32C Series*. Primera edición. Japón: Omron, pp.57-101. Consulta: 1 de mayo del 2016.  
[http://industrial.omron.com.br/uploads/arquivos/OS32C\\_RevB\\_man\\_eng.pdf](http://industrial.omron.com.br/uploads/arquivos/OS32C_RevB_man_eng.pdf)
- [26] TYCO ELECTRONICS  
2014 *M8/M12 connector system*. Australia: Tyco Electronics Corporation, p.27. Consulta: 19 de mayo del 2016.

[http://www.te.com/content/dam/te-com/documents/industrial-automation-and-control/global/1-1773701-8\\_M8M12\\_CONNECTOR\\_SYSTEM\\_CATALOG.pdf](http://www.te.com/content/dam/te-com/documents/industrial-automation-and-control/global/1-1773701-8_M8M12_CONNECTOR_SYSTEM_CATALOG.pdf)

[27] TEMPOSONICS

2014 *Model MXR Analog Output Data Sheet*. United States of America: MTS Systems Corporation, pp.1-7. Consulta: 18 de mayo del 2016.

[http://www.mtssensors.com/fileadmin/media/pdfs/Products/Mobile-Hydraulics/551601A\\_Model\\_MXR\\_DataSheet\\_FINAL.pdf](http://www.mtssensors.com/fileadmin/media/pdfs/Products/Mobile-Hydraulics/551601A_Model_MXR_DataSheet_FINAL.pdf)

[28] DANFOSS

2016 *Joystick Base JS6000*. United States of America: Danfoss Power Solutions, pp.1-2. Consulta: 18 de mayo del 2016.

<http://files.danfoss.com/documents/JS6000%20Joystick%20Base%20Technical%20Information%20Manual/520L0760.pdf>

[29] ROBOTSHOP

2016 *Arduino Mega 2560 Datasheet*. United States of America: RobotShop, pp.1-5. Consulta: 31 de mayo del 2016.

<http://www.robotshop.com/media/files/PDF/ArduinoMega2560Datasheet.pdf>

[30] FARNELL

*DTM Series Enclosure and Header Dimensions*. Consulta: 29 de agosto del 2016.

[http://www.farnell.com/datasheets/1640961.pdf?\\_ga=1.7880178.1938287829.1472494949](http://www.farnell.com/datasheets/1640961.pdf?_ga=1.7880178.1938287829.1472494949)

[31] AYMAN A. y otros

2012 *Intelligent PI Fuzzy Control of an Electro-Hydraulic Manipulator*. I.J. Intelligent Systems and Applications, pp. 43-49.

[32] RAHMAT M. y otros

2010 *Self-Tuning Position Tracking Control of an Electro-Hydraulic Servo System in the Presence of Internal Leakage and Friction*. International Review of Automatic Control, pp. 673-683.

[33] MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD

2016 *Clasificación de las rocas*. España. Consulta: 23 de mayo del 2016.

[http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA\\_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS\\_CC.pdf](http://www.ciudadciencia.es/doc/files/FICHA_CLASIFICACION%20DE%20ROCAS_CC.pdf)

[34] BIOGEO

*Conglomerado*. Consulta: 26 de marzo del 2016.

[http://biogeo.260mb.net/BG2ESO/2eso\\_htm\\_files/10248.jpg](http://biogeo.260mb.net/BG2ESO/2eso_htm_files/10248.jpg)

[35] JARDINERÍA DENIA

*Grava*. Consulta: 26 de marzo del 2016.

[http://jardineriadenia.com/wp-content/uploads/2013/09/Paulino\\_0273-350x350.jpg](http://jardineriadenia.com/wp-content/uploads/2013/09/Paulino_0273-350x350.jpg)

[36] IES VALLE DEL JILOCA

*Terreno Arcilloso*. Consulta: 26 de marzo del 2016.

<http://arablogs.catedu.es/arablogs/repositorio/447/paredarcilla2.jpg>

[37] LOS TIPOS

*Limos*. Consulta: 26 de marzo del 2016.

<http://lostipos.com/fotos/2015/rocas/Limos%20y%20Arcillas.jpg>

[38] MEDINA, G.

*Granito*. Consulta: 27 de marzo del 2016.

<http://blog.educastur.es/ciclo2/files/2008/02/granito.jpg>

[39] EJEMPLOS

*Gabro*. Consulta: 27 de marzo del 2016.

<http://www.ejemplos.co/wp-content/uploads/2015/10/Gabro-roca.jpg>

[40] EDUCAREX

*Basalto*. Consulta: 27 de marzo del 2016.

[http://contenidos.educarex.es/sama/2006/minerales/imagenes/imag\\_ud2/basalto.jpg](http://contenidos.educarex.es/sama/2006/minerales/imagenes/imag_ud2/basalto.jpg)

[41] MINERALES DE COLECCIÓN S.L.,

*Obsidiana*. Consulta: 27 de marzo del 2016.

<http://www.mineral-s.com/tienda/images/obsidiana6-1019987.jpg>

[42] I.E. ALONSO QUIJANO,

*Pizarra*. Consulta: 27 de marzo del 2016.

<http://www.educa.madrid.org/web/ies.alonsoquijano.alcala/carpeta5/carpetas/quienes/departamentos/ccnn/CCNN-1-2-ESO/2eso/2ESO-12-13/Bloque-II/Tema-2-Energia-interna-Tierra-II/imagenes/031-pizarra-metamorfica.jpg>

[43] USAL

*Esquisito Micáceo*. Consulta: 27 de marzo del 2016.

<http://politecnicavila.usal.es/webrocas/rmt3b.JPG>

[44] ISOMAR

*Mármol*. Consulta: 27 de marzo del 2016.

<http://www.marmolesygranitos.es/images/marmol.jpg>

[45] DEL RAMO JIMÉNEZ, A.

*Cuarcita alpujárride de la sierra de Carrasco*. Consulta: 27 de marzo del 2016.

[http://www.regmurcia.com/servlet/integra.servlets.Imagenes?METHOD=VERIMAGEN\\_102241&nombre=A\\_res\\_300.jpg](http://www.regmurcia.com/servlet/integra.servlets.Imagenes?METHOD=VERIMAGEN_102241&nombre=A_res_300.jpg)

[46] HARTMAN, H.

1959 *Basic studies of percussion drilling*. Trans. AIME, pp.68-75.

[47] BROWN, E.

1981 *Rock characterization, testing & monitoring*. Oxford: Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics by Pergamon Press.

[48] TWI

*Vickers hardness test*. Consulta: 28 de marzo del 2016.

[http://www.twi-global.com/\\_resources/assets/inline/full/0/9770.gif](http://www.twi-global.com/_resources/assets/inline/full/0/9770.gif)

[49] KÄSLING, H. y K. THURO

2016 *Determining rock abrasivity in the laboratory*. Germany: Technische Universität München, pp.1-4. Consulta: 29 de marzo del 2016

[http://www.geo.tum.de/people/thuro/pubs/2010\\_eurock\\_abrasivity.pdf](http://www.geo.tum.de/people/thuro/pubs/2010_eurock_abrasivity.pdf)

[50] YEPES, Víctor

*Perforación por rotación*. Consulta: 22 de marzo del 2016.

<http://victoryepes.blogs.upv.es/2014/01/09/perforacion-rotativa-de-rocas>

[51] SOUTH MINING SUPPLY

*Tricono de acero*. Consulta: 22 de marzo del 2016.

<http://www.southminingsupply.cl/images/subcategorias/triconos2.jpg>

[52] HARTMAN, Howard

1992 *SME mining engineering handbook*. Segunda edición. Littleton, Colo.: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

[53] ATLAS COPCO

*Carro para martillo en fondo semihidráulico AirROC D45*. Consulta: 1 de abril del 2016.

[http://www.atlascopco.se/Images/AirROC\\_T35\\_D45\\_D50\\_leaflet\\_low\\_res\\_tcm836-3500547.pdf](http://www.atlascopco.se/Images/AirROC_T35_D45_D50_leaflet_low_res_tcm836-3500547.pdf) [Acceso 1 Abr. 2016].

[54] DUNPHY, T.

*Flanders Ardvarc*. Consulta: 5 de abril del 2016.

<http://www.aggman.com/files/2013/12/Flanders.jpg>

[55] HARD-LINE

*Teleop Tele-Remote Mining Systems*. Consulta: 5 de abril del 2016.

<http://hard-line.com/images/products/tele-remote-chair.png>

[56] HARD-LINE

*Remote Control Hauling Unit*. Consulta: 5 de abril del 2016.

<http://hard-line.com/documents/hardlinerrc-en.pdf>

[57] ROBOTS IN SEARCH

*LD Laser Scanner internal working mechanism*. Consulta: 12 de abril del 2016.

<http://www.robotsinsearch.com/products/blog/ld-laser-scanners-and-time-flight>

[58] 3D SYSTEMS

*Structured Light (White or Blue Light) 3D Scanners*. Consulta: 12 de abril del 2016.

<http://www.rapidform.com/3d-scanners/>

[59] SICK

*Tunnel Collision Warning System*. Consulta: 9 de abril del 2016.

[https://www.sick.com/media/dox/2/02/502/Product\\_information\\_MINESI\\_C100\\_TCW\\_Tunnel\\_Collision\\_Warning\\_System\\_en\\_IM0052502.PDF](https://www.sick.com/media/dox/2/02/502/Product_information_MINESI_C100_TCW_Tunnel_Collision_Warning_System_en_IM0052502.PDF)

[60] SICK

*Operating range Diagram*. Consulta: 9 de abril del 2016.

[https://www.sick.com/media/pdf/0/40/840/dataSheet\\_LMS151/10100\\_1047607\\_en.pdf](https://www.sick.com/media/pdf/0/40/840/dataSheet_LMS151/10100_1047607_en.pdf)

[61] RENISHAW

*Void Scanner 150*. Consulta: 9 de abril del 2016.

[https://www.renishaw.com/VS\\_BRO\\_L-5914-8001-01-A\\_MC.pdf](https://www.renishaw.com/VS_BRO_L-5914-8001-01-A_MC.pdf)

[62] ECURED

*Sensor Capacitivo*. Consulta: 12 de abril del 2016.

[http://www.ecured.cu/Sensor\\_capacitivo](http://www.ecured.cu/Sensor_capacitivo)

[63] SCHNEIDER ELECTRIC

*Sensor inductivo*. Consulta: 12 de abril del 2016.

[http://automaqperu.com/ver\\_producto.php?ip=315&ipp=239](http://automaqperu.com/ver_producto.php?ip=315&ipp=239)

[64] ELECTROTEC

*Sensor infrarrojo de un cuerpo*. Consulta: 12 de abril del 2016.

<http://electrotec.pe/tienda/sensor-infrarrojo-e18>

[65] BERNSTEIN

*Sensor de ultrasonido*. Consulta: 12 de abril del 2016.

<http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/sensor-distancia-por-ultrasonido-186612.html>

[66] INFINEON

*Sensor magnético 3D*. Consulta: 12 de abril del 2016.

<http://www.diarioelectronicohoy.com/sensor-magnetico-3d-de-bajo-consumo/>

[67] PBE

*Proximity Alert System*. Consulta: 10 de abril del 2016.

<http://pbegrp.com/proximity-alert-system>

[68] HARD-LINE

*Proximity Sensor*. Consulta: 5 de abril del 2016.

<http://hard-line.com/documents/proximity-detection-system-en.pdf>

[69] REXROTH

*Servoválvula hidráulica 4WS2EM*. Consulta: 12 de abril del 2016.

[http://www.boschrexroth.com/ics/content/internet/images/IH\\_4WS2EM10-XH\\_300x300\\_web.JPG](http://www.boschrexroth.com/ics/content/internet/images/IH_4WS2EM10-XH_300x300_web.JPG) [Acceso 12 Abr. 2016].

[70] TEMPOSONICS

*Sensor de posición lineal magneto restrictivo*. Consulta: 12 de abril del 2016.

[http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-mg/16777-2586203.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-mg/16777-2586203.jpg)

[71] BAUMER

*Magnetic Cylinder sensor*. Consulta: 12 de abril del 2016.

[http://www.baumer.com/typo3temp/pics/User\\_Knowledge\\_Magnetic\\_Sensors\\_Functionality\\_Cylinder\\_functional\\_principle\\_f8300ec455.jpg](http://www.baumer.com/typo3temp/pics/User_Knowledge_Magnetic_Sensors_Functionality_Cylinder_functional_principle_f8300ec455.jpg)

[72] VISHAY

2015 *POWER MOSFET IRF 530*. Germany: Vishay, pp.1-9. Consulta: 14 de junio del 2016.

<http://www.vishay.com/docs/91019/91019.pdf>

[73] HELLERMANN TYTON

*Definición y Tabla del Grado de Protección (IP), acorde a DIN EN IEC 60529*. Consulta: 11 de agosto del 2016.

[http://www.hellermanntyton.es/site/binaries/content/assets/downloads/es/el-catalogo-2011---2012/ht\\_es\\_chapter7.2.pdf](http://www.hellermanntyton.es/site/binaries/content/assets/downloads/es/el-catalogo-2011---2012/ht_es_chapter7.2.pdf)

