



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL - CONSTRUCCIÓN

**ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES DE
MÁQUINAS TUNELADORAS TIPO EPB POR MEDIO DE REDES
NEURONALES ARTIFICIALES**

TESIS

Que para optar por el grado de:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

SALVADOR ISRAEL LAGOS ORTIZ

TUTORES PRINCIPALES:

M.A. ADRIÁN LOMBARDO ABURTO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

DR. LEONARDO ALCÁNTARA NOLASCO
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

Ciudad Universitaria, CDMX enero 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO PRINCIPAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1. EVOLUCIÓN DE LA EXCAVACIÓN MECANIZADA DE TÚNELES	5
1.1. Orígenes y Desarrollos Históricos	5
1.2. Escudos de frente abierto	11
1.2.1. Escudo Manual de Frente Abierto.....	12
1.2.2. Escudo Semimecanizado de Frente Abierto.....	13
1.2.3. Escudo Mecanizado de Frente Abierto	14
1.3. Escudos de Frente Cerrado	18
2. TECNOLOGÍAS DE MÁQUINAS TUNELADORAS TBM	22
2.1. Métodos de Tuneleo de acuerdo con las condiciones Geológicas	22
2.1.1. Escudo de Presión de Tierra Balanceada EPB	22
2.1.1.1. Sistemas de Acondicionamiento	26
2.1.2. Escudo de Presión de Lodos SPB	30
2.1.2.1. Sistema de Circulación de Lodos.....	33
2.1.3. Escudo de Presión de Lodos y Aire Comprimido MIXSHIELD	34
2.1.4. Escudo de Frente Abierto con Zapatas de Apoyo (Gripper TBM)	39
2.1.5. Tuneladoras de Escudo Simple.....	42
2.1.6. Tuneladoras de Doble Escudo	44
2.1.7. Tuneladoras Multimodo.....	47
2.2. Criterios de Selección de Tuneladoras en Suelo y Roca	48
2.3. Equipamiento de Máquinas Tuneladoras	50
2.3.1. Rueda de Corte.....	50
2.3.2. Herramientas de corte	52
2.3.3. Equipamiento de rezaga.....	60
2.3.4. Cámaras para Intervenciones Hiperbáricas	62
2.3.5. Sistema de Replanteo y Guiado	66
2.3.6. Instrumentación Geotécnica	70

3. CONTROL DE PROCESOS Y MODOS DE OPERACIÓN ASOCIADOS	74
3.1. Control de Procesos	74
3.1.1. Gestión de Datos	77
3.1.2. Implementación del Control de Procesos	77
3.2. Control de Procesos en TBM-EPB.....	79
3.3. Principales Parámetros de Operación en Tuneladoras tipo EPB.....	79
3.4. Modos de operación de TBM-EPB de acuerdo con las condiciones geológicas del terreno 81	
3.5. Introducción a los parámetros geotécnicos del subsuelo referido a las características de un macizo rocoso	84
3.6. Clasificación geomecánica de macizos rocosos	86
4. INTELIGENCIA ARTIFICIAL	91
4.1. Principios de la Inteligencia Artificial	92
4.2. Enfoques de la Inteligencia Artificial	93
4.3. Técnicas Adaptativas	93
4.4. Redes Neuronales	96
4.4.1. Redes Neuronales Biológicas	96
4.4.1.1. Estructura Biológica.....	97
4.4.1.2. Funcionamiento Neuronal	97
4.4.2. Redes Neuronales Artificiales.....	98
4.4.2.1. Arquitectura de la Red Neuronal	102
4.4.2.2. Tipos de Redes Neuronales y su Aprendizaje.....	103
4.4.2.3. Proceso de Entrenamiento y Prueba.....	106
4.4.2.4. Algoritmo de Retropropagación (<i>backpropagation BP</i>).....	108
4.4.2.5. Generalización y Sobre-entrenamiento de la Red	110
4.4.2.6. Incertidumbre del Modelo Neuronal	112
4.5. Aplicación en la Ingeniería de Túneles.....	114
5. MODELO NEURONAL PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES	118
5.1. Base de datos de los parámetros operacionales	120
5.2. Herramienta de cómputo <i>ThinksPro</i>	120
5.3. Entrenamiento del Modelo Neuronal Artificial.....	123
5.4. Resultados de la Red Neuronal Artificial.....	124

6. CONCLUSIONES	133
ANEXO	136
REFERENCIAS	142

INTRODUCCIÓN

La implementación de la Inteligencia Artificial a los Túneles tendrá por objetivo reaccionar eficazmente a los cambios imprevistos durante la construcción de una obra subterránea. Los ingenieros de campo se verán beneficiados al usar esta tecnología para mejorar la operación de las tuneladoras, ya que involucrará la utilización de diversos parámetros de operación y monitoreo que registra la máquina durante la excavación. El operador no tiene la habilidad natural de controlar todos los parámetros generados en las *Tunnel Boring Machine* (TBM) al mismo tiempo, ya que se registra una gran cantidad de parámetros en tiempo real sobre el asentamiento en superficie y el subsuelo, vibraciones, velocidad y rotación de la rueda de corte y del tornillo transportador, etc.

A lo largo de los años se ha trabajado en la mejora de la automatización y operación de las tuneladoras, pero ahora se abrirán nuevos enfoques en la implementación de la Inteligencia Artificial para el reconocimiento de los patrones de datos de entrada, generados en la excavación y que son manipulables por el operador; así mismo con los datos de salidas, que se pueden relacionar con el rendimiento, la toma de decisiones y manipulación de la tuneladora en la ejecución del proceso constructivo. Estas máquinas producen flujos continuos de datos generados por sensores colocados en toda la TBM y en la superficie del terreno, todos estos datos recopilados se introducen en algoritmos de procesamiento para obtener la estimación de los datos de salida.

La complejidad de la excavación de túneles por medios mecanizados se amplifica en entornos urbanos. Estos sistemas se operan en condiciones que cambian todo el tiempo y que un operador por naturaleza no sería capaz de monitorear y manipular esa gran cantidad de datos al mismo tiempo, por lo que la tecnología como la Inteligencia Artificial por medio de las Redes Neuronales Artificiales será una herramienta fundamental para la operación y toma de decisiones en el frente de la excavación.

Con estas tecnologías y la correcta utilización de los parámetros de entrada en el algoritmo programado, se espera que las tuneladoras en un futuro sean capaces de operar de forma autónoma. El rendimiento es un aspecto importante que depende de la operación y manipulación de la tuneladora, aunque también dependerá del comportamiento en sus respectivos entornos geológicos y geotécnicos, mismos que si se tiene la información específica, se obtendrán resultados confiables, efectivos y consistentes. El rendimiento en las operaciones de tunelización es uno de los objetivos clave para el éxito de los proyectos, ya que está directamente relacionado con el costo de la obra.

Más allá de las fórmulas matemáticas y las soluciones analíticas para la resolución de problemas; la inteligencia artificial, particularmente las Redes Neuronales Artificiales han demostrado resultados muy prometedores en varias áreas de la ingeniería, ya que se puede mejorar la efectividad del análisis, especialmente en la manipulación de los datos de entrada, donde los parámetros interrelacionados en forma de red neuronal interactúan entre sí para obtener el resultado esperado.

El desarrollo del algoritmo de una red neuronal intentará comprender el funcionamiento del cerebro, imitando sus capacidades de evaluación para decidir y actuar bajo incertidumbre, por medio de un modelo matemático de nodos o neuronas interconectadas por capas. La ventaja de este tipo de herramientas es su flexibilidad en el procesamiento de datos, ya que no es determinista y requiere una relación matemática de sus componentes, una vez que los datos se introducen, la red identifica las relaciones existentes, aprende y emite un comportamiento por medio de los enlaces entre las neuronas.

Se analizará la información obtenida de la experiencia en proyectos de tuneleo mecanizado en los diferentes tipos de suelo, en especial los macizos rocosos o suelos mixtos, obteniendo así un conjunto seleccionado de datos. La selección se realizará en solicitud de causa y efecto del proceso de excavación para identificar las interacciones entre los datos de entrada y llegar a la ponderación adecuada de los parámetros involucrados de salida, que finalmente determinarán la exactitud de los resultados y podrán ser comparados con los datos que les llamamos objetivo o existentes.

La utilización de técnicas de Inteligencia Artificial en la operación adecuada de las máquinas tuneladoras, podrá producir soluciones confiables y contribuirá en los esfuerzos de los ingenieros responsables del frente de la excavación y los operadores de estas máquinas, para la mejor comprensión del fenómeno y tomar decisiones eficaces en la excavación y construcción de túneles mecanizados.

OBJETIVO PRINCIPAL

Aplicar la Inteligencia Artificial por medio de las Redes Neuronales Artificiales para la estimación de parámetros operacionales que se ajusten a una máquina tuneladora TBM de tipo EPB en macizos rocosos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Mostrar la evolución de la excavación mecanizada de túneles de acuerdo con sus orígenes y desarrollos históricos.
2. Identificar las tecnologías de las TBM aplicables a las diferentes condiciones geológicas del frente de excavación, con enfoque hacia la excavación mecanizada de macizos rocosos.
3. Mostrar los parámetros operacionales clave del control de procesos en la excavación con máquina tuneladora de tipo EPB y determinar los rangos y valores más apropiados para la excavación de macizos rocosos.
4. Describir los principios de la Inteligencia Artificial por medio de la teoría de las Redes Neuronales Artificiales, aplicado al control de procesos de una máquina tuneladora de tipo EPB.
5. Desarrollar un Modelo Neuronal Artificial que permita la estimación de los parámetros operacionales más apropiados para la excavación de macizos rocosos, a partir de la base de datos del control de procesos de una tuneladora tipo EPB.

CAPÍTULO 1

EVOLUCIÓN DE LA EXCAVACIÓN MECANIZADA DE TÚNELES

1. EVOLUCIÓN DE LA EXCAVACIÓN MECANIZADA DE TÚNELES

Las máquinas para la excavación de túneles se conocen como tuneladoras y son capaces de excavar un túnel a sección completa para después colocar un revestimiento. En terrenos blandos, inestables, fracturados o muy permeables que son sometidos a carga freática, se utilizan tuneladoras comúnmente llamadas escudos.

Los escudos son máquinas que se componen de una cabeza de corte giratoria del mismo diámetro de la sección a excavar, equipadas con herramientas de corte y una cámara de presión, avanza mediante el empuje de una serie de gatos hidráulicos perimetrales que se apoyan sobre las dovelas. Todos estos aditamentos se encuentran dentro de una coraza metálica (escudo) que las protege del subsuelo. Existen escudos abiertos y cerrados, su utilización está en función de las características y estabilidad del frente de la excavación.

Las tuneladoras son máquinas integrales que actualmente están diseñadas para ser utilizadas en terrenos completamente distintos, los llamados “topos” son tuneladoras pensadas principalmente para excavar en rocas duras o competentes, sin la necesidad de colocar sostenimiento de dovelas en el interior del túnel. Los “escudos” son tuneladoras más complejas, utilizadas en la excavación de rocas blandas o muy fracturadas y suelos inestables que por lo regular se encuentran por debajo del nivel freático.

Debido a las complicaciones que se tienen al excavar en terrenos mixtos y al avance de nuevas tecnologías, se han desarrollado máquinas que cumplen con características más específicas. El doble escudo es una máquina capaz de trabajar como topo o como escudo y está en función de la calidad del macizo rocoso, es una solución muy eficaz para terrenos con tramos variables suelo y/o roca. Para suelos mixtos se han desarrollado en los últimos años los escudos multimodo para optimizar los avances y hacer las modificaciones pertinentes durante el proceso de excavación sin necesidad de sacar la tuneladora o tener que comprar dos tipos de escudos (Sáenz I, 2001).

Las *Tunnel Boring Machine* se desarrollaron inicialmente para resolver la construcción totalmente mecanizada de los túneles hidráulicos, en los que la sección circular resulta la más apropiada. Estas máquinas realizan los procesos elementales del ciclo de trabajo: excavación, revestimiento del túnel, carga y transporte de la rezaga.

1.1. Orígenes y Desarrollos Históricos

Los métodos de excavación de túneles a lo largo del tiempo se han basado en el empleo de herramientas, desde manuales, el empleo de pólvora como explosivos, hasta llegar a los métodos mecanizados. Anteriormente el soporte se realizaba con madera para la caída de terrenos sueltos, seguidos de un revestimiento de ladrillo recosido. Este tipo de túneles fueron

construidos sobre el nivel freático, ya que este método no soportaría las presiones ejercidas por el agua subterránea y tendría filtraciones considerables.

No fue hasta 1807 cuando por primera vez se construye el primer túnel por debajo del nivel freático, bajo el Río Támesis en Londres, a cargo del ingeniero francés Isambard Brunel, esta obra tuvo muchas dificultades por la gran cantidad de agua y las características del suelo al ser un terreno muy blando, a tal grado que tuvo que ser suspendida. Un año después Brunel desarrolló un nuevo método constructivo que lo llamó máquina excavadora escudada y lo pudo utilizar cinco años más tarde con la apertura de la construcción del túnel.

El dispositivo desarrollado consiste en una coraza metálica para sostener el subsuelo, es empujado hacia adelante por el único elemento mecanizado (sistema de gatos). La excavación y rezaga se seguía haciendo por medios manuales. El escudo estaba dividido por celdas donde los trabajadores podían estar ubicados y excavar.

El primer prototipo tenía geometría circular y debido a nuevos problemas en el proceso constructivo se cambió a sección rectangular, este nuevo soporte fue fabricado de hierro fundido, sus dimensiones eran 11.43 metros de alto, 6.78 metros de ancho y 2.72 metros de longitud, dividido en 12 compartimentos y cada uno de ellos en tres celdas verticales (Figura 1.1). Las celdas están conectadas por elementos deslizantes para avanzar alternadamente al frente, cortar el suelo y sosteniéndolo rápidamente. El avance se daba mediante gatos tornillo, apoyados en el revestimiento final (ladrillos) del túnel y soportados por elementos horizontales de madera. El avance en el proceso de excavación era de 15 centímetros y 4.3 metros por semana en promedio (Guglielmetti V, 2008).

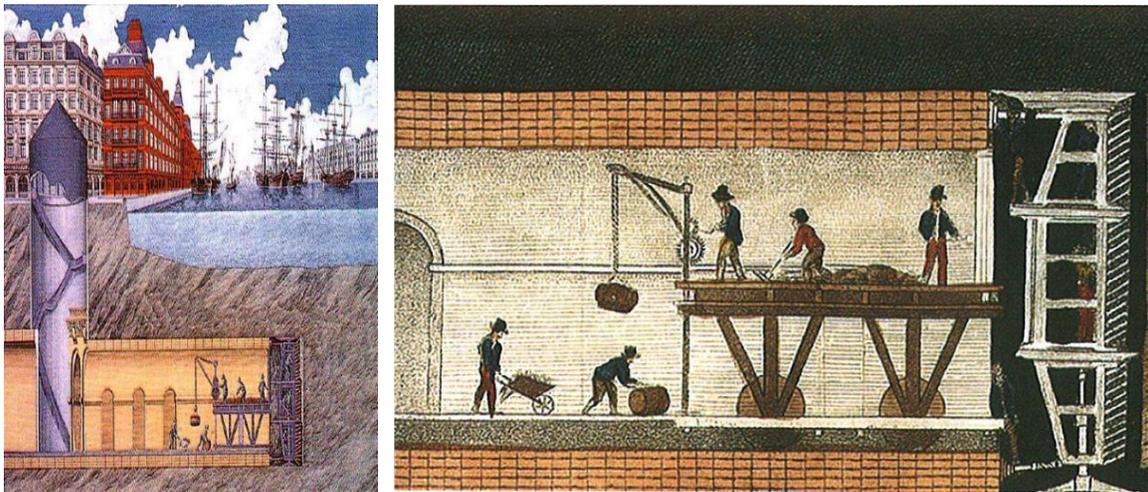


Figura 1.1. Construcción de túnel bajo el nivel freático (Guglielmetti V, 2008).

Por su parte el ingeniero norteamericano Beach, completó un tramo de túnel experimental en Nueva York con un escudo cilíndrico de una pieza, en el cual se utilizaron gatos de empuje

hidráulico (Figura 1.2), el desarrollo de las primeras ideas y realizaciones de escudos dieron como resultado el origen de la creación de la mampara hermética, la esclusa de personal y de dispositivos de colocación de dovelas, así como la coraza protectora que constituye al escudo mismo. Desde las primeras aplicaciones se dieron soluciones al soporte del frente de la excavación y al retaque del ademe contra el suelo, ya que en esos tiempos ya se reconocía la necesidad del túnel.

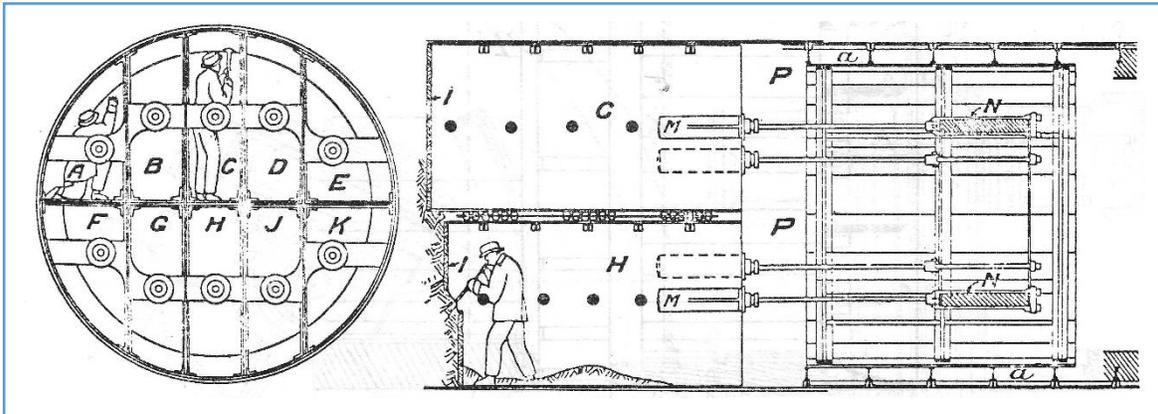


Figura 1.2. Primeros escudos cilíndricos con empuje hidráulico (Vieitez L, 1986).

En 1869, el ingeniero James Henry Greathead usó un escudo circular para otro túnel debajo del Támesis, que también marcó el primer uso de segmentos circulares de hierro fundido para el revestimiento. La construcción del túnel de 402 m de largo con un diámetro externo de 2.18 m se completó sin grandes dificultades, ya que el túnel pasó a través de arcilla impermeable (Maidl B, et al., 2012).

El problema de controlar el agua en la construcción de túneles en terreno suelto fue resuelto por primera vez por Thomas Cochrane mediante el uso de aire comprimido, siguiendo la sugerencia de Callodan a Brunel de 1828. En 1830 inventó la esclusa de aire comprimido, permitiendo el acceso a un espacio de trabajo bajo una presión incrementada.

Los primeros usos del aire comprimido se dieron en Amberes y 1880 en Nueva York, aunque estos se trabajaron sin escudos. En 1886, Greathead logró la aplicación de un escudo en combinación con aire comprimido para la construcción del metro de Londres, este hecho dio el nacimiento a los escudos de aire comprimido.

A principios del siglo XX, la mayoría de los túneles se excavaron con escudos de tipo Greathead. El escudo circular Greathead fue el patrón para la mayoría de los diseños posteriores. La figura 1.3 ilustra uno de los dos escudos Greathead utilizados para la construcción del túnel Rotherhithe (1904-1908) con 9,35 m de diámetro.

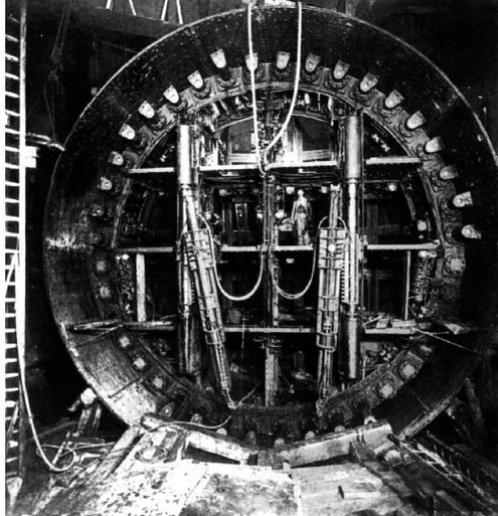


Figura 1.3 Escudo para la construcción del túnel Rotherhithe 1904-1908 (Maidl B, et al., 2012).

Desde la invención de Brunel, se dio como resultado el remplazo de los procesos de excavación manual a excavación mecánica. La primera patente para tal escudo mecanizado fue solicitada por los ingleses John Dickinson Brunton y George Brunton (Figura 1.4). El escudo tenía un cabezal de corte giratorio hemisférico formado por placas individuales (Maidl B, et al., 2012). El material de corte cae sobre cubos montados radialmente en el cabezal de corte, estos arrojan la rezaga sobre un cinturón transportador, la cabeza de corte gira por seis cilindros hidráulicos, que trabajan contra un anillo de trinquete fijado a la misma cabeza.

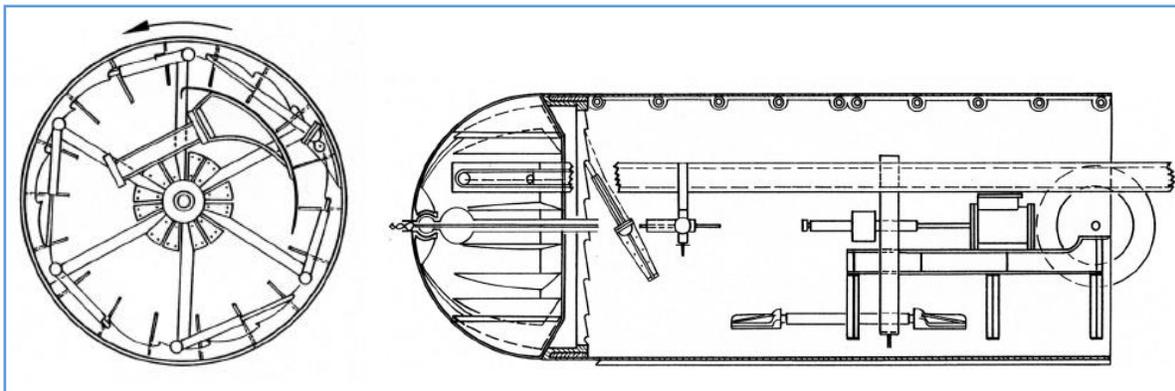


Figura 1.4 Escudo mecanizado utilizado por Brunton, 1876 (Maidl B, et al., 2012).

Esta idea se repitió más tarde por J. Price para la construcción del ferrocarril subterráneo en Kiev (1896). Esta máquina se utilizó con gran éxito en arcillas de Londres, fue la primera máquina en utilizar el rendimiento de un cabezal de corte giratorio basado en principios simples dentro de un escudo Greathead. La cabeza de corte contaba con cuatro brazos dispuestos como radios, en los que se ajustaban las herramientas de corte y rastrillado (Figura 1.5).

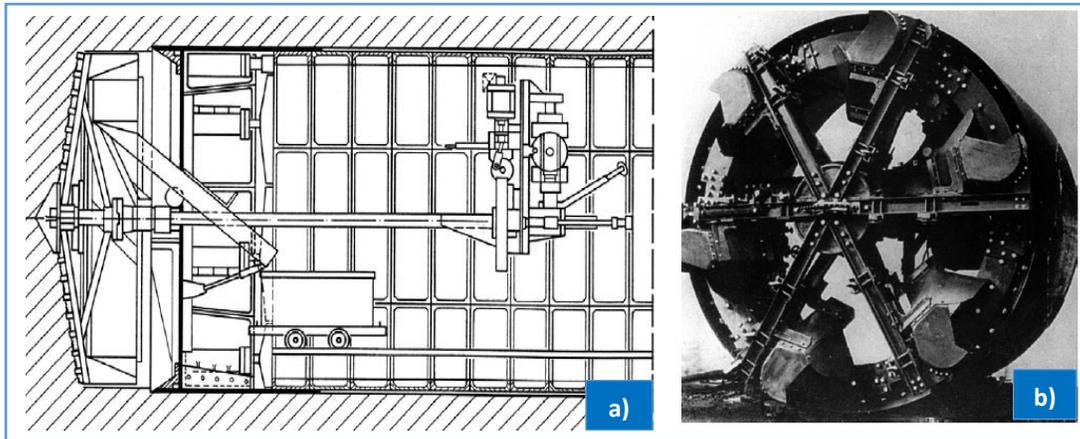


Figura 1.5 a) Escudo mecanizado utilizado por Price, U. K., 1896 b) Escudo mecanizado utilizado por Price, 1902. (Maidl B, et al., 2012).

En suelos con mayor permeabilidad era difícil sostener la cara con aire comprimido. Por lo que se desarrolló un escudo con soporte de fluido. Se pretendía que la tierra fuera retirada hidráulicamente por un fluido y transportada hidráulicamente como una suspensión, con la cámara de excavación llena de fluido y sellada herméticamente como una cámara de presión (Figura 1.6).

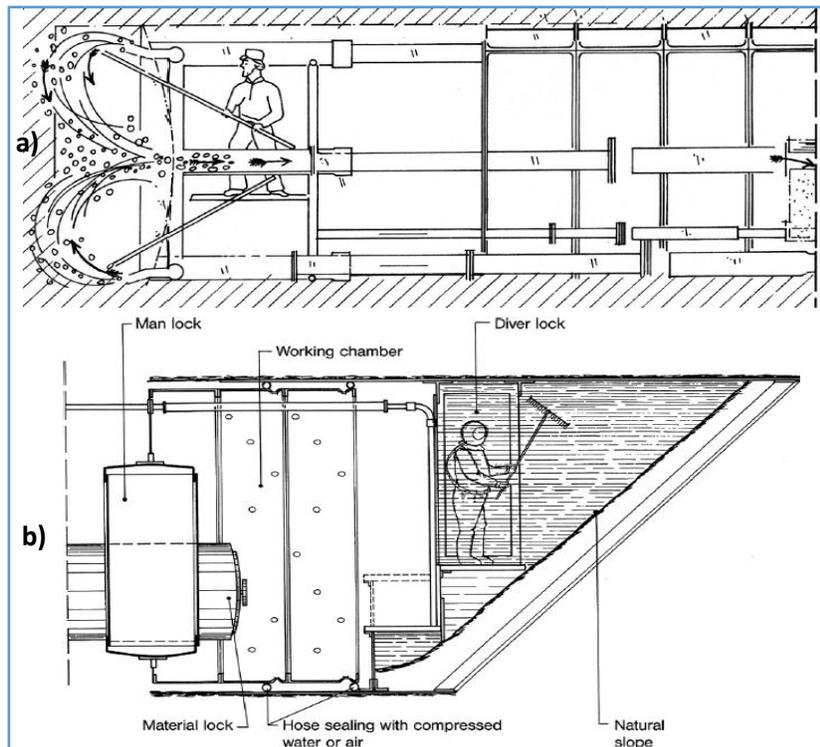


Figura 1.6 a) Escudo de lodo usado por Greathead, 1874 b) Escudo de fluido usado por Haag, 1896 (Maidl B, et al., 2012).

En 1960, Schneiderei introdujo la idea del soporte facial activo con suspensión de bentonita, el primer uso de un protector de lodo con la excavación de la cara por una rueda de corte y la extracción hidráulica del lodo fue una máquina de 3,1 m de diámetro en 1967 en Japón. Y en Alemania, Wayss & Freytag AG desarrolló y utilizó el primer escudo de cara con soporte de bentonita en 1974 (Maidl B, et al., 2012).

El desarrollo del sostenimiento por equilibrio de presión de tierra comenzó más tarde, aunque el protector de tornillo de Brunel puede considerarse el predecesor de la técnica básica. El primer diseño fue desarrollado en 1963 por la japonesa Sato Kogyo Company Ltd. (Figura 1.7), buscaban un método para hacer un túnel a través del suelo blando y fluido debajo del nivel freático.

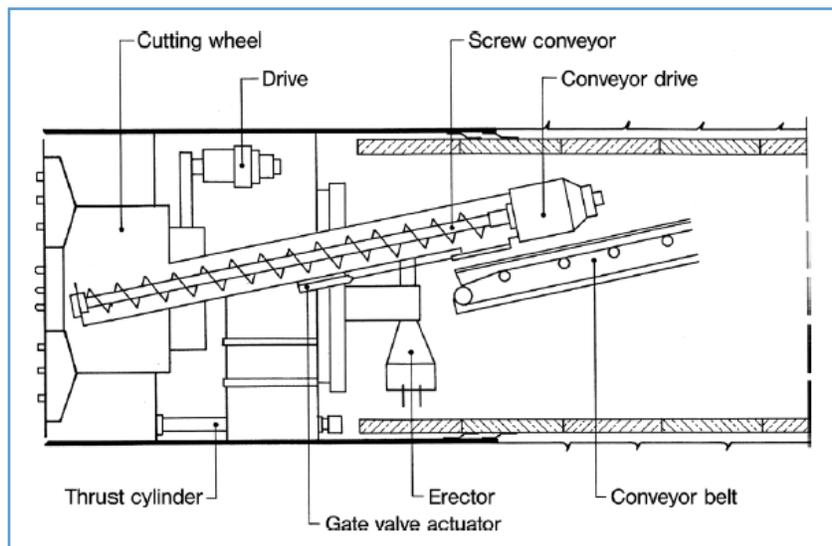


Figura 1.7 Escudo de equilibrio de presión de tierra, Sato Kogyo Company, 1963 (Maidl B, et al., 2012).

La construcción de túneles mediante tuneladoras comienza en la segunda mitad del siglo XX y se ha desarrollado de manera eficaz en los últimos veinte años. Debido a la gran expansión mundial registrada en la construcción de obras subterráneas por medio de túneles con tuneladoras, se han desarrollado cambios tecnológicos muy importantes que han ampliado el catálogo de las diferentes tuneladoras para los diferentes tipos de terreno.

Para describir el desarrollo de las máquinas tuneladoras, se presentan las características básicas de los diferentes tipos de escudos abiertos y cerrados que fueron la base para las máquinas tuneladoras de hoy en día.

1.2. Escudos de frente abierto

Tienen la característica de proveer un sistema de soporte mecánico parcial del frente de excavación, es posible observar el comportamiento del suelo durante las actividades en el ciclo de excavación, estos fueron los primeros escudos que se crearon debido a las limitaciones tecnológicas de la época. Su versatilidad para utilizarse en combinación de otros procedimientos para garantizar la estabilidad del subsuelo, estos procesos pueden ser: inyecciones, congelamiento, aire comprimido o bombeo.

La técnica de excavación de túneles utilizando escudo abierto y aire comprimido ha sido desplazada por la implementación de escudos con frente presurizado, debido a los bajos rendimientos y al alto costo, sin embargo, este proceso es la base con la que se parte para el desarrollo de las nuevas tecnologías. El método consiste en aplicar a todo el túnel una presión de aire superior a la presión atmosférica que servirá para soportar el frente, permitiendo junto con el escudo abierto realizar la excavación sin tener algún riesgo (Figura 1.8).

El aire comprimido de baja presión a la que se somete el túnel, es cuando se comprime a un valor mayor al que tiene en estado libre y es introducido al frente para contener la inercia del agua y del terreno, para que no fluya al interior de la excavación (Hardy V., 1998). Para llenar completamente el túnel de aire, se utilizan compresores, intercambiadores de calor y separadores de agua y aceite, para comprimirlo, enfriarlo y garantizar su calidad y volumen requerido. El aire se envía a la cámara de trabajo delimitado por la mampara, donde están empotradas las esclusas que sirven para presurizar al personal de trabajo.

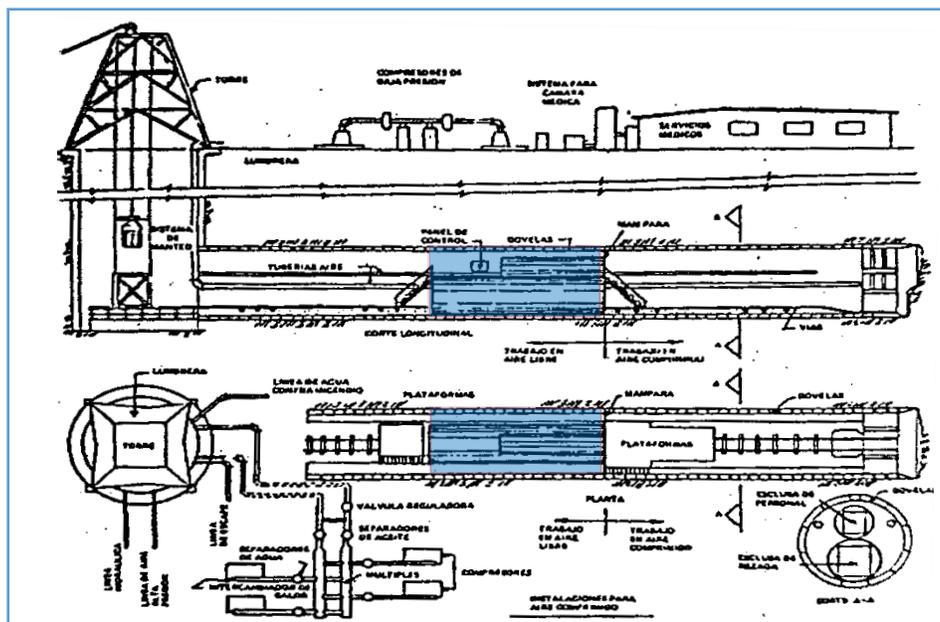


Figura 1.8 Elementos requeridos para el túnel con aire comprimido (Hardy V, 1998).

En la actualidad existe gran variedad de escudos de frente abierto, pero debido a las condiciones geológicas encontradas, es necesario adecuar este tipo de escudos a las necesidades del proyecto. En suelos blandos o inestables su aplicación ya no es tan factible, ya que es difícil controlar el comportamiento del terreno al momento de excavar, en el caso contrario, en suelos compactos o frentes mixtos, inclusive en estratos de roca es posible la aplicación de estos sistemas abiertos.

1.2.1. Escudo Manual de Frente Abierto

Estas máquinas no cuentan con herramientas para atacar el frente de la excavación, están compuestas básicamente con los sistemas de empuje, soporte frontal y para la colocación del revestimiento. Su uso es reducido porque tiene muchas limitaciones contra terrenos complejos, ya que su eficiencia se ve afectada en el procedimiento de excavación, la ventaja es que tiene soporte en el contorno de la excavación y esto ayuda a tener un avance seguro.

En la Figura 1.9 se ilustra un escudo consistente en un cilindro metálico reforzado con traveses y columnas en las que se alojan los gatos hidráulicos que se utilizan para el soporte del frente, la colocación del revestimiento primario está formado por tres dovelas de concreto que son colocadas por medio de dos brazos erectores localizadas en la parte posterior del escudo, los cuales son acondicionados por dos gatos hidráulicos. Para la extracción de la rezaga, las columnas y traveses están colocadas de tal forma que permiten el paso de la maquinaria a la parte central, ya que la excavación se realiza por medios mecánicos (rosadoras), la cual es una herramienta independiente al escudo. En la Figura 1.10 se observa que los escudos abiertos también pueden ser equipados con viseras móviles y gatos frontales que están integrados a las placas de soporte del frente excavado (Canseco H, 1986).

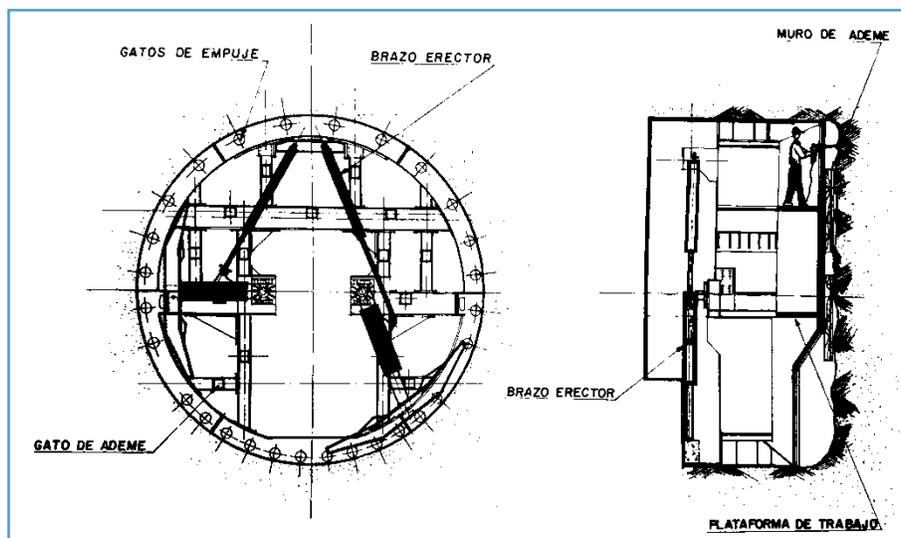


Figura 1.9 Escudo manual SOLUM-MATHEWS (Canseco H, 1986).

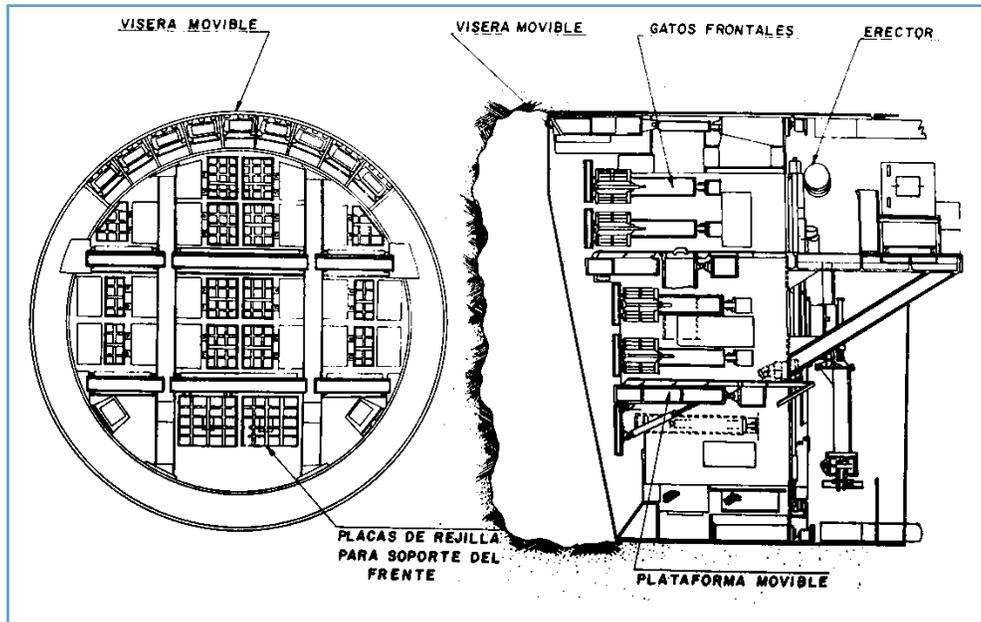


Figura 1.10 Escudo manual MITSUBISHI (Canseco H, 1986).

1.2.2. Escudo Semi-mecanizado de Frente Abierto

Son una variante de los escudos manuales, ya que cuentan con herramientas para la excavación parcial del frente y lograr mayor eficiencia en el avance. Comparte la misma problemática con el escudo anterior debido a su dificultad de excavación en suelos heterogéneos, se compone de un brazo retroexcavador o herramienta similar que cuente con las características necesarias para poder colocarlo al frente y no tener problemas con las limitaciones de espacio.

Para incrementar su eficiencia, los escudos son equipados con maquinaria de extracción rápida del material excavado, así como para la colocación y manejo del revestimiento a colocar.

En la Figura 1.11 se ilustra un escudo semimecanizado fabricado por Mitsubishi que está adecuado con un brazo retroexcavador en la parte baja del escudo, una visera móvil y placas de rejilla integradas a los gatos hidráulica que soportan el frente de la excavación (Canseco H, 1986).

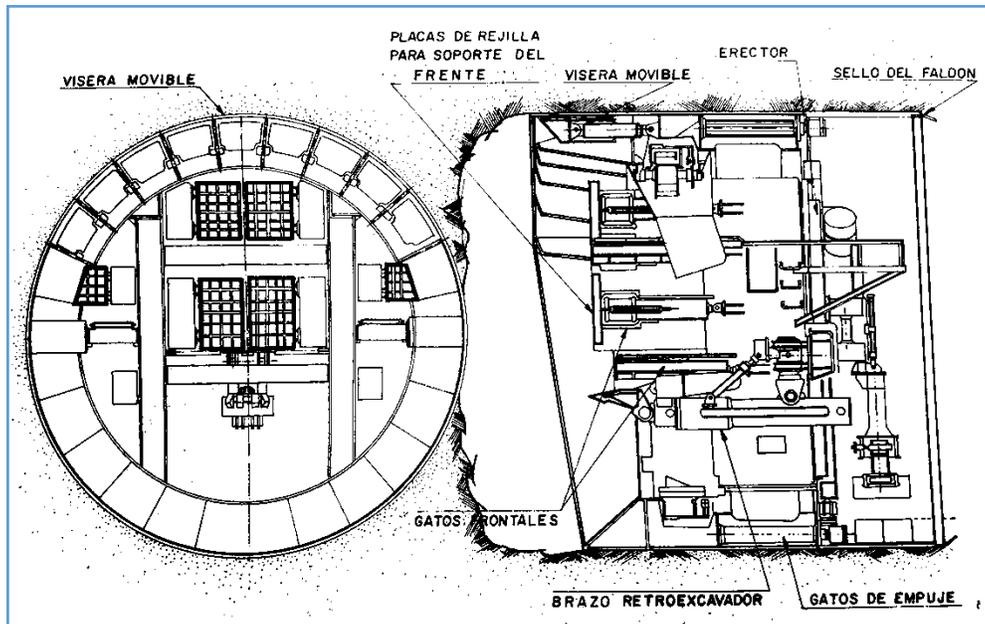


Figura 1.11 Escudo semimecanizado MITSUBISHI (Canseco H, 1986).

1.2.3. Escudo Mecanizado de Frente Abierto

Cuenta con herramientas para la excavación total del frente de trabajo, pueden tener muchas formas y tamaños dependiendo del equipamiento, el tipo de proyecto y la tecnología con la que se cuente. Estas herramientas pueden ser la cabeza de corte giratoria, brazo retroexcavador articulado, brazo excavador deslizante y brazo rozador. Dependiendo del tipo de suelo es el tipo de herramienta que se utilizará, todo va a depender de las condiciones geológicas en las que se tenga que trabajar, la cabeza de corte es utilizada para suelos blandos o difíciles, para soportar con la misma herramienta el terreno y evitar una falla del frente, las demás herramientas mencionadas son utilizadas en suelos duros o más competentes con auto soporte.

Cuentan con el equipamiento necesario para mecanizar completamente el ciclo de excavación, el escudo tiene una estructura conocida como tren de equipo o de arrastre, el cual consta de una plataforma en la que se alojan los equipos auxiliares (hidráulicos, eléctricos, mecánicos) y un sistema de trasporte de rezaga para la eficiente operación del escudo. En los últimos años la mecanización de los escudos ha tenido cambios en su forma y método de excavación y comienzan a llamarse maquinas integrales o maquinas tuneladoras TBM, en el siguiente capítulo se describen estos métodos de excavación.

En la Figura 1.12 se encuentra un escudo de cabeza cortadora giratoria en forma de estrella, su giro es provisto por medio de motores hidráulicos o eléctricos, la junta articulada en el cuerpo del escudo que se opera y controla por medio de gatos hidráulicos que mueven

ligeramente el cuerpo delantero del escudo, que es independiente de la parte trasera. Porta un anillo de expansión mediante el cual se expande el revestimiento primario del túnel y un anillo de distribución de cargas unido a los gatos de empuje (Canseco H, 1986).

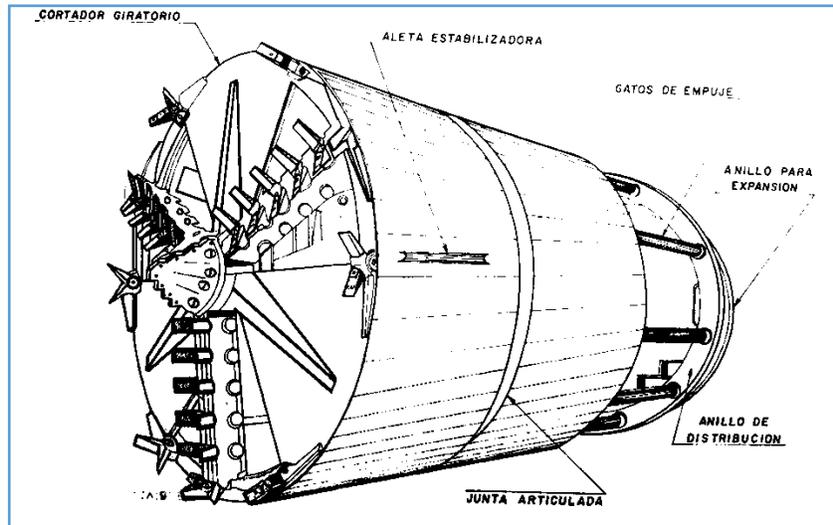


Figura 1.12 Escudo mecanizado LOVAT (Canseco H, 1986).

Existen escudos con brazo excavador deslizante giratorio, además de ser telescópico están dotados de un mecanismo que acciona la pala o herramienta de ataque (Figura 1.13 y 1.14). El alcance de los brazos está diseñado con las dimensiones del frente de excavación, el material excavado es depositado en el sistema de transportadores que está colocado en la parte baja del escudo. El sistema de ademe frontal tiene compuertas abatibles localizadas en la media sección superior y se acciona con gatos hidráulicos (Canseco H, 1986).

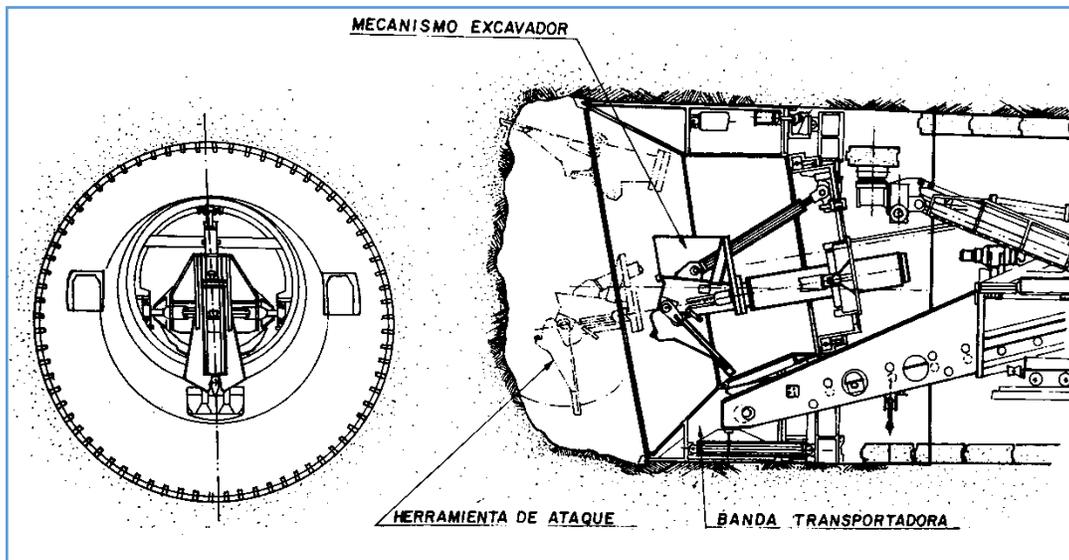


Figura 1.13 Escudo mecanizado ROBBINS (Canseco H, 1986).

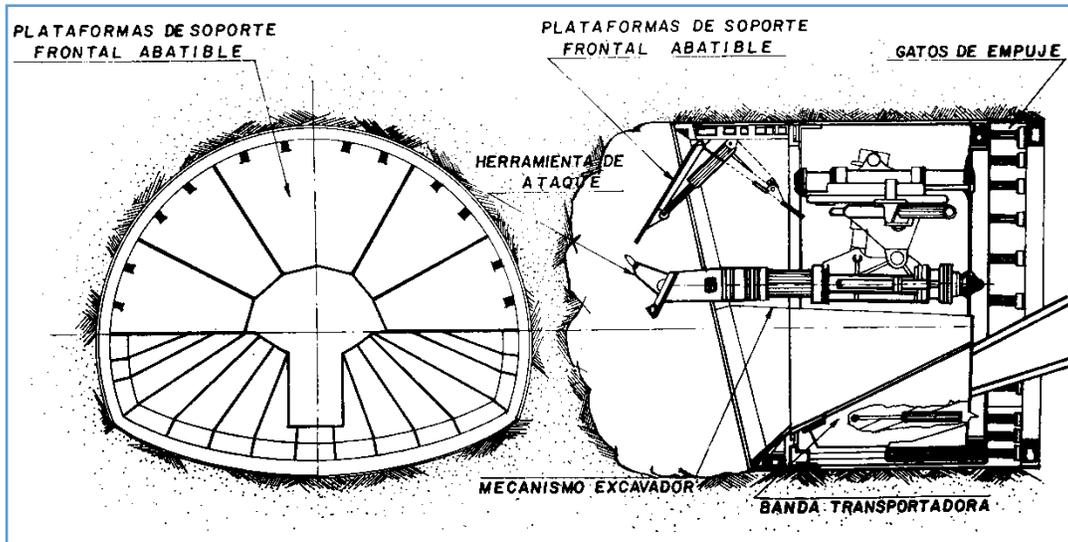


Figura 1.14 Escudo mecanizado en forma de herradura ROBBINS (Canseco H, 1986).

En la Figura 1.15 y 1.16 están representados dos escudos que trabajan con brazo excavador articulado giratorio, el principio y funcionamiento está diseñado para excavar toda la sección del túnel, esta misma herramienta empuja el material excavado al transportador de la rezaga. El sistema de ademe frontal se limita a la cubierta móvil, la cual puede deslizarse con un gato hidráulico en cada una de ellas (Canseco H, 1986).

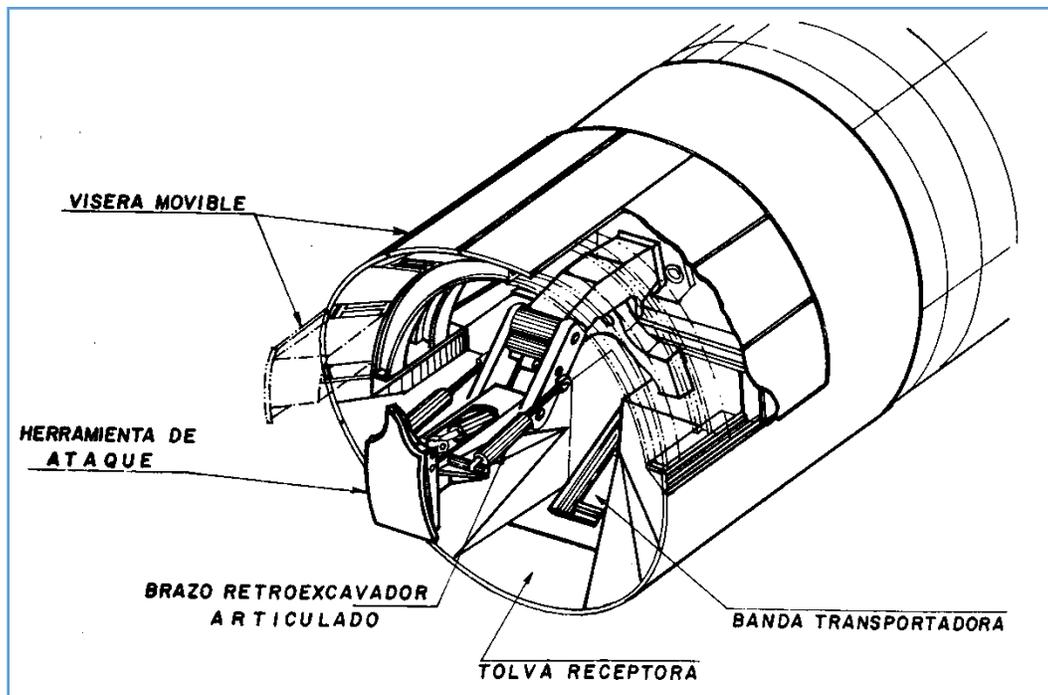


Figura 1.15 Escudo mecanizado MILWAUKEE BOILER (Canseco H, 1986).

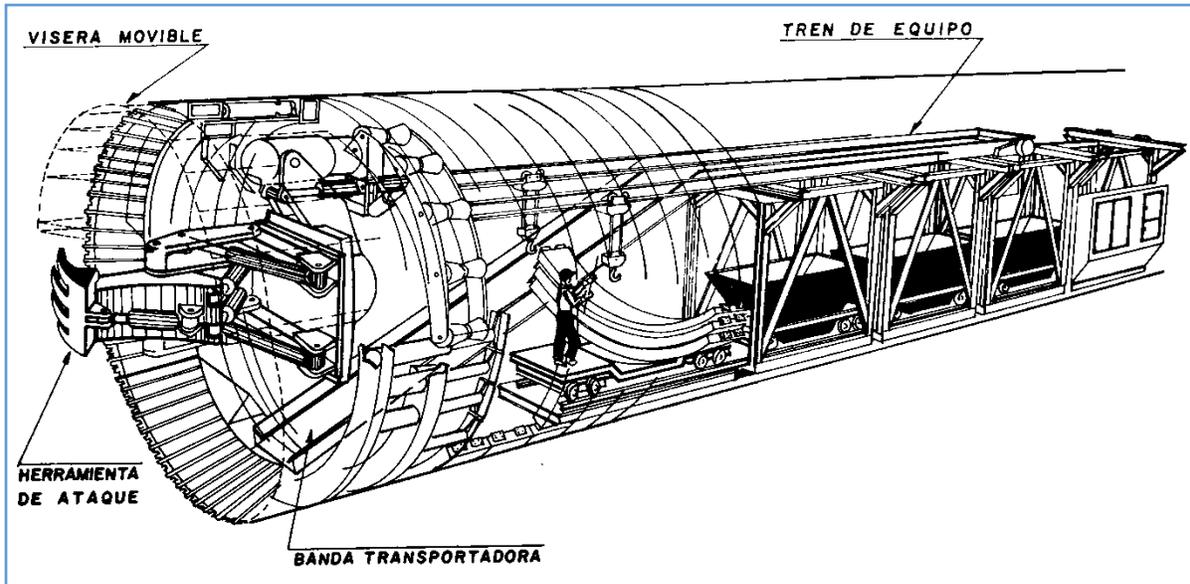


Figura 1.16 Escudo mecanizado SOKOR (Canseco H, 1986).

Existe un tipo de escudo que porta dos brazos rozadores que giran alrededor de un balero central, cuenta con un sistema de ademe frontal abatible, banda transportadora de racletas para la salida del material, anillo erector de dovelas y tren de equipo (Figura 1.17). Está diseñado para obtener altos rendimientos ya que excava simultáneamente con los dos brazos, el retiro del material se hará conforme al avance del equipo para no parar en ningún momento el ciclo de la excavación (Canseco H, 1986).

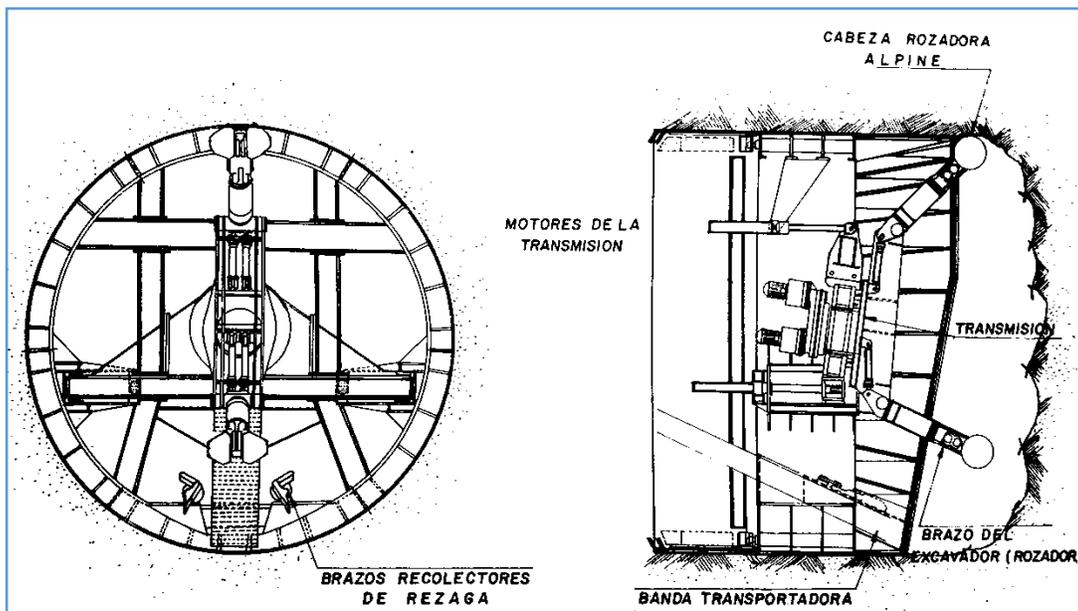


Figura 1.17 Escudo mecanizado HAMILTON-VOEST ALPINE (Canseco H, 1986).

1.3. Escudos de Frente Cerrado

Los escudos se utilizan cuando las condiciones del suelo son menos favorables, ya que se requiere tomar en cuenta otras medidas para el soporte sistemático del suelo. Está integrado por una estructura cilíndrica de acero que sirve como escudo protector al momento de excavar la longitud correspondiente a la carrera de los gatos hidráulicos. Con este tipo de máquinas es posible colocar el revestimiento con elementos prefabricados de concreto armado, entre el espacio libre de la cola y el anillo anterior de dovelas (Figura 1.18).

Al contar con una cabeza de corte giratoria, ofrece la ventaja de excavar y soportar el terreno al mismo tiempo, y junto con la cámara, donde se introduce el material de rezaga, ambas proveen un sistema integral de presurización en el frente de la excavación mediante algún tipo de fluido, ya sea con lodo bentónico, aire comprimido o con el balance del mismo material rezagado, estos métodos de excavación se detallan en el capítulo siguiente. La rueda de corte tiene varias velocidades de rotación y gira en ambas direcciones; dependiendo de las adecuaciones que tenga, puede desplazarse longitudinalmente por medio de gatos con respecto al cuerpo del escudo, en la Figura 1.19 se observan sus características principales.

La función de este sistema presurizado es la estabilidad del frente, lograda mediante la presión mecánica que ejerce el escudo al momento que la rueda gira y va cortando el material, mismo que penetra a la cámara presurizada a través de las aberturas del disco cortador para equilibrar la presión hidrostática que ejercer el terreno. Todos los controles para la operación del escudo están en la cabina del operador, esta se encuentra localizada en el tren de arrastre de la tuneladora.

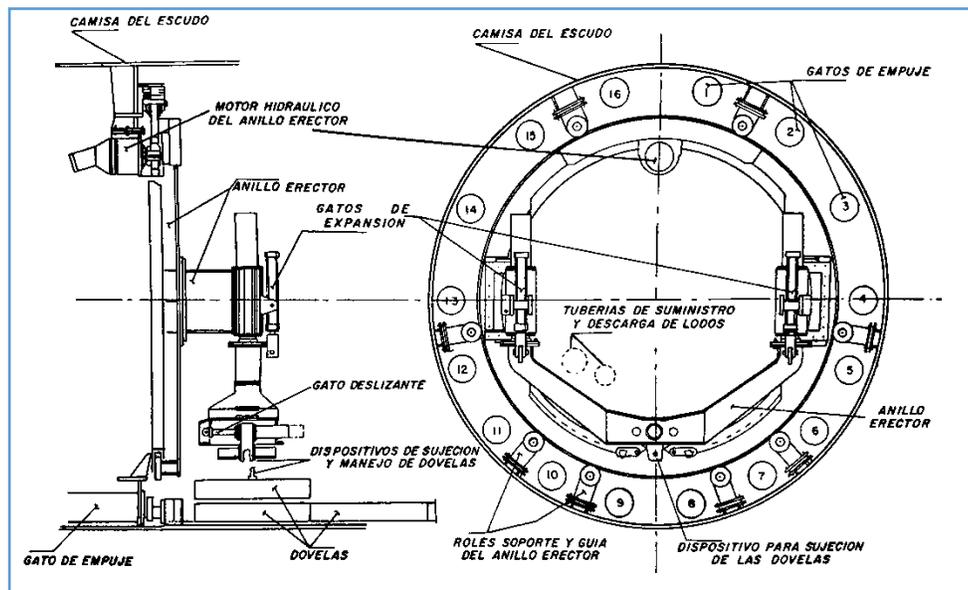


Figura 1.18 Anillo erector y distribución de los gatos de empuje (Orozco J, 1986).

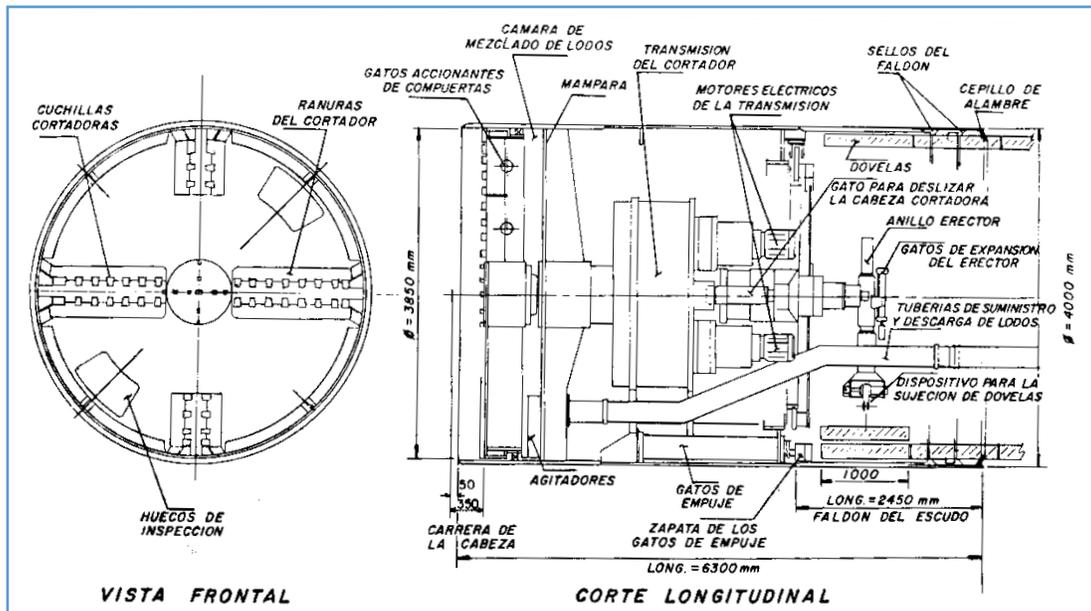


Figura 1.19 Escudo de frente presurizado (Orozco J, 1986).

El tren de arrastre del equipo consta principalmente de la cabina del operador, unidades hidráulicas, compresores, sistema neumático, gabinetes de equipo eléctrico y transmisor, bomba de descarga, transformadores, carros para cableado y tuberías telescópicas utilizadas en el avance del escudo (Figura 20).

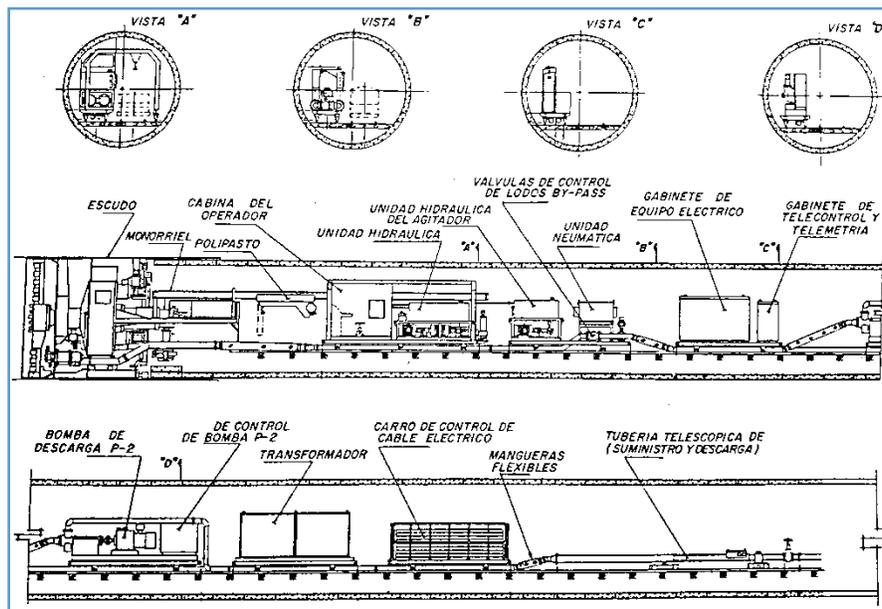


Figura 1.20 Tren de arrastre del escudo de frente presurizado (Orozco J, 1986).

Además del escudo y el tren de arrastre, existen equipos auxiliares que forman parte del sistema de tuneleo. Las plantas dosificadoras del mortero que se inyecta entre las dovelas y el terreno, una grúa pórtico para el suministro de los materiales y herramientas durante la excavación, suministros de agua, sistemas de reciclaje de lodos bentónicos, suministros de aire comprimido, cimbras telescópicas para la colocación del revestimiento definido de concreto reforzado si es que el proyecto lo amerita (Figura 1.21).

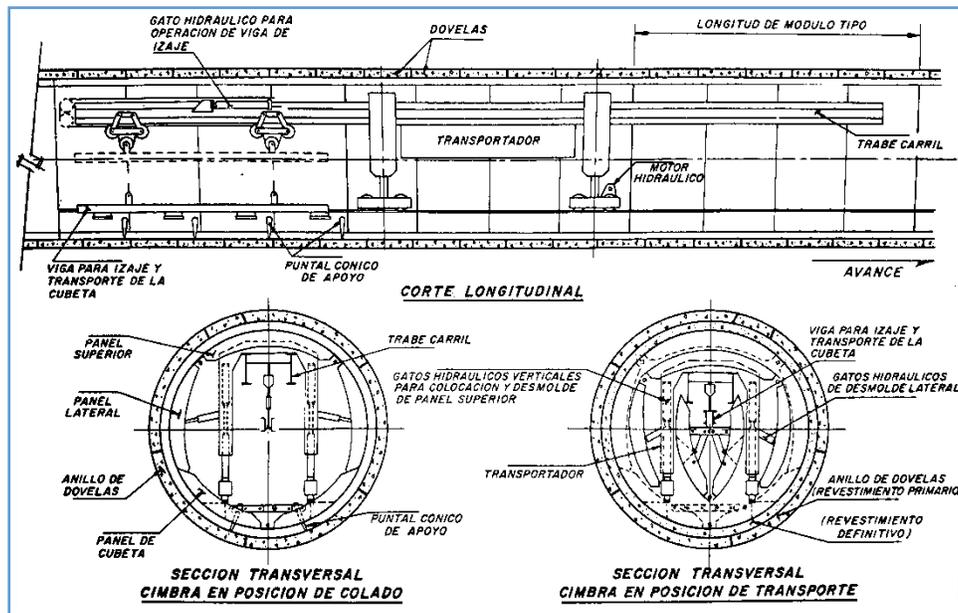


Figura 1.21 Cimbra telescópica para revestimiento definitivo (Orozco J, 1986).

Los avances técnicos y científicos permiten mejorar y refinar la construcción de escudos, el reto en la actualidad es construir máquinas capaces de excavar en todo tipo de terrenos. El escudo de frente presurizado se desarrolló para responder a los problemas que se presentan en terrenos complicados. Existe en el mercado una gran variedad de máquinas tuneladoras, diseñadas principalmente con base en las condiciones geológicas del subsuelo por excavar y las características particulares del proyecto.

La descripción de los diferentes escudos en modo abierto y cerrado da la pauta para comprender su grado de mecanización y el tipo de herramientas con las que se encuentran equipados, los diferentes tipos de escudos en su momento permitieron realizar simultáneamente las actividades más críticas en cada proceso de excavación, reduciendo considerablemente los tiempos y así aumentar el rendimiento de las máquinas utilizadas. Con el paso de los años, la tendencia a la modernidad de los escudos está encaminada a la mecanización absoluta de las máquinas y poder ser diseñadas para cualquier tipo de proyecto, evaluando todas las condiciones que conllevan para su realización.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGÍAS DE MÁQUINAS

TUNELADORAS TBM

2. TECNOLOGÍAS DE MÁQUINAS TUNELADORAS TBM

La tecnología presenta en la actualidad adelantos de gran relevancia en los procesos de excavación de túneles, aumentando la seguridad y la productividad. Esto se han desarrollado gracias al empleo de máquinas perforadoras, conocidas usualmente en México como escudos.

Las TBM (*Tunnel Boring Machine*), son máquinas especializadas que tiene la capacidad de excavar túneles a sección completa, disminuyendo el riesgo en el frente de excavación, dado que es corto el tiempo en el cual el suelo permanece sin revestimiento. Estas técnicas de construcción engloban una gran variedad de máquinas y tipos de tuneladoras sofisticadas. Estos escudos no sólo excavan el terreno, sino que además colocan el sostenimiento y retiran la rezaga.

La importancia de tomar en cuenta el comportamiento de macizos rocosos y de los suelos, así como sus características y propiedades para la mejor elección del método de perforación, permitirá disminuir las problemáticas, incertidumbres y riesgos que se pueden presentar en la construcción de túneles, derivado de los esfuerzos que se generen en la periferia de la excavación y durante el proceso constructivo.

2.1. Métodos de Tuneleo de acuerdo con las condiciones Geológicas

Por todo ello, no se puede hablar de una tuneladora “universal” que solucione todos los problemas derivados de la heterogeneidad del terreno que deseamos excavar, la tuneladora debe adaptarse al tipo de terreno y, según sea el comportamiento geotécnico de éste, la máquina puede presentar diferencias que se reflejan tanto en su diseño como en las operaciones que sea capaz de realizar. Son las características del terreno las que determinan el tipo de tecnología a aplicar o las modificaciones que se deben solicitar al fabricante.

2.1.1. Escudo de Presión de Tierra Balanceada EPB

Utilizado en suelos blandos y cohesivos como las arcillas y limos con bajas permeabilidades, pero también pueden trabajar en estratos inestables o no compactos como las arenas permeables y boleos con ciertas adecuaciones. Para hacer factible el uso de este método el suelo debe ser un material plástico de consistencia blanda a rígida, con un ángulo de fricción interno bajo y buena elasticidad (Sáenz C, 2016). Los EPB son escudos de equilibrio de presión ejercida con el mismo material cortado, convirtiéndolo en una pasta de suelo que se utiliza como medio de soporte plástico flexible. El principio general de tuneleo por medio de estos escudos consiste en igualar la presión del frente de excavación con la presión del material excavado que se introduce por la rueda de corte hacia la cámara, este equilibrio se logra balanceando ambas presiones por medio del control del material de rezaga, y así evitar asentamientos o bufamientos en superficie (Figura 2.1).

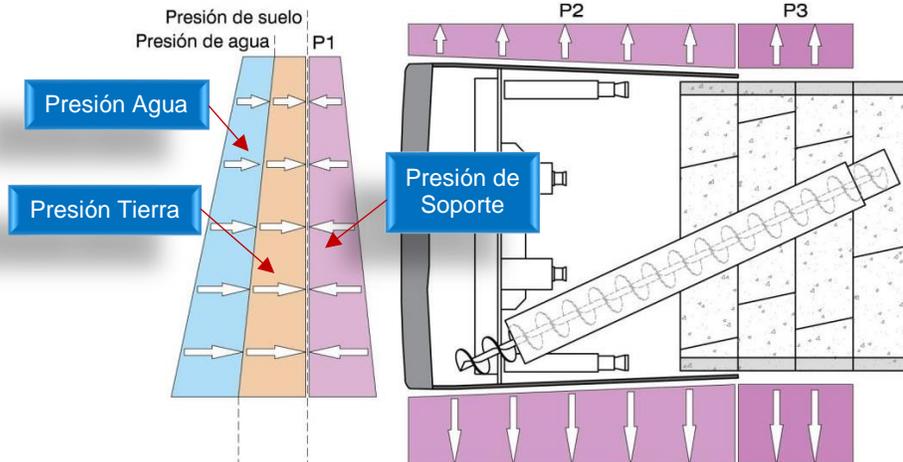


Figura 2.1 Principio de presión de tierra balanceada (Sánchez S, et al., 2018).

Para igualar las presiones y volúmenes de material, la tuneladora monitorea el retiro de la rezaga por medio de un tornillo sin fin, la velocidad de rotación de la cabeza de corte y la carrera de los gatos del escudo. El tornillo está equipado con una compuerta o alimentador para controlar la descarga de la rezaga y verificar su comportamiento.

La rueda de corte está integrada por rastreles, rippers, cuchillas de corte y discos cortadores localizados estratégicamente para cortar en su totalidad el frente de excavación. El escudo se compone de piezas y herramientas tales como faldón de cola, accionamiento principal, pórtico erector, cruz portante, anillo erector, entre otros. Las principales herramientas que componen el escudo se muestran en la figura 2.2.

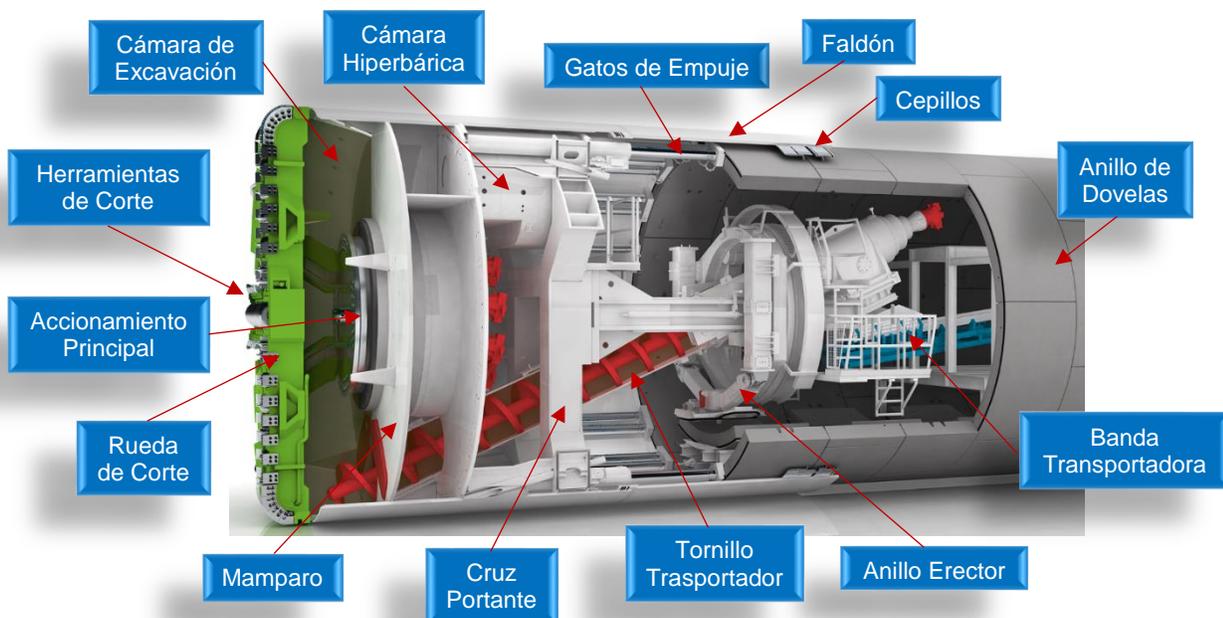


Figura 2.2 Componentes principales de un escudo EPB (Herrenknecht, 2019).

La rueda giratoria está equipada con herramientas de corte, al ser presionada sobre la cara del túnel excava el material. El suelo ingresa a la cámara de excavación, con los brazos mezcladores combina el material recién ingresado con la pasta ya generada en la cámara hasta que tenga la textura requerida. El mamparo transfiere la presión de los cilindros de empuje a la pasta de suelo flexible, cuando la presión de la pasta del suelo en la cámara de excavación es igual a la presión del suelo circundante y el agua subterránea, se logra el equilibrio necesario.

El tornillo transportador guía el material excavado desde la base de la cámara hasta una banda transportadora. El proceso de extracción del tornillo y la velocidad de avance del TBM aseguran que la presión de soporte de la pasta de suelo se pueda controlar con precisión, la presión con la que el material de rezaga se encuentra en la cámara se disipa conforme se va desalojando con el giro del tornillo (Figura 2.3).

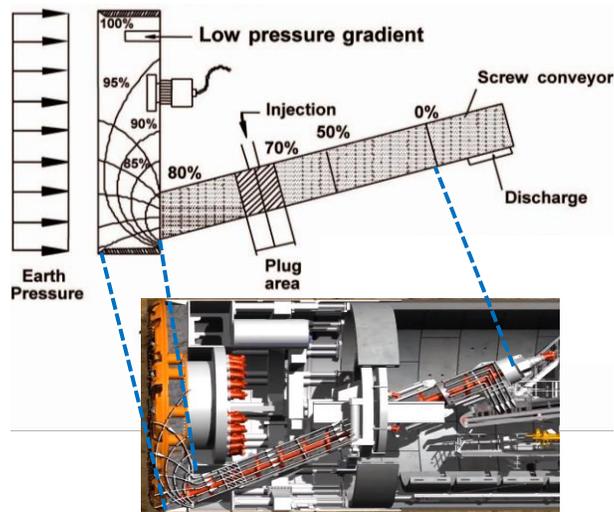


Figura 2.3 Control de presiones de la rezaga (Herrenknecht, 2019).

El equilibrio en la cámara es controlado continuamente mediante sensores de presión de tierra colocados en el escudo. El operador de la máquina puede manipular y ajustar los parámetros registrados, la ventaja de este monitoreo es cuando se enfrentan a condiciones geológicas cambiantes o irregulares.

Los escudos disponen de una grúa móvil llamada anillo erector, este permite manipular las dovelas para armar el anillo completo. Actualmente la mayor parte de los erectores manipulan las dovelas sujetándolas mediante un sistema de succión, al igual que los sistemas de elevación necesarios para descargar las dovelas que llegan al escudo para ser colocadas.

Al término de cada empuje se verifica en el sistema de guiado automático la posición real del escudo y se compara con la del proyecto, lo cual da la pauta a seguir para la programación de la colocación del anillo de dovelas antes del siguiente empuje y corregir así la posición del escudo. Para la colocación de los anillos subsecuentes se realizan las siguientes actividades: (Enzo C. 2016).

- Se retraen los gatos del escudo ubicados en la posición donde se coloca la primera dovela.
- La dovela es tomada por el anillo erector, previamente se verifica que cuente con los tornillos necesarios para la colocación de la misma, procediendo con la colocación de la dovela en su sitio correspondiente y fijando la tornillería a los insertos.
- Se apoyan los gatos a la dovela dependiendo de la posición de la misma para poder retirar el anillo erector, trasladándolo para posicionarse en la siguiente dovela.
- Se retiran los gatos necesarios para alojar la segunda dovela.
- Se hacen coincidir el orificio del tornillo con el del inserto, colocando los tornillos correspondientes.
- Nuevamente se apoyan dos, tres o cuatro gatos de acuerdo con la posición de la dovela, se retira el anillo erector para desplazarse a la siguiente dovela situada sobre la mesa de traslación.

Los escudos de presión de tierras disponen de un puesto de mando desde donde se controla la trayectoria de la tuneladora en el proceso de ejecución del túnel y los parámetros que definen su funcionamiento. Entre éstos destaca la presión de tierras en la cámara de excavación, ya que ejerce un efecto muy directo e importante sobre la subsidencia que se produce en la superficie después del paso de la tuneladora, así como un sistema de registro continuo de los principales parámetros de funcionamiento durante la excavación (velocidad de la rueda de corte, empuje, caudales de inyección, cantidades material excavado, presiones en clave. También se lleva un control de las actividades realizadas para completar el ciclo de colocación de un anillo de dovelas y de las incidencias ocurridas.

Por naturaleza las condiciones geológicas en el subsuelo son muy diversas y por lo regular no muestran características ideales para construir un túnel sin problemas, el método de excavación con sistema EPB puede mejorarse enormemente mediante el acondicionamiento del suelo, con la modificación de su plasticidad, la textura y la permeabilidad al agua del suelo mediante la inyección de diversos materiales acondicionadores, como agua, bentonita o espuma. Esto permite lograr buenas tasas de avance incluso en suelos heterogéneos que contienen grava, arena o agua, o en condiciones geológicas inestables.

2.1.1.1. Sistemas de Acondicionamiento

Debido a que el anillo de dovelas se arma dentro del escudo, es necesario que el diámetro exterior del escudo sea mayor que el diámetro externo del anillo de dovelas. Al ir avanzando el escudo, los anillos salen del interior del escudo dejando un espacio entre su superficie externa y el terreno excavado, el espacio está comprendido entre 15 y 20 cm y es inyectado con un mortero de cemento (GAP) con presiones de hasta 10 Kp/cm².

El GAP además del importante papel que tiene en el desarrollo y limitación de asentamientos, en la ejecución de un relleno adecuado, este asegura que se propicie un contacto uniforme entre el terreno y el revestimiento, evitando así distribuciones de cargas irregulares.

El GAP también mantiene al anillo posicionado durante el avance de la máquina y ayuda al mismo a recibir las cargas del back-up, reduce esfuerzos en el anillo como consecuencia de su trabajo longitudinal, reduce las filtraciones y arrastre de material en el caso de fallo de las juntas de estanqueidad y limita la flotación en túneles claramente bajo el nivel freático, como consecuencia de la presión del empuje de Arquímedes. La falta de resistencia en el mortero inyectado podrá ocasionar apertura de juntas o efectos locales, lógicamente la presión de inyección y la velocidad de producción juegan un papel importante en este aspecto (Sánchez S, et al., 2018).

Los escudos tienen en su cola un dispositivo denominado juntas de grasa, construida por tres filas circunferenciales de cepillos de acero, entre los que se inyecta grasa consistente para conseguir la estanqueidad y evitar el paso de la inyección de mortero (GAP) hacia el interior de la máquina. Si las propiedades del suelo no cumplen con las condiciones necesarias, se debe considerar la implementación de un acondicionamiento en el tamaño del grano, contenido de agua, límite líquido, índice de plasticidad o en su consistencia de la pasta para su rezaga.

El acondicionamiento se puede realizar con la adición de bentonita, agua, polímeros o espumas para que el suelo se mantenga lo más estable posible en el frente, la consistencia garantice su transporte y la rezaga deba ser ecológicamente económica.

El acondicionamiento entre el faldón y el terreno es a base de grasa obturante, con características de alta resistencia al agua, bombeable y no debe tener reacciones químicas con el concreto y los sellos de las juntas (Figura 2.4). El empleo de estas TBM sin estos acondicionamientos implicaría tener complicaciones en el proceso de excavación e incrementos de riesgo de colapso del frente.

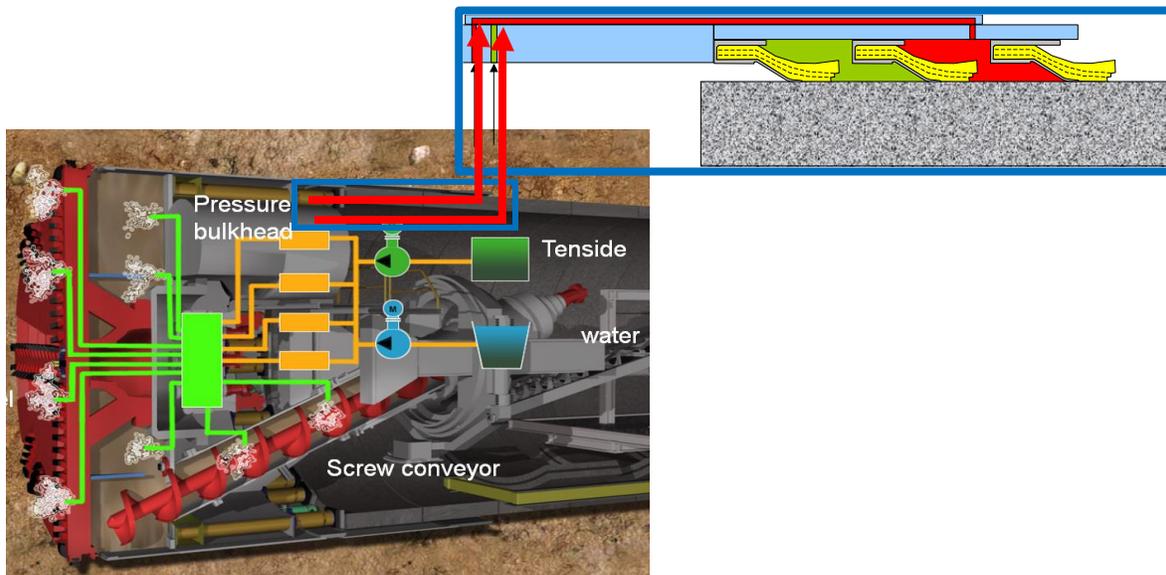


Figura 2.4 Inyección automática de los sistemas de acondicionamiento (Sáenz C, 2016).

Dentro de la variedad de productos químicos que requiere la tuneladora TBM-EPB para su óptimo funcionamiento, la clasificación de estos, está en función de la zona de acción en la máquina tuneladora (tratamiento de terreno, mortero de relleno y grasas de sellado de cola), todos resultan imprescindibles para el óptimo rendimiento, sin embargo, el tratamiento de terreno mediante espumas y polímeros, por ser estos de gran trascendencia y de laboriosa elección, se considera esencial a la hora de excavar un túnel. No tratar correctamente el terreno implica bajos rendimientos de avance y atascos en la cabeza de corte, lo que ocasionaría el paro total de operación de la tuneladora para realizar actividades manuales dentro de la cámara de amasado.

La formación de espuma para un correcto tratamiento conlleva al control de tres elementos básicos como son el agua, el aire y por último la adición del agente espumante compuesto de polímeros orgánicos y tensoactivos. Este componente minimiza la formación de bloques de suelo, mejora la distribución de presiones en la cámara, reduce la permeabilidad en el suelo y disminuye el desgaste en la rueda de corte y el tornillo transportador (Sáenz C, 2016). Las propiedades de la espuma dependen de los siguientes parámetros:

Tasa de Inyección o de Tratamiento (FIR)

Es el volumen total de espuma inyectada en el frente de la excavación, con respecto al volumen de terreno excavado por avance. Los valores de tratamiento dependen de las características geológicas del terreno a excavar. Terrenos con alta pegajosidad requieren un FIR elevado ($\geq 60\%$) y por el contrario terrenos con baja pegajosidad requieren menos espuma por metro cúbico de terreno excavado (Figura 2.5).

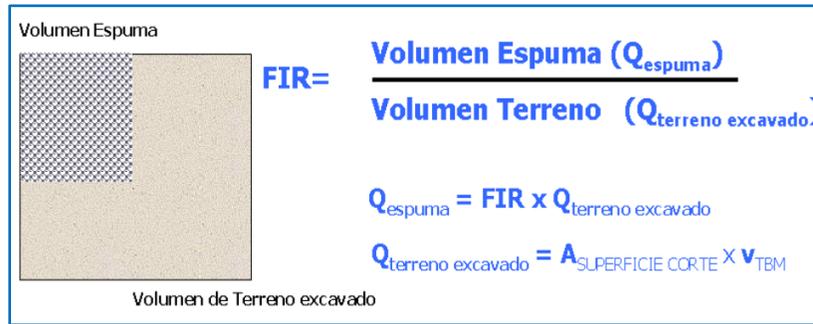


Figura 2.5 Tasa de inyección FIR (MEYCO, 2008).

Tasa de Expansión (FER)

Es la relación de espuma generada a partir de un volumen dado de solución (agua + agente espumante). El contenido de humedad del terreno será un factor clave para la optimización del FER (Figura 2.6).

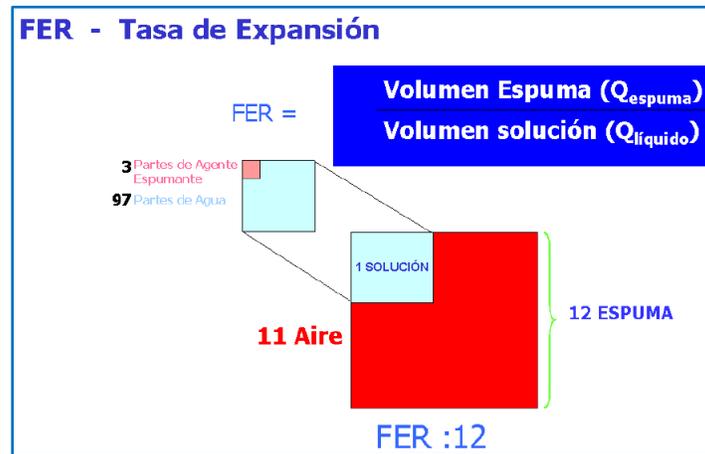


Figura 2.6 Tasa de expansión FER (MEYCO, 2008).

Concentración de Agente Espumante

Volumen de espuma total inyectada al frente de excavación, relacionada con el volumen de terreno excavado por avance, concentración del agente espumante en la espuma (Figura 2.7).

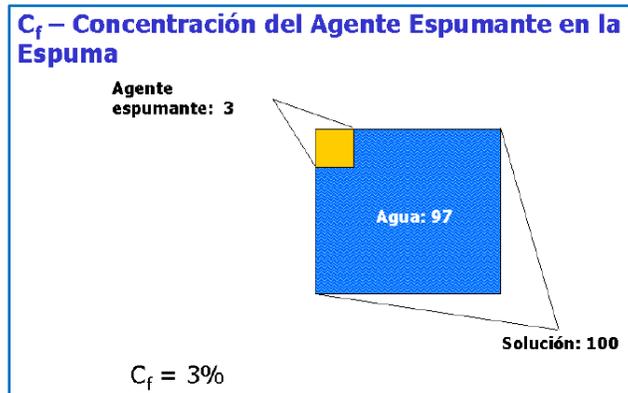


Figura 2.7 Concentración de Agente Espumante (MEYCO, 2008).

El sistema de generación de espuma está provisto de 2 bombas independientes para la inyección de tensoactivo y polímero simultáneamente. El número de generadores de espuma deberá ser el suficiente para el suministro, esto dependerá del diámetro de la tuneladora.

La entrada de inyección del polímero orgánico debe estar conectada antes de la entrada al generador de espuma ya que se dispersa más eficazmente en la espuma. La colocación de los generadores de espuma debe estar lo más cercano al escudo, para evitar la degradación de su calidad y pérdida de presión en las líneas de conducción. (MEYCO, 2008). La espuma se inyecta al frente de la excavación, cámara de amasado y tornillo transportador, en la figura 2.8 se ilustra el sistema de generación de espumas dentro de la tuneladora.

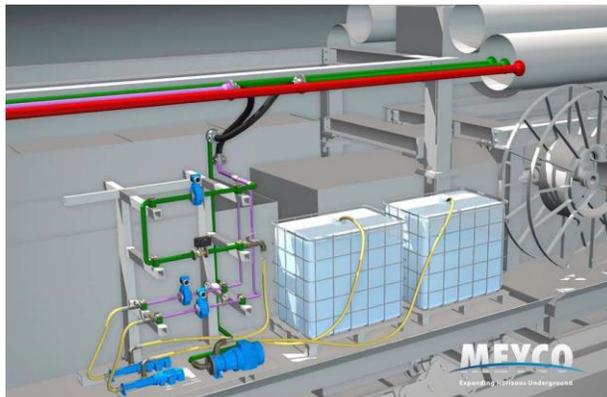


Figura 2.8 Sistema de generación de espuma (MEYCO, 2008).

El tren de arrastre de la TBM está dividido en módulos muy bien acondicionados con las herramientas, insumos y suministros necesarios para la eficiente excavación y avance del escudo. El carro puente se compone de una tolva de descarga al final del tornillo, un sistema de generación de espumas, así como de la grúa y mesa de dovelas.

El carro dos lo compone una bomba de grasas para el faldón, obturación y lubricación de los accionamientos, la cabina de control, el carro de inyección de mortero y las bombas de inyección. El carro tres alberga el tanque y las bombas hidráulicas, el tablero eléctrico de alimentación de equipos, transformadores y el ventilador. Por último, en el carro cuatro está montada la motorización y extensión de la banda, los sistemas de enfriamiento, grúas de materiales y los tableros eléctricos de las mismas, como se muestra en la figura 2.9 (Sáenz C, 2016).

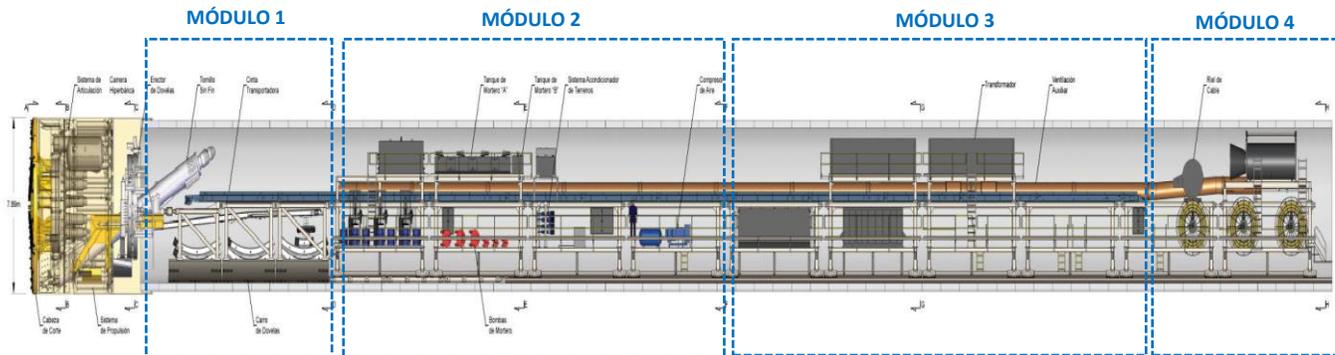


Figura 2.9 Módulos del Tren de trabajo de la Máquina Tunneladora tipo EPB (Varde O, 2018).

La ventaja de un escudo de tierra balanceada es su flexibilidad para mejorar el rango de aplicación de este método, ya que con el tornillo transportador no es posible mantener un tapón de tierra suficiente para retener la presión de soporte en suelos con altas presiones de agua. Sin embargo, este efecto podría controlarse con adecuaciones al escudo por medio de bombas de lodo, convirtiéndose es una máquina tunneladora con método de excavación tipo dual.

El concepto de soporte de presión de tierra balanceada hace que este método se utilice principalmente en suelos blandos y cohesivos de poca permeabilidad. Además, las condiciones geológicas y la presencia de agua subterránea determinarán su aplicación, se puede mejorar el material excavado utilizando el acondicionamiento del suelo, pero los costos aumentan debido a la aplicación de otros agentes como las espumas, ya que implica tener herramientas e insumos adicionales en superficie que, aunque son importantes para la seguridad y el rendimiento de la excavación, su costo es importante.

2.1.2. Escudo de Presión de Lodos SPB

El principio fundamental para el soporte del suelo y el avance del escudo es logrado mediante la igualación de la presión mecanizada ejercida por la cabeza de corte y el lodo dentro de la cámara, contra la presión hidrostática del frente de la excavación (Figura 2.10). Los dientes y el giro de la rueda cortan el suelo, el cual se introduce en la cámara presurizada, donde se mezcla con lodos bentónicos suministrados desde el exterior del escudo, con las propiedades necesarias para la rezaga del material.

Las suspensiones de bentonita han demostrado ser especialmente exitosas cuando sus propiedades como la densidad, viscosidad y contenido de arena se diseñan específicamente para el tipo de suelo excavado, para ello tienen que ser monitoreados continuamente.

La tuneladora avanza por medio de gatos hidráulicos impulsados de forma simultánea con el giro de la rueda de corte, colocando a cada avance un revestimiento definitivo de dovelas. El espacio anular generado por la diferencia entre el diámetro del escudo tomando en cuenta el espesor del faldón y el diámetro exterior de la dovela. Se inyecta inmediatamente una mezcla de cemento, bentonita y agua, para formar un sello entre el terreno y el escudo.

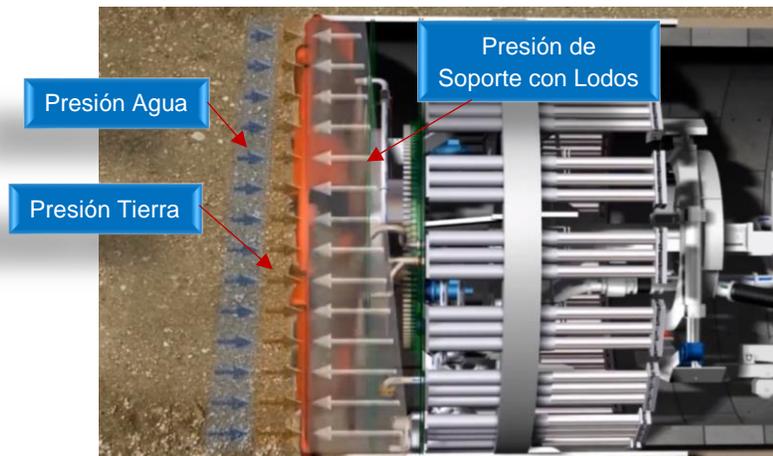


Figura 2.10 Principio de presión de Lodos (Herrenknecht, 2019).

El escudo se conforma por una cabeza de corte, su principal función es estabilizar la excavación por medio de la presión mecánica que ejerce hacia el suelo para cortarlo mediante un desplazamiento horizontal y un giro sobre su propio eje con velocidades registradas en revoluciones por minuto. La rueda está compuesta por compuertas de control donde entra el material de rezaga, herramientas de corte como dientes y discos de corte, cuchillas, rastreles, rippers, sobre cortadores, etc, (dependiendo del tipo de suelo), al igual que dos escotillas de acceso para la inspección y mantenimiento de las herramientas. El elemento fundamental que hace funcionar la rueda de corte es su transmisión con motores eléctricos, la función principal es dar el torque necesario para que gire con la velocidad necesaria y realice su función.

La cámara es el espacio presurizado entre la rueda de corte y el mamparo, en ella se equilibra la presión hidrostática del suelo con la inyección de lodos, el cual se suministra por bombeo desde la superficie. Los gatos de empuje brindan el avance de la tuneladora, apoyándose en el anillo de dovelas, los gatos se pueden operar de manera independiente para conducir y maniobrar el escudo. Otro elemento importante es el anillo erector, encargado de la colocación de las dovelas, esta herramienta se desliza y gira 330 grados para tomar cada dovela y colocarla, su operación es a control remoto (Figura 2.11).

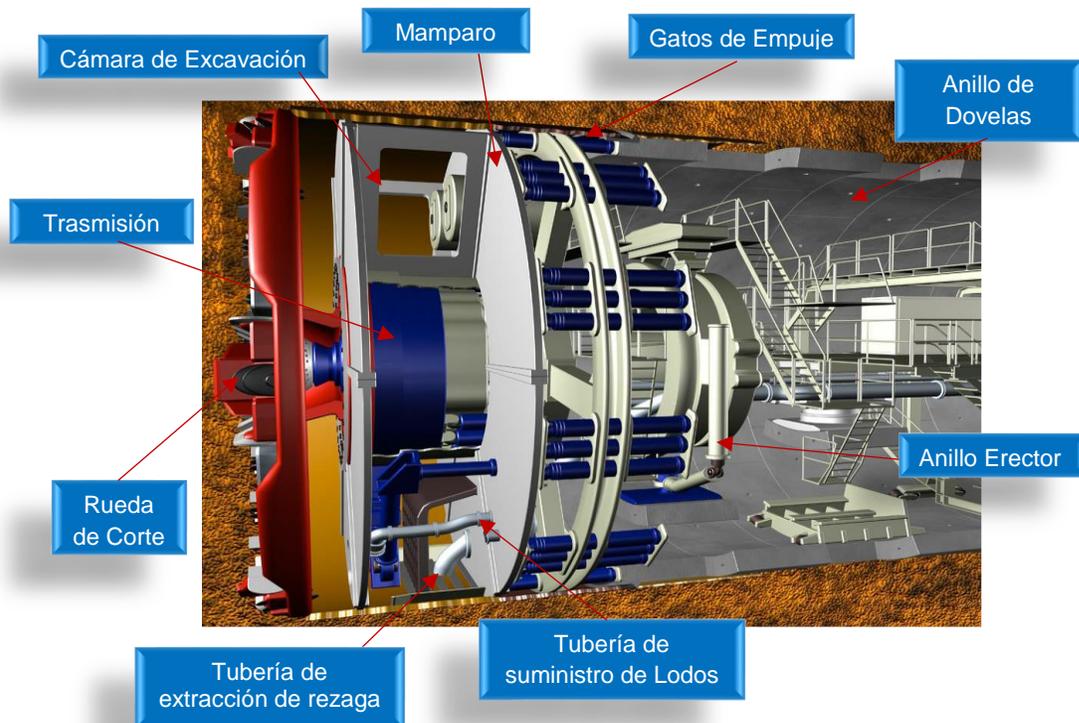


Figura 2.11 Componentes principales de un escudo de Presión de Lodos SPB (Varde O, 2018).

Después del cuerpo del escudo encontramos el tren de equipamiento, donde van instalados los equipos principales y necesarios para la operación de la tuneladora, el tren consta de cuatro módulos y una unidad de tubería telescópica que permite al escudo avanzar hasta 6 metros sin tener que instalar tubería rígida. El módulo 1 está formado por la cabina del operador donde se operan los sistemas de la rueda cortadora, gatos de empuje, las compuertas de control, las unidades de energía hidráulica y lubricación, así como los parámetros necesarios para la manipulación del escudo. También cuenta con un poliplasto montado en la trabe carril para llevar las dovelas al anillo erector.

El módulo 2 está integrado por la unidad de energía hidráulica que alimenta a los gatos de empuje y de la rueda de corte, al anillo erector y los gatos de las compuertas. El gabinete de circuitos eléctricos suministra energía a las unidades hidráulicas, a las bombas de lubricación, motores de la transmisión, al compresor de aire y al tablero de operación.

En el módulo 3 está alojada la unidad de derivación de lodos o by-pass para controlar el suministro de lodos en la cámara, las válvulas de compresión, y la unidad neumática dotada de un compresor de aire para operar las válvulas de compresión del sistema de circulación de lodos (Sáenz C., 2019). En el módulo 4 se halla la bomba de extracción de lodos (Figura 2.12).

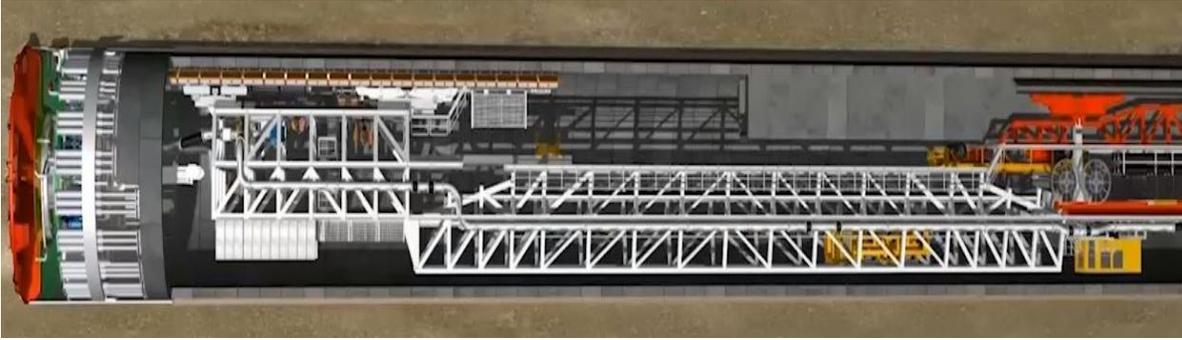


Figura 2.12 Componentes principales del tren del equipo de la tuneladora (Herrenknecht, 2019).

2.1.2.1. Sistema de Circulación de Lodos

Los objetivos primordiales de los lodos son: a) darle un soporte al frente de la excavación con el equilibrio de presiones al combinarse con el material retenido en la cámara y b) rezagar el material que ha sido cortado mediante el sistema de circulación de lodos.

Consta de un puesto de control central en la superficie, desde este punto se opera el sistema de lodos con los parámetros necesarios que el escudo vaya requiriendo y registrando por medio de sensores; las componentes principales de este sistema (Sáenz C, 2016), son las siguientes:

- Bomba centrífuga de suministro de lodos.
- Bomba centrífuga de extracción, por lo regular instalada en el módulo 4.
- Bombas de traspaleo, instaladas en el túnel cada 400 metros, para obtener la potencia necesaria para la extracción del lodo.
- Medidores de flujo que registran las velocidades de los lodos, medidores de densidad para ajustar su tratamiento en la planta manteniéndolos en los rangos de operación.
- Válvulas de compresión y *by-pass* para controlar el suministro y extracción de los lodos mediante la circulación frontal y circulación de derivación.
- Unidad neumática para proporcionar energía a las válvulas de compresión y la unidad telescópica para el avance del escudo (6 metros) sin necesidad de instalar más tubería

Las capacidades de las bombas y su separación dependen de las características del proyecto, diámetro de la máquina tuneladora y longitud del túnel. En la operación del sistema, las bombas se activan en modo de circulación de derivación, es decir, sin pasar por las tuberías que van a la cámara, cerrando las válvulas de suministro y extracción, y manteniendo abierta la válvula de retorno con el fin de igualar las densidades en las tuberías de entrada y salida.

Antes de iniciar con la excavación, las bombas se activan en modo de circulación frontal para que el flujo circule hasta la cámara presurizada y se ajustan las velocidades para igualar los flujos en todo el sistema. Del mismo modo, si se deja de excavar o hay un paro prolongado, el sistema se regresa a modo de circulación de derivación para igualar las densidades en todas las tuberías, esto se logra parando las bombas (Figura 2.13).

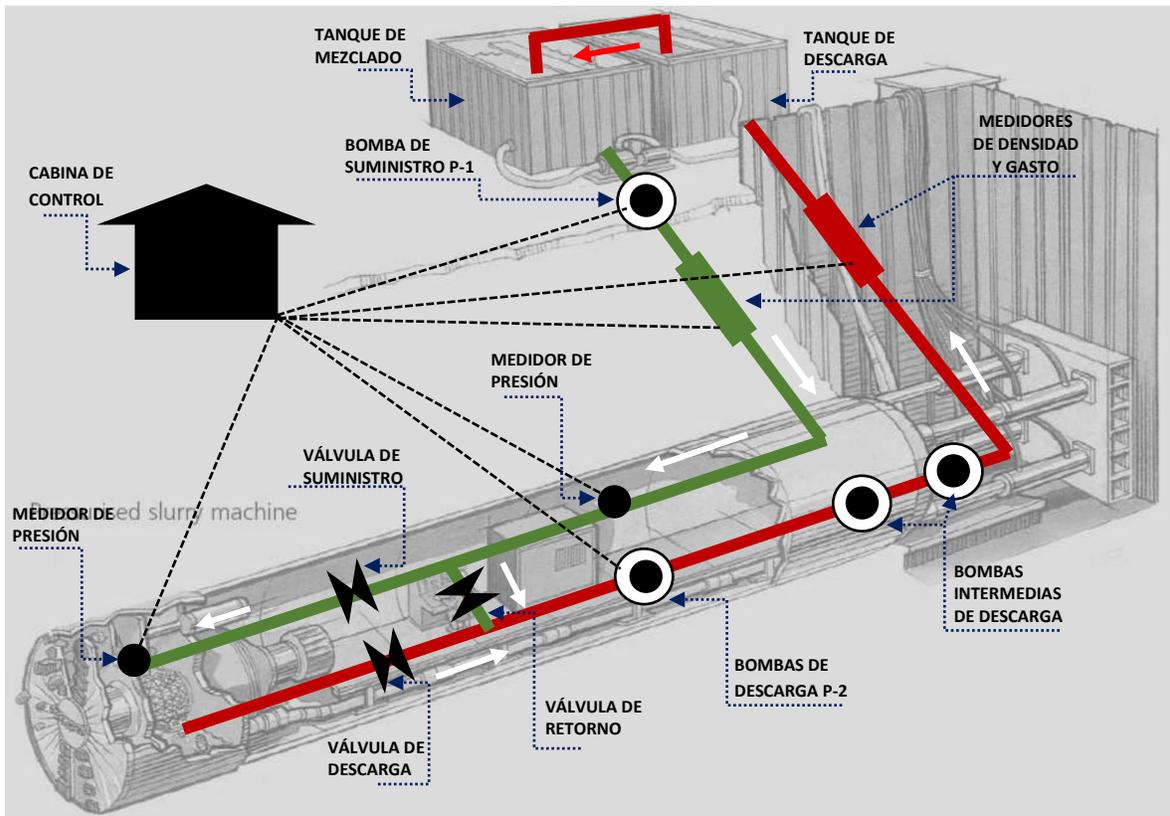


Figura 2.13 Sistema de circulación de Lodos.

2.1.3. Escudo de Presión de Lodos y Aire Comprimido MIXSHIELD

Esta máquina trabaja en suelos inestables y heterogéneos con gravas, arenas o boleos, con alta permeabilidad y presiones de agua. Al igual que el escudo SPB, el Mixshield es un escudo de frente presurizado y estabilizado con lodos. La diferencia es que este trabaja con un colchón o burbuja de aire comprimido para mantener la presión del frente de la excavación con el flujo suministrado (Figura 2.14). Este principio ayuda a que el material se mantenga en la cámara, se mezcle con los lodos y sea extraído por las tuberías para su transporte a la superficie. Regula la presión en el frente de manera rápida, ya que permite reaccionar ágilmente ante las variaciones de presión, el sistema es más preciso que los slurry shields.

La contrapresión necesaria en la cara del túnel se suministra utilizando este colchón de aire comprimible en la sección superior. La comunicación entre las dos cámaras de este escudo tiene lugar a través de compuertas. Las altas presiones que se puedan generar son trabajadas con alta seguridad debido a su circuito cerrado de lodos bentoníticos, incluso se inyecta una capa a presión de lodo entre la máquina y el suelo frontal y perimetral.

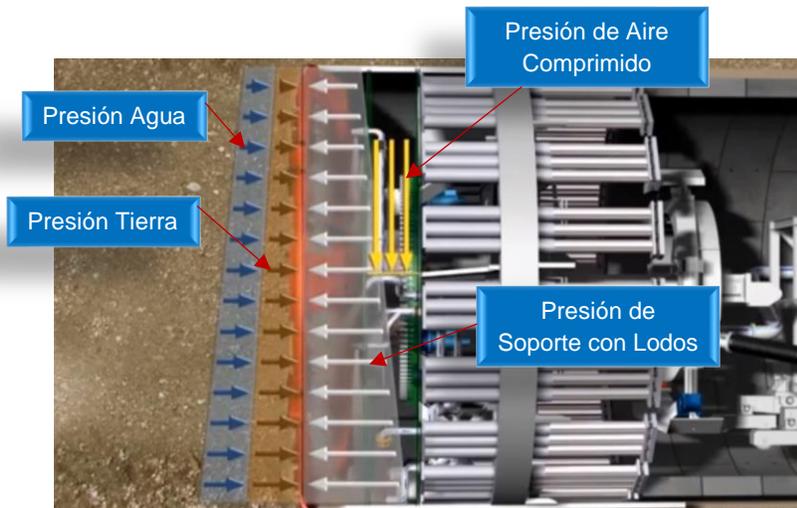


Figura 2.14 Principio de presión de Lodos y Aire Comprimido (Saingre G, 2017).

En la parte superior de la mampara se encuentran las cámaras hiperbáricas del personal que hará las intervenciones en la cámara presurizada o rueda de corte, estos trabajos se realizan para el mantenimiento o cambio de herramientas de corte. El personal tiene que ser presurizado para soportar las altas presiones que se generan en el frente de la excavación y poder trabajar con seguridad.

En la parte central de la mampara se localiza la chumacera donde se introduce el eje que va de la transmisión a la rueda de corte, así como a los elementos estructurales que soportan a los motores eléctricos y gatos de empuje (Sáenz C, 2016).

En la parte inferior de este sistema se encuentran las entradas de las tuberías de inyección de bentonita y extracción de rezaga con rejillas, estas últimas impiden el taponamiento de la tubería de salida con los fragmentos de material cortado por las trituradoras de mandíbula o las trituradoras de tambor con agitadores (Figura 2.15). Estas trituradoras se colocan frente a la pantalla de admisión, el tamaño de los fragmentos o boleos triturados varían según el diseño de la trituradora y el diámetro del escudo.

La pantalla de admisión (rejillas) localizadas frente a la entrada de succión de la línea de lodo, protege la máquina contra los tamaños de chips que pueden causar problemas. La rejilla retiene los chips hasta que la trituradora los haya fragmentado lo suficiente. Si existen suelos cohesivos o de grano fino, se instalan trituradoras de tambor con agitadores para facilitar la extracción durante el proceso.

En el espacio existente entre la mampara y la rueda de corte se alojan dos cámaras, la primera o frontal está completamente llena de material para hacerle soporte al terreno y la segunda parcialmente llena de lodo, complementada con el aire comprimido en la parte superior para regular la presión necesaria de soporte y avance.

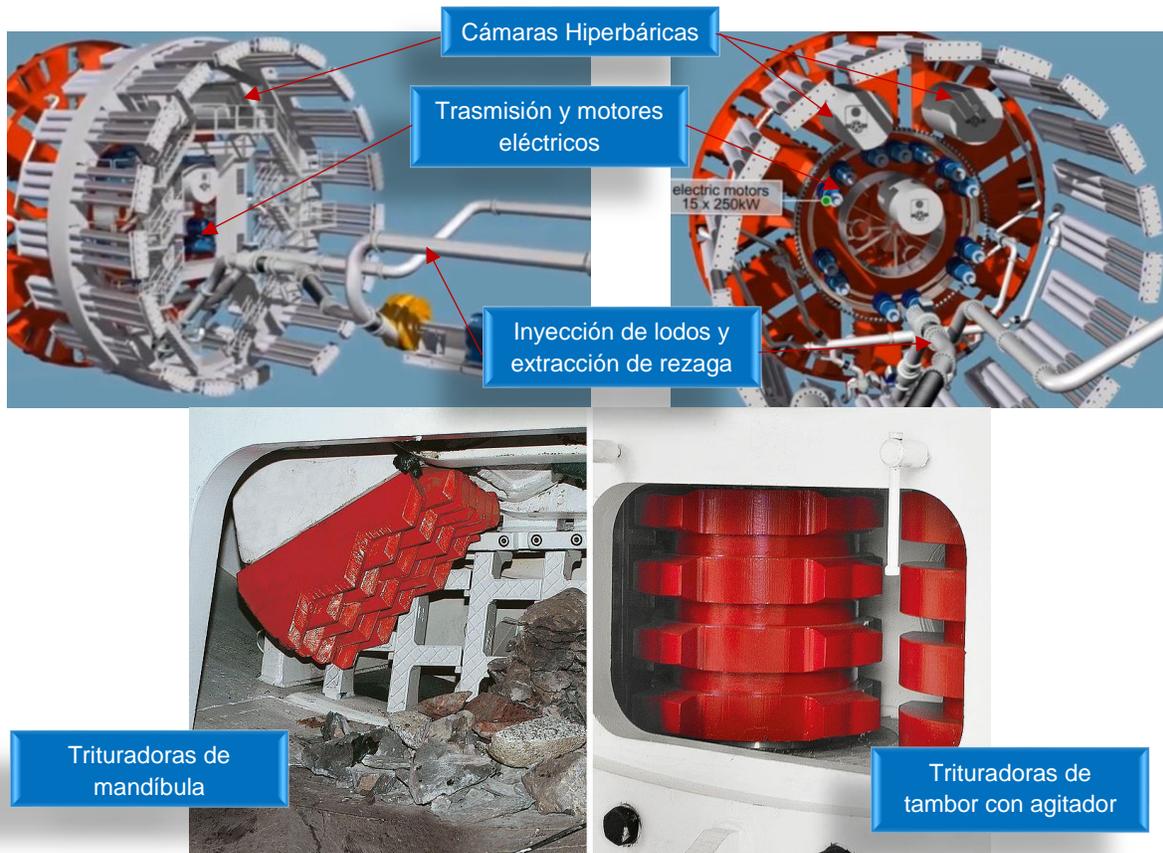


Figura 2.15 Componentes principales localizadas en el interior y exterior de la mampara (Herrenknecht, 2019).

El traslado del aire comprimido es por medio de un ducto instalado por todo lo largo del tren y del túnel excavado, pasando por la lumbrera hasta llegar a la superficie donde se encuentra instalado el equipo de aire comprimido. La conducción del lodo bentónico y la rezaga se realiza igual que un SPB, el sistema de manejo de lodos contempla instalaciones adicionales para darle varios usos, con las características necesarias para la inyección y extracción del flujo, se emplea una planta reemplazadora que separa el material contaminado por medio de cribas y sedimentación, este proceso se describió en el método de tuneleo anterior.

Como en las TBM anteriormente mencionadas, en el interior del faldón se encuentra el anillo erector que ensambla las dovelas, el sistema de inyección del espacio anular homogeniza el espacio entre el escudo y el terreno conforme avanza la máquina y los cepillos de alambre colocados en todo el contorno interior del faldón evitan el paso del material de inyección o del agua al interior de la máquina por medio de la inyección de grasa obturante, las componentes principales del escudo Mixshield se muestran en la figura 2.16.

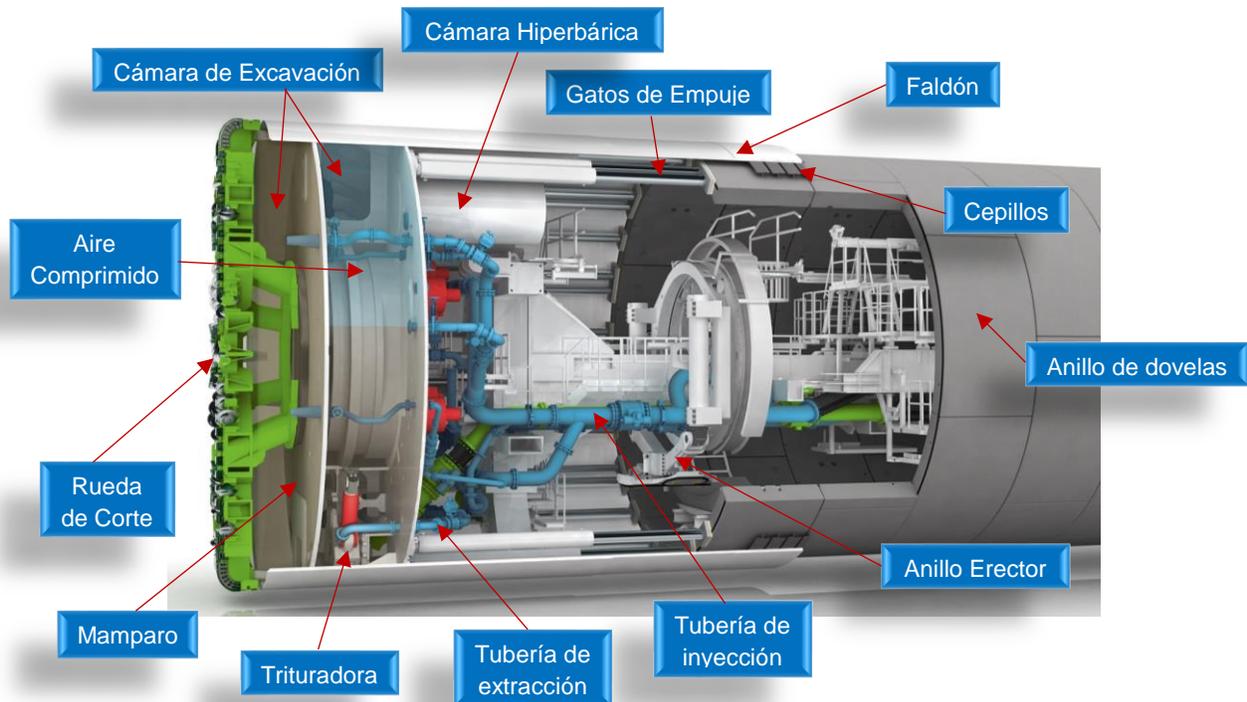


Figura 2.16 Componentes principales de un escudo Mixshield (Herrenknecht, 2019).

La obstrucción en la rueda de corte y en la cámara de excavación aumenta el desgaste de las herramientas y reduce la velocidad de avance. Para optimizar el flujo de material excavado, el diseño de la cabeza de corte debe ser acorde al tipo de suelo y la velocidad del flujo del lodo es constante mediante la optimización de la alimentación hidráulica y el esquema de transporte por medio de las tuberías separadas con boquillas ajustables. El buen funcionamiento del flujo de la rezaga también depende del diseño de la cámara de excavación, del borde liso del escudo y la superficie de contacto del mamparo (Figura 2.17).

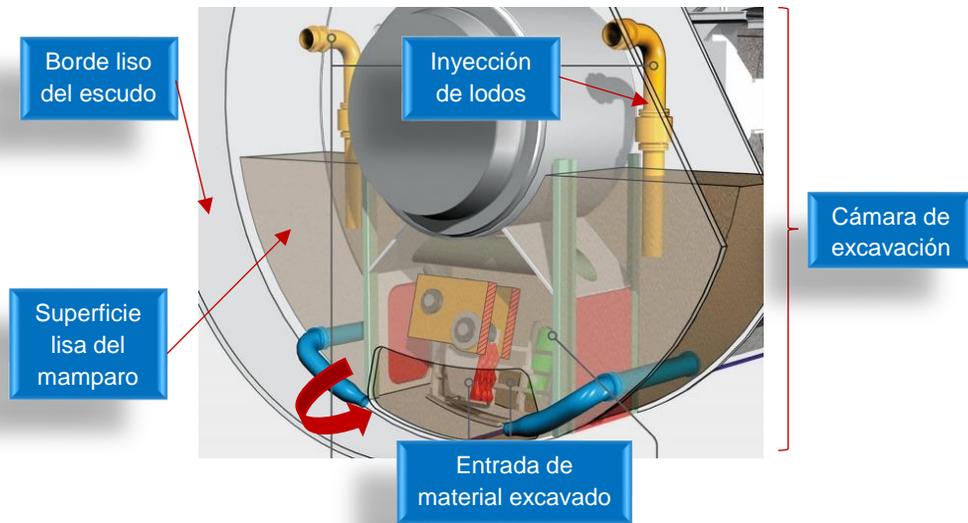


Figura 2.17 Cámara presurizada de un escudo (Herrenknecht, 2019).

Durante el proceso de tuneleo, la rueda de corte, las herramientas de excavación y otros componentes deben controlarse, mantenerse o limpiarse; eliminando las obstrucciones generadas por los materiales excavados. Para ello, se realizan intervenciones por medio de las cámaras hiperbáricas de trabajo, la excavación se reduce parcialmente mediante la introducción de aire comprimido, lo que permite trabajar en la cámara con seguridad. El personal de mantenimiento ingresa a través de una esclusa, si este trabajo se ejecuta en condiciones de aire comprimido lo realizarán buzos profesionales.

Las intervenciones hiperbáricas requieren mucho tiempo para el mantenimiento de herramientas de excavación. Los brazos principales de la rueda de corte están contruidos de tal manera que se puede acceder en condiciones atmosféricas. Las herramientas de excavación desgastadas se pueden reemplazar desde el interior de la rueda de corte sin reducir el nivel de lodos (Figura 2.18).

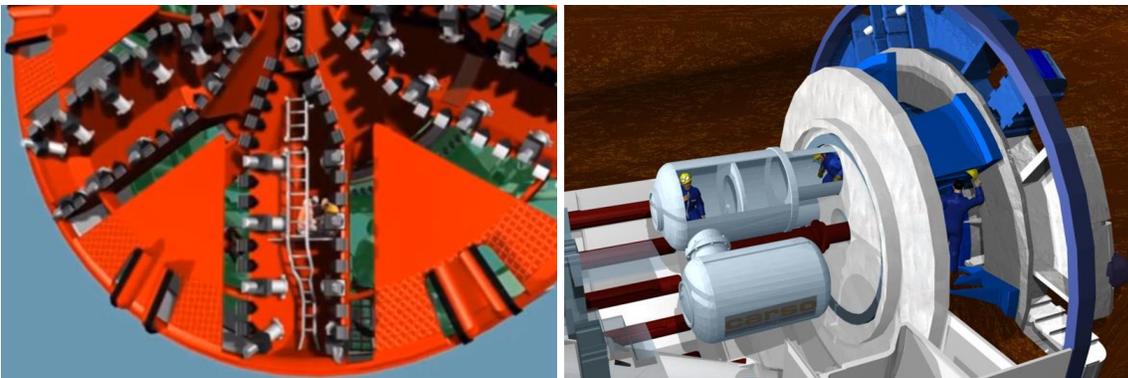


Figura 2.18 Intervenciones a la cámara y rueda de corte (Herrenknecht, 2019).

Los escudos Mixshield se especializan en túneles con condiciones complejas de terreno, especialmente en suelos inestables con altas presiones de agua. La facilidad en la excavación del frente es debido al soporte de la cara del túnel, mediante la inyección de aire controlado automáticamente para equilibrar las presiones y volúmenes de lodo encontrados en la cámara presurizada. El método garantiza la seguridad necesaria para minimizar en gran medida el riesgo de asentamientos o bufamientos en la superficie si el túnel tiene poca cobertura.

2.1.4. Escudo de Frente Abierto con Zapatas de Apoyo (Gripper TBM)

La tuneladora Gripper TBM o también llamada de viga principal, trabaja en condiciones estables de roca muy competente ya que el frente de excavación no es presurizado. La parte delantera de la máquina la conforma la cabeza de corte donde los cortadores de disco se sitúan en posiciones concretas para desarrollar el corte. Mientras gira la cabeza, el sistema de cilindros de empuje diagonal presiona a los cortadores contra la roca para que se fracture y se formen chips desprendidos del frente de la excavación.

El escudo está equipado principalmente con una cabeza de corte rotativa diseñada con cortadores de gran diámetro y alta capacidad de carga para penetrar la roca, el rodamiento y corona principal están diseñados especialmente para altas solicitaciones durante la excavación. Los grippers flotantes, adosados a gatos hidráulicos diagonales permiten el guiado y avance de la máquina y el sistema de guiado por láser mantiene la precisión en la traza del túnel. La cubierta del escudo sella la cavidad de la excavación junto con la cabeza de corte, la cinta transportadora utilizada para el traslado de la rezaga desde la cabeza a la parte trasera y la viga principal que es el cuerpo longitudinal de la tuneladora (Figura 19).

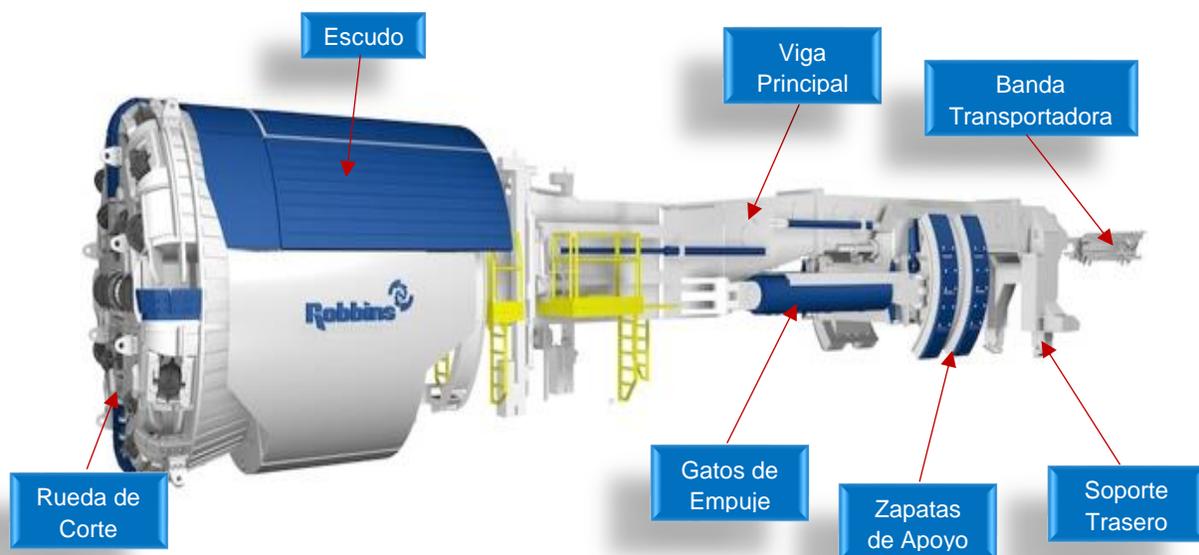


Figura 2.19 Componentes principales de un Gripper TBM (The Robbins Company, 2018).

El sistema de zapatas flotantes reacciona contra las paredes de la roca, la máquina puede guiarse de modo continuo cuando se ancla a las paredes del túnel y reacciona al empuje de los gatos hacia la perforación. Al final de la carrera de perforación se extienden las patas traseras de la tuneladora hasta el suelo y se retraen los cilindros de empuje. La retracción de los cilindros provoca que el sistema de anclaje (zapatas) se sitúen en posición para el siguiente ciclo de perforación, se anclan de nuevo las zapatas, se retraen las patas traseras y la perforación comienza de nuevo (Figura 2.20). La viga principal se mueve vertical y horizontalmente utilizando los cilindros hidráulicos en el área de la unidad de empotramiento (zapatas). Esto permite un control y posicionamiento preciso de la TBM.

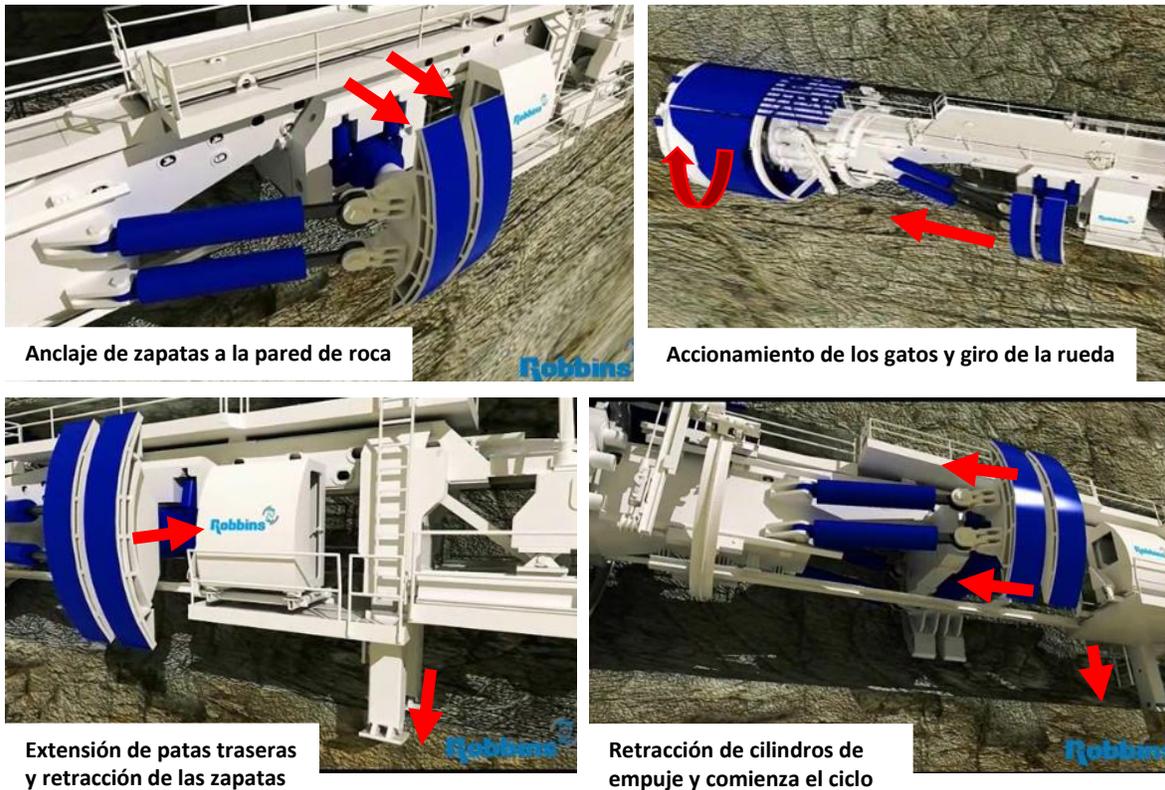


Figura 2.20 Funcionamiento de avance de un Gripper TBM (The Robbins Company, 2018).

Debido al movimiento de rueda de corte se forman chips que se desprenden del macizo rocoso, es de utilidad ocupar agua para enfriar las herramientas de corte y reducir la formación de polvo. Los canchales habilitados en el cabeza toman el material excavado, mismo que se desliza hacia el centro de la máquina a través de rampas o cucharones, el material cae a través del anillo en forma de embudo sobre la tolva de la máquina. A partir de ahí, los fragmentos de roca se trasladan a través de bandas transportadoras o vehículos de transporte adicionales y se retiran del túnel hasta la superficie (Figura 2.21).



Figura 2.21 Sistema de extracción de rezaga (Herrenknecht, 2019).

El diseño abierto de la tuneladora permite el acceso rápido a la parte trasera de la cabeza de corte y a todo el tren de arrastre, para la instalación de medidas de sostenimiento del terreno como anclas, marcos metálicos y concreto lanzado (Figura 2.22). Debido a las características geológicas y mecánicas del terreno, hace que este método de excavación no requiera de un revestimiento como dovelas prefabricadas, con ello se reducen los tiempos en el ciclo de la excavación.

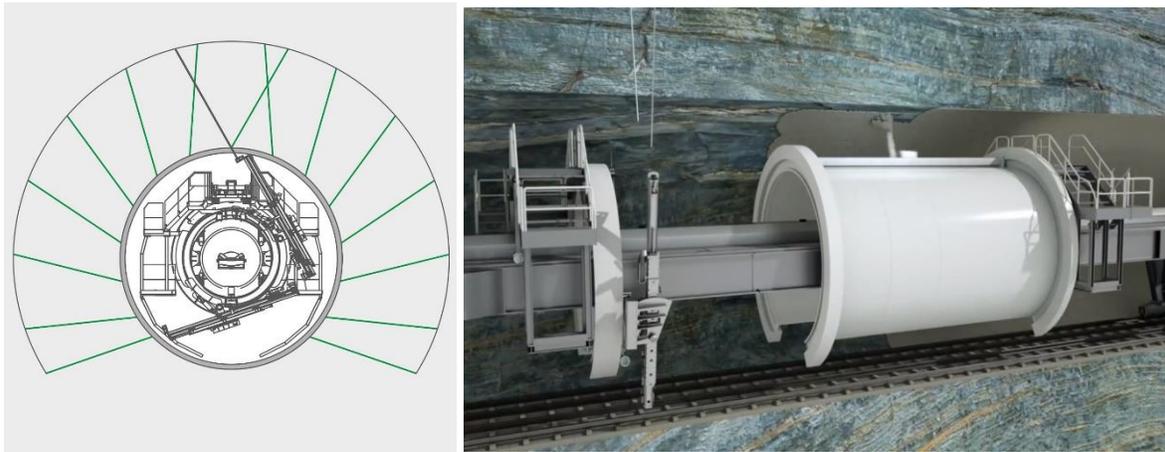


Figura 2.22 Colocación de sistemas de sostenimiento (Herrenknecht, 2019).

También permite el acondicionamiento del terreno en el frente de la excavación con equipos de perforación adicionales. El agua filtrada por el fracturamiento de la roca se bombea a través de un sistema de drenaje integrado a la viga principal. Todas las instalaciones de suministro necesarias están en el tren de arrastre de la tuneladora.

Una ventaja a comparación de los demás escudos es su flexibilidad de movimiento con ayuda de los grippers, la máquina puede incluso retirarse por completo y acceder directamente a la parte frontal del cabezal de corte sin tener algún riesgo de inestabilidad.

2.1.5. Tuneladoras de Escudo Simple

Este escudo excava en roca fracturada o suelos duros de baja permeabilidad, utiliza como revestimiento del túnel dovelas prefabricadas. El sistema de excavación es similar a las máquinas sin blindaje, pero los segmentos prefabricados proporcionan el soporte para el empuje de avance y garantizan la protección ante desprendimientos de roca.

Las características estándar comunes del escudo simple son la cabeza de corte diseñada con una distribución específica de discos cortadores, que pueden montarse y desmontarse internamente para sustituirlos con mayor seguridad en condiciones inestables del terreno y aperturas o cangilones integradas en la cabeza, dotadas de barras de protección para evitar la entrada de rocas de gran tamaño. Los cilindros de empuje son de alta velocidad de retracción y un colocador de dovelas simple o doble, según el diámetro (Figura 2.23).



Figura 2.23 Tuneladora de escudo simple (The Robbins Company, 2018).

Está equipado con un escudo protector monolítico o articulado que facilita la formación de curvas, la cabeza de corte plana está equipada con discos de corte que minimizan las perturbaciones en el frente a la hora de excavar y evita el desprendimiento de grandes bloques. El sistema de empuje consiste en una serie de gatos hidráulicos que se apoyan contra el anillo de dovelas (Guglielmetti V, 2007).

El ciclo de trabajo comienza con la excavación de una longitud equivalente a la carrera de los gatos de empuje, el montaje de las dovelas es por medio del anillo erector, la inyección del espacio anular y monitoreo de los parámetros son necesarios para el avance de la máquina.

La transferencia de esfuerzo por el empuje de los cortadores a la roca crea fracturas en el frente, desprendiéndose pequeñas lascas o chips que se introducen por la rueda de corte. La excavación y la colocación del revestimiento del túnel se llevan a cabo de forma secuencial y no al mismo tiempo. Para guiar la máquina, los cilindros orientan la cabeza de corte articulada en la dirección deseada para evitar algún tipo de atrapamiento o desnivel en el eje de proyecto.

Las TBM tienen un diámetro de excavación más grande que el faldón del escudo, este sobrecorte permite controlar la máquina y la protege contra el atasco en la roca. Para ello se utilizan accionamientos instalados firmemente con cilindros de dirección o accionamientos móviles, permitiendo que la rueda de corte se pueda desplazar hacia atrás para permitir el acceso directo a la cara del túnel.

Para evitar el rompimiento o desgaste de los discos se enfrían por medio de chorros de agua, los cucharones instalados detrás de la rueda de corte recogen el material excavado y por gravedad se desliza hacia el centro de la máquina a través de canales de rezaga que caen a la tolba y ser trasladados por medio de una banda transportadora hacia la superficie (Figura 2.24).

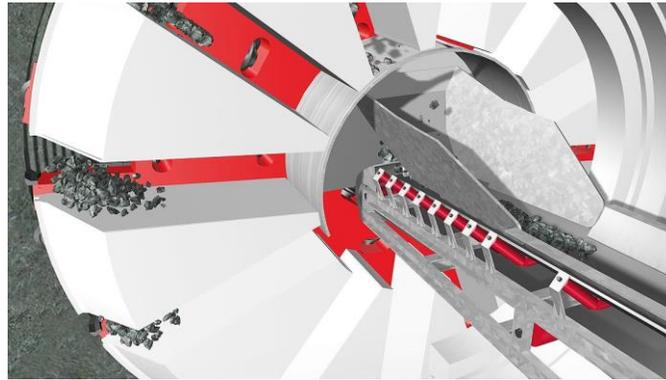


Figura 2.24 Extracción de rezaga (Herrenknecht, 2019).

El acondicionamiento del suelo o roca fracturada mejora la capacidad de excavación de la máquina, para este propósito se realizan perforaciones de inyección a través de la cabeza de corte y en la parte frontal del escudo. Los sistemas de drenaje drenan el agua entrante de manera controlada por medio de bombas hacia la superficie (Figura 2.25).

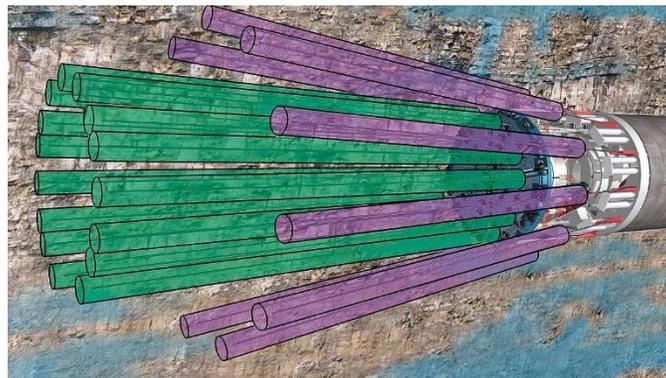


Figura 2.25 Sistema de inyección y mejoramiento del terreno (Herrenknecht, 2019).

2.1.6. Tuneladoras de Doble Escudo

Al igual que el escudo simple, el escudo doble trabaja en modo abierto sobre roca fracturada de baja resistencia y poca permeabilidad. El principio de funcionamiento es similar, ofreciendo la posibilidad de un ciclo de trabajo continuo debido al sistema de reacción de empuje longitudinal múltiple de secciones telescópicas contra el sistema de soporte en el suelo (Guglielmetti V, 2007). Esta máquina es más versátil que el escudo simple, ya que puede avanzar incluso sin antes haber instalado el revestimiento del túnel durante la excavación, dependiendo de las condiciones de estabilidad del terreno, asegura ciclos de trabajo cortos con altas tasas y velocidad en el avance.

Una tuneladora de Doble Escudo consta de una cabeza de corte rotativa equipada con herramientas de corte, unida en su soporte a un escudo telescópico, un escudo *gripper* y un escudo de cola. El sistema de empuje doble consiste en una serie de gatos longitudinales y los *grippers* apoyados en las paredes del túnel para soportar el empuje de gatos delanteros, y el colocador de dovelas (anillo simple o doble), según el diámetro de la máquina (Figura 2.26).

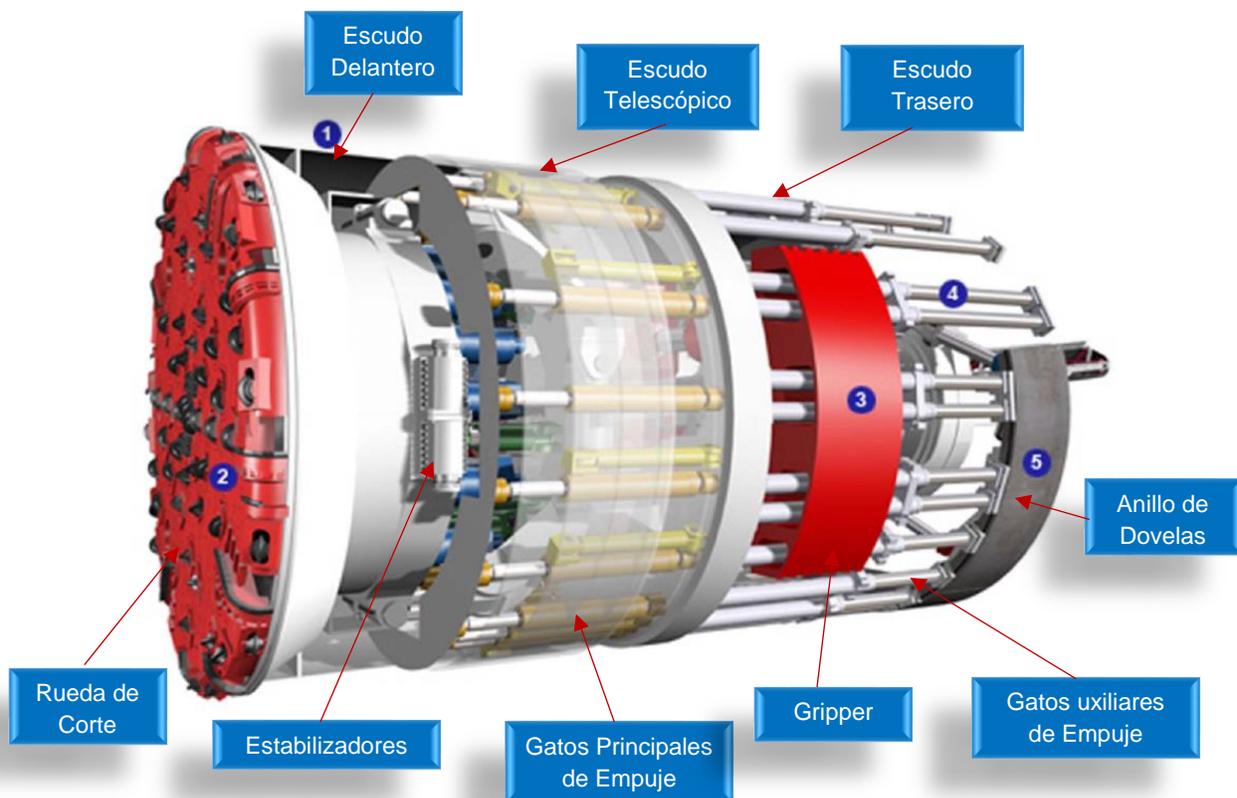


Figura 2.26 Componentes principales de un Escudo Doble (Labouse V, 2015).

En el modo de funcionamiento, las zapatas de anclaje se apoyan sobre el terreno para reaccionar contra los empujes de perforación de los cilindros hidráulicos principales, estos se extienden para que la cabeza de corte avance hacia adelante. La cabeza rotativa corta la roca, mientras el escudo telescópico se despliega durante el avance de la perforación.

El escudo *Gripper* permanece empotrado en la roca durante el avance del escudo telescópico, sobre él va montado un colocador de dovelas que permite instalar los anillos prefabricados mientras la máquina continúa excavando, las dovelas se colocan bajo el escudo de cola. Cuando se termina la carrera de los gatos principales y se termina de colocar el anillo prefabricado, la rueda de corte deja de girar para que los *grippers* se retraigan y avance el escudo *Gripper* hacia adelante debido al cierre de los gatos principales y la apertura de los gatos traseros (Figura 2.27).

El ciclo se repite con el empotramiento de los *grippers* en la roca. La característica principal de este método de excavación es la capacidad simultánea de instalación del revestimiento del túnel y la perforación, lo que le permite alcanzar rendimientos de avance muy altos.

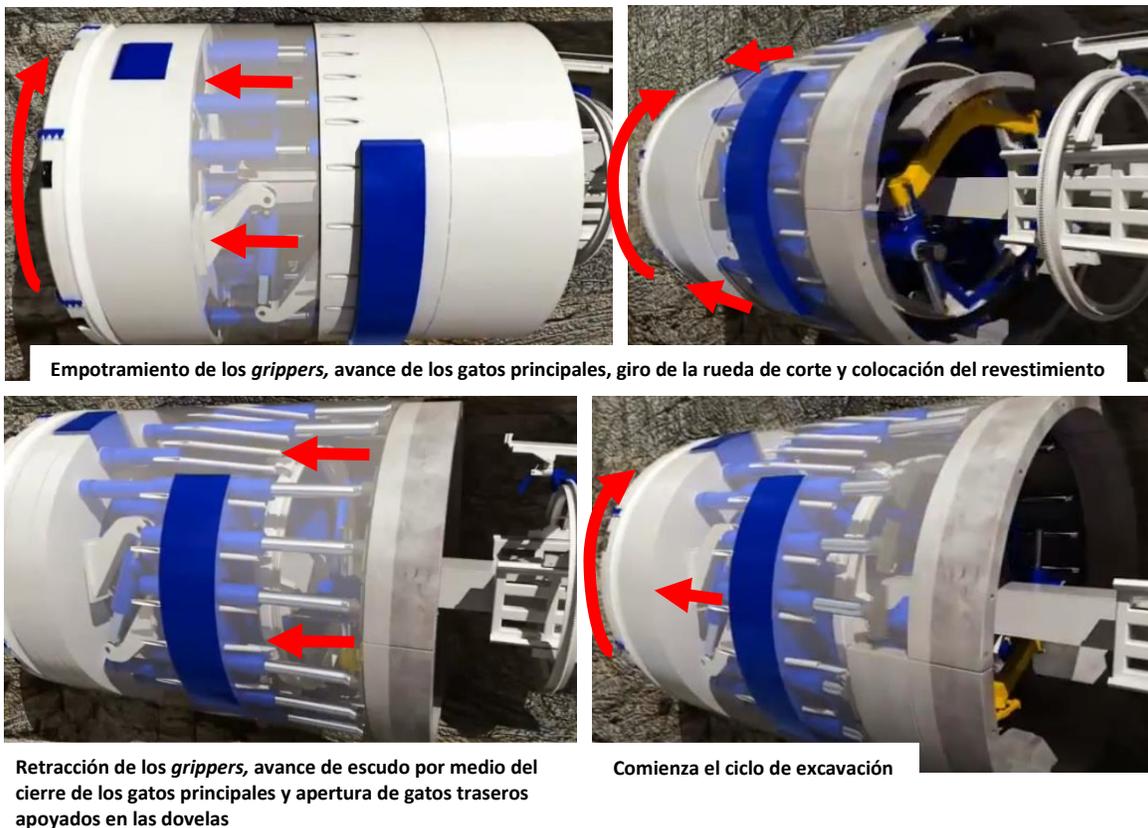


Figura 2.27 Funcionamiento de avance de un Escudo Doble (The Robbins Company, 2018).

Si el terreno está muy fracturado y la resistencia no es la adecuada para empotrar los *grippers* en el túnel, la máquina tiene la posibilidad de trabajar como escudo simple, mediante los cilindros de empuje auxiliares situados en la parte trasera del escudo, transfiriendo los esfuerzos al último anillo de dovelas. En este modo de trabajo no es posible construir el anillo de dovelas simultáneamente al avance de la máquina, por lo que ambas operaciones deben llevarse a cabo de manera alternada.

Las TBM de doble escudo al ser máquinas largas existe el riesgo de que se atasquen, la solución es darles un desplazamiento vertical en los ejes longitudinales del cabezal de corte. La roca triturada del material excavado bloquea la articulación telescópica del escudo y el espacio anular, esto hace difícil empujar el avance hacia adelante. El escudo telescópico se puede mover de forma independiente usando cilindros de desplazamiento adicionales para proporcionar acceso a la pared del túnel durante los trabajos de limpieza (Figura 2.28).

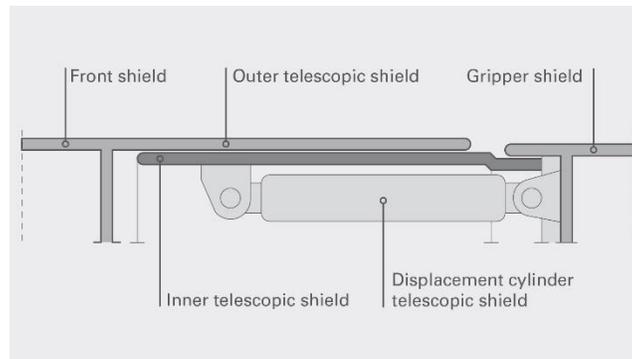


Figura 2.28 Cilindros adicionales de desplazamiento (Herrenknecht, 2019).

El control del túnel se realiza directamente por los cilindros y una articulación o cilindros de caja de torsión que ayudan a la TBM. Estos últimos proporcionan un desplazamiento continuo horizontal y vertical del accionamiento. De tal forma que la cabeza de corte se pueda dirigir con precisión en todas las direcciones e incluso puede producir un corte local (Figura 2.29).

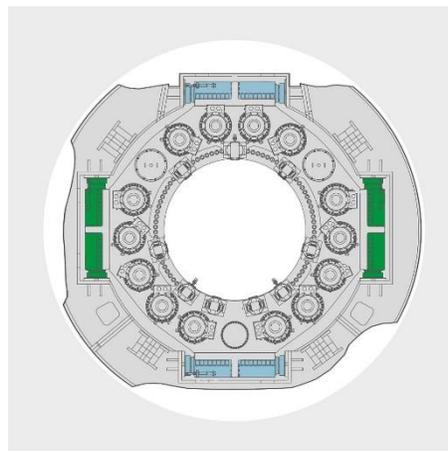


Figura 2.29 Articulación con desplazamiento horizontal y vertical (Herrenknecht, 2019).

2.1.7. Tuneladoras Multimodo

Utilizadas para suelos heterogéneos o mixtos, capaz de soportar altas permeabilidades y condiciones de cambios en la geología del terreno, garantizando la seguridad y flexibilidad óptima durante todo el proceso de tunelización. Estas máquinas están diseñadas para tener varias modalidades en la forma de excavar y de colocar el sostenimiento (Figura 2.30).

En los túneles mecanizados se opta por utilizar métodos de excavación abierta o presurizada, cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas dependiendo de la geología del terreno. El concepto básico de este escudo es intercalar los tipos de soporte de frente: presión de tierra balanceada, presión con lodos y el modo abierto dentro de la alineación de la misma máquina, mediante la conversión de las diferentes herramientas necesarias para cada método. La TBM multimodo, dependiendo de las condiciones geológicas en el frente, va cambiando y modificando sus componentes individuales en tiempos relativamente cortos y a un costo relativamente bajo. Sin embargo, su diseño técnico es considerablemente más complejo.

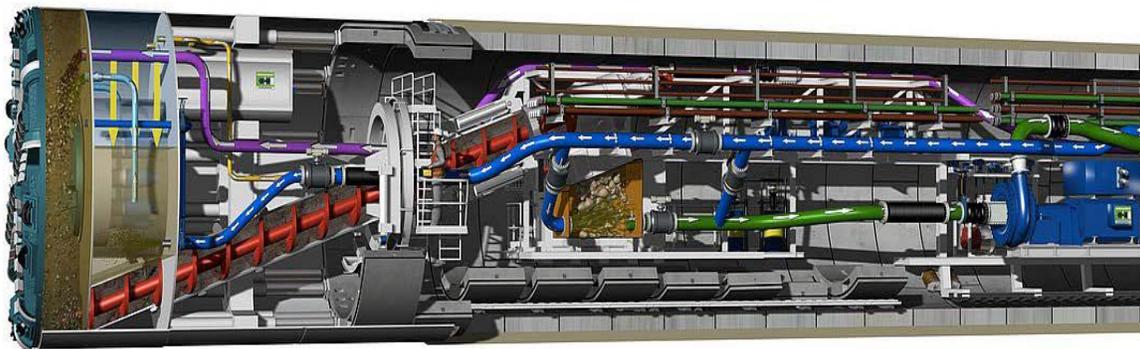


Figura 2.30 TMB Multimodo para condiciones geológicas cambiantes (Nicholas P, 2006).

Existen varios tipos de combinaciones y su elección dependerá de las características del proyecto y la geología del sitio, algunas de ellas son:

- EPB y TBM de cara abierta: El tornillo transportador puede trabajar en modo cerrado o abierto, la cámara de excavación permanece parcialmente llena, lo que implica no tener una presión de soporte activa, la rezaga es por banda transportadora.
- TBM de cara abierta y SPB: El mayor desafío es retirar el material de rezaga al cambiar el modo de túnel, colocando tuberías de extracción de lodos y bandas transportadoras para el modo abierto.
- EPB y SPB: Estos métodos funcionan con presión de soporte, la diferencia consiste en la composición y características del medio de soporte, el transporte del material excavado y el diseño de la cámara de excavación.

- TBM con densidad variable: El material excavado se retira de la cámara de excavación presurizada a través del tornillo transportador tanto para los modos EPB y SPB. La presión de soporte se controla con el tornillo y la velocidad de avance con el colchón de aire a presión suministrado a la cámara.

2.2. Criterios de Selección de Tuneladoras en Suelo y Roca

Es imprescindible la aplicación activa de soporte en el frente de excavación en túneles de suelo blando para minimizar los asentamientos en superficie, tener un avance confiable de la TBM y permitir el mantenimiento de las herramientas de corte por medio de intervenciones con aire a presión. La aplicación de los agentes acondicionadores permite que las EPB y Slurry (Mixshield) operen en casi todas las condiciones de suelo blando o suelo inestable, la correcta selección del escudo dependerá de las condiciones geológicas y de las necesidades del proyecto ejecutivo (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Criterios de selección de TBM para suelos (Babendererde Engineers, 2013)

CRITERIO	SLURRY-TBM	EPB-TBM
CONTROL DE ASENTAMIENTO	Distribución lineal muy precisa definida por la presión de soporte.	Menos precisa con fluctuaciones, la presión de soporte no se distribuye linealmente.
BOLEOS	Menos desgaste en los discos cortadores, posee trituradora de boleos.	Mayor desgaste y posible bloqueo del tornillo trasportador.
FRENTES MIXTOS	Mejor control en el frente y en desgaste.	Mayor riesgo de inestabilidad y desgaste.
ALTO CONTENIDO DE FINOS	Altos esfuerzos en la separación y peligro de obturación.	Ideal para suelos con alto contenido de finos.
SUELO GRUESO CON AGUA	Mejor control en el frente, menos desgaste e intervenciones con aire comprimido más fáciles.	Mas desgaste, las intervenciones con aire comprimido son más complejas en su control.
ACCESIBILIDAD DE ENFRENTAR CONDICIONES ADVERSAS	Vaciado rápido de la cámara, bajas temperaturas.	Mayor tiempo de vaciado y aumento de temperatura debido a la fricción.
CONTROL DE FRENTE DURANTE PERIODOS DE INACTIVIDAD	Soporte de frente ininterrumpido.	Desegregación de espuma y suelo en la cámara de excavación.
SUELO CONTAMINADO	Mayor volumen de lodo contaminado, con la posibilidad de separar volúmenes críticos.	Menor volumen de lodo contaminado, expuesto en el túnel debido a las bandas.

ELIMINACIÓN DE REZAGA	Sin disposición directa y mayor costo.	Eliminación directa y menor costo
COMPLEJIDAD DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN	Más complejo para la instalación del circuito de lodos.	Menos complejo en situaciones estándar, más complejo en acondicionamiento del frente.
TAMAÑO DE INSTALACIONES	Más grande por la planta de separación de lodos.	Menor.
INVERSIÓN INICIAL	Mayor.	Inferior.

Para la selección y configuración de TBM's para roca depende de consideraciones geológicas tales como: las propiedades mecánicas y resistencia del macizo rocoso, la composición mineralógica y abrasividad de la roca, la inclinación de las fisuras con respecto al eje del túnel, los esfuerzos que actuarán sobre el sistema de sostenimiento, las zonas de falla y la existencia de agua. Las consideraciones principales que hay que tomar van a depender de la localización de la obra, si se encuentra en zona urbana o en la montaña, los radios de giro y pendientes para la ubicación de lumbreras, el tipo de sistema de sostenimiento y la seguridad del túnel debido a las condiciones geohidrológicas (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Criterios de selección de TBM para roca (González R, 2019)

	ESCUDO SENCILLO	DOBLE ESCUDO	ESCUDO ABIERTO
ROCA	Para condiciones de roca no competente, utilizando dovelas precoladas ya que se requieren para el empuje de la máquina.	Para roca no competente a poco competente, puede ser utilizada con o sin anillos de dovelas.	De media a alta calidad de roca, muy competente.
PROS	Relativamente más económica, el personal no se expone con la roca, la velocidad de avance menos sensible a las condiciones del frente de excavación, mayor habilidad de giro, sin necesidad de concreto lanzado.	El personal no se expone a la roca, no existe liga entre la instalación del soporte, la excavación y el avance de la máquina.	Altas velocidades de avance, radios de giro cortos, son las más económicas.
CONTRAS	Velocidad de avance lento, requiere de una mayor fuerza de empuje debido a la fricción del escudo.	Es más cara, propensa a ser atrapada por sobre-excavación, mayor radio de giro, mayor fuerza de empuje requerida debido a la fricción del escudo.	El personal está expuesto a la excavación, la presión de las zapatas contra el terreno ronda en los 4 MPa.

La investigación geológica/geotécnica se realiza en el anteproyecto para el diseño y estimación del proyecto ejecutivo, las condiciones del subsuelo no son totalmente reveladas hasta que se realiza la excavación. Por lo tanto, las condiciones definidas en los estudios antes mencionados deben ser comparadas continuamente con la información obtenida en el frente de excavación.

Estas condiciones incluyen las propiedades mecánicas del suelo y roca, la permeabilidad de los estratos donde pasa el eje del túnel y la condición actual de redistribución de esfuerzos, los datos obtenidos indicarán que los estudios realizados fueron los necesarios para la correcta elección y equipamiento de la Tuneladora.

2.3. Equipamiento de Máquinas Tuneladoras

2.3.1. Rueda de Corte

La rueda de corte es la herramienta principal en el sistema de excavación mecanizada, es la parte de la máquina que está en contacto directo con el frente de excavación, enfrenta situaciones complejas de rocas o suelo extremadamente duros o inestables, por tal motivo son fabricadas cada vez más robustas y resistentes para soportar mayores cargas de empuje transmitidas a la estructura de la rueda.

La Cabeza de corte es una estructura móvil que al girar rompe o rasga el frente de la excavación dependiendo del tipo de terreno, sus funciones principales son: sujetar las herramientas de corte, sostener el frente y retirar la rezaga por medio de sus ventanas hacia la cámara de extracción.

Las herramientas normalmente se disponen en la cabeza en forma de espiral o radial, por lo que cada posición dista del centro de la rueda a una separación diferente para que al girar la rueda puedan describir círculos concéntricos prácticamente equidistantes. Para la extracción de la rezaga en roca, la cabeza incorpora una serie de cangilones o rastreles situados en su periferia que recogen el escombros y lo elevan para su descarga a la tolva, para el caso de suelo el material entra por las ventanillas a la cámara para después ser retirado por bombas o por anillo transportador.

Los espacios abiertos por donde entra el material desde el frente hacia la cámara de tierras (ventanas) y el porcentaje de la superficie de contacto de la rueda se diseñan en función del tipo de material a excavar (suelos finos o gruesos). En caso de que existiera la posibilidad de cambios en las características del terreno estas ventanas se pueden modificar con el fin de reducir el porcentaje de apertura. Dependiendo del tamaño de las ventanas la rueda de corte pueden denominarse abierta, mixta o cerrada.

El número y tamaño de las herramientas de corte instaladas en la cabeza se diseña para instalar el menor número posible, pero con el óptimo desarrollo, proyectando sobre el diámetro de la misma las posiciones de las herramientas que contiene según su distribución (Figura 2.31).

El aumento del número de herramientas ocasiona un descenso en la eficiencia del corte y propulsión, así como una mayor generación de polvo, mientras que la disminución en el consumo de útiles es mínima. Por otra parte, una reducción importante de herramientas tiene como consecuencia un mayor esfuerzo específico, una reducción de su vida de servicio y la generación de vibraciones que son perjudiciales en la cabeza de corte (González C., 2014).

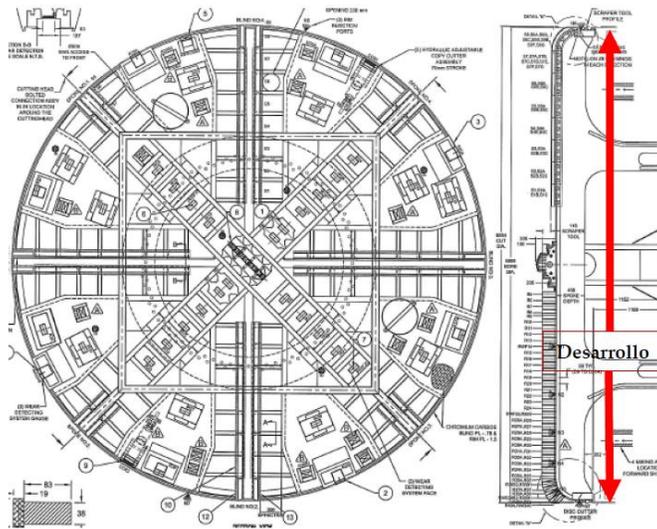


Figura 2.31 Vista frontal y desarrollo de la rueda de corte (González C, 2014).

Para el diseño de la rueda de deben considerar condiciones geológicas diferentes, tanto para roca como para suelo. Para un frente estable con poca o nula presencia de agua y que esté por encima del NAF, emplear una cabeza abierta a sección completa o rozadora, en ambos casos la máquina puede disponer de un soporte de aire comprimido. Para un frente inestable y con posible presencia de agua subterránea, se requiere la utilización de un soporte del frente activo (Presurizado), lo que obliga a trabajar con una rueda de corte cerrada. Este es el caso las EPB con soporte positivo del frente del propio material excavado acondicionado, o en los hidroescudos con soporte positivo proporcionado por lodos bentoníticos.

Al centro de la cabeza giratoria (centros de cabezales), son las áreas más críticas por las conexiones e instalaciones que se disponen en ese punto, por ejemplo, en las EPB el material excavado que se acumula en el centro es muy denso y con poca dinámica de mezclado. En las máquinas de lodos esto puede ser compensado en cierta medida por los inyectores del centro de lavado que reducen la densidad en el área central, la cual se convierte en un problema por el nulo movimiento, los discos en el centro deben ser muy activos y para ello se incluye la alimentación de la suspensión de lodo.

Las líneas de aspiración han sido desarrolladas en los hidroescudos para proporcionar una mayor velocidad de la herramienta y de la dinámica en el centro. Con estas mejoras se ha logrado un aumento de la velocidad de extracción de hasta 30% en suelos cohesivos, al mismo tiempo que, el par motor de la cabeza de corte se ha reducido en aproximadamente un 25% (González C, 2014).

2.3.2. Herramientas de corte

Son las encargadas de llevar a cabo la rotura del terreno al concentrar en el frente la energía de empuje de la máquina, estas se encuentran en contacto directo con el medio a excavar. Existen herramientas fijas cuyo movimiento es con respecto al de la rueda, con giros libres ya que pueden rotar en torno a su eje y las de desplazamiento libre que no dependen del desplazamiento de la rueda (Figura 2.32).



Figura 2.32 Herramientas de corte (González C, 2014).

La rueda de corte consta de un número específico de brazos en los que se encuentran distribuidos los discos, rastreles y las picas, según sea el caso. Los discos cortadores y las picas son enumerados según su posición, abarcando todo el diámetro de la rueda y están distribuidos de tal forma que dibujen radios en el frente para cortar la roca, la posición de los discos puede tener un cierto grado de inclinación respecto al eje del túnel.

Picas

Las picas son las herramientas de corte que se emplean más comúnmente en la excavación de rocas sedimentarias y metamórficas, pero también son utilizadas para rocas blandas o suelos. Las piezas que conforman una pica son: Bloque-Porta Picas que es el soporte soldado a la rueda de corte donde va alojada la pica, el vástago que es la parte de la pica que se introduce en el porta picas y la punta de contacto entre la pica y la roca (González C, 2014) como se observa en la figura 2.33.

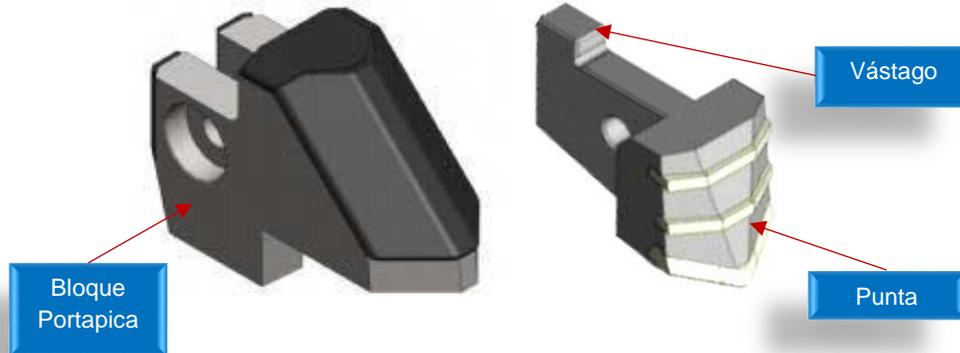


Figura 2.33 Herramientas de corte: Pica Cincele (González C, 2014).

Para colocar la pica a la rueda se suelda la porta pica, estos elementos permiten la fijación por medio del vástago con anillos de retención o por medio de grapas anulares de montaje rápido. Existen diferentes tipos de picas, como las de fricción (*drags picks*) o tangenciales y los cinceles o picas radiales.

Las picas de fricción tienen una forma cónica, el eje de su vástago está en línea con el de su cuerpo o punta y forma un ángulo mayor de 90 grados con la dirección del corte, están diseñadas para trabajar en rocas blandas a moderadamente duras. En los terrenos blandos se utilizan las picas radiales o cinceles, que se colocan a lo largo del contorno de las aberturas de la cabeza, con el filo hacia el hueco, de forma que, dependiendo del sentido de giro de la máquina, trabajan unas herramientas u otras. Estas herramientas tienen el eje del vástago normal a la dirección de corte (Figura 2.34). La distancia medida entre la cabeza de la herramienta y la base se le conoce como el alcance de la herramienta o calibre de la pica.

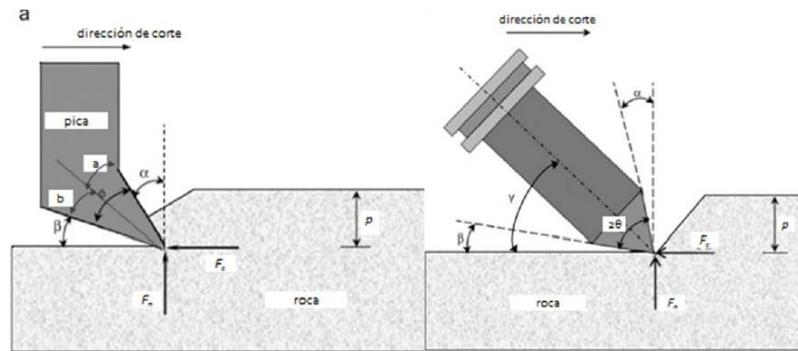


Figura 2.34 Herramientas de corte: Pica Radial y Tangencial (González C, 2014).

Rastreles

También llamados rastrillos o *scrapers*, son piezas de corte que se localizan en el contorno exterior de la rueda de corte, sus funciones son, perfilar la excavación siguiendo una geometría circular y la de acompañar al terreno excavado hacia las aberturas de la rueda, también se pueden emplear rastreles para cortar el terreno, y en ese caso, su funcionamiento corresponde al de las picas de cincel y su ubicación en la rueda se distribuye no sólo en el perímetro sino en los brazos de la misma y describiendo un diseño radial.

Para los materiales que constituyen las piezas de corte, existe una gama de aleaciones metalúrgicas que mejoran las características mecánicas de dichos elementos en función de los requerimientos del proyecto. El carburo cementado (CC) es el grupo de materiales más comúnmente usado en la fabricación de herramientas de corte, por sus propiedades de dureza y tenacidad. Es un material compuesto que consiste en partículas de carburo de alta dureza unidas por un aglutinante. La proporción de la fase de carburo está generalmente entre 70 - 97% del total del peso del compuesto y el tamaño de sus granos promedia entre 0.2 y 14 μm . El carburo de Tungsteno (WC) es la fase dura, junto con el Cobalto (Co) que es la fase aglutinante, forman la estructura básica del Carburo Cementado (CC) a partir del cual se han desarrollado otras formas de CC (González C, 2014).

Discos

El desarrollo tecnológico de los discos ha permitido el aumento progresivo del diámetro de los túneles, el uso de estas herramientas comenzó el siglo pasado, cortaban roca de dureza media por lo que las cargas necesarias por cortador eran pequeñas y el diámetro de los discos era reducido. Con el paso del tiempo se ha podido excavar en rocas más duras, haciendo necesario el uso de discos con diámetros mayores (20 pulgadas).

Es una herramienta metálica en forma de disco con filo o aro de corte intercambiable, el disco está montado sobre un soporte de rodamiento. Los primeros discos de corte tenían forma de V con el ángulo en punta variando entre 60 y 120 grados, esta configuración permitía ser muy eficientes al comienzo, pero rápidamente el vértice se desgastaba y la eficiencia disminuía, estos discos fueron substituidos por los *Constan Cross Section* (CCR), estableciéndose como el disco estándar (Figura 2.35).

Los discos cortadores se localizan en la rueda de corte y giran libres sobre su propio eje debido al empuje y rotación de la rueda que actúan sobre ellos. Todo el empuje de la tuneladora es transmitido por los cortadores hacia el frente de excavación y la carga total se reparte entre el número de discos instalados. La cantidad y posición de discos está en función del diseño y el diámetro del túnel y el tipo de roca a excavar. Los discos CCR pueden ser simples, dobles y triples, están en función de la ubicación donde se encuentren en la cabeza de corte.

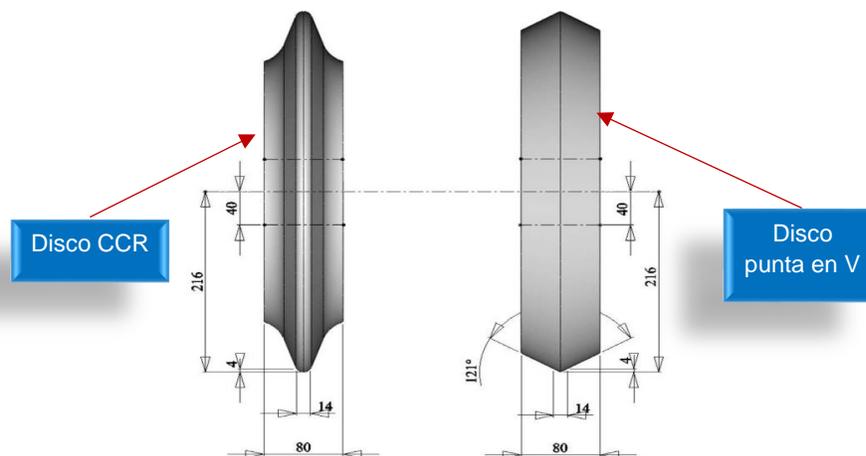


Figura 2.35 Herramientas de corte: Discos (González C, 2014).

Se distinguen tres tipos principales de cortadores según la posición. En la figura 2.36 se identifican estas zonas de posición de las herramientas dentro de la rueda de corte.

- Centrales: Perforan el centro de la sección, con una trayectoria circular mínima. Debido a las grandes vibraciones y fuerzas excéntricas soportadas, el gripado es muy frecuente en ellos, mientras que el desgaste normal es menor.
- Frontales: Perforan la zona principal del frente, entre el centro y la periferia. Su principal causa de cambio es el desgaste. A medida que las trayectorias circulares van aumentando hacia el exterior, la vida útil de ellos disminuye.

- Gálbo: En la periferia de la cabeza de corte, perfilan el diámetro de la excavación. El consumo de cortadores es mayor que en lo frontales, debido tanto al desgaste como al gripado.

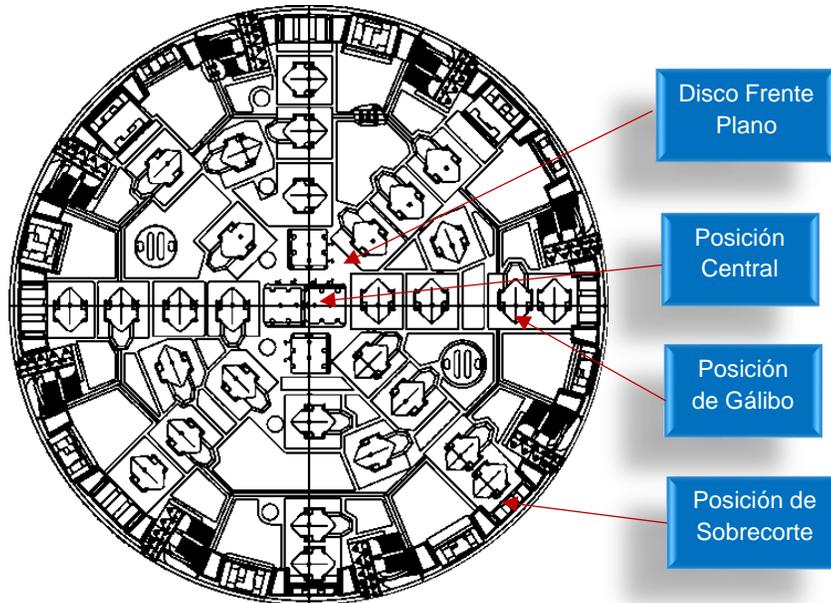


Figura 2.36 Posición de los discos en la rueda de corte (González C, 2014).

Debido a la abrasión de la roca, los discos sufren un continuo desgaste del aro cortador exterior, y deben ser reemplazados cada cierto tiempo. El diseño y los materiales de las distintas partes de un disco cortador también difieren en cada diseño y están en función del tipo de roca.

En la rueda de corte los discos están colocados en una determinada distancia del centro y tienen una trayectoria circular, con el giro de la cabeza se plasman en la roca círculos concéntricos al eje de la máquina (Figura 2.37). El objetivo es la formación de los llamados *chips*, son fragmentos de roca entre dos huellas de cortador que se desprenden del frente (Figura 2.38).

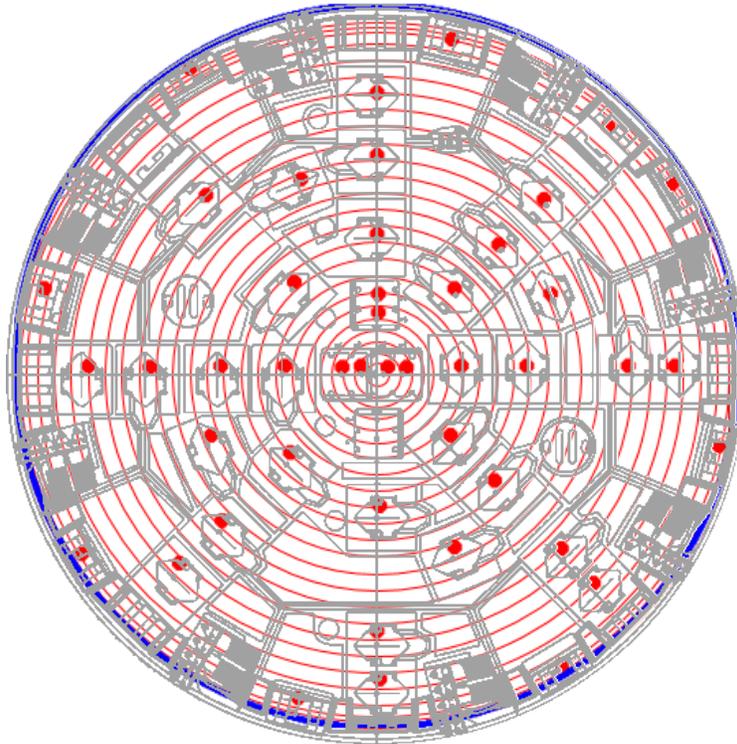


Figura 2.37 Trayectoria de los discos de corte (Gonzales R., 2019).

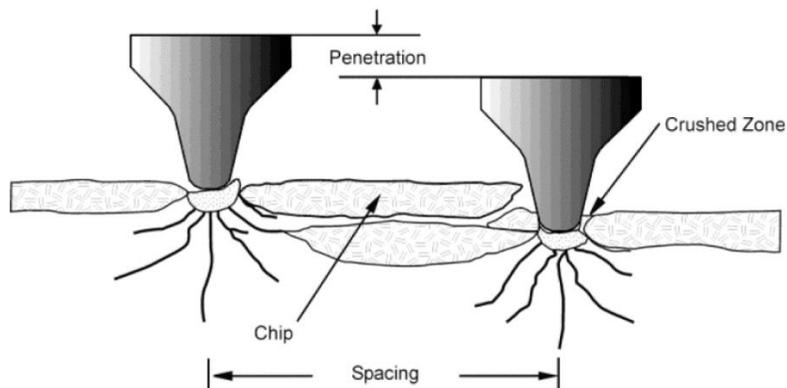


Figura 2.38 Proceso de formación de chips (Pérez A, 2018).

El proceso se basa en que la roca tiene una tensión de rotura mucho más baja comparada con su resistencia a compresión. El disco produce una carga puntual muy alta que crea una zona de fracturación, con grietas de tensión alrededor (Pérez A, 2018). Cuando las grietas interceptan con otras provocadas por un disco cortador en una circunferencia contigua, se forma un chip que se desprende del macizo rocoso.

Los discos cortadores constan de varias partes que se encargan de su fijación a la rueda de corte, el giro sobre su eje, y su correcta lubricación, refrigeración y aislamiento del material excavado, entre otras. Las principales partes de esta herramienta se observan en la figura 2.39.

Debido al desgaste que sufren las herramientas, debe ser reemplazada el aro cortador, se le conoce como desgaste primario, pero también existe la posibilidad de cambio del disco por gripado, ya que el disco deja de girar sobre su eje. El desgaste depende de factores geológicos, resistencia de la roca y operación adecuada de la tuneladora.

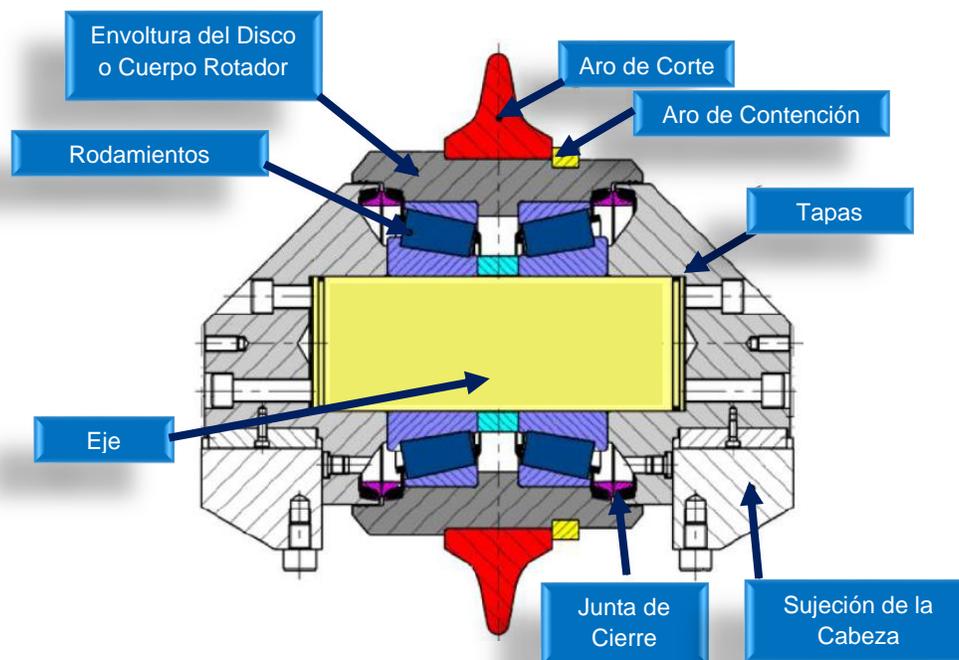


Figura 2.39 Partes principales de los discos de corte (Pérez A, 2018).

El reemplazo de cortadores de disco es muy costoso ya que se deben parar todos los procesos de la excavación, esto propicia al aumento de costos ya que el rendimiento disminuye. Si los discos se dañan excesivamente y no son reemplazados, provocarán roturas y desgaste inminente en los demás discos. Es muy importante programar el reemplazo a tiempo de aquellos que estén desgastados o dañados.

Los componentes del disco limitan el empuje máximo que puede ser aplicado a un cortador, las mejoras en los materiales en los últimos años, tanto del aro cortador como del cuerpo del disco, permitirán un incremento del empuje, que se verá repercutido en la penetración y la vida útil de los cortadores.

Con un aumento del 15% del empuje, la penetración podría aumentar un 50%. Las mejoras en los materiales del aro cortador permitirán reducir la anchura de su punta, que incrementará la carga de contacto y mejorará la formación de chips (Pérez A, 2018).

Desgaste de Herramientas de Corte

El desgaste de una pieza se puede definir como el proceso mecánico de eliminación microscópica o macroscópica del material que la constituye, a consecuencia del movimiento de su superficie respecto a otra en contacto. Es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la superficie. En el proceso continuo de desgaste, el material puede ser eliminado de la superficie y expulsado o también puede romperse.

Los tipos de desgaste que sufre una herramienta de corte en excavación mecanizada se pueden clasificar de varias formas con base al movimiento relativo entre los materiales en contacto:

- Por fatiga cuando hay concentración de tensiones mayores a las que puede soportar el material (dislocaciones, formación de cavidades y grietas).
- Por abrasión, cuando el daño es debido a la acción de partículas sólidas presentes en la zona del rozamiento.
- Por erosión producida por una corriente de partículas abrasivas
- Por corrosión, originada por la influencia del ambiente, la humedad, y la oxidación ocasionada por la acción del oxígeno atmosférico o disuelto en el lubricante.
- Vibración, es el desgaste producido por las vibraciones inducidas por un fluido a su paso por una conducción.
- Impacto, debido a golpes que producen fragmentación y erosión en el material.

El desgaste del disco cortador se debe a la abrasión por contacto con la roca, este fenómeno no se presenta de manera uniforme, ya que ni las cargas ejercidas ni el frente rocoso son homogéneos. El desgaste se puede dividir en primario cuando se pierde el aro cortador por la abrasión y secundario que causa la pérdida imprevista de material en otras áreas del cortador.

En el aro cortador el desgaste es primario y se puede dar de diferentes formas, medianamente uniforme a lo largo del borde del anillo con mucha abrasión en el borde y poca en los lados del anillo y un desgaste en forma de filo en los lados del anillo debido a una gran abrasión lateral, también se generan deformaciones plásticas cuando el anillo de corte es muy blando y está expuesto a presiones de contacto extremadamente altas, el anillo puede presentar astillamiento sin necesidad de romperse y con cambios bruscos de carga, pueden producir fracturas o grietas. El desgaste secundario afecta al resto del disco cortador, al eje, aro de contención y a los sellos, si el desgaste es alto se perderá el aceite lubricante, provocando un gripado del disco cortador (Pérez A, 2018).

El gripado se produce cuando el disco cortador no gira sobre su eje, por lo que se produce un gran desgaste por abrasión en una zona concreta, este fenómeno es causado por frentes heterogéneos o inclinación de la cabeza de corte, causando tensiones descompensadas y superando la carga máxima admisible de los cortadores.

El giro del disco es bloqueado por el material de rezaga, aumenta la temperatura por causa de la fricción. La caída de bloques puede incrustarse en los cortadores bloqueándolos y haciendo que rompan. El aumento de las vibraciones de la tuneladora se deriva del empuje y las revoluciones, haciendo que todas las componentes de los cortadores vibren provocando su rotura.

2.3.3. Equipamiento de rezaga

Conformado por un conjunto de plataformas que se deslizan sobre el revestimiento prefabricado y que son arrastrados en el avance. Incorpora transformadores, cableado, ventilación, depósitos para el mortero y el sistema de evacuación de rezaga, una vía para la circulación de los trenes y colocación del revestimiento.

Para la evacuación de la rezaga existen varias alternativas como los trenes de tolvas que se alimentan de la banda transportadora primaria, cintas puentes que en su interior pueden alojar el tren completo y lo carga conforme este pase por debajo, siendo posible mediante un cablo californiano la espera del segundo tren, el sistema *Rowa* que es el conjunto de dos vías paralelas para barrenos cargados y vacíos con tracción mediante cadenas de arrastre y las cintas convencionales que no disponen de vías, siendo la alternativa más favorable para reducir tiempos.

Los remolques se encuentran unidos unos a otros al escudo, situados sobre raíles que desde la propia tuneladora se van colocando. Además, alojan el resto de sistemas de la tuneladora: transporte de dovelas, cabina de mando, talleres, producción de espuma, áreas de paso, bombas de agua de evacuación, almacenamiento y depósito de diversos componentes, sistemas eléctricos y de comunicaciones, generadores eléctricos de emergencia, etc. (Figura 2.40).

El transporte de materiales y personal se realiza generalmente mediante trenes diésel, mientras que el material excavado es sacado al exterior mediante una banda transportadora que va anclada y colgada de un lateral para no entorpecer el paso. Es necesaria la ventilación a lo largo de todo el trayecto para mantener las condiciones de salubridad y seguridad, evacuando polvos, humos de combustión y de maquinaria. Para la operación de los sistemas se necesita canalizar el suministro de agua para la limpieza, fabricación de espumas, refrigeración e inyecciones. El agua ya utilizada junto con la que se infiltra del terreno es retirada mediante el sistema de bombeo a la superficie.

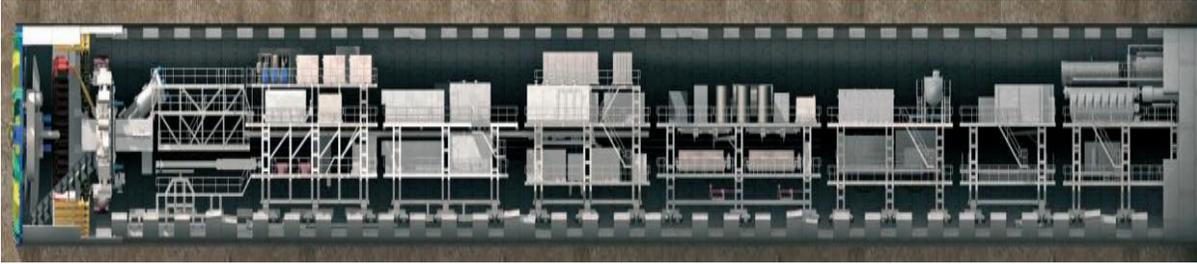


Figura 2.40 Equipamiento del Back-Up (Pérez A, 2018).

El sistema *back-up* se conforma por plataformas arrastradas por la máquina en su avance y que normalmente pueden alcanzar longitudes de hasta 130 m, donde se incorporan los siguientes equipos:

- Transporte y almacenamiento de dovelas.
- Polipastos para manejo de vías y dovelas.
- Sistema de relleno del anillo de dovelas.
- Transformadores y carretes de cables de alta tensión.
- Generadores e iluminación de emergencia.
- Casetes de tuberías de ventilación que almacenan habitualmente 100 m de tubería.
- Sistema de engrase y refrigeración de la tuneladora.
- Bombas hidráulicas.
- Sistema de guiado.
- Sala de máquinas o cabina del operador.
- Ventiladores.

El diseño del *back-up* o tren de arrastre se debe adecuar al método de construcción del túnel y al tipo de tuneladora, pudiendo construir desde sistemas simples porticados hasta sofisticados equipos de doble vía y control remoto. Es muy importante decidir cuál diseño representa la mejor opción para el proyecto, ya sean equipos rodantes o deslizantes compatibles con la rezaga mediante trenes, cinta o vehículos con neumáticos.

Bandas transportadoras

Las bandas transportadoras cada vez se utilizan más debido a la necesidad de asegurar altos rendimientos, las ventajas que aportan son altas capacidades de transporte, la operación continua, son adaptables a cualquier tamaño de túnel y pendiente, no se requiere mucho espacio para su instalación, los costos de operación y mantenimiento son relativamente bajos, su accionamiento es eléctrico.

Sus inconvenientes son las fuertes inversiones iniciales, la limitación en el tamaño máximo de roca a transportar, necesita de otro sistema como las tolvas para el almacenamiento en el frente de avance, se requieren diseños especiales en tramos curvos y empieza a tener problemas cuando el material de carga tiene agua.

Transportador de racletas: Consta de unos canales de chapa soldada sobre la que se desliza el material arrastrado por racletas de acero transversales unidas por cadenas. Lateralmente los canales disponen de unas guías tanto superiores como inferiores, que además de contener el material, controlan las trayectorias de las cadenas y las racletas. Los canales pueden doblarse varios grados en sentido horizontal y vertical, permitiendo una mayor adaptabilidad al suelo del frente de avance. El motor de accionamiento puede ser eléctrico o de aire comprimido.

Transporte por tubería: Se utiliza trabajando juntamente con el escudo, los materiales arrancados por la máquina de avance llegan de la cámara de excavación a través de un tornillo transportador a una parrilla cribadora y el material pasante al depósito de carga. Desde allí una cinta lo transporta al equipo de machaqueo, que suele ser un molino de impactos, donde se tritura y posteriormente se mezcla con agua. Esta masa se bombea sin dificultad a la tubería de transporte. La instalación completa se desplaza arrastrada por la máquina de excavación.

2.3.4. Cámaras para Intervenciones Hiperbáricas

Una cámara hiperbárica es un recinto presurizado capaz de resguardar una o varias personas, con la finalidad de asegurar un tratamiento médico. Existen dos categorías de cámaras terapéuticas. Las cámaras monoplazas a compartimiento único para un solo paciente, con la posibilidad para el personal médico de acceder a la cámara principal a través de una cámara para el personal. Las cámaras multiplaza, con dos compartimientos o más que permiten el acceso del personal, de los pacientes y del material al mismo tiempo conservando la presión en el recinto principal.

Composición:

- Locales para conjunto hiperbárico
- Sistemas hiperbáricos con instalaciones asociadas (subconjuntos)
- Equipamiento de sostén (suministro de gas y fluidos)
- Personal técnico y médico
- Organización administrativa específica

Una cámara hiperbárica instalada por detrás de la cámara presurizada permite la compresión de un grupo de hiperbáristas. Cuando las presiones son igualadas, este grupo puede entonces entrar en la zona de excavación para inspeccionar, cambiar o reparar los elementos de la rueda de corte.

Durante este período, los hiperbáristas son sometidos a la respiración de aire comprimido y deberán entonces salir de la cámara siguiendo los procedimientos de descompresión.

Los trabajos en ambientes hiperbáricos sólo se darán en tuneladoras con presión de frente que se utilizan para la excavación de suelos blandos con poca cohesión y bajo el nivel freático, son las llamadas escudos EPB, SPB o Hidroescudos. Las intervenciones hiperbáricas son operaciones estándar en túneles para permitir la inspección regular y el mantenimiento de la cámara de excavación, la cabeza de corte y garantizar el sostenimiento del frente.

Para ello es indispensable disponer de cámaras hiperbáricas para la aclimatación de los trabajadores, además de un tren o vehículo de evacuación y personal sanitario para asistir a los trabajadores en caso de producirse accidentes disbáricos (Quilez D, 2011).

Las intervenciones en condiciones hiperbáricas son programadas y supervisadas, se planean adecuadamente para realizarlas cuando sea necesario, en el menor tiempo posible y en condiciones máximas de seguridad, con el fin de reducir costos. Los métodos hiperbáricos utilizados en las intervenciones son similares a las técnicas de buceo, con presiones muy parecidas, pero en ambientes diferentes (inmersión en agua).

A causa de la naturaleza y características de las intervenciones, el impacto psicológico y de salud requiere cuidados especiales en los trabajadores. No pueden realizar esta actividad a menos que puedan demostrar haber realizado con éxito dicha actividad anteriormente en el buceo o en el tuneleo o se hayan sometido a una formación específica y se hayan evaluado sus condiciones físicas (Serradell D, 2017).

Las operaciones son ejecutadas en condiciones presurizadas, el aire comprimido es alimentado a través del mamparo. El acceso para las intervenciones es a través de esclusas de aire situadas en la parte superior del mamparo, las cuales tienen un mecanismo de cierre de sellado y presurizado. Las esclusas permiten a los trabajadores la transición gradual entre las presiones en condiciones normales y las presiones de las condiciones del frente.

El personal especializado debe estar sujeto a exámenes médicos de manera constante, el rango de edad de los trabajadores establecido para trabajar en condiciones de presurización comúnmente es de 18 a 50 años.

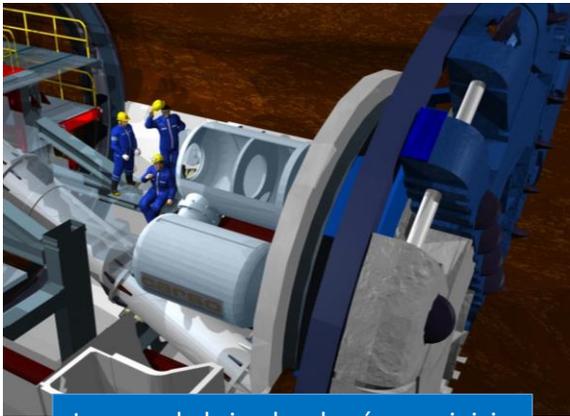
Existen restricciones con respecto a la permanencia de los trabajadores dentro de la cámara hiperbárica, los tiempos de presurización son demasiado largos para permitir un ciclo de

trabajo, los rendimientos de trabajo son bastante reducidos. La ejecución inapropiada de los trabajos de presurización y despresurización del personal pueden conducir a riesgos y problemas graves en su salud. Otros factores que pueden influir en los tiempos de permanencia dentro de las cámaras son la temperatura y la humedad (González A., 2017).

El procedimiento de ingreso a la cámara debe realizarse por fases, se inicia con el ingreso a la cámara hiperbárica donde el trabajador se somete a una presión cerrando la escotilla. Cuando la presión de la cámara hiperbárica es igualada a la existente en la cámara de excavación, se abre la escotilla que se conecta con el mamparo para que el personal entre a realizar la intervención, al final los trabajadores regresan a la cámara para su despresurización.

El procedimiento de intervenciones hiperbáricas se realiza de acuerdo con las normas de seguridad internacional del buceo industrial, así como de las normas médicas e higiene de la medicina hiperbárica, el procedimiento se describe a continuación (González R., 2019):

- Limpieza e inspección visual de la higiene y asepsia de la cámara principal.
- Ingreso de la brigada de buzos (3 personas) a la cámara de compresión, inicia tiempo de fondo.
- Compresión de buzos y ecualización de las presiones entre la cámara de personal y la de excavación.
- Apertura de la compuerta de la cámara de excavación para iniciar el mantenimiento.
- Finalización de los trabajos de mantenimiento y regreso a la cámara principal.
- Inicia la descompresión inicial solo con aire, al término los buzos se transfieren a la cámara gemela, para su aseo y esterilización, para continuar los periodos de descompresión.
- Limpieza de la cámara principal, lavado y drenado.
- Terminó de los periodos de descompresión e inicio de la limpieza en la cámara gemela, termina la intervención y el tiempo de fondo.
- Ingresa la siguiente brigada de buzos, la brigada anterior es examinada en sus signos vitales y pruebas de coordinación motora, quedan en observación una hora (Figura 2.41).



Ingreso de brigada a la cámara, inicia tiempo de fondo.



Compresión de buzos y eculización de presiones.



Apertura de compuertas, inicia el mantenimiento.



Regreso a la cámara, inicia la descompresión con sólo aire.



En la cámara gemela los buzos se asean y esterilizan para terminar con la descompresión.



Limpieza de cámara, termina periodo de descompresión e ingresa la siguiente brigada.

Figura 2.41 Procedimiento de intervención hiperbárica (González R., 2019).

Por otro lado es importante señalar que las alternativas de solución para la intervención podrán ser por medio de una lechada de bentonita inyectada y mezclada con el material de excavación, creando una pantalla de lodos, bajando el nivel de rezaga a media rueda de corte, este material se sustituye con aire comprimido. Otra opción es el remplazo de la rezaga de la cámara con lechada de bentonita que posteriormente se permea con el terreno y puede formar la pantalla de lodos. Y por último se podrá remplazar toda la rezaga de la cámara con aire comprimido.

Durante los trabajos de inspección dentro de la cámara de excavación, el personal de mantenimiento se puede colocar en plataformas instaladas a diferentes elevaciones sobre el nivel de rezaga, el aire comprimido se monitorea cuidadosamente para mantener la estabilidad del frente de excavación. Una vez adentro la cuadrilla pueden realizar los trabajos necesarios de cambio de cortadores y soldaduras dentro de la cámara.

2.3.5. Sistema de Replanteo y Guiado

En la actualidad se cuenta con un procedimiento automatizado en los sistemas de replanteo y guiado de las TBM. En los datos previos de un sistema de replanteo se consideran desde el momento de comprar la tuneladora, ya que se debe conocer la precisión que se requiere, el tipo de tuneladora y su diámetro, el trazo del túnel, el registro del guiado a utilizar. Los sistemas de replanteo manuales requieren de una excelente preparación del personal, el sistema semiautomático y los totalmente automáticos facilitan la adquisición continua de datos durante todo el avance, es decir, el operador puede integrar todas las condiciones que desee.

El replanteo requiere automatización para facilitar el control constante y en tiempo real del avance realizado, disponer del registro de datos que intervengan en los procesos (parámetros de TBM y terreno), para ello se requiere un nivel alto de adquisición de datos para el guiado de la máquina.

El sistema proporciona el posicionamiento de la señal de referencia en el centro de la rueda de corte, la inclinación del eje de la máquina respecto a la pendiente del eje del trazo, la magnitud de un posible giro respecto a su eje. Debido a las elevadas medidas de avance es necesario determinar en intervalos cortos de tiempo la posición, dirección e inclinación del escudo.

Estos datos del sistema automatizado de replanteo se utilizan también en el guiado automático. Para los sistemas guiados, los datos obtenidos en la topografía se trasladan a los mandos de los cilindros de empuje y guiado para conocer la posición y dirección real de la tuneladora. Estos datos son transferidos a los computadores de mando para facilitar un avance homogéneo (Figura 2.42).

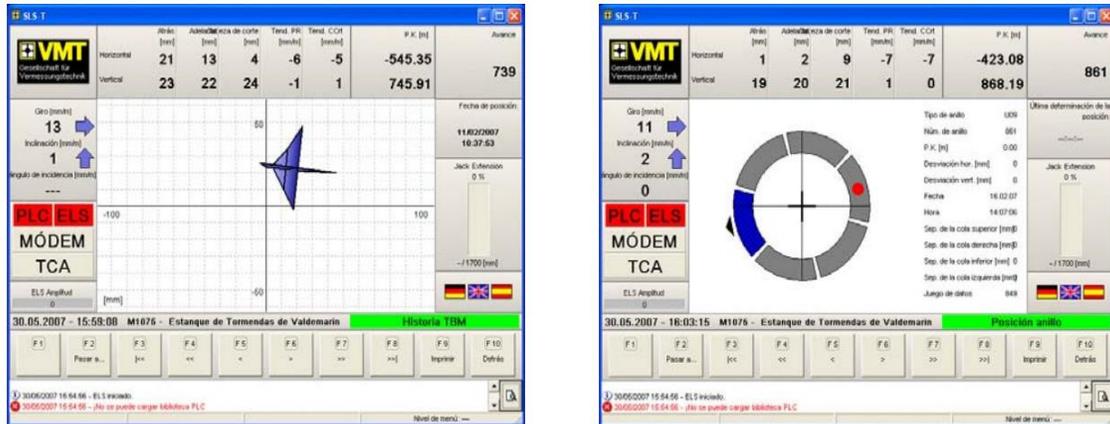


Figura 2.42 Sistema guiado de posición y tendencia del escudo, así como posición del anillo (Grupo Terratest, 2005).

Así mismo para el guiado se necesitan los datos de sobre excavación, presión de confinamiento, inyección, etc., que también son dependientes del tipo de escudo. Estos datos han de registrarse y transferirse al panel de control central, donde se registran todos los parámetros operacionales importantes como el avance, sobre corte, presiones y montaje de anillos. El panel de control está situado en el interior del escudo (Figura 2.43).



Figura 2.43 Panel de Control de la TBM (Grupo Terratest, 2005).

En la figura 2.44 se observa la estructura modular de un sistema electrónico de evaluación de datos, las señales en los elementos de dirección más importantes del escudo transforman magnitudes físicas (distancias, presiones, posiciones), en una señal analógica (4-20 mA). Las señales registradas se recogen y se visualizan en la cabina de control, ahí las señales son digitalizadas y enviadas vía interfaz a una PC o acopladas directamente a un circuito de control con microprocesadores (Mendaña F y Fernández R, 2011).

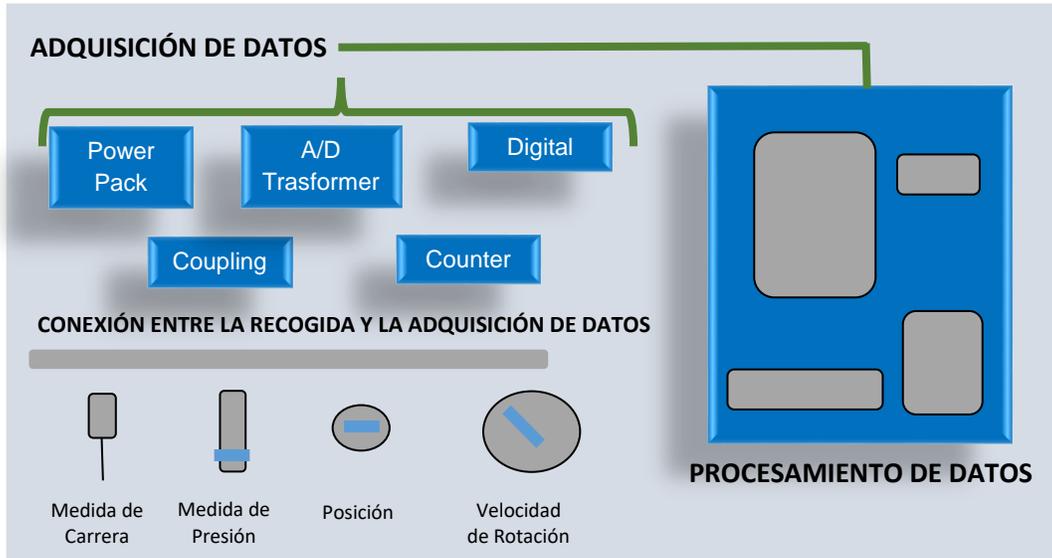
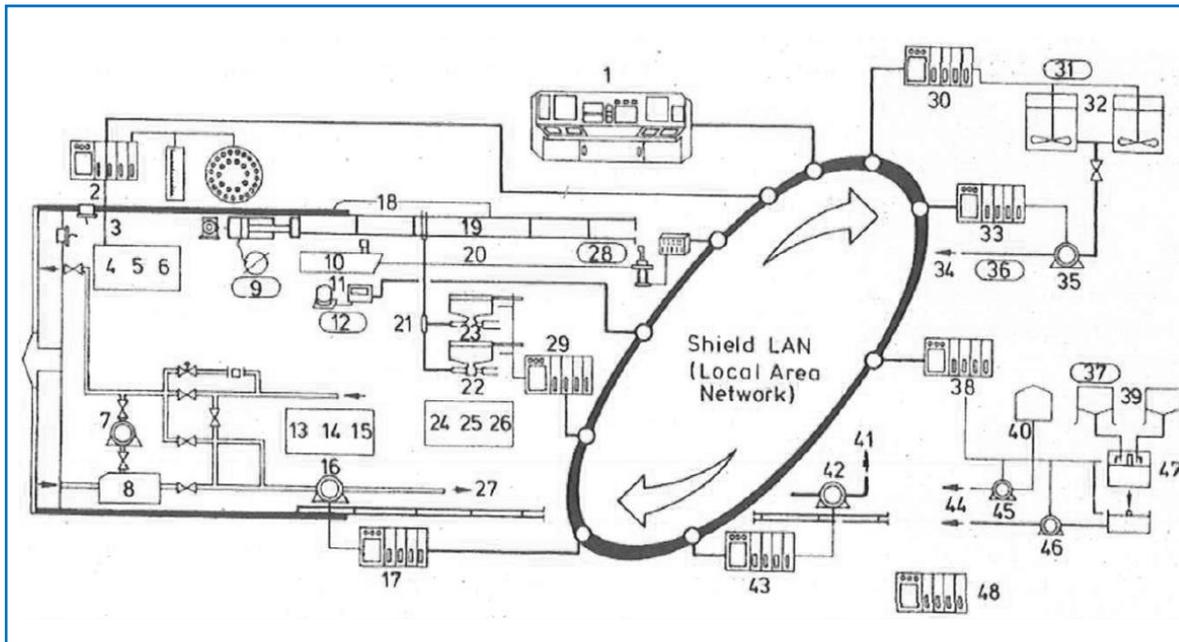


Figura 2.44 Sistema electrónico de Evaluación.

En la figura 2.45 se observan los parámetros de operación más importantes de un escudo, se considera como un sistema que se comprende de circuitos operacionales independientes, los cuales son controlados semi-automáticamente. Teóricamente es posible acoplar todos estos circuitos a uno solo que controle la secuencia completa de operación a través de un sistema de programación.



1. PANEL PRINCIPAL	27. A SUPERFICIE
2. DISPOSITIVO DE GUIADO DEL ESCUDO	28. REGISTRO AUTOMÁTICO DE LASER
3. TRASDUCTORES	29. CONTROL DE LA BOMBA DE INYECCIÓN
4. CONTROL DE EXCAVACIÓN	30. CONTROL DE TRATAMIENTO DE LODO
5. CONTROL DE VELOCIDAD	31. REGISTRO DE EQUIPO Y MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL LODO
6. CONDICIONES DE FRENTE	32. TANQUES DE EQUILIBRIO
7. BOMBA FD	33. PANEL DE CONTROL BOMBA PI
8. TRITURADORA	34. AI TÚNEL
9. CONTROL DE DIRECCIÓN	35. BOMBA PI
10. MEDICIÓN AUTOMÁTICA OBJETIVA	36. CONTROL DE PRESIÓN EN EL FRENTE
11. GIROCOMPAS	37. REGISTRO DEL MORTERO DE INYECCIÓN Y CONTROL DEL MEZCLADOR
12. MEDICIÓN AUTOMÁTICO DE GIRO	38. PANEL DE CONTROL DE INYECCIÓN DE MORTERO
13. CONTROL DE TRANSPORTE DE LODOS	39. SILO
14. CONTROL DE VOLUMEN DE ESCOMBRO	40. TANQUE LIQUIDO 8
15. REGISTRO DE BLOQUEOS	41. A LA PLANTA DE SEPARACIÓN
16. BOMBA P2	42. BOMBAS P3-PE
17. CONTROL DIRECCIÓN P2	43. PANEL DE CONTROL DE LA BOMBA DE LODO HACIA EL TÚNEL
18. INYECCIÓN DE MORTERO	44. BOMBA DE INYECCIÓN
19. DOVELA	45. BOMBA DE INYECCIÓN
20. LASER	46. BOMBA DE INYECCIÓN
21. AGITADOR	47. MEZCLADOR DE INYECCIÓN
22. BOMBA DE INYECCIÓN LIQUIDO A	48. ORDENADOR PARA LA MEDICIÓN EL CONTROL Y RIESGO
23. BOMBA DE INYECCIÓN LIQUIDO B	
24. CONTROL DE INYECCIONES AUTOMÁTICO	
25. MEDICIÓN Y REGISTRO DE LA INYECCIÓN CONTROL Y MONITOREO	
26. VOLUMEN Y PRESIÓN DE INYECCIÓN	

Figura 2.45 Configuración de un Sistema Guiado (Mendaña F y Fernández R, 2011).

Para guiar la máquina, se utiliza un Sistema que se compone de un hardware, un software y elementos específicos que crean la posibilidad de la determinación continua de la posición (Di Pascua N., 2012), en la figura 2.46:

- ET con láser externo. (laser ajustado de forma paralela al eje óptico).
- Video Target (VT, blanco del láser, que determinará la posición. Miniprisma adosado).
- Prisma de orientación en base nivelante.
- Caja de comunicación y derivación del control automático o manual, entre la ET Computador industrial.
- Cable de datos (extensible).
- Módem Konverter (recibe: datos de ET, VT, extensión de gatos, dirección de la articulación, etc).
- Computador industrial (computador a bordo de guiado).
- Posibilidad de comunicación de datos al exterior del túnel.
- Computador en superficie (oficinas).
- Computador soporte (oficina de fabricación del Sistema de guiado).

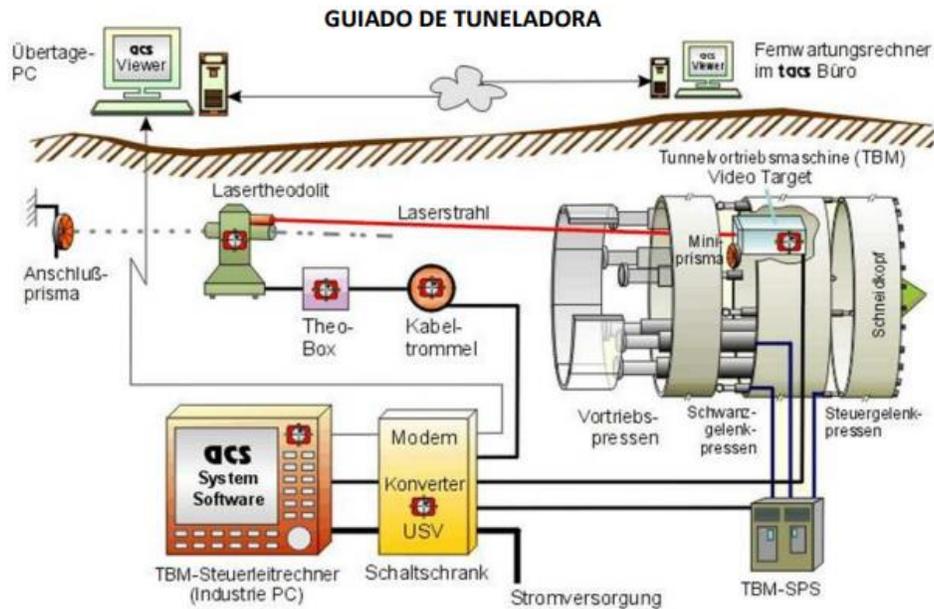


Figura 2.46 Guiado de Tuneladora (Di Pascua N., 2012).

2.3.6. Instrumentación Geotécnica

Los sistemas de auscultación en tiempo real son importantes para la operación y monitoreo de las obras subterráneas, debido a su localización (zonas urbanas), entornos geológicos y geotécnicos muy complejos, brindando seguridad y calidad en la excavación de túneles. El diseño de estos sistemas dependerá de lo que se quiere medir, del comportamiento del terreno excavado, de las estructuras que intervienen en la construcción y del entorno (Pérez A., 2013).

La instrumentación se basa en el uso de dispositivos y técnicas para obtener información específica de las variables para caracterizar el comportamiento del suelo o estructura, y evaluar su seguridad para tomar decisiones preventivas o correctivas. Este sistema de monitoreo se puede utilizar en diversas etapas del proyecto, desde la realización del proyecto ejecutivo en el diseño de las estructuras, midiendo posibles asentamientos, movimientos al interior del subsuelo, presiones hidrostáticas y nivel de aguas freáticas. En la etapa constructiva comprobando las hipótesis de diseño, verificando el comportamiento de la estructura durante los procesos, por medio de sus deformaciones y desplazamientos. Y durante la etapa operacional de la obra ya terminada.

Para el diseño del sistema de auscultación es necesario conocer diversos factores que son importantes para la toma de decisiones, como la geología y geohidrología del sitio en cuestión, el tipo y características del túnel, las propiedades físicas y mecánicas del suelo, así como definir el procesamiento de la información recabada con base a las condiciones del proyecto, el objetivo del sistema de auscultación, las variables a medir y el tipo de instrumentación instalada.

Los instrumentos principales empleados para el monitoreo de obras subterráneas arrojan información importante para el análisis de su comportamiento, como lo son los deformímetros para acero y concreto que nos proporcionan las deformaciones intrínsecas en los revestimientos, las celdas de presión que registran los esfuerzos a los que se encuentra sometida la estructura, los piezómetros y pozos de observación para registrar presiones de poro y nivel del NAF, respectivamente. La tuneladora se alimenta con los registros obtenidos de la instrumentación (datos de entrada) y los valores objeto (de proyecto), todos en tiempo real para procesarlos y compararlos para el buen funcionamiento de la máquina y la toma de decisiones adecuadas durante su operación.

La instrumentación geotécnica tiene como finalidad determinar el comportamiento y las características del terreno para predecir su evolución frente a cargas, movimientos, empujes y demás acciones, tanto naturales como inducidas por las obras (Martínez J., 2017). La frecuencia de lecturas y toma de datos depende de las magnitudes de los parámetros y la velocidad del proceso que se quiera verificar, las lecturas pueden ser manuales o automáticas, dependiente de la tecnología de los instrumentos y el número de sensores o puntos de registro que contengan.

Los Piezómetros son instrumentos utilizados para medir la presión intersticial en el interior de masas de suelo y roca. Para el caso de los de tipo abierto, la tubería está abierta en sus dos extremos, dentro de ella se mide la altura que alcanza el nivel de agua. Este registro es de gran importancia porque permite obtener información significativa sobre el tipo de acuífero y la permeabilidad del suelo. Proporcionan información para la comprensión de las condiciones geohidrológicas, determinan el nivel de seguridad para la colocación de relleno, predicen la estabilidad de taludes y sirve para diseñar empujes laterales. Los piezómetros de cuerda vibrante se instalan dentro de la tubería de un barreno, en la punta se localiza el sensor de cuerda vibrante, las lecturas se obtienen mediante un *Datalogger*.

Los Inclinómetros permiten medir desplazamientos horizontales, miden las inclinaciones en diversos puntos en el interior de un barreno, mediante una sonda que transmite una señal eléctrica proporcional a la inclinación por medio de ángulos. Se utilizan para controlar los movimientos del subsuelo y sus deformaciones, se puede comprobar las deformaciones permisibles por medio de los desplazamientos registrados, se puede verificar la estabilidad de las estructuras como las lumbreras o en las mismas dovelas.

Los Extensómetros miden los movimientos entre dos puntos (verticales), con un punto fijo en la superficie mediante un anclaje, los desplazamientos de los puntos se transmiten al extremo inicial del sondeo mediante varillas, se miden los desplazamientos por procedimientos mecánicos o eléctricos. Los extensómetros se utilizan para medir los movimientos de tierra y roca a lo largo de un solo eje, su aplicabilidad está basada en el monitoreo del asentamiento en las excavaciones y cimentaciones, en los deslizamientos de rocas y muros, en la compresión de suelo bajo carga y en el monitoreo de convergencias en los túneles.

Las Celdas de presión están diseñadas para medir las cargas transmitidas por el terreno en el perímetro del túnel, se instalan en elementos prefabricados como dovelas o tuberías. Y las Piezoceldas miden la presión combinada de tensión efectiva y la presión del agua intersticial, se aplican en el monitoreo de la presión total ejercida sobre una estructura para verificar las hipótesis de diseño y para determinar la magnitud, distribución y orientación de los esfuerzos. Durante la construcción del túnel, la medición del desplazamiento y la convergencia de la pared del túnel son muy importantes. El monitoreo de las convergencias se lleva a cabo con la ayuda de alfileres o placas objetivo, montadas en la pared del túnel inmediatamente después de la excavación. Las lecturas entre los puntos de la misma sección transversal se grafican con el tiempo. Si las mediciones se realizan con métodos ópticos (mediante el uso de patas reflectantes), las operaciones de monitoreo no interfieren con el proceso de construcción.

El distómetro o extensómetro de cinta, permite medir cambios en la distancia entre dos puntos de referencia. Por lo general, se usa para el monitoreo de convergencia durante la tunelización, la característica principal de este instrumento es proporcionar una tensión constante en la cinta métrica para que permanezca recta. Una cierta cantidad de puntos de medición colocados en lugares significativos se obtienen mediante pernos especiales instalados en el revestimiento de forma permanente. La longitud de la cinta se puede leer directamente en el instrumento. Los cambios en la longitud entre las mediciones de diferencia dan la convergencia del túnel.

Los levantamientos topográficos permiten determinar la posición de algunos puntos en el espacio con respecto a un punto de referencia fijo. Se utilizan fuera del túnel para estudiar y controlar los asentamientos en el entorno urbano. Dentro del túnel, las mediciones topográficas se utilizan principalmente para determinar los desplazamientos del contorno del túnel en un tiempo relativamente corto.

Hoy en día, los teodolitos tradicionales se sustituyen por estaciones totales. En general están equipados con un teodolito electrónico, un distanómetro y un sistema de adquisición a bordo que permite almacenar todos los datos grabados (ángulos azimutales, ángulos cenitales y distancias) (Delisio A., 2015).

La medición óptica 3D es una evolución de las mediciones de convergencia convencionales (basadas en extensómetro de cinta). Con este sistema, los desplazamientos absolutos se pueden medir en un espacio 3D. La precisión de las mediciones se ve afectada por las malas condiciones de trabajo (como la presencia de polvo). El sistema de medición óptica 3D en lugar de los métodos convencionales de monitoreo de desplazamiento puede ayudar al registro automático de datos, para hacer un juicio adecuado de una manera más eficiente y segura mediante el uso de datos procesados por una computadora (Delisio A., 2015).

CAPÍTULO 3

CONTROL DE PROCESOS DE EXCAVACIÓN Y MODOS DE OPERACIÓN ASOCIADOS

3. CONTROL DE PROCESOS Y MODOS DE OPERACIÓN ASOCIADOS

3.1. Control de Procesos

La seguridad y calidad en la construcción de obras subterráneas son muy complejas, debido a sus condiciones de contorno (geología). Estas obras de ingeniería se construyen en cualquier tipo de suelo, con elevadas presiones de agua y en zonas densamente pobladas que exigen una estricta minimización de asentamientos. Estos procesos reducen en la mayor medida posible los plazos de ejecución, convirtiéndose en una parte esencial de la gestión de proyectos de estas características.

El Control de Procesos tiene sus orígenes a mediados del siglo XX, estructurado de simples interfaces de usuario, el operador de una máquina industrial tiene la función de operar, observar y corregir (Figura 3.1). Las correcciones se ejecutan cuando ciertos parámetros superan unos valores límite de referencia. Esto resulta insuficiente para procesos complejos como el tuneleo, ya que no cuenta con las herramientas necesarias que permitan reaccionar antes las variaciones geológicas del subsuelo.

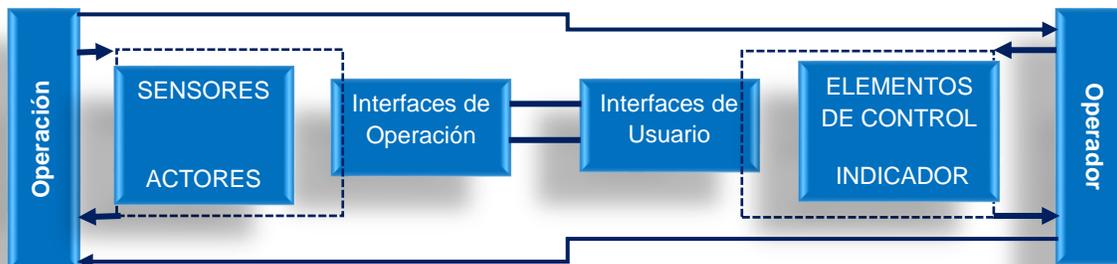


Figura 3.1 Modelo de interfaz de Usuario (Comulada M, 2005).

La excavación con escudo, por su complejidad el control de procesos es un sistema dinámico, que se precisa de modelos de control predictivos (Figura 3.2). En comparación con otros métodos constructivos, la excavación con tuneladora proporciona en tiempo real un gran número parámetros de funcionamiento de la máquina que pueden integrarse eficientemente en un circuito de control de procesos (Comulada M, 2005).

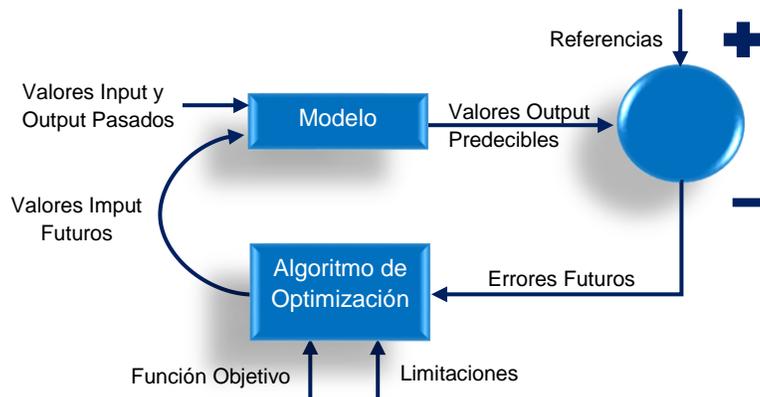


Figura 3.2 Modelo de Control Predictivo (Comulada M, 2005).

El control de procesos es la técnica que sirve para la evaluación de los parámetros de excavación de una TBM, analiza e identifica la interacción entre los distintos procesos que constituyen la excavación con tuneladora y la interacción entre el suelo y el escudo. Este sistema optimiza la seguridad y calidad de la obra, el rendimiento en el proceso de excavación y los costos del proyecto (Pérez A, 2019).

El objetivo principal es asegurar la estabilidad del suelo, minimizar los asentamientos diferenciales y los efectos inducidos a las estructuras existentes, así como el aseguramiento del proceso de excavación con la comparación de valores reales registrados por la tuneladora y los de proyecto, por medio de la gestión de datos y la experiencia de los ingenieros.

El control de procesos es sumamente importante porque el escudo es altamente dependiente de las características del suelo, en algunos métodos de excavación, el material excavado es el que actúa como medio de sostenimiento del frente y para mantener ese equilibrio de fuerzas se ajustan los parámetros de excavación con la intención de conseguir los rendimientos y el avance. La correcta realización del control de procesos genera buenos resultados en la seguridad y calidad de la obra, pero también ayuda a tener buenos rendimientos de avance y bajar los costos. Para cumplir los objetivos anteriormente mencionados se debe conocer perfectamente el medio donde se desenvolverá la tuneladora, ya que son medios complejos y cambiantes.

El sistema debe ser alimentado con datos suficientes para poder llevar a cabo un análisis exitoso. Los escudos están equipados con sensores que registran los parámetros de funcionamiento de la maquinaria y herramientas que lo componen, desde presiones y desplazamientos, hasta caudales y pesos. Entre más datos se registran, más eficiente será el proceso de control (Figura 3.3).

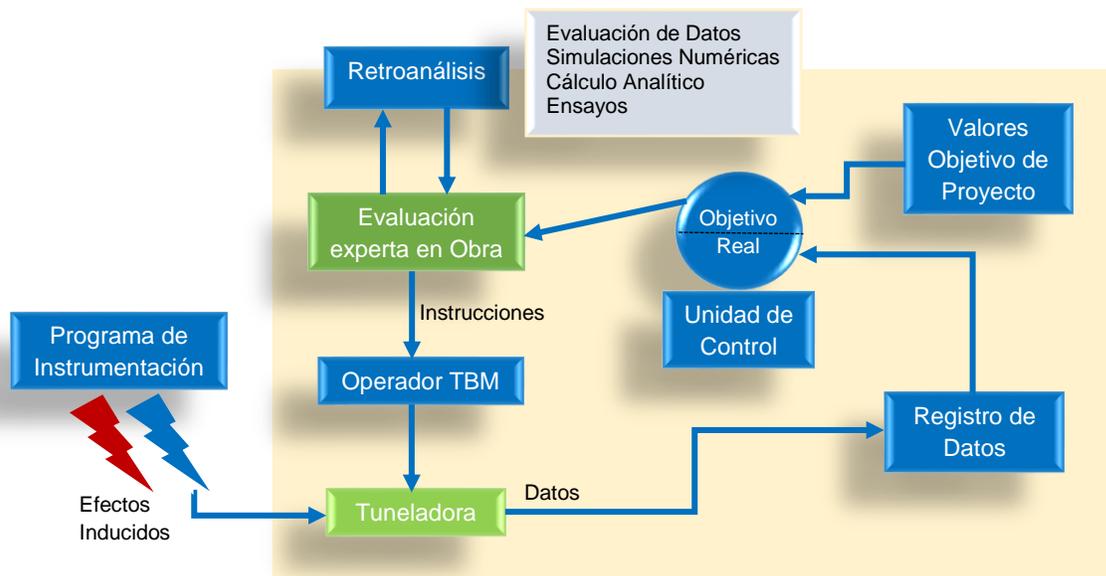


Figura 3.3 Circuito de Control de Procesos (Comulada M, 2005).

Los parámetros operacionales se registran y almacenan digitalmente, durante el avance, el circuito de control principalmente compara los parámetros reales medidos con los valores objetivo de referencia. Esta comparación la realiza el ingeniero de frente especializado, tomando en cuenta las condiciones geológicas e hidrogeológicas que está encontrando al momento de excavar.

El objetivo de esta comparación es tomar decisiones fundadas para poder adaptar la operación de la tuneladora a las condiciones actuales del suelo, este proceso se puede realizar por medio de las Redes Neuronales Artificiales.

Para el mejoramiento del control de procesos se implementan herramientas informáticas que permiten tener una mejor percepción de la interacción suelo-tuneladora, y que permitan manejar en el menor tiempo posible un gran número de datos interrelacionados entre sí.

Deben desarrollarse y emplearse modelos matemáticos y numéricos realistas que simulen el proceso constructivo y las condiciones geológicas de contorno. Estos modelos proporcionan los valores objetivo de referencia para la operación, es importante llevar a cabo retroanálisis para validar o mejorar las hipótesis de cálculo adoptadas, con el objetivo de minimizar el tiempo en la toma de decisiones por parte del operador y de los ingenieros.

3.1.1. Gestión de Datos

La realización de una gestión de datos es importante para la implementación de un control de procesos, ya que las fuentes de alimentación de datos son muy variadas, principalmente destacan la información geológica e hidrogeológica del proyecto, los cálculos y resultados para la determinación de valores objetivo, los datos de la tuneladora, las lecturas del programa de instrumentación y datos e información de otros proyectos de referencia.

Las maquinas tuneladoras pueden registrar más de 600 parámetros en intervalos de 10 a 60 segundos. Los datos deben ser centralizados en una base de datos que sea fácilmente accesible a las personas responsables. La estructura de las bases de datos varía según el tipo de proyecto y de tuneladora (Comulada M., 2005). Los datos de la instrumentación geotécnica son esenciales, sin la evaluación de estos datos es mucho más difícil tomar decisiones sobre el manejo de la tuneladora y sobre la interacción suelo-tuneladora. La introducción de lecturas de instrumentación en el sistema de Control permite mejorar la toma de decisiones, esto se consigue con la instalación en superficie de robots de lectura como los teodolitos automáticos, transmiten los datos en tiempo real por señales de radio, la lectura de convergencia de los anillos de dovelas y la variación estacional de los niveles freáticos captada por piezómetros. Es normal que los datos no sean homogéneos, la integración de toda la información en una misma base de datos es posible, pero deben cuidarse las interfaces.

La Información geológica, geotécnica e hidrológica es importante para el análisis de la interacción del subsuelo con el contorno exterior del escudo. Existe gran cantidad de información adicional que hay que integrar en el sistema de gestión de datos. Por ejemplo, la frecuencia de cambios de herramientas de corte, los daños en los cepillos, fisuración en las dovelas o las propiedades reológicas de la bentonita en hidroescudos, etc.

Para el Control de Procesos existen distintos programas de cómputo que facilitan el análisis de los datos y de sus interacciones, algunos de ellos combinan la visualización de datos de la tuneladora con la integración de los perfiles geológicos.

3.1.2. Implementación del Control de Procesos

Para poder llevar a cabo los objetivos ya descritos, se han desarrollado programas de cómputo específicos para la visualización, procesamiento y análisis de los parámetros de la tuneladora y de toda la información asociada (Figura 3.4). Con una adecuada representación de los datos en combinación con la disponibilidad de toda la información, es posible representar y captar de forma rápida el funcionamiento de la tuneladora para obtener los avances necesarios del proyecto sin riesgo alguno.



Figura 3.4 Monitor de observación de parámetros en la TBM (González C, 2014).

La información de la base de datos debe estar disponible en todo momento y deberá transmitirse en tiempo real, el *software* recibe toda esta información vía Internet (Figura 3.5). Los datos operacionales de la tuneladora son transmitidos a una computadora central que actúa como servidor para el resto de las computadoras conectadas en red. El *software* permite evaluar los procesos clave y el funcionamiento particular de los distintos equipos y componentes de la tuneladora con objeto de poder detectar con la máxima precisión donde se encuentran los puntos débiles o fallos del proceso y cómo mejorarlo (Comulada M, 2005).

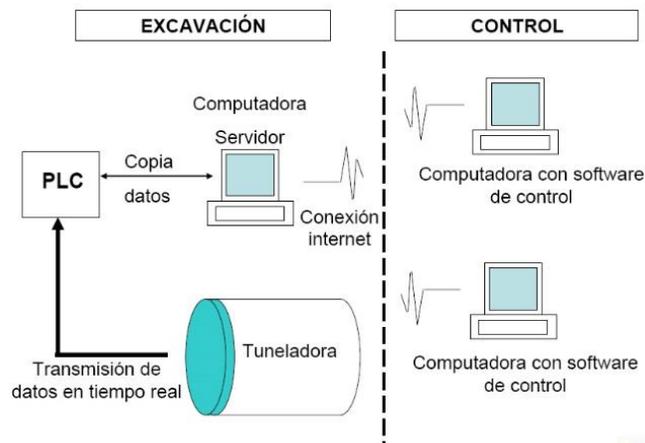


Figura 3.5 Esquema de conexiones para el Control de Procesos (Comulada M, 2005).

Como ya se ha comentado el control de procesos puede realizarse en tiempo real, pero también a nivel de post-proceso, el objetivo es comprender en todo momento el funcionamiento de la tuneladora y detectar a tiempo los posibles errores u operaciones no óptimas. El análisis de post-proceso estudia las situaciones ya ocurridas para aplicar las soluciones que se deriven para el resto del proyecto o incluso para otros proyectos.

3.2. Control de Procesos en TBM-EPB

El monitoreo y el análisis de datos en el control de procesos de una TBM-EPB debe ser continuo, para llevar un control preventivo por medio de la correlación de los parámetros registrados y los efectos provocados por la misma excavación. Este proceso puede realizarse en tiempo real, dependiendo de las características y tecnologías de la máquina, sirve para detectar indirectamente las características del frente de la excavación y tener una adecuada operación de la tuneladora.

El control de procesos de una EPB alcanzará su objetivo cuando el registro y análisis de datos operacionales y la toma de decisiones ya sea del operador de la máquina o del ingeniero de frente; se relacionen y se obtengan resultados en tiempo real, para ello la realización de este trabajo.

Cuando los valores de operación sean registrados, se pueden comparar con los valores objetivo que se tengan de referencia, ya sea de un proyecto en particular, de una base de datos, de manera indirecta, por métodos empíricos y/o analíticos para determinar asentamientos y presiones de sostenimiento requeridas para el avance de la tuneladora o de ser posible, por medio de una red neuronal. El control de procesos de estas máquinas también puede alimentarse de lecturas de instrumentación geotécnica-estructural dentro y fuera de la obra subterránea.

Las EPB son tuneladoras que registran una gran cantidad de información que se puede dividir de dos formas, la primera toma en cuenta los parámetros operacionales como la velocidad de rotación de la cabeza de corte, torque, fuerza de empuje, penetración, velocidad de avance, y la segunda registra los parámetros de otros procesos relacionados con la presión de frente, acondicionamiento del terreno, inyección de mortero, etc.

El control de procesos para estos escudos definen diagramas de avance que ayudan a obtener una curva de aprendizaje para comprender las etapas del proceso de construcción del proyecto en las primeras etapas del mismo. En las EPB cuando se lleva un monitoreo y control adecuado es eficiente en los terrenos de todo tipo, por medio del balance de tierras, ya que son versátiles a la hora de aplicar los diferentes modos de operación que le son atribuidos, dependiendo de las características y tecnologías del diseño de la misma.

3.3. Principales Parámetros de Operación en Tuneladoras tipo EPB

El proceso de excavación de túneles por medios mecanizados conocidas como TBM tipo EPB, consideran el principio fundamental enfocado en obtener el equilibrio entre la presión de frente con la presión que ejercerá la tuneladora, para no alterar el estado actual del subsuelo y provocar asentamientos o bufamientos en el terreno circundante.

El control y monitoreo del proceso de excavación se realiza mediante sistemas computarizados de la misma tuneladora, con ello es suficiente para visualizar en tiempo real los parámetros operacionales durante el proceso de excavación.

El sistema es capaz de controlar de forma automática todo el proceso, los parámetros de operación de la tuneladora deben ser tomados en cuenta en todas las fases del proyecto, desde la planeación para el diseño y la excavación, los procesos más importantes y los parámetros operacionales clave son los siguientes.

Tiempos: Se refiere a la información respecto a la duración de cada uno de los tres ciclos que constituyen un proceso completo de avance, la excavación, el montaje de los anillos y las posibles paradas que tenga que realizar la máquina. El análisis de los tiempos invertidos en cada una de las fases permite una primera evaluación de su funcionamiento y es la base del análisis para la optimización de los procesos.

Presión de trabajo: Es el control de las principales presiones de la máquina, estas comprenden las presiones que se aplican para el sostenimiento del terreno y son, la presión de sostenimiento de frente, la presiones a lo largo del escudo y la presión de inyección de mortero. Todas estas presiones se miden con células de presión y con manómetros en las líneas de inyección de mortero.

Acondicionamiento de las espumas: Estos parámetros son el FIR y FER, calculados a partir de las medidas de caudal en las líneas de aire y líquido, la distribución de las espumas se realiza en la zona central de la cabeza de corte, en la periférica de la cabeza de corte, en la cámara de excavación y en el tornillo transportador.

Inyección de mortero: Este proceso es clave en la minimización de asentamientos en superficie como es la inyección de mortero por la cola del escudo. Para ello se representa el volumen total de mortero inyectado, calculado a partir del número de emboladas realizadas durante la fase de excavación, frente al volumen teórico objetivo de inyección. Es importante también evaluar la correlación entre las presiones de inyección de mortero (-) en clave y las presiones medidas en la grasa de cola (+).

Balance de fuerzas: En este proceso se registran las principales fuerzas que resultan del proceso de avance y excavación, y que caracterizan la interacción entre la tuneladora y el terreno. Las fuerzas registradas y calculadas a partir de los datos de funcionamiento de la tuneladora son la presión de los gatos de empuje, la fuerza en la articulación del escudo, la fuerza de empuje total, la fuerza total transmitida a través de la cabeza de corte y la fuerza media transmitida a los cortadores en la cabeza de corte.

El guiado y posición: El seguimiento del guiado de la tuneladora y su posición son importantes para reflejar la posición de la tuneladora respecto al perfil de terreno excavado y para controlar la calidad del montaje del anillo.

Torque: Es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia, es decir, es la fuerza con la cual se registra que tanto le cuesta rotar a la cabeza de corte. Su incremento es indicativo de que existe un cambio geológico en el frente de excavación, daños en las herramientas de corte debido a la fricción y/o problemas mecánicos con la transmisión principal. Está en función de la rueda de corte y el contacto con el terreno, es un parámetro de respuesta que determina que tanto trabajo le cuesta a la máquina girar dependiendo de las condiciones del terreno.

Velocidad de avance: Mide la velocidad de avance de la tuneladora por unidad de tiempo, está representado por mm/min.

Velocidad de rotación de la rueda de corte: Es la velocidad angular de la rueda de corte, se representa como la velocidad de giro de la cabeza de corte.

Penetración: Se refiere al grado de avance que la TBM, esto se consigue por cada giro de la rueda de corte, está expresado en (mm/rev.). El cálculo de la penetración se dificulta conforme se incrementa la complejidad geológica del trazo (Pérez A., 2019). Se calcula como el cociente de la velocidad de avance entre la velocidad angular de la rueda de corte.

Presión de frente: Para obtener este valor primero se obtiene un valor teórico que se verá afectada por la suma de la presión hidrostática y la presión de frente, si llega a basar la tuneladora por debajo de alguna estructura se le añadirá esa carga al cálculo de la presión.

Fuerza de empuje: Es la fuerza que ejercen los gatos de la máquina hacia el escudo con la intención de tener un avance.

3.4. Modos de operación de TBM-EPB de acuerdo con las condiciones geológicas del terreno

La necesidad de construir obras subterráneas implica el surgimiento de proyectos que se diseñen bajo parámetros geotécnicos y condiciones geológicas que hubieran sido inconcebibles de construir hace algunos años. El uso de máquinas tuneladoras que estén especialmente adaptadas para excavar con seguridad los túneles donde sea necesario, independientemente de las condiciones existentes en el subsuelo, requiere del conocimiento adecuado de: los parámetros geotécnicos que intervienen en el medio, el diseño de la tuneladora y el modo de operación adecuado para las condiciones del terreno, así como la

preparación y compromiso de los operarios e ingenieros de frente, encargados de manipular los parámetros operacionales para el avance de la excavación.

Cada vez es más frecuente la construcción de túneles en geologías heterogéneas, la combinación de litologías, secciones de roca sólida o fracturada, suelos firmes o blandos, presencia de agua, etc. Requieren de una adecuada elección del modo de operación de la tuneladora para llevar a cabo el proceso de excavación y revestimiento del túnel de una forma segura y confiable.

Es evidente la necesidad de adaptarse a la conversión de un modo de operación a otro, dependiendo de las condiciones específicas de los suelos en cada etapa del proceso, para mantener los tiempos y avances de ejecución. Las TBM ofrecen la posibilidad de modificar la tecnología de excavación del túnel para adaptarse a las condiciones reales del terreno y, por lo tanto, hacer funcionar las tuneladoras en modos diferentes.

Las ventajas que surgen a partir de la implementación de máquinas con presión de tierras balanceadas para lograr un buen funcionamiento y operación ante frentes inestables, es la estabilidad que le otorga al frente de trabajo con el mismo material excavado, la adición de productos acondicionantes para obtener una mezcla visco-plástica para su rezago por medio de bandas transportadoras, y así lograr extraer todo el material excavado sin perder la presión de frente para la estabilidad del material inestable.

De esta manera se ha logrado que las tuneladoras se acondicionen o trabajen de ciertos modos dependiendo de las características del subsuelo, para satisfacer las necesidades de la obra subterránea. Los rendimientos van a depender del modo de operación de la tuneladora, ya que depende de los procesos que se llevan a cabo en cada uno de ellos.

El modo abierto que es el frente despresurizado, trabaja en los frentes un poco más competentes y con poca o nula presencia de agua, la extracción de la rezaga se hace por bandas transportadoras desde el interior de la rueda de corte. El modo cerrado con presión balanceada en el frente, es aplicado en frentes de excavación inestables como los suelos mixtos o blandos con presencia de agua, la extracción del material se realiza por medio de un tornillo sin fin en el interior de la cabeza de corte y tubería hasta la superficie. Habrá ocasiones en las que será más factible trabajar en modo abierto que en modo cerrado, pero dependerá primordialmente de las características geológicas del macizo rocoso.

De acuerdo con el tipo de operación que se realice con la tuneladora y la presión que se tenga en la cámara de excavación, existen cuatro tipos de modos de operación en máquinas EPB, modo abierto, cerrado y de transición con o sin aire comprimido (semi-abierto o semi-cerrado).

La selección de cualquiera de estos modos, como ya se ha dicho, depende de la estabilidad del frente de excavación y de la presencia de agua. Estas formas de operar de las EPB se observan en la figura 3.6 donde se describe cada modo y sus características principales, a) frente de excavación estable con la cámara de excavación abierta en un macizo rocoso poco permeable, b) frente de excavación estable con la cámara cerrada, prácticamente lineal y presurizada, con un control de flujo de agua moderado, c) frente de excavación estable con la cámara cerrada parcialmente lineal y presurizada, el control de flujo de agua es de moderado a significativo y d) frente de excavación inestable con flujo de agua significativo, con la cámara de excavación cerrada y presurizada.

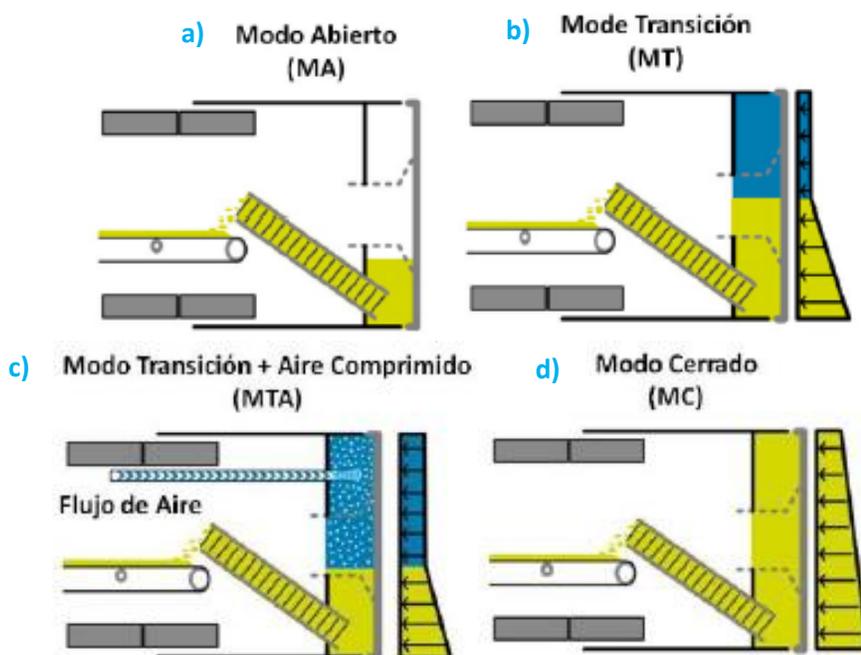


Figura 3.6 Modos de operación de máquinas tuneladoras EPB (Moreno A, 2020).

El principio fundamental es como se mantiene el llenado de la cámara de excavación. En el modo transición más aire comprimido, la cámara se llena por debajo del eje del túnel para prevenir bloqueos de la rueda de corte y así asegurar que no existan bajos rendimientos por un ineficiente acondicionamiento. El aire comprimido en el resto de la cámara ayuda a equilibrar el flujo de agua que tiende hacia el interior del escudo.

En modo transición, cuando se llena la cámara por encima del eje de la TBM, se restringe el acceso del material, hasta tener un acondicionamiento mediante el uso de espumas y bentonita, que formen un material más plástico y manejable. En modo cerrado es necesario llenar la cámara por completo; el punto clave para este modo de trabajo es el acondicionamiento mediante espumas y bentonita (Moreno A, 2020).

3.5. Introducción a los parámetros geotécnicos del subsuelo referido a las características de un macizo rocoso

Los grandes avances en la Mecánica de Suelos permiten desarrollar modelos de cálculo que fueron sustituyendo benéficamente a las técnicas empíricas que conocemos hoy en día. El estudio del comportamiento geológico-geotécnico del terreno ante solicitaciones y cambios en sus condiciones de contorno requiere una dimensión científica más importante para comprender mejor los mecanismos de falla del suelo y los parámetros geotécnicos que los gobiernan.

Las pruebas en sitio son técnicas importantes de reconocimiento que aportan la información necesaria, así como los ensayos de laboratorio sobre muestras alteradas o inalteradas del suelo debidamente interpretadas, permitiendo estimar con mayor precisión los parámetros geotécnicos. La aplicación de la Mecánica de Suelos para predecir el comportamiento del terreno requiere del conocimiento y experiencia para la modelización de perfiles geotécnicos representativos de las características del suelo.

Los parámetros geotécnicos se estiman a partir de ensayos normalizados realizados in-situ o en laboratorio, sobre muestras representativas de las unidades geotécnicas (Figura 3.7), es decir, se realizan sobre los sitios en los que la litología y comportamiento mecánico es representativo de las condiciones que presentará el suelo ante una excavación subterránea.

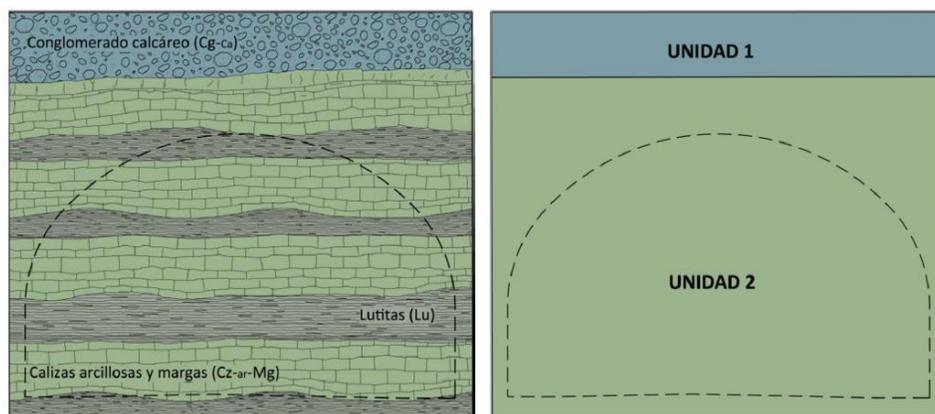


Figura 3.7 Definición de unidades geotécnicas a partir de la homogenización de grupos litológicos (Sánchez F, 2019).

Para identificar las características físicas y tamaños de partícula, se realizan ensayos clásicos a las muestras; la granulometría, expresada en el porcentaje de material que pasa por los tamices y los límites de consistencia; límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), para identificar su plasticidad. El estado húmedo o seco del suelo tiene una importancia esencial en la

respuesta mecánica, resistencia y compresibilidad. Los ensayos permiten determinar las propiedades de estado como el contenido de agua (w), relación de vacíos (e) y el peso específico (γ_d).

La resistencia del suelo ante sollicitaciones de cargas transmitidas por estructuras en la superficie o por la misma excavación de túneles, se determina mediante pruebas de compresión simple, triaxial y corte. Por medio de una prueba triaxial se pueden determinar algunos parámetros geotécnicos importantes, como la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (Φ).

Existen correlaciones con las cuales se pueden estimar indirectamente los parámetros geotécnicos, los especialistas se apoyan en estas relaciones para afinar y estimar sus valores característicos. De esta manera los parámetros geotécnicos con mayor incertidumbre se corrigen con base a los valores obtenidos en parámetros más confiables, como los obtenidos en las pruebas de campo y laboratorio, y así caracterizar el suelo con mayor exactitud (Figura 3.8).

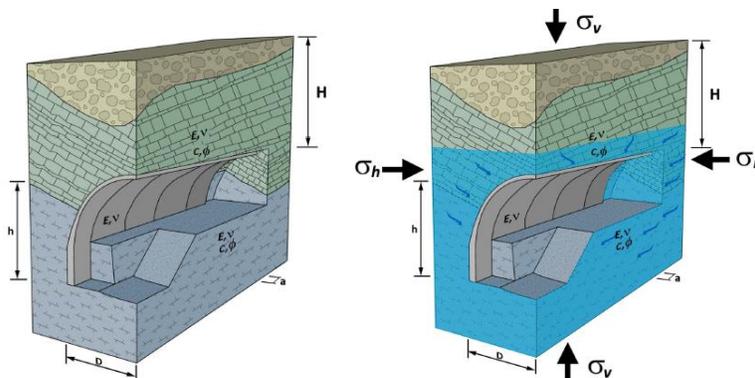


Figura 3.8 Aspectos que componen y caracterizan al suelo y su estabilidad (Sánchez F, 2019).

A la hora de diseñar y construir un túnel es necesario conocer tres aspectos básicos: la estabilidad del frente desde el punto de vista de la seguridad durante la ejecución, tanto dentro del túnel como en superficie, el estudio de los movimientos del terreno y su consecuente afectación a las construcciones superficiales en túneles someros, y por último el sostenimiento del túnel diseñado para que funcione correctamente durante toda su vida útil. Para que sea capaz de resistir todas las sollicitaciones a las que pueda ser sometido como cargas del terreno, el nivel freático y las deformaciones que pueda llegar a sufrir en la etapa constructiva y de servicio.

Cuando la tuneladora avanza sobre secciones mixtas o macizos rocosos, esta se enfrenta a situaciones desfavorables ya que puede encontrar roca muy fracturada y suelos inestables que dificultan la correcta operación de avance de la EPB, lo que resulta obligado en la mayor parte de los casos, mantener estable el frente trabajando en modo cerrado.

En las secciones mixtas resulta cuestionable el principio sobre el que se basa el funcionamiento de las máquinas EPB. En ellas no es posible garantizar un control total de la sección de excavación. Llevar la cámara llena de material, acondicionar la rezaga correctamente y avanzar con un régimen de presiones adecuado en el mamparo, no evita que puedan producirse vibraciones y fluctuaciones importantes y no controlables en la presión real de soporte que existe en el frente y en consecuencia, puedan producirse sobre-excavaciones de la sección (Didac A, 2009).

La generación correcta de la presión en el mamparo se logra si está perfectamente relleno el espacio que existe entre el frente y la cabeza de corte, el relleno puede no ser perfecto cuando en la misma sección existen materiales con resistencias y propiedades distintas, pero se puede acondicionar el material de rezaga y operar de manera cuidadosa. La sección en roca podría proporcionar ocasionalmente bloques de cierto tamaño que complicarían el acondicionamiento correcto del material de rezaga y su salida por el tornillo sinfín.

En los macizos rocosos, la cabeza de corte y las herramientas sufren esfuerzos dinámicos considerables al pasar del terreno blando a la roca dura o fracturada aumentando el número de roturas en dichas herramientas. En ocasiones se realizan tratamientos previos al frente de la excavación que reduzcan el carácter mixto de la sección para evitar sobre-excavaciones.

El control correcto de todos los parámetros de operación de las EPB en los frentes mixtos o macizos rocosos, especialmente los relativos al avance, pesaje del material y a la inyección de mortero (GAP), así como los parámetros operacionales principales descritos anteriormente, y la esencial elección del modo de operación, harán que la tuneladora trabaje sin problemas en este tipo de terrenos, donde las condiciones para excavar son muy diversas.

3.6. Clasificación geomecánica de macizos rocosos

El comportamiento del subsuelo y del frente de excavación no se rige por las propiedades geomecánicas de la roca matriz, sino por las características del macizo rocoso. Ya que si se toman en cuenta tales parámetros de la roca sin considerarlo como un conjunto o macizo, sus discontinuidades y las distintas propiedades que tiene serán muy diferentes a la roca matriz, por lo que generaría una mala elección del tipo de tuneladora a emplear.

Es importante emplear la clasificación geomecánica del macizo rocoso, ya que su comportamiento está determinado por los factores: las propiedades de la roca matriz y su litología, la frecuencia y tipo de las discontinuidades para definir el grado de fracturación, el tamaño y la forma de los bloques del macizo, sus propiedades hidrogeológicas, el grado de alteración, estado de esfuerzos in situ y si existe la presencia de agua.

Las clasificaciones geomecánicas son una herramienta de uso generalizado en obras subterráneas, ya que es posible obtener un mejor conocimiento, interpretación y aplicación de los datos geológicos y geotécnicos. Son criterios muy útiles que ayudan a la representación del comportamiento mecánico de los macizos rocosos, así como de los posibles sistemas de soporte, estabilización y reforzamiento adecuados para el túnel (Sánchez F., 2019). Algunas de ellas son las siguientes:

- Rock Mass Rating o sistema RMR de Z.T. Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1984, 1989).
- Clasificación del Instituto Geotécnico Noruego, o sistema Q de Barton, Lien y Lunde (1974).
- Geological Strength Index (GSI) desarrollado por Hoek (1985).

Estas técnicas o clasificaciones se basan en los datos de recuperación de núcleos RQD, número de familias de discontinuidades, rugosidad y estado de las juntas, presencia de agua y la resistencia de la roca matriz, así como la orientación de las discontinuidades. Los macizos rocosos están conformados por materiales con calidades muy distintas, como lo son el suelo y la roca, también se le denomina frente mixto por la heterogeneidad que presentan en el subsuelo.

En el frente de la excavación existen distintas proporciones de suelo y roca en las que se podría presentar y tener un comportamiento diferente en cada avance de excavación. Los frentes mixtos contienen dos o más materiales geológicos presentes de manera simultánea en el frente de excavación con diferentes propiedades mecánicas.

La relación de resistencia a la compresión uniaxial (UCS) es igual o inferior a 1/10 entre el material más débil y el más fuerte. Para ejemplificar las posibles condiciones en las que se presenta un frente de excavación mixto, se divide en tres condiciones diferentes (Tóth et al., 2013).

Terreno mixto en Interfaz roca-suelo (IRS)

Presenta una matriz de suelo que cubre la roca, al excavar un túnel en esta condición se encuentran dos materiales muy diferentes, con resistencias muy diferentes. Áreas de karst relleno y minas llenas de materiales blandos también se consideran como IRS, este tipo de frente mixto es probablemente el frente más encontrado en las obras subterráneas. Los problemas encontrados durante la excavación en terrenos tipo IRS son: vibraciones en la máquina, cargas de impacto sobre la cabeza de corte y una desigual distribución de fuerzas en el frente del túnel (Figura 3.9a).

Boleos de roca en una matriz de suelo (BRS)

Este frente de excavación incluye piedras de río y rocas incrustadas en una matriz más blanda, ya sean depósitos del río y granito completamente erosionado. El tamaño de los bloques es muy variable entre cada uno de ellos. Se presentan en depósitos de aluvión donde existen piedras de río de diferentes tamaños y están rodeados por materiales arenosos y otros tipos de rocas meteorizadas, los bloques de roca están incrustados en suelos residuales (Figura 3.9b).

Intercalaciones de suelo en una matriz rocosa (ISR)

Formado por masas de roca en estratos con materiales de diferentes propiedades y a su vez la misma roca con diferente composición mineralógica, formaciones sedimentarias, zonas de fallas e intrusiones en rocas homogéneas. Excavar el subsuelo en este tipo de condiciones dependerá de la relación de área de las rocas y el suelo, así como de las propiedades de cada uno de ellos en el frente de la excavación y la orientación de los estratos con respecto al área excavada por la tuneladora (Figura 3.9c).

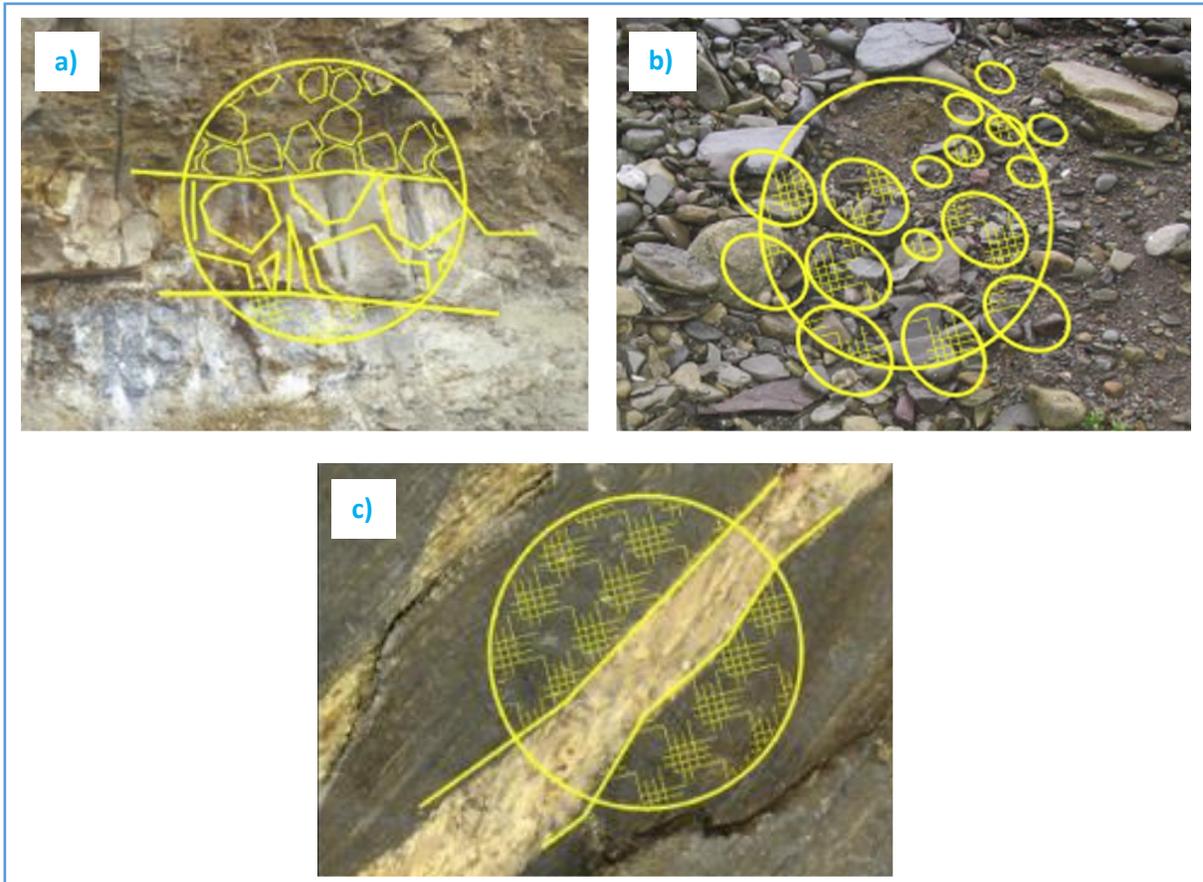


Figura 3.9 a) Frente de excavación mixto en una Interfaz roca-suelo, b) Frente mixto con bloques de roca en una matriz de suelo, c) Terreno mixto de tipo ISR (Tóth et al., 2013).

Para obtener un excelente rendimiento y calidad en los trabajos de construcción de túneles por medios mecanizados, es importante tomar en cuenta la relación e interacción que existe entre los parámetros operacionales de la tuneladora, las condiciones geológicas y geomecánicas del frente de excavación. Para poder excavar en macizos rocosos se debe considerar el diseño de la tuneladora y el o los modos de operación requeridos por la máquina, utilizando los principales parámetros operativos y las propiedades geomecánicas del terreno.

CAPÍTULO 4

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

4. INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La Inteligencia Artificial (IA) es la rama de las ciencias computacionales que se encarga del diseño y construcción de sistemas capaces de realizar tareas asociadas con la inteligencia humana. Sus aplicaciones van desde el reconocimiento en imágenes, objetos y personas, hasta el habla y la traducción automática de textos, pasando por el diagnóstico y tratamiento de enfermedades y la toma de decisiones (Mitchell T. 1997).

El desarrollo de la IA crece gracias a la disponibilidad de datos y recursos tecnológicos, así como a los avances en las técnicas de aprendizaje computacional. Tiene un gran impacto profesional, las actividades laborales y técnicas podrían ser automatizadas. Algunos factores clave del uso y aprovechamiento de los sistemas inteligentes son: la transparencia y confiabilidad en la toma de decisiones y la representatividad.

La Inteligencia Artificial pretende imitar las funciones cognitivas propias de la mente humana, como: creatividad, sensibilidad, aprendizaje, entendimiento, percepción del ambiente y uso del lenguaje. Un subcampo de la IA que ha ganado auge en años recientes es el aprendizaje computacional “*machine learning*”, donde un sistema aprende a ejecutar tareas, ya sea a partir de ejemplos o mediante prueba y error (Mitchell T. 1997). La IA está construida por medio de conocimientos y teorías existentes en áreas tales como: ciencias de la computación, filosofía, matemáticas y la psicología, para contribuir con enfoques, herramientas y experiencias en el desarrollo de esta nueva área del conocimiento.

Esta área de conocimiento (IA), describe de forma estructurada como el ser humano produce conclusiones racionales a partir de un grupo de premisas con un conjunto de reglas conocidas como silogismos (filosofía). La IA consta de herramientas para manipular las aseveraciones de certeza lógica, así como aquellas en las que existe incertidumbre de tipo probabilista, modelación de diferentes tipos de fenómenos y manejo del razonamiento con algoritmos (matemáticas). La psicología refuerza la idea de que los humanos y otros animales pueden ser considerados como máquinas para el procesamiento de información. Las ciencias de la computación son el medio para modelar a través de las computadoras, los programas son extensos y funcionan con los grandes avances de velocidad y memoria aportados por la industria del cómputo.

El aprendizaje automático es la capacidad de las máquinas de aprender por sí mismas y mejorar sus propios rendimientos. No dependen de programación basada en reglas, sino en algoritmos que identifican patrones en los datos y luego predicen patrones similares en datos nuevos, pudiendo mejorar continuamente la calidad de las predicciones a medida que pasa el tiempo. Todas las definiciones de Inteligencia Artificial están relacionadas con la idea del desarrollo de métodos y algoritmos que permitan a las computadoras comportarse de modo inteligente como los procesos que se llevan a cabo en el cerebro.

Los modelos llamados redes neuronales están inspirados en una forma simplificada del funcionamiento de las neuronas. En la actualidad, las redes neuronales profundas (con gran número de células bajo un orden jerárquico), han sido muy exitosas en tareas de alta complejidad (Graves A. et al., 2013). La búsqueda constante de medios para brindar facilidades y orientar estos estudios en las capacidades humanas, es una fuente de nuevas ideas para el diseño de las nuevas máquinas, en donde puedan implementarse fácilmente algoritmos para solucionar multitud de problemas que antes resultaban difíciles de resolver.

4.1. Principios de la Inteligencia Artificial

A lo largo de la historia el hombre ha buscado la materialización de seres semejantes a él, creando artefactos con aspecto, movimientos y hasta comportamiento similar al que presentan los seres humanos. Asimov, en su libro *Runaround* describió lo que el día de hoy son las tres leyes de la robótica. Su obra literaria serviría como motivación para que los científicos e ingenieros trataran de hacerla realidad.

En los años 50, Rosenblatt desarrolló un sistema visual para el reconocimiento de patrones denominado Perceptrón y mediante el cual se logró resolver una amplia gama de problemas por medio de reconocimiento de patrones. No obstante, este esfuerzo realizado se diluyó rápidamente (Ponce J. et al., 2014).

El matemático inglés Alan Turing (1912-1954) propuso una prueba con la finalidad de demostrar la existencia de “inteligencia” en un dispositivo no biológico. Esta prueba conocida como “*test de Turing*” se fundamenta en la hipótesis de que, si una máquina se comporta en todos aspectos como inteligente, entonces debe ser inteligente. A partir de esto las investigaciones se enfocaron en la redacción de sistemas de inteligencia artificial lingüística. Dos de las contribuciones más importantes de Alan Turing son el diseño de la primera computadora capaz de jugar al ajedrez y el establecimiento de la naturaleza simbólica de la computación (Huerta J, 2009).

En los años 70, un equipo de investigadores dirigido por Edward Feigenbaum comenzaría a elaborar un proyecto para resolver problemas de la vida cotidiana (problemas más concretos); dando origen a lo que se conocería como los sistemas expertos. En 1958 McCarthy desarrolló un lenguaje de programación simbólica, utilizado aún en la actualidad LISP (Procesamiento de LIStas). En los años 80, se desarrollaron lenguajes especiales de Inteligencia Artificial, como por ejemplo el EURISKO. Este programa se compone y retroalimenta de reglas heurísticas por inducción (Huerta J, 2009).

En esa misma época se formaron escuelas de inteligencia artificial: Newell y Simon en la Universidad de Carnegie-Mellon desarrollaron modelos de comportamiento cuya estructura se parecía al cerebro humano, lo que derivó la postura en las redes neuronales artificiales.

Y por el otro lado McCarthy y Minsky en el Instituto Tecnológico de Massachusett, se centraron en procesamientos de carácter inteligente, sin preocuparse por la estructuración y los componentes similares al ser humano (Ponce J. et al., 2014).

Los enfoques mencionados obedecen a los objetivos de entender la inteligencia natural humana, y usar máquinas inteligentes para adquirir conocimientos y resolver problemas considerados como intelectualmente difíciles.

4.2. Enfoques de la Inteligencia Artificial

Existen enfoques que define a la inteligencia artificial: el tecnológico o ingenieril y el científico. La rama de la ingeniería busca la creación de sistemas computacionales o informáticos que realicen tareas para el planteamiento y resolución de problemas concretos. La rama científica define el estudio del comportamiento inteligente, su objetivo es obtener una teoría que explique la conducta producida por seres de natural inteligencia y lograr crear entes artificiales capaces de alcanzar dicho proceder.

Las técnicas clásicas como los sistemas expertos, sistemas basados en el conocimiento, entre otros; desde el punto de vista tecnológico tienen problemas que radican en que no son capaces de adaptarse a los cambios del entorno y que es preciso tener un conocimiento explícito del problema para poder abordarlo satisfactoriamente. Estos sistemas tienen que ser programados y no pueden autoprogramarse ni adaptarse a nuevos requisitos del entorno. Para resolver este problema, se han desarrollado diversas aproximaciones computacionales conocidas de forma global como Técnicas Adaptativas (Romero J et al., 2000).

4.3. Técnicas Adaptativas

Son técnicas aplicadas a un problema, capaces de tener un buen funcionamiento a pesar de las circunstancias cambiantes del entorno. Para un buen funcionamiento del sistema se ajustan relativamente los parámetros de entrada de manera autónoma para conseguir la resolución del problema.

El objetivo principal es conseguir una autonomía en el aprendizaje de las computadoras, por medio de la programación automática. Estas técnicas utilizan conocimiento que representado de tal forma permita obtener generalizaciones, se pueda modificar fácilmente y sea utilizable en una gran cantidad de situaciones; mediante el uso de herramientas en la solución de problemas, mismas que forman técnicas que proveen elementos fundamentales para la resolución de los modelos. La aplicación de estas técnicas utilizadas en la inteligencia artificial ha tenido aportaciones en diferentes áreas como la búsqueda de soluciones, representación del conocimiento, reconocimiento de patrones, procesamiento de lenguaje natural, robótica, redes neuronales, sistemas expertos y algoritmos genéticos (figura 4.1).

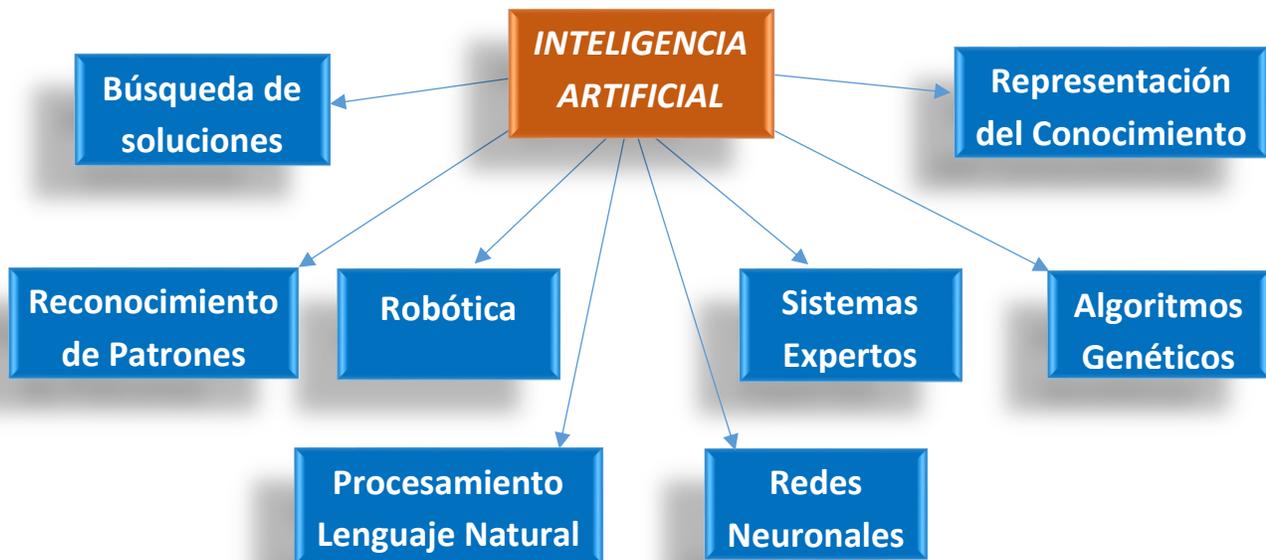


Figura 4.1 Áreas de la Inteligencia Artificial.

Búsqueda de Soluciones

Resuelve los problemas en los cuales no existe un método más directo como una estructura con técnicas directas, es fundamental considerar la búsqueda heurística (conjunto de criterios, métodos o principios que se utilizan para encontrar, entre varios cambios posibles, cuál o cuáles son los más efectivos para obtener un objetivo determinado), como una de las formas más eficientes en la solución de problemas, misma que busca una mayor posibilidad de éxito y acotar así el número de soluciones exploradas.

Cuando existen problemas complejos y se está realizando una búsqueda de soluciones, se abren nuevas posibilidades para futuras decisiones. Estos problemas se representan como un árbol de posibilidades, con nodos conectados mediante líneas o bien con métodos que buscan sistemáticamente todas las posibilidades, la manera más eficiente es la búsqueda heurística.

Representación del Conocimiento

El conocimiento es una forma de resolver problemas complejos, la IA utiliza diferentes sistemas para la representación del conocimiento e implícitamente las posibilidades que ofrece la utilización de dichos sistemas. Existen diferentes tipos de conocimiento: El general, cumplen con un conjunto de objetivos representados con fórmulas matemáticas o lógicas, así como de lenguaje hablado/escrito. El conocimiento procedural, son secuencias de acciones a seguir, representado mediante diagramas de flujo y algoritmos. Conocimiento factual, con base en hechos y Metaconocimiento, conocimiento sobre el conocimiento.

La representación del conocimiento en una computadora radica en hallar una relación entre el cuerpo del mismo y un sistema simbólico que lo represente y que le permita solucionar problemas con base de dicha correspondencia.

Reconocimiento de Patrones

Técnicas clasificatorias que identifican subgrupos con características en común, dependiendo del grado de asociación se obtiene una conclusión diferente. El reconocimiento de patrones consiste en medir el parecido entre formas y su comparación cuantitativa, es un método formal para medir la similitud entre dos formas o fenómenos que representan cierta regularidad.

Procesamiento del Lenguaje Natural

A través del lenguaje natural surge el fenómeno de la comunicación, es una forma de transmitir el conocimiento. El lenguaje natural consiste en el procesamiento del lenguaje escrito, requiere conocimientos de fonología y de la información para manejar ambigüedades que se presenten en el habla. El procesamiento del lenguaje natural tiene por objetivo estudiar el lenguaje de los seres humanos para poder acceder desde a una computadora hasta todo tipo de seres inteligentes.

Robótica

Tiene por objetivo la construcción de robots inteligentes capaces de funcionar con autonomía, se ocupa de tareas motrices y perceptuales, la robótica es la conexión inteligente entre la percepción y la acción. Tiene por objeto diseñar y desarrollar máquinas que sean capaces de realizar procesos mecánicos y manuales mediante la interacción de un sistema de control y un sistema sensorial con el que cuentan, permitiendo responder a los cambios que surgen en el entorno del mundo real. Es fundamental el desarrollo para recibir y emitir comunicación, comprender lo que pasa en el entorno, formular y ejecutar planes, así como poder motorizar sus operaciones. La robótica debe permitir el aumento de la habilidad y la autonomía de los mecanismos que se construyen.

Algoritmos Genéticos

Un algoritmo genético trabaja sobre la representación de una posible solución a un problema dado, aplicando operadores genéticos para combinar las bondades de las soluciones mediante la reproducción para medir la oportunidad de solución se crea una función de aptitud que califica a las soluciones propuestas. Estos algoritmos son un procedimiento de búsqueda y optimización, basado en mecanismos genéticos de selección natural de los seres vivos, el funcionamiento de dichos algoritmos es la evolución a partir de una población que ofrece soluciones candidatas a un problema para mejorar las soluciones existentes y generar nuevas, las cuales son evaluadas por una función de ajuste (Ponce J et al., 2014).

Sistemas Expertos

Almacenan el conocimiento de expertos para un campo determinado y la solución se da mediante deducción lógica de conclusión, el desarrollo de un software que reproducirá el comportamiento de un experto humano en la solución de un problema. La simulación de los procesos de los expertos permite interactuar con objetos del mundo real para realizar tareas de forma precisa y rápida, similares a las tareas realizadas por el ser humano por medio del procesamiento de información y las técnicas para la solución de problemas.

El sistema de expertos es un programa de computadora interactivo que incorpora juicios, experiencias, reglas de evaluación, intuición y otras habilidades para dar asesoría inteligente sobre las tareas o problemas complejos empleando modelos de razonamiento humano.

4.4. Redes Neuronales

El auge de las Redes Neuronales Artificiales se activa con la aplicación de nuevos métodos para la resolución de problemas sin la necesidad de acudir a técnicas convencionales, basándose en la simulación del comportamiento del sistema nervioso biológico de los seres humanos.

Esto se logra con un proceso de aprendizaje que se adopta naturalmente, permitiendo establecer una o varias relaciones entre las variables presentadas que definen el comportamiento de una acción y generalizar el conocimiento adquirido, para establecer comportamientos debidos a estas condiciones por medio de dicho aprendizaje.

4.4.1. Redes Neuronales Biológicas

La mayoría de lo que entendemos en nuestra vida cotidiana, implica la actividad del sistema nervioso, especialmente del cerebro. Este sistema nervioso está compuesto por miles de millones de células, las principales son las células nerviosas o neuronas, se estima que debe haber cien mil millones de neuronas en nuestro sistema nervioso.

La neurona es una célula del sistema nervioso central que posee la capacidad de recibir y decodificar información en forma de señales eléctricas y químicas, transmitiéndolas a otras células a través del proceso de sinapsis, lo que constituye el principio del funcionamiento del cerebro, su estructura principal se observa en la figura 4.2.

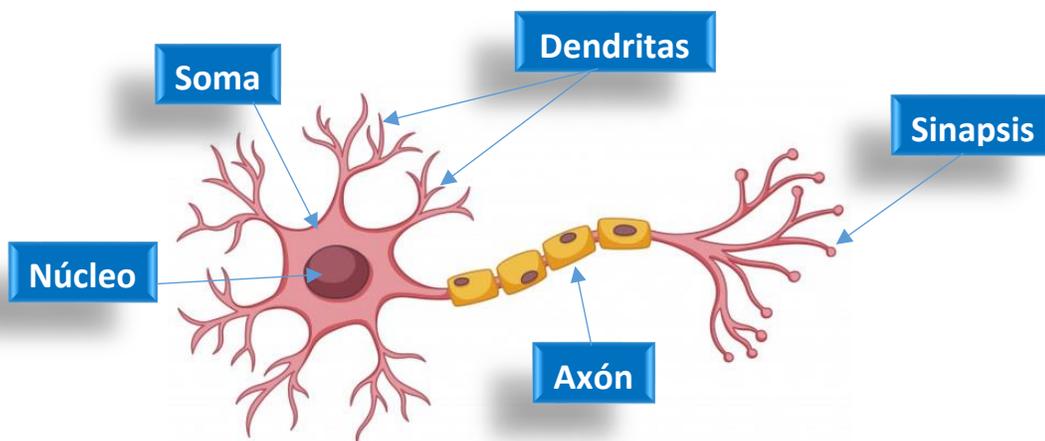


Figura 4.2 Estructura de una neurona biológica.

4.4.1.1. Estructura Biológica

El núcleo es una estructura ubicada en el centro de la neurona, en la que se concentra toda la información genética. En el núcleo también se encuentra un par de nucleolos, una sustancia llamada cromatina, (en la que hay ADN), y el cuerpo accesorio de Cajal, una especie de esfera en la que se acumulan proteínas indispensables para la actividad neuronal.

El soma es el cuerpo celular de la neurona, dentro de él se encuentran una serie de orgánulos que son esenciales para llevar a cabo la síntesis proteica de la neurona, como los ribosomas, que son complejos supramoleculares compuestos por proteínas y ARN (ácido ribonucleico) y las mitocondrias, encargadas de suministrar energía para la actividad celular.

Las dendritas son múltiples ramificaciones que parten del soma y que actúan como zona de recepción de estímulos y alimentación celular, además de establecer conexiones entre las neuronas. Son ricas en orgánulos que contribuyen en el proceso de sinapsis.

El axón representa el principal prolongamiento de la neurona, puede medir varias decenas de centímetros y se encarga de conducir el impulso nervioso a lo largo del cuerpo y también hacia otras neuronas a través de las dendritas.

4.4.1.2. Funcionamiento Neuronal

La función principal de la neurona es la transmisión la información en forma de impulsos nerviosos hacia otras células, lo cual se traduce en “instrucciones” para el organismo. Este proceso de recepción, procesamiento y envío de mensajes se realiza durante la sinapsis, el cual puede ser de dos tipos:

- **Sinapsis eléctrica:** se caracteriza por la transmisión de iones entre una neurona y otra a través de conexiones proteicas, que permiten la transmisión del impulso eléctrico sin que sea necesaria la intervención de un neurotransmisor. La sinapsis eléctrica es bidireccional y más rápida que una sinapsis química.
- **Sinapsis química:** las neuronas liberan y reciben neurotransmisores que son pequeñas moléculas que llevan información a una célula inmediata. Algunos de los neurotransmisores más conocidos son la dopamina, acetilcolina, serotonina, noradrenalina, endorfina y oxitocina (Boeree G, 1998).

Las neuronas forman redes, una sola no puede hacer mucho por sí misma y la función del sistema nervioso depende de grupos de ellas para trabajar en conjunto. Las neuronas individuales se conectan a otras para estimular o inhibir su actividad y forman circuitos que pueden procesar la información entrante y producir una respuesta. Los circuitos neuronales pueden ser muy simples, o pueden componerse de redes neuronales más complejas.

4.4.2. Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) están inspiradas y organizadas en las redes neuronales del cerebro humano, constituidas por elementos que se comportan de forma similar a la neurona biológica en sus funciones más comunes, aprenden de la experiencia, generalizan de ejemplos previos a otros nuevos y abstraen las características principales de una serie de datos. Son sistemas compuestos por estructuras en forma de red que contienen infinidad de conexiones entre sus múltiples capas de procesamiento.

Una RNA es un algoritmo de cálculo que se basa en una analogía del sistema nervioso con la idea general de emular su capacidad de aprendizaje, en forma tal que aprenda a identificar un patrón de asociación entre los valores de un conjunto de variables predictoras (entradas) y los estados que se consideran dependientes de dichos valores (salidas).

La RNA consiste en un grupo de unidades de proceso (nodos) que se asemejan a las neuronas al estar interconectados por medio de un entramado de relaciones (pesos) análogas al concepto de conexiones sinápticas en el sistema nervioso. A partir de los nodos de entrada, la señal progresa a través de la red hasta proporcionar una respuesta en forma de nivel de activación del nodo de salida (Basoqain X, 2001). Los elementos que conforman la RNA se observan en la figura 4.3.

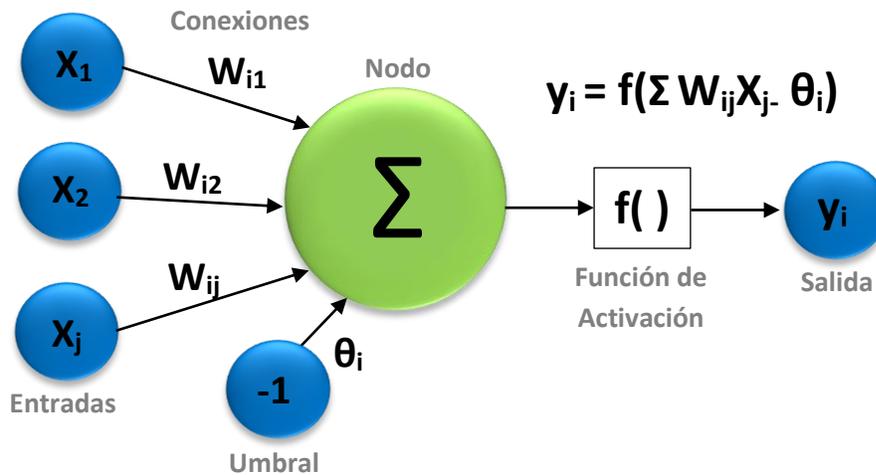


Figura 4.3 Modelo de neurona artificial.

Los valores de salida proporcionan una predicción del resultado en función de las variables de entrada, los nodos son elementos computacionales simples que emulan la respuesta de una neurona a un determinado estímulo. Funcionan como interruptores: cuando la suma de señales de entrada es suficientemente alta, la neurona manda una señal a las neuronas con las que mantiene contacto. Esta situación se modela matemáticamente como una suma de pesos de todas las señales de llegada al nodo (Alcántara L., 2013), en donde:

- El conjunto de entradas X_j está en función de (t) , donde (t) representa el estado actual de la red neuronal.
- Los pesos sinápticos W_{ij} representan la intensidad de interacción entre cada neurona presináptica i y la neurona postsináptica j .
- La regla de propagación se define como $n_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$ y permite obtener, a partir de las entradas y los pesos, el valor del potencial postsináptico n_i de la neurona.
- La función de activación representada por $y_i(t) = f_i(n_i(t))$ es la salida de la neurona y su estado de activación se encarga de atribuir las características no lineales al procesamiento en los nodos. La función actúa sobre el valor arrojado por la función de entrada limitando su crecimiento numérico.
- La función de salida proporciona la salida actual k y (t) de la neurona k en función de su estado de activación actual $a_i(t)$. Frecuentemente la función de salida es simplemente la identidad $F(x) = x$ de modo que el estado de activación de la neurona se considera como la propia salida, es decir: $y_i(t) = F_i(f_i(a_i(t))) = a_i(t)$

De manera general, la operación de la neurona i puede expresarse de la siguiente forma

$$y_i(t) = F_i(f_i(a_i(t-1), \sigma(w_{ij}, x_j(t)))) \quad (1)$$

Al conjunto de pesos de la neurona se añade un parámetro adicional θ_i que se denominara umbral, que es la mínima señal registrada por un sistema, y se resta del potencial postsináptico por lo que el argumento de la función de activación se expresa: $\sum_j W_{ij}X_j - \theta_i$

Si los índices i y j comienza en 0 y definimos a $w_{i0}=\theta_i$ y $x_0=-1$ (constante), se puede obtener el comportamiento de la neurona (García J, 2017), a través de:

$$y_i(t) = f_i(\sum_{j=0}^n W_{ij}X_j) \quad (2)$$

Para cada una de las neuronas conectadas en una red neuronal, se calcula la suma ponderada de sus entradas y sus pesos, aplicándole una función de activación o de transferencia $f(\cdot)$ o $F_k(x)$, esto permite determinar la fuerza de salida y satisfacer las características y necesidades del problema que la neurona intenta resolver. Algunas de las funciones de activación son las siguientes (Ponce J. et al., 2014).

Función Escalón

Se asocia a neuronas binarias en las cuales, cuando la suma de las entradas es mayor o igual que el umbral de la neurona, la activación es 1; si es menor, la activación es 0 (o -1) (figura 4.4).

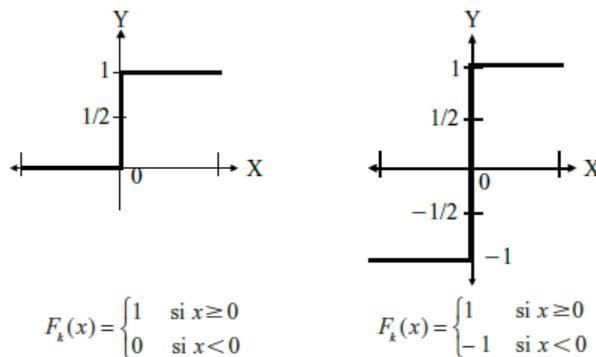


Figura 4.4 Función de Activación Escalón.

Función Lineal y Mixta

La suma de las señales de entrada es menor que un límite inferior, la función se define como 0 (o -1). Si la suma es mayor o igual que el límite superior, entonces la activación es 1. Si la suma de entrada está comprendida entre los dos límites, entonces la activación es 1. Si la suma de entrada está comprendida entre ambos límites, superior e inferior, entonces la activación se define como una función lineal de la suma de las señales de entrada (figura 4.5).

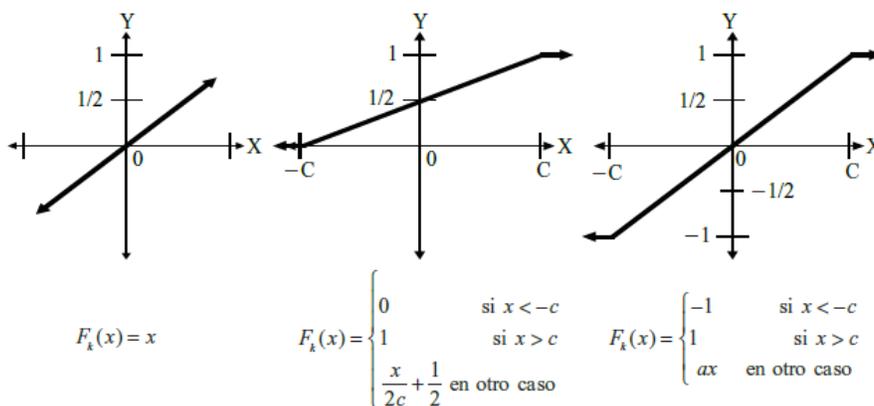


Figura 4.5 Función de Activación Lineal y Mixta.

Función Tangente Hiperbólica

Se emplea en los casos que presentan variaciones suaves de valores positivos y negativos de la señal a clasificar, es una de las funciones más empleadas en entrenamientos supervisados, como en el caso del entrenamiento de retropropagación del error (figura 4.6).

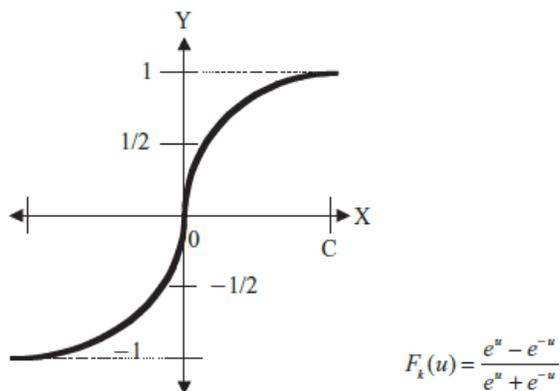


Figura 4.6 Función de Activación Tangente Hiperbólica.

Función Sigmoidal

El valor dado por la función es cercano a uno de los valores asintóticos, el valor de salida está comprendido en la zona alta o baja del sigmoide. Cuando la pendiente es elevada, esta función tiende a la función escalón. Sin embargo, la importancia es que su derivada siempre es positiva y cercana a cero para los valores grandes positivos o negativos. Toma su valor máximo cuando $x=0$, esto hace que se puedan utilizar reglas de aprendizaje definidas para las funciones escalón (figura 4.7).

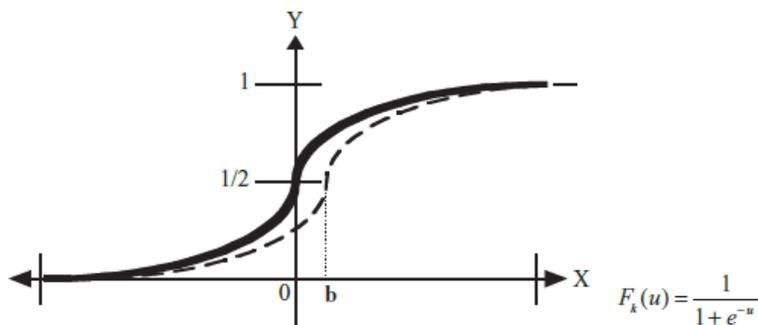


Figura 4.7 Función de Activación Sigmoideal.

Función de Gauss

Los mapeos ocultos algunas veces pueden realizarse con un solo nivel de neuronas mediante el uso de funciones de activación tipo Gauss, en lugar de funciones tipo sigmoideales (figura 4.8).

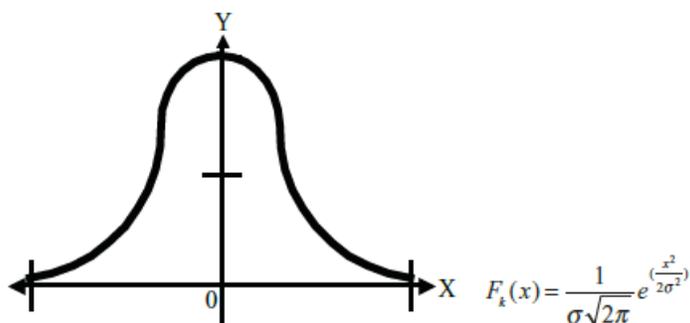


Figura 4.8 Función de Activación de Gauss.

4.4.2.1. Arquitectura de la Red Neuronal

Las RNA presentan una arquitectura totalmente diferente de las computadoras tradicionales de un único procesador, la CPU (Control Process Unit) realiza todos los cálculos ejecutando todas las instrucciones de la secuencia programada en el algoritmo.

La red neuronal se constituye por la interconexión de neuronas, reciben las señales de entrada que provienen de sus antecesoras en el arreglo, esta transmisión de datos dependerá de su forma u organización que tenga la red. Su arquitectura está definida por el número de capas, la cantidad de neuronas contenidas en cada capa y su comportamiento de cada una de ellas, dependiendo de su umbral y función de activación. También está definida por su tipo de conexión.

Capas en la RNA

Las capas son unidades estructurales donde las neuronas están contenidas, la información es procesada en paralelo y fluye a diferentes niveles por las capas superiores a las capas inferiores. Dependiendo del número de capas, la red se puede considerar como:

- Monocapa, representada por una capa que proyecta las entradas a una capa de salida donde se realizan los cálculos, sus conexiones son laterales y/o cruzadas.
- Multicapa, red que contiene un conjunto de capas intermedias (capas ocultas), entre la capa de entrada y la de salida (fig. 4.9) (Acevedo E et al., 1998)

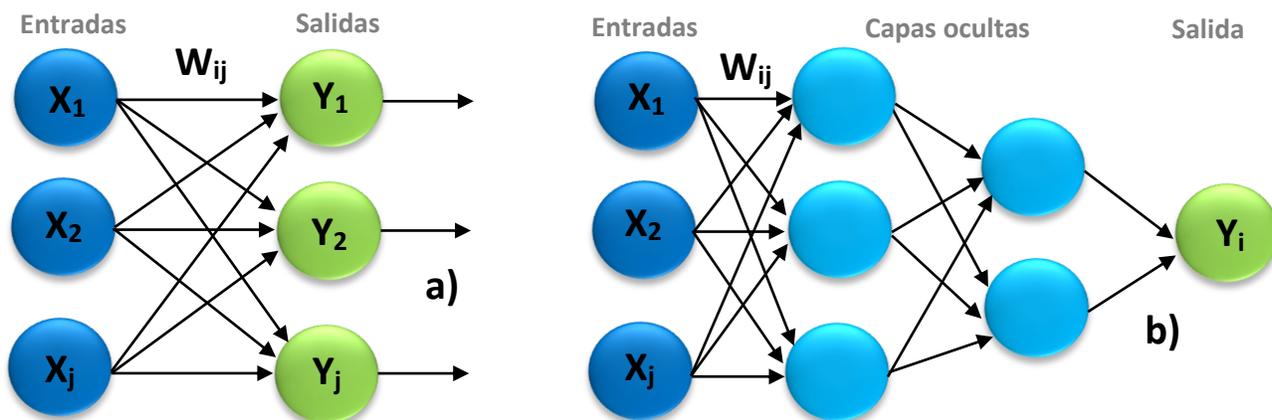


Figura 4.9 Red Neuronal a) Monocapa y b) Multicapa.

4.4.2.2. Tipos de Redes Neuronales y su Aprendizaje

Perceptrón

Unidad básica de inferencia en forma de discriminador lineal, que consiste en la suma de las señales de entrada, multiplicadas por unos valores de pesos escogidos inicialmente en forma aleatoria. En una fase en la que éste aprende, la entrada se compara con un patrón preestablecido para determinar la salida de la red. Si en la comparación la suma de las entradas multiplicadas por los pesos es mayor o igual que el patrón preestablecido, la salida de la red es uno (1); en caso contrario la salida es cero (0).

El perceptrón es un dispositivo que, en su configuración inicial no está en capacidad de distinguir patrones de entrada muy complejos, sin embargo, mediante un proceso de aprendizaje es apto para adquirir esta capacidad. En esencia, el entrenamiento implica un proceso de refuerzo a través del cual los pesos que codifican las sinapsis se incrementan o se disminuyen.

Adaptive Linear Element

Adeline es un modelo que utiliza una neurona similar a la del perceptrón pero de respuesta lineal y cuyas entradas pueden ser continuas, implementa como método de aprendizaje la regla de Widrow-Hoff, realiza una actualización continua de los pesos sinápticos de acuerdo a la contribución de cada neurona sobre el error total de la red. Este método produce un conjunto de pesos sinápticos óptimos y en caso de que los vectores de entrada sean linealmente independientes produce una asociación perfecta entre entradas-salidas (Brío B, 2002).

Perceptrón multicapa

Este tipo de red está compuesta por una capa de entrada, que transmite la información hacia las demás capas de la red, pasando por las capas ocultas, transmitiendo y procesando los datos hacia la capa de salida. El flujo de la información va de la capa de entrada hasta la capa de salida, pero entre nodos o neuronas de la misma capa está restringida la comunicación, solo se permite la conexión entre nodos de la capa anterior o posterior (figura 4.10).

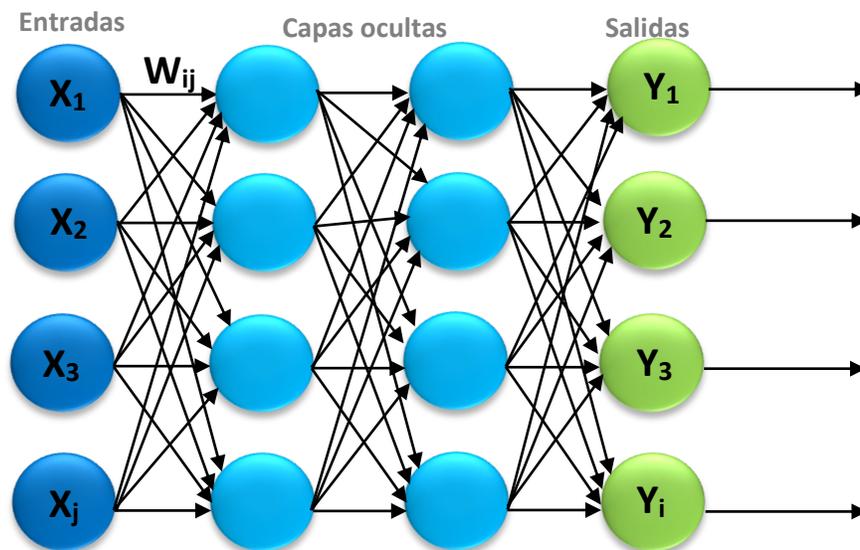


Figura 4.10 Modelo Perceptrón Multicapa.

Las características anteriores le permiten contar con una estructura no lineal para poder establecer la relación entre los datos de entrada y los datos de salida. Este modelo es utilizado para la clasificación de patrones y funciones de aprendizaje, ya que este tipo de red no se programa, es entrenada con el ajuste de datos para obtener una respuesta de salida con valores de error aceptables con respecto a los datos objetivo. La cantidad de neuronas que contiene cada capa ya sea de entrada o de salida está determinada por el tipo de problema a resolver, el número de capas ocultas y las neuronas que la conforman no dependen del tipo de problemática ni de alguna teoría, es a criterio y experiencia de quien formule el algoritmo y diseñe la arquitectura de la RNA.

Aprendizaje de la red

El proceso de aprendizaje es de carácter secuencial. Se da en todo momento adquiriendo conocimiento a través de las experiencias ocurridas. El conjunto de entrenamiento de una red neuronal artificial debe contener dos características, ser significativo y ser representativo; para que haya aprendizaje debe existir un número significativo y representativo de datos durante el proceso.

Las redes neuronales se basan en un algoritmo para aprender, el cual va a depender del método utilizado. Se da por entendido que una red aprendió cuando los pesos de las conexiones han cambiado según la regla de aprendizaje utilizada en el entrenamiento y estos permanecen estables (Cruz P, 2010).

Para que la red resulte efectiva es primordial entrenarla, definiendo la condición de ajuste a una tarea específica, esto quiere decir que la red ha aprendido cuando: se ha alcanzado una cota de error que se considere aceptable, o se ha llegado a un punto de sobre-entrenamiento y por lo tanto una pérdida de la capacidad de generalización, en la cual ya no es posible reducir el error. La fase de entrenamiento consiste en hacer que la red sea capaz de extraer, a partir de las correlaciones existentes entre la información de entrada y de salida, lo que posteriormente le permita estimar un comportamiento ante patrones no conocidos.

Aprendizaje no supervisado

La red no requiere atribución externa para ajustar o cambiar los pesos de las conexiones de las neuronas y no solicita información que le indique si el resultado de la salida en función de los datos de entrada es o no correcta.

Aprendizaje supervisado

Se ajustan sus pesos hasta que la salida tiende a ser la deseada, para ello se utiliza información detallada del error obtenido en cada proceso. La red es capaz de estimar relaciones entrada/salida sin proponer una forma práctica de partida. Existen tres tipos de aprendizaje supervisado:

- **Aprendizaje Estocástico.** Durante el entrenamiento se realizan cambios de forma aleatoria en los pesos de la red y se analiza la salida obtenida en comparación a la salida deseada. Si la diferencia de ambas salidas es mínima, esto significa que la red ha aprendido. Si la diferencia entre las salidas obtenida y esperada es mayor, se aceptarían cambios en el peso en función de una distribución de probabilidades determinadas.

- **Aprendizaje por corrección de error.** Durante el entrenamiento, se presenta a la red las entradas y salidas deseadas. La finalidad de este aprendizaje es que haya una diferencia mínima entre la salida obtenida y la deseada. Para ello, se hace una comparación de ambas salidas y se ajustan los pesos de las conexiones de la red teniendo en cuenta las diferencias con los valores deseados y los obtenidos (utilizado en este trabajo).
- **Aprendizaje por refuerzo.** No se cuenta con una salida esperada, el diseñador de la red indica mediante una señal de refuerzo, si la salida que se obtuvo se acerca a la deseada. Se ajustan los pesos basándose en un mecanismo de probabilidades para acercarse a la salida deseada. Para este aprendizaje, la señal de refuerzo solo informa si la salida de la red se acerca a la deseada o no.

4.4.2.3. Proceso de Entrenamiento y Prueba

Consiste en la presentación de un conjunto amplio de datos de entrenamiento (training set), formado por las entradas y los valores correspondientes de las variables a predecir, es necesario tener el conocimiento suficiente del problema que se va a modelar, para hacer una selección óptima de los parámetros representativos del fenómeno en cuestión. Con la información recabada generar una base de datos lo más completa posible y seleccionar un buen método de aprendizaje y función de transferencia.

Con las herramientas anteriormente mencionadas, se podrá conseguir un proceso iterativo de ajuste de pesos internos (interacciones entre nodos) cuya finalidad es minimizar el error entre las predicciones de la red y los valores observados en la muestra para que conduzcan a resultados óptimos en la capa de salida, acercándose lo más posible a los resultados esperados.

Conocido este error, vuelven a actualizarse los pesos de entrada para cada neurona oculta. Este proceso se repite cíclicamente para cada iteración del proceso de entrenamiento. La presentación de los datos en cada ciclo puede hacerse con la totalidad de estos, siendo esta estrategia la más habitual, o fraccionando en distintos lotes el conjunto de entrenamiento. Observamos que en este tipo de red, el flujo de información es unidireccional, de entrada a salida pero el flujo de actualización del error es de retropropagación (*backpropagation*) (Trujillo J y March J, 2000).

Una vez determinados los grupos de datos para el entrenamiento y la prueba, se configura la Red Neuronal, definiendo el número de nodos de la capa de entrada y salida, así como el número de capas ocultas con sus correspondientes nodos (Herrera J, 2019). El proceso general para el entrenamiento de la Red Neuronal es el siguiente (Figura 4.11):

- Definir la arquitectura inicial de la RNA, estableciendo la función de transferencia para cada capa y fijando un valor de error tolerable. Para iniciar el entrenamiento, se asocia a cada parámetro de entrada un peso (W) en forma aleatoria.
- La propagación de la información se realiza hacia al frente hasta llegar a un valor estimado por la RNA.
- Se evalúa el resultado obtenido con respecto al valor objetivo utilizando una diferencia normalizada, obteniendo el correspondiente error (e). Si resulta ser menor que el establecido, el proceso se detiene y se almacena la configuración propuesta del modelo de Red Neuronal, si el error no es tolerable se procede a realizar un ajuste de los pesos (W) en todas las etapas del proceso.
- El ajuste de los pesos es con base a su contribución relativa al error total y se realiza de la capa de salida hasta la entrada (retropropagación).
- El proceso de entrenamiento se repite iterativamente y se detiene hasta que se el valor del error sea aceptable o mediante la observación de la reducción del error con respecto al número de iteraciones.
- El entrenamiento y las pruebas se hacen con su conjunto de datos correspondiente, realizado el entrenamiento simultáneamente se evalúa el mismo con los datos del conjunto de pruebas sin sesgos.

Si los resultados del modelo al término del proceso de entrenamiento no son los esperados, es recomendable definir otra configuración de arquitectura de la Red para repetir el procedimiento anteriormente mencionado. Como criterio de selección de una arquitectura neuronal se toma como base una sola capa oculta con un número determinado de nodos, para después ir incrementándolos de acuerdo con los resultados obtenidos.

Para después considerar dos capas ocultas con su respectivo número de nodos, y así ir modificando la estructura para obtener en valor mínimo del error.

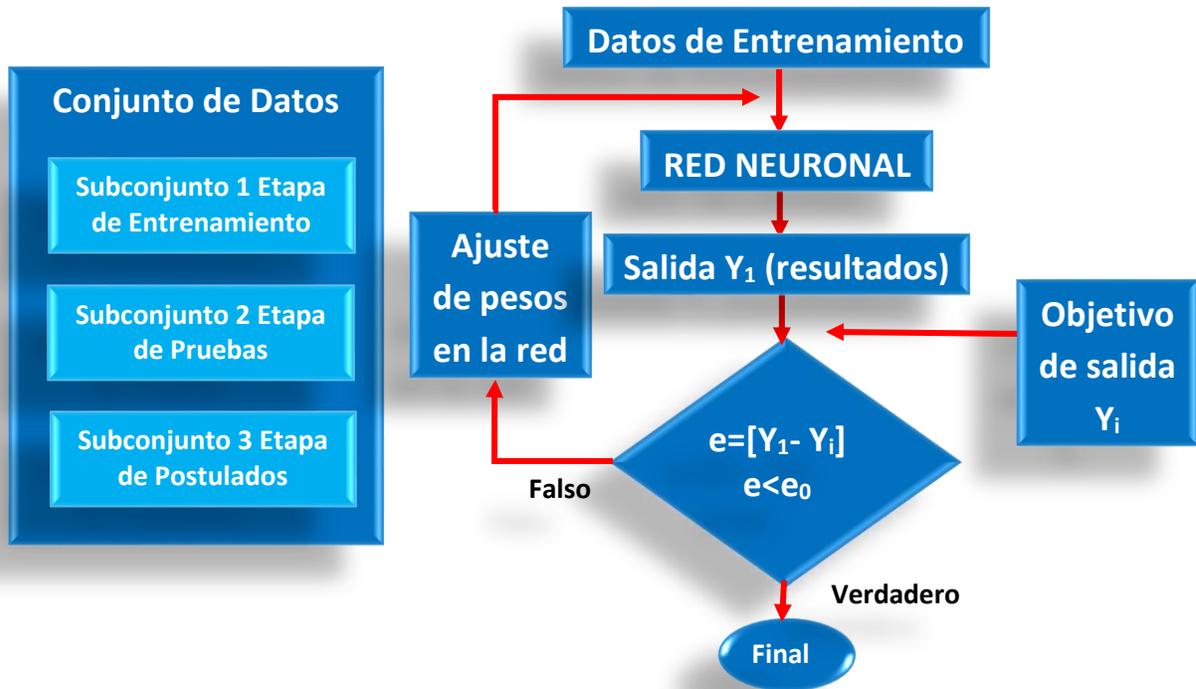


Figura 4.11 Flujo de entrenamiento de la Red.

4.4.2.4. Algoritmo de Retropropagación (*backpropagation BP*)

La invención de este algoritmo ha desempeñado un papel vital en el resurgimiento de las redes neuronales artificiales. Es un método de entrenamiento de redes multicapa, su potencial reside en su capacidad de utilizar capas ocultas durante el entrenamiento lo que le permite considerar comportamientos no lineales.

El algoritmo de retropropagación (BP) busca minimizar el error medio cuadrático de la función en el espacio de los pesos, usando el método del gradiente descendiente. La combinación de los pesos que minimizan la función de error es considerada para ser una solución al problema de aprendizaje (Fritsch J, 1996), el BP opera de la forma siguiente:

- Se proporciona a la red un conjunto de patrones constituidos por pares de entradas y salidas para su aprendizaje.
- Los datos se proporcionan en la primera capa de entrada y es propagada por las capas ocultas hasta generar una salida.
- Los resultados de salida son comparados con los valores objetivo y se calcula el error.
- El valor del error es transmitido hacia atrás partiendo de la capa de salida, pasando por las capas ocultas hasta llegar a la capa entrada. Todos los nodos toman un porcentaje del error en función del valor de su peso.

- Dependiendo del porcentaje recibido en cada neurona, se ejecuta un ajuste a los pesos en las interconexiones, para que con ello el valor de las salidas este más próximo a los deseados y el error disminuya (Alcántara L, 2013).

Para minimizar el error se utiliza el algoritmo BP en forma secuencial, en cada nodo de entrada para no considerar el proceso como una combinación de entradas, la secuencia para aplicar el algoritmo BP es el siguiente:

1. Se propaga la información de las entradas a través de la red hasta alcanzar la salida, se calcula para la neurona (k) el error (e_k), donde (y_k) es la salida calculada y (d_k) es la salida deseada de la neurona (k).

$$e_k = d_k - y_k \quad (3)$$

2. Se procede al ajuste de los pesos de conexión, para ello se determina el valor (δ_k), donde (g') es la derivada de la función de activación.

$$\delta_k = e_k g'(y_k) \quad (4)$$

A continuación se calcula un valor (δ_j) para las capas precedentes con la expresión:

$$\delta_j = \eta g'(y_j) \sum_{k=0}^k \delta_k w_{jk} \quad (5)$$

(k) representa el número de neuronas de la capa correspondiente y (η) es un parámetro de aprendizaje que determina el nivel de ajuste que se hará al peso de la conexión. Con los valores (δ_j) se estiman los incrementos (Δw) mediante los cuales los pesos se ajustarán.

$$\Delta w_{jk} = \delta_j y_k \quad (6)$$

El valor (Δw_{jk}) permite modificar el peso (w_{jk}) de forma tal que el valor ajustado estará dado por:

$$w_{jk} = w_{jk} + \Delta w_{jk} \quad (7)$$

3. Después de ejecutado las formulaciones anteriores, el algoritmo de retropropagación se desplaza a la siguiente entrada y al ajuste de los pesos de acuerdo a la salida. El proceso se repite hasta alcanzar una condición límite, que se genera previamente para detenerlo, es útil para ello el valor del error medio cuadrático de los datos de entrenamiento (Alcántara L, 2013).

Las redes neuronales artificiales cuentan principalmente con una regla de propagación que establece la forma en que se transmite la información entre los nodos, una función de transferencia que sirve para evaluar la condición de los nodos cuando ha procesado la

información de entrada y así determinar si deberá ser transmitida o no de acuerdo a la regla de propagación, y un proceso de aprendizaje al modelo neuronal donde se le presentan diversos patrones de entrada y sus correspondientes salidas, para que establezca las relaciones existentes entre estos datos de entrada-salida y haga una estimación propia de las salidas.

Si en este proceso hay diferencias al respecto en los resultados, quiere decir que existe un error, mismo que debe ser reducido hasta un valor aceptable mediante el ajuste de los pesos en las conexiones de los nodos. Al reducirse el error se dice que el modelo está aprendiendo y está obteniendo conocimiento. Una vez que un modelo ha sido entrenado deberá ser valorado y probar su desempeño para que evalúe un conjunto de patrones entrenada-salida diferente que no haya sido utilizado durante el entrenamiento.

4.4.2.5. Generalización y Sobre-entrenamiento de la Red

Cuando se realiza el entrenamiento de una Red Neuronal Artificial se debe llegar a un punto lo más cercano posible a la generalización de los resultados, para asegurar que la red esté aprendiendo de los patrones de datos que se le agregan para obtener una determinada salida.

Es importante evaluar también cuál es su comportamiento ante patrones o datos que no fueron utilizados en su entrenamiento, en la Figura 4.12 se ilustra el comportamiento tonto de los valores de entrenamiento como los correspondientes objetivo, en el caso (a) se observa una buena capacidad de generalización del modelo, mientras que en el (b) es claro que la ha perdido. La red aprende de los datos que le son presentados y arroja una salida que depende de dichos valores. Es necesario evaluar el comportamiento ante entradas que no se utilizaron en el entrenamiento.

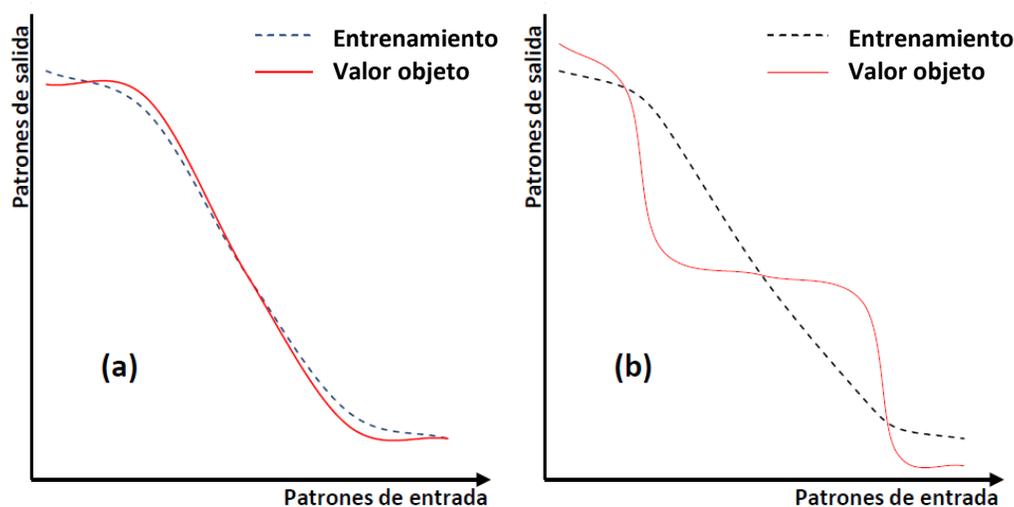


Figura 4.12 Capacidad de Generalización de la RNA (Alcántara L, 2013).

Para hacer esta comparación de generalización, es con base en los datos objeto con respecto a los resultados obtenidos en el entrenamiento. Es necesario contar con dos conjuntos de datos que representen al fenómeno que se pretende modelar en la red, uno de ellos se entrena ajustándole los pesos y el segundo servirá como prueba para verificar que el entrenamiento ya realizado sea el adecuado, este último conjunto permite evaluar su nivel de generalización del modelo.

Si al evaluar los resultados se observa una mala estimación, implica un mal entrenamiento por lo que deberá procederse a modificar la estructura del modelo. La Red Neuronal durante el proceso de entrenamiento se somete a un número muy grande de ciclos de trabajo, lo que ocasiona un sobre-entrenamiento o pérdida de generalización (Alcántara L, 2013). El sobre-entrenamiento se genera de dos maneras:

- Cuando se ejecuta un número muy grande de iteraciones durante el entrenamiento, suele ocurrir que la RNA en lugar de aproximarse a la solución tienda a la divergencia, incrementa el nivel del error e inicia un proceso de “memorización” de datos.
- La selección de valores de entrada que no representen adecuadamente el fenómeno a modelar o que presenten sesgos.

Un entrenamiento pobre, el sobre-entrenamiento y la mala elección de datos de entrada, repercuten en las características correctas del problema para poder representarlo y entrenarlo, pocos datos podrían no representar el problema, pero mucha información de entrada, aunque podrían representarlo muy bien, podrían fallar al tratar de generalizar el fenómeno.

Cada Red Neuronal Artificial tiene sus propias características, reglas de propagación, funciones de transferencia y aprendizaje, esto determina como va a interactuar cada nodo de la Red y la información que va a transmitir, así como los resultados a obtener en el aprendizaje y el error esperado al calibrar el modelo.

En la Figura 4.13 se ejemplifica como el valor del error de los datos de entrenamiento y prueba: a) permanecen estables después de un cierto número de ciclos (aprendizaje exitoso con un buen nivel de generalización), b) después de un cierto número de ciclos, el valor del error en los datos de prueba comienza a incrementarse, aun cuando en el entrenamiento se disminuyó el error, se ha perdido la capacidad de generalización (Alcántara L, 2013).

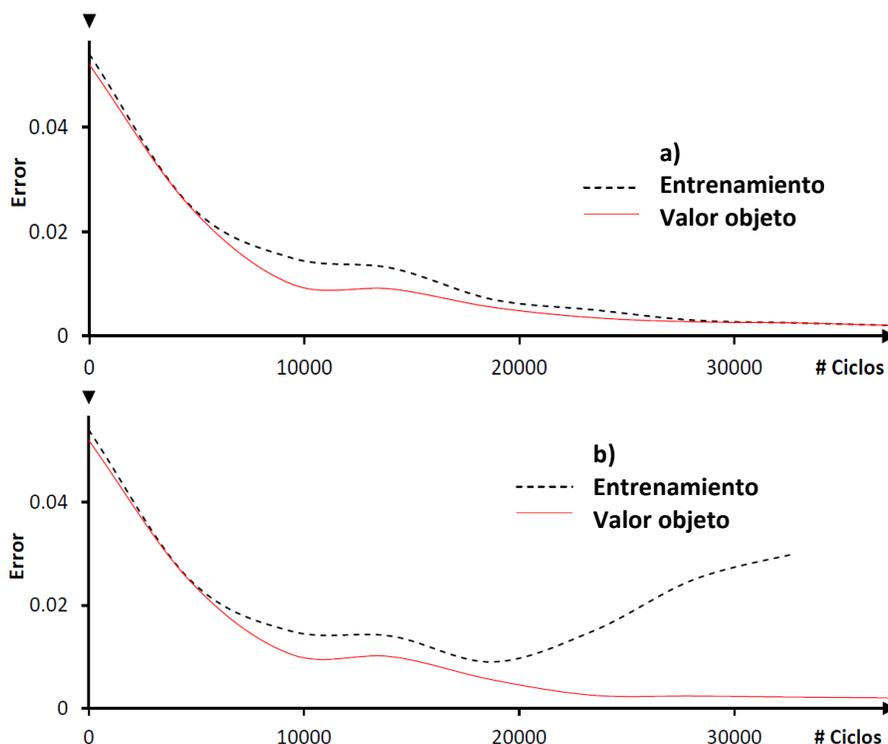


Figura 4.13 Red Neuronal con a) Buena generalización b) pérdida de capacidad de Generalización (Alcántara L, 2013).

4.4.2.6. Incertidumbre del Modelo Neuronal

Para abordar el tema de la incertidumbre es necesario implementar un método sistemático, considerando factores importantes para poder seleccionar de una manera más satisfactoria los valores de entrada, el proceso de selección de datos antes de ser entrenados, la definición de la arquitectura de la Red, la estimación de parámetros internos que contralen el método de optimización, los criterios para detener el entrenamiento y como se validara el modelo (Shahin et al., 2009). Es necesario desarrollar metodologías que nos permitan:

- a) La obtención de modelos robustos para tener la capacidad predictiva de generalizar dentro de un intervalo de datos, al conjunto de datos utilizados en el entrenamiento. Para ello hay que lograr una calibración y validación adecuada de los datos, así como predicciones certeras con base en las relaciones que se modelan.

Ya que las Redes Neuronales Artificiales se validan solo con el error producido en datos semejantes a los del entrenamiento, podrán no ser buenas ante condiciones diferentes a estas, pero tampoco se garantiza para un conjunto de datos similares.

Para ello es necesario realizar un análisis de sensibilidad, donde se corrobora la respuesta de salida del modelo al realizar cambios en los datos de entrada (Shahin et al, 2005).

- b) La transparencia del modelo para la extracción de conocimiento de las redes de entrada, permite interpretar el modelo neuronal para entender cómo afectan los datos de entrada a los datos de salida.

Si se considera la clasificación por color de las técnicas de modelado, los modelos de caja blanca son sistemas basados en principios básicos o leyes físicas, donde las variables y parámetros son conocidos y tienen un significado físico mediante el cual el comportamiento del modelo puede ser explicado. Los modelos de caja negra son sistemas regresivos, o basados en datos en donde la forma funcional de las relaciones existentes entre las variables es desconocida y requiere ser determinada, estos modelos pretenden establecer las relaciones entre las entradas y salidas del correspondiente modelo, más que encontrar una posible estructura del mismo (Alcántara L, 2013).

Las Redes Neuronales Artificiales son modelos de tipo caja negra ya que no cuentan con esa transparencia y no consideran ni explican explícitamente los procesos físicos en los que se basan. El inconveniente identificado es que la Red almacena la información de entrada como un conjunto de pesos que difícilmente se puede interpretar y la estructura del modelo pueden llegar a ser tan compleja que podría presentar fallas al tratar de darle una función de transparencia para relacionar las entradas con sus correspondientes salidas.

- c) Mejorar la capacidad de extrapolación para hacer predicciones certeras no solo con los datos utilizados en la calibración del modelo, aunque es más satisfactorio no extrapolar la información, el no hacerlo restringe la aplicabilidad de la RNA.

Las Redes Neuronales Artificiales conllevan incertidumbre debido a las posibles especificaciones erróneas del modelo, a la complejidad de su arquitectura y la poca eficacia en el proceso de entrenamiento.

Cuando una Red está entrenada, tiene una mayor representación en las regiones donde exista una mayor densidad de datos. Debido a la naturaleza del algoritmo de entrenamiento, no hay garantía que los pesos correspondan al mínimo total de la función de error, aún si este es encontrado, la solución no necesariamente será la óptima ya que el conjunto finito de entrenamiento podría no representar completamente el modelo. A esto se le conoce como la incertidumbre del modelo (Alcántara L, 2013).

Es importante seleccionar adecuadamente la función del error, para modelar fenómenos naturales se utiliza el error medio cuadrático (RMSE). La incertidumbre de las predicciones de las Redes Neuronales no es común que se cuantifiquen, pero el no hacerlo impide obtener la calidad de las predicciones, lo que repercute en la eficiencia del modelo. Las redes Neuronales Artificiales son un método estadístico no-lineal donde se minimiza una función de error y una predicción puntual, así como una estimación de incertidumbres en los pesos del modelo en las predicciones realizadas.

Las técnicas Bayesianas para el entrenamiento de una RNA ayudan a estimar las incertidumbres, ya que este método incorporado al algoritmo de retropropagación mejora la capacidad de predicción del modelo, haciendo una valoración más confiable a dichas predicciones (Buntine y Weigend, 1991). En el análisis Bayesiano, los datos son modelados como una distribución de probabilidad y la deducción es realizada construyendo la posterior condición de probabilidad para las variables de interés no observadas, dados los datos de muestra observados y las suposiciones previas.

La dificultad para construir el modelo neuronal es la complejidad de sí misma, es aceptable que el número óptimo de grados de libertad en el modelo depende del número de patrones de entrenamiento, del ruido contenido en dichos patrones y de la complejidad de las funciones que pretenden ser estimadas (Alcántara L, 2013). La determinación correcta del Modelo Neuronal y su implementación con la complejidad deseada, aunque se realizan con métodos muy estándar, requieren bastante tiempo computacional.

4.5. Aplicación en la Ingeniería de Túneles

La implementación de la Inteligencia Artificial a Túneles tiene por objetivo reaccionar eficazmente a los cambios imprevistos durante la construcción de una obra subterránea. Los ingenieros de campo y los académicos investigan cómo usar esta tecnología para ayudar a mejorar las operaciones de las Tuneladoras, ya que involucra la utilización de diversos parámetros para la operación y monitoreo por parte del operador, estas actividades producen flujos de datos constantes a medida que la máquina avanza en la excavación.

El operador no tiene la habilidad natural de controlar todos los parámetros generados en las máquinas TBM al mismo tiempo, ya que se registran una gran variedad de parámetros en tiempo real sobre el asentamiento en superficie y el subsuelo, vibraciones, velocidad y rotación de la rueda de corte y del tornillo transportador, entre otros.

A lo largo de los años se ha trabajado en la mejora de la automatización y operación de las tuneladoras, pero también se han abierto enfoques a la implementación de Inteligencia Artificial para el reconocimiento de los patrones de datos de entrada, generados en la excavación y que son manipulables por el operador; así mismo con las salidas, relacionadas con el rendimiento, la toma de decisiones y manipulación de la tuneladora en la ejecución del

proceso constructivo. Estas máquinas producen flujos continuos de datos generados por sensores colocados en todo la TBM y en superficies del terreno, todos estos datos recopilados se introducen en algoritmos de procesamiento para obtener datos de salida.

La complejidad de la excavación de túneles por medios mecanizados se amplifica en entornos urbanos, ya que existe muy poco margen de error en los asentamientos permisibles de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulgada. Estos sistemas se operan en condiciones que cambian todo el tiempo y que un operador por naturaleza no sería capaz de monitorear y manipular todos los parámetros al mismo tiempo, por lo que la tecnología como la Inteligencia Artificial por medio de las Redes Neuronales Artificiales serían una herramienta fundamental para la operación y toma de decisiones en el frente de la excavación. Con estas tecnologías y la correcta utilización de los parámetros de entrada en los algoritmos programados, se espera que las tuneladoras sean capaces de operar de forma autónoma.

El rendimiento es un aspecto importante que depende de la operación y manipulación de la tuneladora, aunque también dependerá del comportamiento en sus respectivos entornos geológicos y geotécnicos, mismos que si se tiene la información específica, se obtendrán resultados confiables, efectivos y consistentes. El uso de estas técnicas se ha introducido en este contexto con resultados de alto potencial en pronósticos precisos. El rendimiento en las operaciones de tunelización es uno de los objetivos clave para el éxito de los proyectos, ya que está directamente relacionado con el costo de la obra.

Más allá de las fórmulas matemáticas y las soluciones analíticas para la solución de problemas; la inteligencia artificial, particularmente las Redes Neuronales Artificiales han demostrado resultados muy prometedores, ya que se puede mejorar la efectividad del análisis, especialmente en la manipulación de los datos de entrada, donde los parámetros interrelacionados en forma de red interactúan entre sí para obtener el resultado esperado. Esto es posible gracias a su capacidad de aprender de experiencias anteriores en túneles y soluciones generalizadas para nuevos conjuntos de datos de entrada. Se genera un modelo a la medida, que se utilizará en la etapa de construcción del túnel para la operación y toma de decisiones, capaz de proporcionar estimaciones de tasas de avances.

El desarrollo del algoritmo de una red neuronal intentará comprender el funcionamiento del cerebro, imitando sus capacidades de evaluación para decidir y actuar bajo incertidumbre, por medio de un modelo matemático de nodos o neuronas de procesamiento interconectadas por capas. La ventaja de este tipo de herramientas es su flexibilidad en el procesamiento de datos, ya que no es determinista y requiere una relación matemática de sus componentes, una vez que los datos se introducen, la red identifica las relaciones existentes, aprende e imita un comportamiento por medio de los enlaces entre las neuronas (pesos de conexión), este modelo puede utilizarse como una herramienta adicional a las tecnologías que utilizan las máquinas tuneladoras, a la hora de obtener información en tiempo real cuando se está excavando una obra subterránea.

La desventaja que podríamos encontrar es la determinación ponderada de los parámetros de entrada ya que, si no se tiene la suficiente información o no existe una relación adecuada entre cada uno de ellos, no será una tarea fácil para generar la arquitectura correcta de la red y los resultados de salida no serán los más adecuados.

El tipo de Inteligencia Artificial utilizada para este trabajo son las Redes Neuronales Artificiales, se analizará la información obtenida de la experiencia en proyectos de tuneleo mecanizado en los diferentes tipos de suelo, en especial los macizos rocosos, obteniendo así un conjunto de datos para la entrada de información del modelo.

La utilización de técnicas de Inteligencia Artificial en la operación adecuada de las máquinas tuneladoras, podrá producir soluciones confiables y contribuir en los esfuerzos de los ingenieros responsables del frente y los operadores para la mejor comprensión en la toma de decisiones.

CAPÍTULO 5

MODELO NEURONAL PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES

5. MODELO NEURONAL PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES

Son varios los factores que se deben tomar en cuenta cuando se excava de manera mecánica (TBM), uno de ellos es el control de los parámetros de operación. Los parámetros empleados en la predicción de la presión de frente y la penetración aquí utilizados, también permiten verificar algunas características geotécnicas de los materiales que se excavan y el proceso constructivo en el frente de excavación.

Los parámetros operacionales pueden proporcionar información de manera indirecta sobre las características de la calidad del macizo rocoso, con el aumento o disminución de la velocidad de avance se asocia a la calidad del macizo en el frente de excavación, el empuje dependerá del rozamiento que debe existir entre la tuneladora y el material de corte, si no se controla adecuadamente este parámetro la maquina puede quedar atrapada. El aumento instantáneo del torque se asocia a los desprendimientos del terreno. La combinación de estos parámetros nos da un panorama más amplio de las características geológicas heterogéneas de los macizos rocosos o suelos mixtos y así obtener una interpretación más adecuada de lo que se puede encontrar a la hora de excavar. La penetración es un parámetro importante que podemos determinar con ayuda de los parámetros ya mencionados.

Los parámetros independientes que controla el operador de la tuneladora son la velocidad de rotación y la fuerza de empuje, la velocidad de rotación depende de la geología del terreno y representa el número completo de vueltas de la rueda de corte en un minuto, y está ligada a la velocidad de penetración del escudo. La fuerza de empuje permite conseguir una cierta penetración, cualquier cambio de magnitud de esta fuerza sobre la cabeza de corte se refleja en cambios en la velocidad de penetración. Las propiedades geológicas y geotécnicas del macizo rocoso influyen en la penetración y la fuerza requerida para realizar ese empuje, mismo que se compara con la presión de frente que recibe la máquina del frente de excavación.

La presión de frente y la penetración son parámetros que ayudan a comprender las características geológicas, geotécnicas y mecánicas del macizo rocoso. Por lo que dada la importancia de estos dos parámetros, uno de los objetivos de esta investigación es el desarrollo de un modelo neuronal con capacidad predictiva, para estimar la presión de frente y la penetración por medio de los principales parámetros operacionales registrados en el control de proceso de una máquina tuneladora tipo EPB.

La arquitectura del modelo propuesto se basa en un Perceptrón Multicapa, mismo que está constituido por una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida, es una red Feed Forward prealimentada o alimentada hacia adelante, el flujo de datos se trasmite únicamente hacia adelante sin conexiones laterales entre las neuronas. Con relación a la capa de entrada se determinó que los parámetros que tienen una mayor influencia son: la velocidad de avance

(V_a), la velocidad angular de la rueda de corte (V_c), la fuerza de empuje (F_e) y el torque (Tr). La capa de salida está determinada por dos nodos, los cuales están comprendidos por la presión de frente (P_f) y la penetración (P_e).

En la tabla 5.1 se identifican los parámetros clave que se monitorean y calibran en la excavación mecanizada con TBM de tipo EPB, determinando los valores mínimos y máximos registrados en el control de procesos en terrenos mixtos.

Tabla 5.1. Valores mínimos y máximos de los parámetros operacionales a evaluar, registrados en la excavación de macizos rocosos: velocidad de avance (V_a), la velocidad angular de la rueda de corte (V_c), la fuerza de empuje (F_e) y el torque (Tr), presión de frente (P_f) y la penetración (P_e).

	ENTRADAS				SALIDAS	
	THRUST SPEED	CUTTER ROTATION SPEED	THRUST FORCE	CUTTER TORQUE	EARTH PRESS	PENETRACIÓN
	VEL. AVANCE	VEL. ANGULAR RUEDA CORTE	FUERZA DE EMPUJE	TORQUE	PRESIÓN DE FRENTE	
	mm/min	min-1 (rev/min)	kN	kNm	kPa	mm/rev
mín.	7	1.17	15803	707	16.42	3.35
máx.	21	3.88	44646	3023	68.07	12.44

Con lo anterior, la arquitectura del modelo neuronal queda representada de la siguiente manera (figura 5.1). En la capa de entrada 4 parámetros, en la capa oculta 50 neuronas (nodos) y en la capa de salida 2 parámetros.

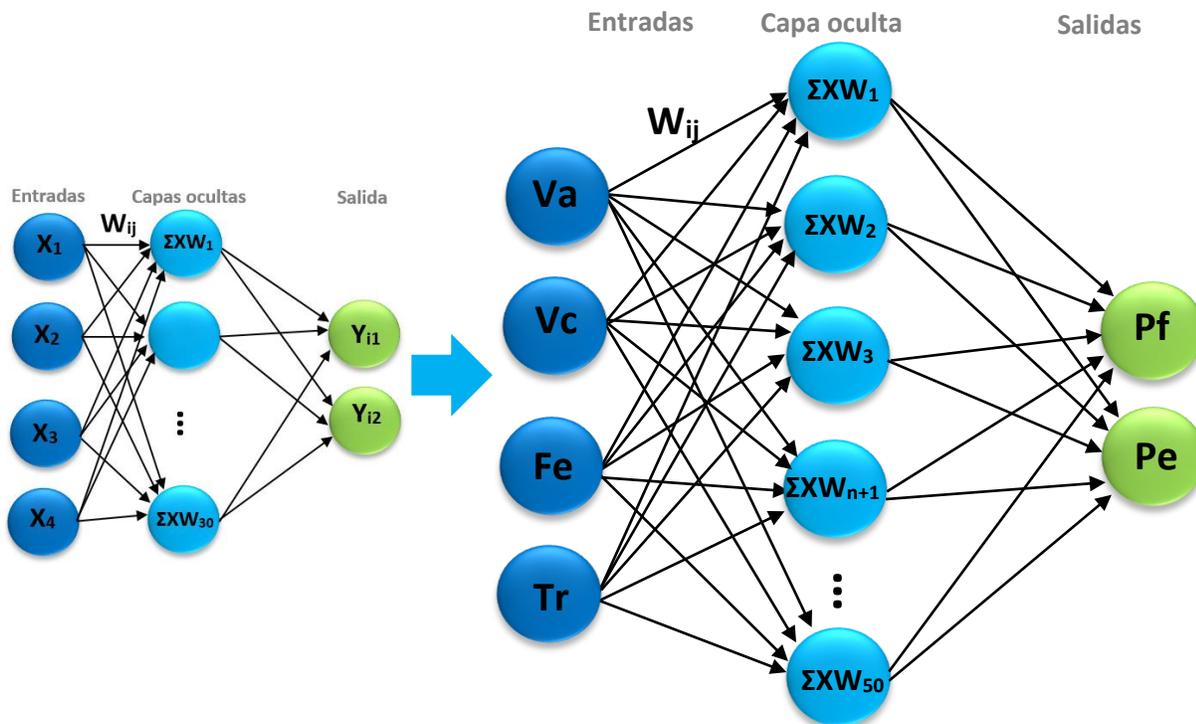


Figura 5.1. Arquitectura general del modelo neuronal artificial para la resolución del problema en cuestión.

5.1. Base de datos de los parámetros operacionales

Considerando que las máquinas tuneladoras registran una gran variedad de parámetros, dependiendo del tipo de TBM o las tecnologías a utilizar, para este proceso se utiliza la base de datos de una máquina tuneladora tipo EPB que ha excavado en macizos rocosos y se seleccionan los parámetros más importantes para este tipo de terrenos. Es importante destacar que los sensores instalados en el escudo registran cada avance milimétrico de la máquina, es por ello que se elabora un análisis para determinar cuáles son los valores más representativos y más completos para generar una base de datos que sea adecuada para el entrenamiento del modelo, entendiendo por esto una adecuada representación del fenómeno que se está modelando. El banco de datos obtenido es de 180 registros para cada parámetro operacional de entrada y salida, de los cuales se formaron dos subconjuntos, el primero para la etapa de entrenamiento y el segundo para la etapa de prueba (90 registros para cada uno).

El criterio para la integración del subconjunto de entrenamiento se basó en tener una representatividad adecuada del amplio intervalo de la magnitud de la presión de frente, ya que al tener un suelo mixto, este valor (como dato de salida) tiene un rango de variación muy importante en su valor absoluto. Es por ello que se obtienen los valores máximos y mínimos de este y de los demás parámetros y se reparten en los dos subconjuntos de la base de datos.

5.2. Herramienta de cómputo *ThinksPro*

El entrenamiento del modelo neuronal se realizó en el software *ThinksPro* (figura 5.2), desarrollado por la consultora *Logical Designs Consulting, Inc. 2015 (Neural Networks for Windows, 2002, <http://www.logicaldesigns.com/ThinksPro.htm>)*. Cuenta con una interfaz intuitiva e interactiva donde se pueden modificar los parámetros de la arquitectura del modelo, antes y durante el procesamiento, los resultados se pueden ir visualizando mientras van ejecutándose las iteraciones del programa mediante los gráficos de error. Los datos de entrada y salida se importan por medio de tablas de Excel con extensión (csv).

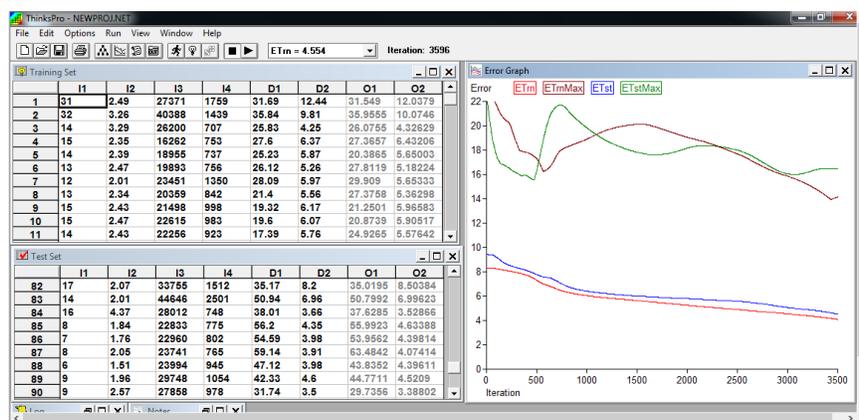


Figura 5.2. Software *ThinksPro*

En la figura 5.3 se observa cómo se establecen los parámetros generales de la arquitectura de la Red Neuronal Artificial, para este trabajo se utilizó el Perceptrón Multicapa tipo Feed Forward, con un error medio cuadrático. Además, se configuró la capa de entrada con 4 nodos, con un procesamiento de máximos y mínimos. El proceso se inicia mediante una semilla que permite inicializar un generador de números aleatorios, cuyos valores se utilizan para los pesos iniciales de cada nodo, el programa arroja un valor aleatorio de 777, pero se puede manipular arbitrariamente. Se fija un error de tolerancia que se considera sea el más aceptable para la obtención de buenos resultados.

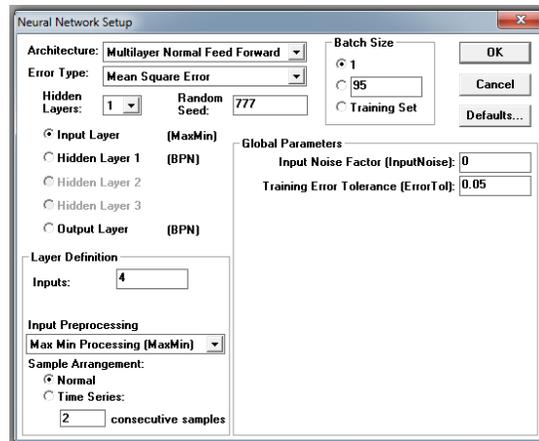


Figura 5.3. Configuración de la arquitectura y la capa de entrada

Se realizaron varias pruebas con una y dos capas ocultas, cada una con un número variado de nodos (neuronas) y en todas las pruebas se utilizó el algoritmo de retropropagación como regla de aprendizaje. La función de entrada utilizada en las capas ocultas fue el producto punto, ya que es la suma ponderada del producto de valores con un sesgo. Dado un vector de entrada de valores (n) , perteneciente a los valores de los números reales (R) $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ y un conjunto de valores ponderados $(n + 1)$, se tienen dos conjuntos de vectores x y w .

En el vector (x) , en su primer componente se localiza la constante de entrada llamada constante de sesgo y la primera componente del vector (w) es llamada peso del sesgo. La suma ponderada se obtiene mediante la sumatoria de los productos de entrada con su peso correspondiente, donde: $w = (w_0, w_1, w_2, \dots, w_n)$ $x = (1, x_1, x_2, \dots, x_n)$ por lo tanto $f(x, w) = w_0 + x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n$

La función de transferencia o de activación para las capas ocultas es la función sigmoide (figura 5.4).

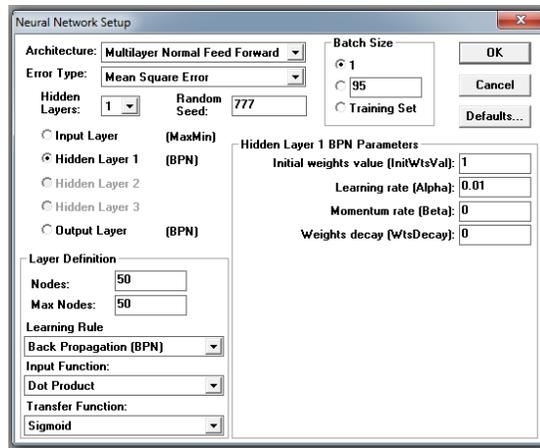


Figura 5.4. Configuración de las capas ocultas

La configuración de salida de la red se compone por la regla de aprendizaje o algoritmo de retropropagación, la función de entrada será producto punto y la función de transferencia será lineal para obtener los resultados esperados. Los conjuntos de entrenamiento y prueba son importados al programa por medio de archivos Excel, donde se enlistan los parámetros de entrada y salida para la evaluación de la red neuronal artificial.

Establecida la configuración de la arquitectura de la RNA, se corre el programa para que el conjunto de entrenamiento de forma iterativa realice el proceso de la red, ajustando los pesos (w) para encontrar el error mínimo. El conjunto de datos de prueba evalúa el rendimiento de la red durante y después el proceso del entrenamiento, comparando simultáneamente los datos de entrada de ambos subconjuntos y los resultados de salida que la propia red arroja (figura 5.5).

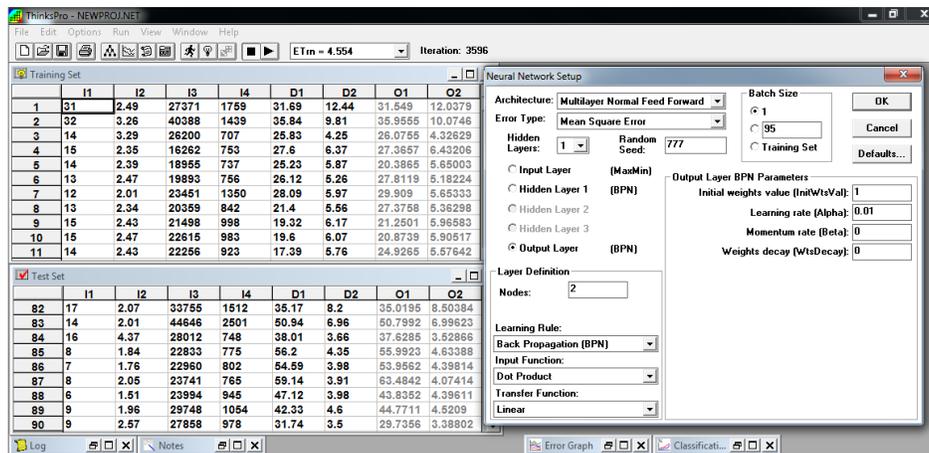


Figura 5.5. Configuración de una capa de salida y de los subconjuntos de entrenamiento y prueba

En la figura 5.6 se visualizan las gráficas de los errores máximos y mínimos de los conjuntos de datos de aprendizaje y de prueba, cabe señalar que los errores máximos registrados no son datos representativos del error esperado en el proceso, estos son valores de referencia del rango donde se encuentra el error, para que el mismo programa de cómputo realice el ajuste del modelo. El error máximo permite identificar si la estructura de la red y/o la función de transferencia son las adecuadas, los datos que interesan son los errores mínimos obtenidos en las etapas de aprendizaje y prueba de la red.

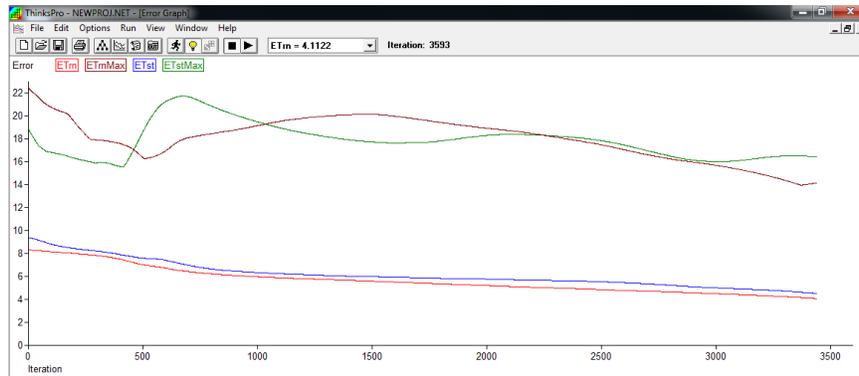


Figura 5.6. Variación del error durante el entrenamiento

5.3. Entrenamiento del Modelo Neuronal Artificial

El criterio utilizado para el entrenamiento y decidir el número de nodos y capas ocultas es con base en los resultados de distintos autores en proyectos de ingeniería. No existe una metodología precisa para establecer el número óptimo de nodos en las capas ocultas del modelo neuronal, la experiencia es fundamental para estructurar una arquitectura adecuada para el modelo. Se sugiere construir una red robusta con varias capas y neuronas, para después ir la simplificando, siempre y cuando se mantenga la convergencia del algoritmo de entrenamiento, es decir que el error disminuya hasta encontrar el error aceptable sugerido. También se puede iniciar con un modelo simple, se diseña una red pequeña y se van agregando neuronas hasta que se alcanzan los resultados necesarios.

En la figura 5.7 se ilustra el diagrama de flujo que describe el proceso de entrenamiento a partir de los datos de entrada, estos son: la velocidad de avance (V_a), la velocidad angular de la rueda de corte (V_c), la fuerza de empuje (F_e) y el torque (T_r), asociados a su correspondiente peso (w). Estos parámetros alimentan la red neuronal artificial en el proceso de aprendizaje para obtener una salida (Y_1), la cual se compara con el patrón objetivo (Y_i), utilizando un criterio de error $e = |Y_1 - Y_i|$; donde $e < e_0$ (propuesto).

El resultado del error (e) se compara con un error aceptable (e_0), y si es menor se finaliza el proceso considerando que la red está entrenada. Por el contrario, si el error (e) es mayor que (e_0), se procede a realizar un ajuste en los pesos (w) por medio del algoritmo de retropropagación, donde el error se distribuye o se retropropaga hacia atrás, desde la capa de

salida hasta la capa de entrada. Cada nodo es ajustado en su peso (w) correspondiente considerando su contribución relativa al error de salida en la capa correspondiente. Este proceso se realiza de forma iterativa hasta que se cumpla la condición en donde el error (e) es menor que el error (e_0) para dar por concluido el entrenamiento.

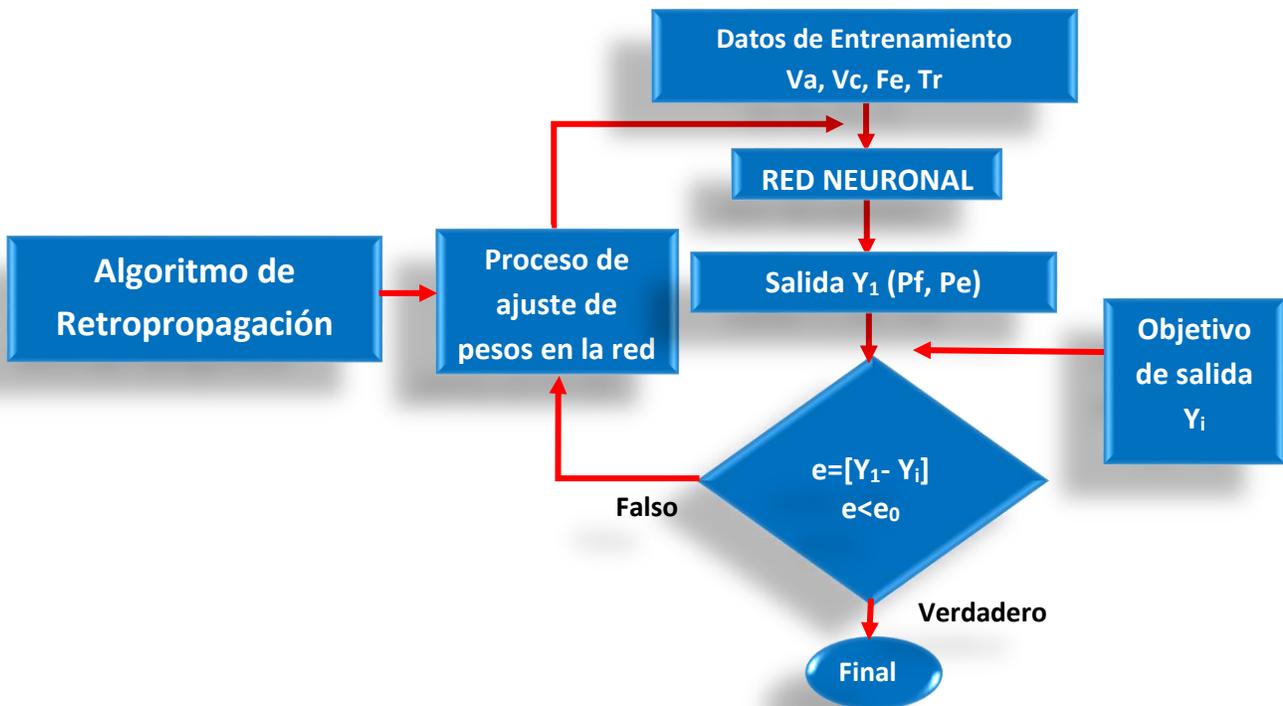


Figura 5.7. Flujo de entrenamiento de la Red.

De manera conjunta al proceso de entrenamiento, se realiza el proceso de prueba del modelo neuronal, haciendo iteraciones de los valores de entrada y salida con sus respectivos pesos (w), pero con un subconjunto de datos diferente al utilizado en la etapa de entrenamiento, es decir los datos de prueba no los conoce el modelo neuronal que se entrena. Un elemento a considerar es que a pesar de tener una red entrenada y la experiencia del diseñador del modelo, no hay un arreglo único para encontrar el error mínimo global que indique que es el entrenamiento más óptimo para resolver el problema propuesto, si el error encontrado se mantiene constante o no varía y los resultados obtenidos del conjunto de prueba son cercanos a los reales, se considera que la red está entrenada, siempre y cuando el error de salida (e) sea menor al error aceptable (e_0).

5.4. Resultados de la Red Neuronal Artificial

La tabla 5.2 presenta las arquitecturas propuestas con los resultados más cercanos a los valores reales, considerando que son los resultados que tienen los factores de correlación óptimos ya sea para uno, o los dos parámetros de salida, tanto en el entrenamiento como para la etapa de prueba. El número máximo de neuronas (nodos) en las capas ocultas varió de 50

a 200, iniciando con valores pequeños hasta llegar al máximo de nodos establecido, los incrementos correspondientes en las capas fueron de 50 en 50 generalmente. Con base a las variaciones del error y de los factores de correlación, se aumenta o se disminuye el número de capas ocultas para observar su comportamiento.

La arquitectura de la red neuronal artificial se representa con las siguientes nomenclaturas: E-CO1-CO2-S; donde (E) representa el número de parámetros en la capa de entrada de la red, en este trabajo se ocuparán 4. CO1 y CO2 representan el número de capas ocultas y (S), representa las dos únicas salidas para este modelo.

Tabla 5.2. Arquitecturas representativas del proceso de modelado de la red neuronal artificial.

EJEMPLO	ARQUITECTURA	PROCESAMIENTO	CONJUNTO DE EPRENDIZAJE		CONJUNTO DE PRUEBA	
	(ARREGLO RNA) E-CO1-CO2-S	NÚMERO DE ITERACIONES	FACTOR DE CORRELACIÓN PRESIÓN DE FRENTE (R_{apf})	FACTOR DE CORRELACIÓN PENETRACIÓN (R_{ape})	FACTOR DE CORRELACIÓN PRESIÓN DE FRENTE (R_{pfr})	FACTOR DE CORRELACIÓN PENETRACIÓN (R_{ppe})
A	4-50-2	3596	0.914	0.992	0.881	0.990
B	4-100-2	2684	0.930	0.995	0.428	0.993
C	4-30-2	1000	0.93	0.99	0.071	0.73
D	4-50-60-2	7000	0.99	0.99	0.064	0.245
E	4-50-50-50-2	3000	0.99	0.904	0.046	0.663

Los valores contenidos en la tabla anterior muestran las configuraciones y arquitecturas más representativas, de casos que muestran que no necesariamente los resultados obtenidos son los óptimos para ambas salidas. Por ejemplo, los valores de salida de la presión de frente para una cierta arquitectura serán los óptimos y para la penetración no, y viceversa, este proceso se realiza hasta encontrar la configuración que dé los mejores resultados para ambas salidas. El entrenamiento de la red es supervisado, por lo cual se utiliza un subconjunto de prueba, y durante el proceso de entrenamiento se supervisa el número de iteraciones del modelo neuronal y la variación del error para ambos casos (entrenamiento y prueba).

En las figuras siguientes se hace una ejemplificación por medio de gráficas de correlación, de los distintos fenómenos que ocurren a la hora de integrar la arquitectura de un modelo y correrlo por medio de iteraciones para encontrar el error mínimo establecido. En el eje de las abscisas se representan los valores de la presión de frente y la penetración que registran los sensores de una máquina tuneladora tipo EPB por medio del control de procesos y en el eje las ordenadas las estimaciones del modelo neuronal.

El ejemplo B con configuración; cuatro datos de entrada, cien nodos o neuronas en una capa oculta y dos datos de la capa de salida (4-100-2), muestra los siguientes valores de correlación: R_{apf} = 0.930, R_{ape} =0.995 para el entrenamiento y R_{pfr} = 0.428, R_{ppe} =0.993 para la prueba, se caracteriza por mostrar un modelo bien entrenado, pero al momento de realizar la prueba, los valores de salida de la presión de frente tienen un error muy elevado a comparación con los de la penetración, dando valores de correlación bastante bajos. Como se mencionó anteriormente, este es un caso típico de que la optimización en el entrenamiento no cumple para las dos salidas en la etapa de prueba de la red, figura 5.8.

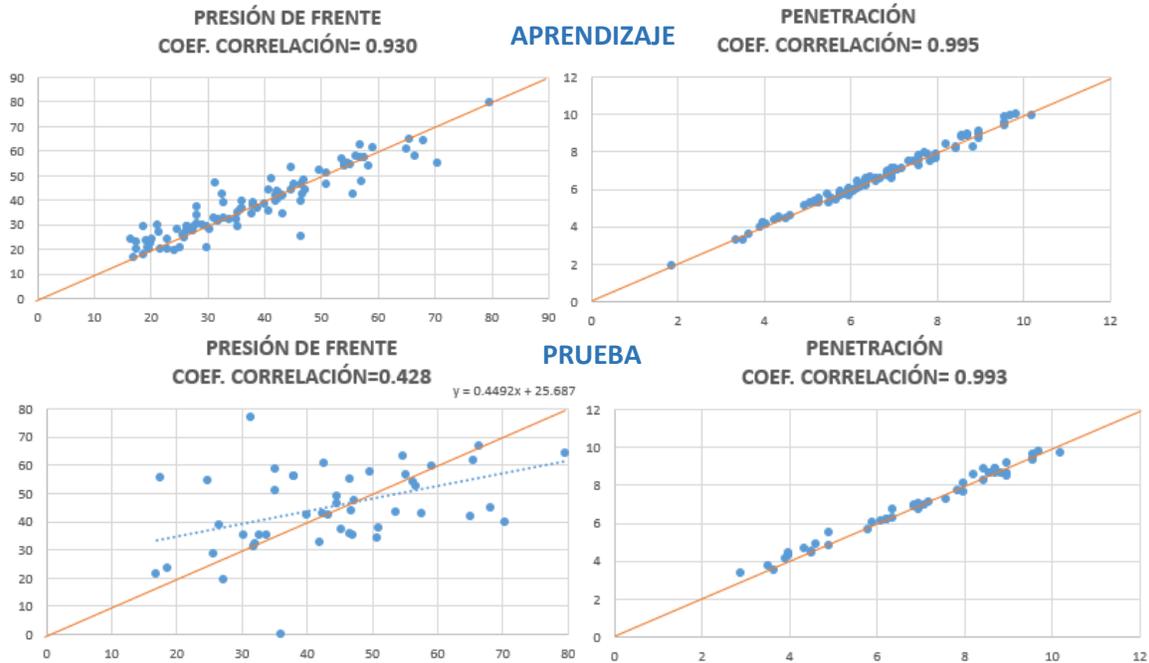


Figura 5.8. Datos de correlación bajos en una salida de la red (presión de frente).

Para el caso del ejemplo C con configuración 4-30-2, arroja valores de correlación: $R_{apf}=0.930$, $R_{ape}=0.992$ para el entrenamiento y $R_{ppf}=0.071$, $R_{ppe}=0.730$ para la prueba. Los valores de correlación se encuentran bastante bajos debido a que los resultados de salida arrojados por la red neuronal tienen un error grande, esto es provocado por el número bajo de iteraciones realizadas al momento de correr el modelo (figura 5.9).

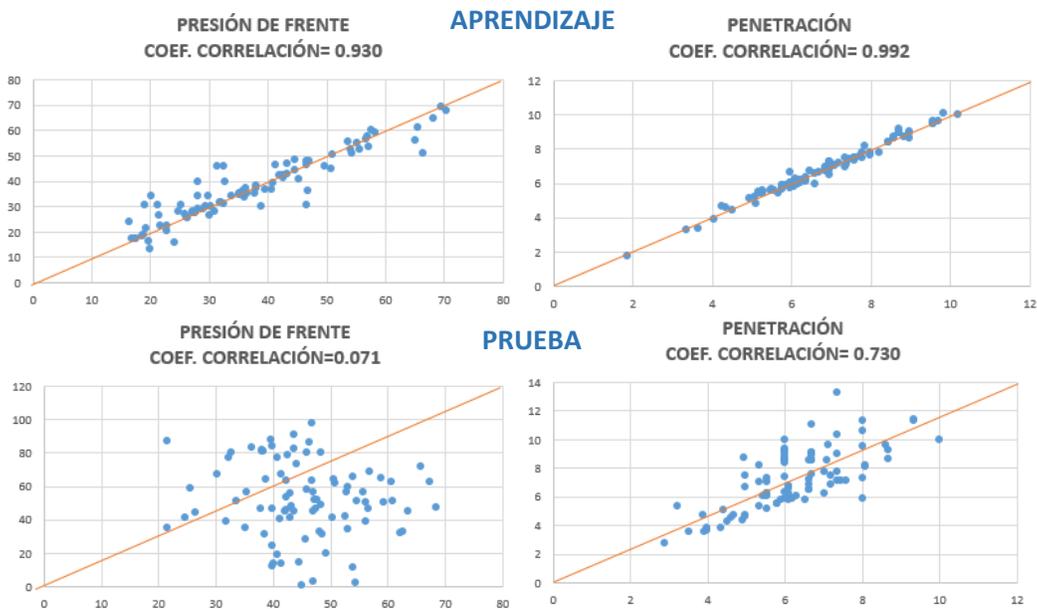


Figura 5.9. Datos de correlación bajos en la salida de la red (presión de frente y penetración).

En el ejemplo D se observa que el modelo neuronal con configuración 4-50-60-2 muestra valores de correlación: $R_{apf}= 0.990$, $R_{ape}=0.980$ para el entrenamiento y $R_{ppf}= 0.064$, $R_{ppe}=0.245$ para la prueba, lo que significa que nuestro modelo fue sobre entrenado y perdió capacidad de generalización, debido al número de iteraciones realizadas (7000) ya que no se detuvo el proceso cuando el error comenzó a incrementar, figura 5.10.

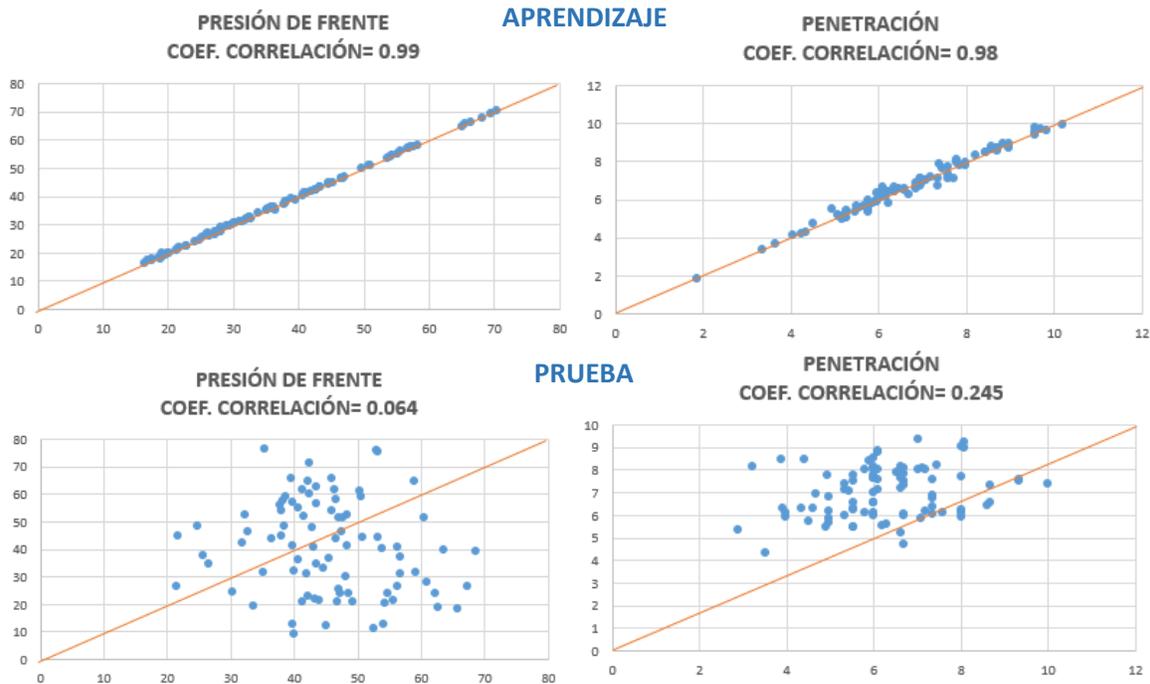
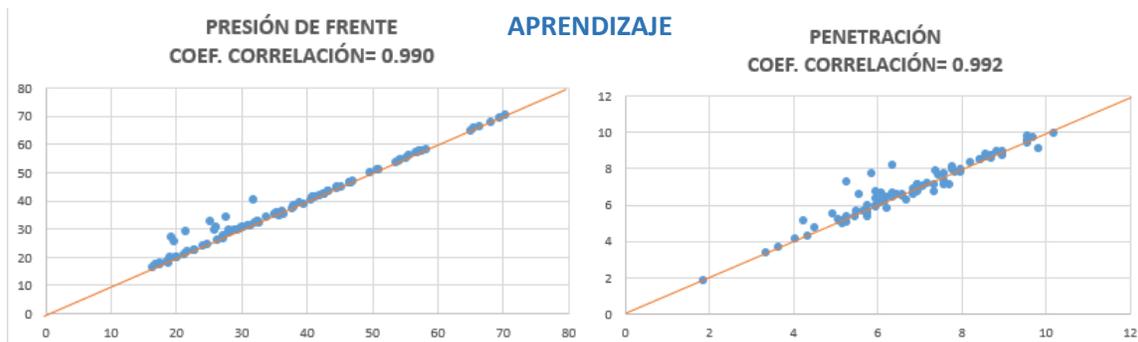


Figura 5.10. Sobre entrenamiento y pérdida de capacidad de generalización.

Otro fenómeno ocurrido es el del ejemplo E, su configuración neuronal es 4-50-50-50-2 con valores de correlación: $R_{apf}= 0.990$, $R_{ape}=0.940$ para el entrenamiento y $R_{ppf}= 0.046$, $R_{ppe}=0.663$ para la prueba, se corrió a 3000 y 5000 iteraciones, obteniendo como resultado un factor de correlación similar tanto en entrenamiento como en prueba para ambos casos, lo que es un indicio de que no necesariamente el incremento en el número de iteraciones o de capas ocultas puede mejorar el rendimiento de la red en cuanto a la reducción del error (figura 5.11).



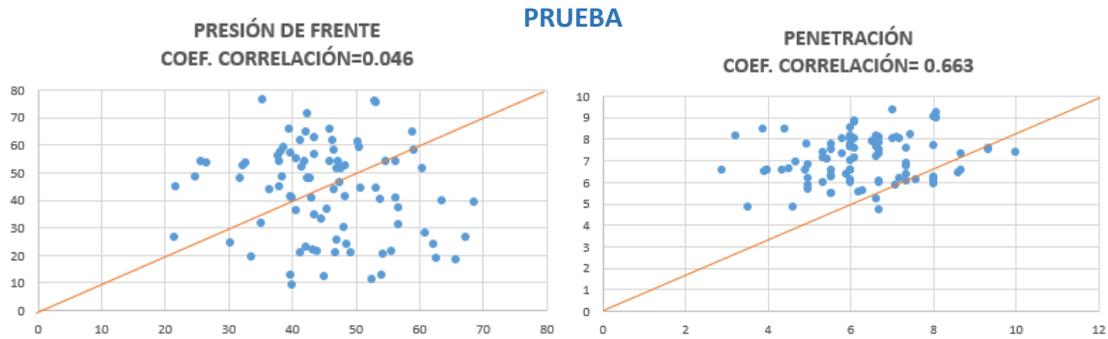


Figura 5.11. Aumento y disminución de capas ocultas e iteraciones.

No obstante, podría darse el caso de que, utilizando la misma arquitectura se obtuviera una mejor correlación con un número mayor de iteraciones, lo que significaría que probablemente el modelo estaría abandonando un error mínimo local y encontrando un error mínimo global. La configuración del modelo neuronal del ejemplo A es: 4-50-2, con valores de correlación de $R_{apf} = 0.914$, $R_{ape} = 0.992$ para el entrenamiento y $R_{ppf} = 0.881$, $R_{ppe} = 0.990$ para la prueba y 3596 iteraciones, estos resultados corresponden a la arquitectura más apropiado para la resolución de este trabajo, figura 5.12.

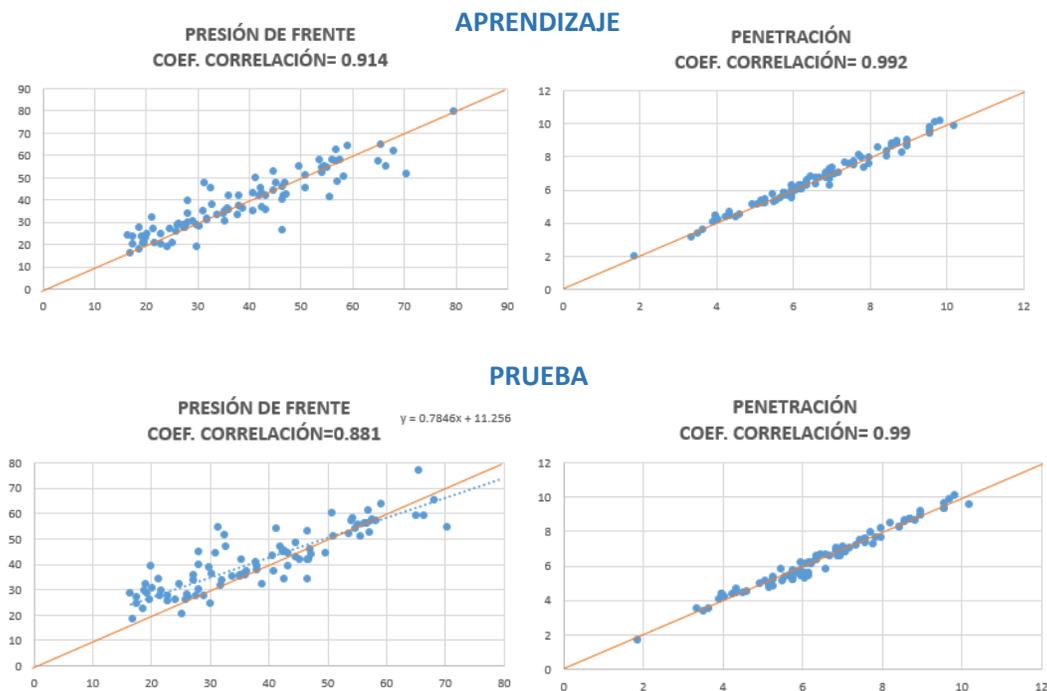
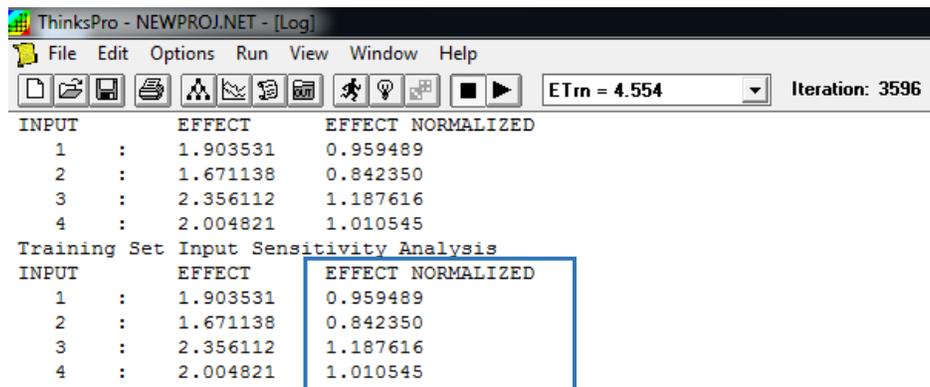


Figura 5.12. Resultados de correlaciones optimas del modelo neuronal.

En general, existe una buena correlación en la etapa de entrenamiento porque los resultados se acercan al eje de 45°, esto indica que los valores de correlación se acercan al 100%. En la etapa de prueba la correlación es menor ya que existe un mayor número de casos que se alejan del eje a 45°. De los resultados se concluye que el modelo sobreestima los valores de la Presión de Frente y en el caso de la Penetración existe una mejor tendencia hacia la unidad en términos de correlación.

Análisis de Sensibilidad

Para establecer el modelo neuronal es importante tener una adecuada selección de los parámetros de entrada que dependen de la respuesta del problema a resolver, ya que es importante para la obtención de resultados aceptables. Cuando ya se tiene una adecuada selección de los parámetros de entrada y propuesto el modelo neuronal, es necesario realizar un análisis de sensibilidad que permita determinar la importancia relativa de cada una de las variables de entrada al modelo, dicho proceso lo realiza el programa ThinksPro. De acuerdo al efecto normalizado (correlacionado con los valores máximos) para las cuatro entradas: velocidad de avance (1)= 0.959489, velocidad angular de la rueda de corte (2)= 0.842350, fuerza de empuje (3)= 1.187616 y torque (4)=1.010545, la contribución de las entradas es muy importante, si se descartará algún parámetro de entrada afectaría considerablemente las salidas de la red (figura 5.13).



INPUT	EFFECT	EFFECT NORMALIZED
1	1.903531	0.959489
2	1.671138	0.842350
3	2.356112	1.187616
4	2.004821	1.010545

Training Set Input Sensitivity Analysis

INPUT	EFFECT	EFFECT NORMALIZED
1	1.903531	0.959489
2	1.671138	0.842350
3	2.356112	1.187616
4	2.004821	1.010545

Figura 5.13. Análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada de la red.

De acuerdo con los resultados presentados el Modelo Neuronal Artificial para estimar la Presión de Frente y la Penetración quedo definido como se indica en la figura 5.14, cuatro nodos o neuronas en la capa de entrada (velocidad de avance, velocidad angular de la rueda de corte, fuerza de empuje, torque), una capa oculta con cincuenta nodos y dos nodos en la capa de salida. Por lo que se considera que el modelo neuronal propuesto ha alcanzado la mayor capacidad de generalización de acuerdo con el algoritmo de aprendizaje, la arquitectura seleccionada y los datos utilizados durante el entrenamiento y la prueba. La tabla A del anexo contiene el subconjunto de datos utilizados para el entrenamiento del modelo neuronal y la tabla B, incluye el subconjunto de datos de prueba para la red neuronal.

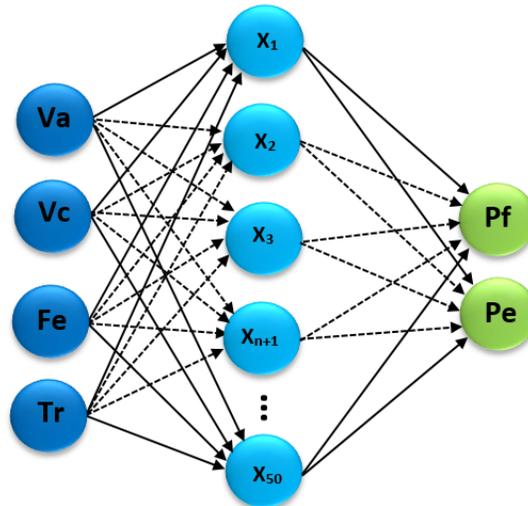


Figura 5.14. Arquitectura de la red neuronal artificial.

En las tablas 5.3 y 5.4 se presenta un listado de los datos de salida que corresponden a los resultados de la presión de frente y penetración, que se alejan de la recta a 45° de las gráficas de correlación del ejemplo "A" ($R_{ppf}= 0.881$, $R_{ppe}=0.990$), estos valores de salida (P_f y P_e) corresponden a las salidas que provocan la disminución de la correlación en el arreglo neuronal.

Cabe señalar que, en la ingeniería de túneles los parámetros operacionales de las máquinas tuneladoras varían y tienen un sentido físico de acuerdo con las condiciones geológicas, geotécnicas y mecánicas del subsuelo. Los especialistas en túneles de acuerdo con su experiencia pueden distinguir las características de los frentes de excavación al conocer el valor de los parámetros operacionales y el porqué de su variación.

En el caso de la Inteligencia Artificial específicamente de las Redes Neuronales Artificiales, los parámetros operacionales que se introducen a la red neuronal como datos de entrada y salida, los reconoce sólo como datos con un valor numérico y no con un sentido físico, la red neuronal no reconoce los valores introducidos como información registrada por una tuneladora al excavar un macizo rocoso. Al correr el modelo se genera un pre-proceso para escalar los valores máximos y mínimos introducidos en las entradas, para normalizar toda esta información y así tener una relaciones más estrecha entre todos los datos, con el artificio de que el aprendizaje se realiza por medio de cómputo aproximado, es decir, el modelo neuronal propuesto no será el único que arroje valores de errores aceptables, pueden existir otros modelos con otras arquitecturas que tengan el mismo error aceptable como el de este trabajo.

En las tablas se enlistan los parámetros operacionales de entrada y salida del modelo, que obtuvieron los errores máximos al comparar los resultados de la red neuronal (O1) y los valores objetivo (D1). Es importante señalar que no es posible realizar interpolación de datos para encontrar el valor de salida más aceptable y disminuir los errores máximos, ya que el modelo neuronal es un sistema de cuatro variables de entrada y dos salidas que considera toda la

información como una red de iteraciones y aproximaciones para normalizar los valores máximos y mínimos del conjunto de datos, por ende, las redes neuronales no son sistemas lineales donde sus entradas y salidas puedan utilizarse para realizar interpolaciones lineales de datos para disminuir los errores máximos encontrados.

Tabla 5.3. Comparación de parámetros con errores máximos: objetivo (D1) y resultados del modelo neuronal (O1) de presión de frente con correlaciones bajas (etapa de prueba).

VEL. AVANCE i1	VEL. ANGULAR i2	FUERZA DE EMPUJE i3	TORQUE i4	PRESION DE FRENTE D1	PENETRACIÓN D2	PRESION DE FRENTE O1	PENETRACIÓN O2
14	2.39	18955	737	25.23	5.87	20.3865	5.65003
13	2.34	20359	842	21.4	5.56	27.3758	5.36298
14	2.43	22256	923	17.39	5.76	25.2789	5.55219
14	2.35	26067	1176	30.99	5.96	39.1745	6.1112
14	2.66	23621	834	16.42	5.26	29.3331	5.20678
14	2.43	24332	912	18.73	5.76	32.28	5.67006
16	2.4	22036	1044	20.13	6.68	27.0608	6.6146
14	2.35	23595	1032	19.81	5.97	29.3667	5.85332
15	1.93	23966	1053	32.74	7.78	42.2719	7.76804
16	2.28	26856	1235	32.51	7.01	50.5052	7.11374
13	2.26	25646	816	35.36	5.76	42.3374	5.68404
14	1.85	26031	1150	27.99	7.58	40.4369	7.52775
14	2.01	29405	1083	28.12	6.96	45.394	6.9519
13	2.09	27338	1280	24.68	6.21	32.5912	6.16106
17	1.98	25257	1341	31.28	8.58	54.6657	8.51966
16	1.84	26627	1531	65.54	8.7	77.1898	8.67354
17	1.98	24649	1181	50.76	8.58	59.8593	8.57174
14	2.05	28538	1248	70.44	6.84	54.1057	6.82297

Tabla 5.4. Comparación de parámetros con errores máximos: objetivo (D2) y resultados del modelo neuronal (O2) de penetración con correlaciones bajas (etapa de prueba).

VEL. AVANCE i1	VEL. ANGULAR i2	FUERZA DE EMPUJE i3	TORQUE i4	PRESION DE FRENTE D1	PENETRACIÓN D2	PRESION DE FRENTE O1	PENETRACIÓN O2
15	2.43	21498	998	19.32	6.17	21.2501	5.96583
13	3.88	23177	1887	27.23	3.35	33.6492	2.97458
14	2.55	19472	1308	36.09	5.48	37.2331	5.15557
16	2.33	30361	828	54.11	6.88	57.0966	6.64679
16	1.57	21491	890	27.22	10.19	33.8533	9.52255
19	1.99	18974	839	17.45	9.57	24.8532	9.35377
19	1.99	21560	857	33.87	9.57	35.8633	9.30153
14	1.98	24450	804	58.29	7.08	56.823	6.77022
12	1.72	27897	834	68.07	6.96	66.3532	6.66335
15	2.19	24534	1089	46.66	6.84	41.9671	7.01923
13	1.87	23689	810	49.7	6.96	44.5932	6.53435
16	2.04	29879	2054	46.52	7.83	42.1711	7.61713
7	1.76	22960	802	54.59	3.98	54.1295	4.43679
6	1.51	23994	945	47.12	3.98	43.9543	4.43264

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

La Inteligencia Artificial es una especialidad esencial en el área de la ciencia y la tecnología, la cual pretende emular por medio de un proceso de aprendizaje, presentándole patrones de entrada y salida a un modelo neuronal, ser capaz de generalizar y obtener una respuesta ante patrones desconocidos, estos sistemas consideran la manera en que las redes biológicas aprenden.

Se propuso un modelo basado en la teoría de las Redes Neuronales Artificiales para estimar la Presión de Frente y la Penetración en función de la velocidad de avance, velocidad angular de la rueda de corte, fuerza de empuje y el torque. Mediante una capa de entrada con los parámetros V_a , V_c , F_e , T_r ; una capa oculta con cincuenta neuronas y una capa de salida con los parámetros P_F y P_e .

El modelo es capaz de estimar con suficiente aproximación la Penetración porque tiene una cercana tendencia de los valores reales con los estimados por la red neuronal. Sin embargo, para la Presión de Frente los valores de correlación son más bajos debido a los valores máximos de error que se presentaron durante el proceso de iteración.

Durante el entrenamiento se realizaron varias pruebas con diferentes configuraciones de arquitectura y procesamiento, lo que es un indicio de que no necesariamente el incremento en el número de iteraciones, capas ocultas o nodos (neuronas) puede mejorar el rendimiento de la red. Aunque se ha considerado a las Redes Neuronales Artificiales como modelos de caja negra, el modelo de este trabajo no recurre a esas características ya que fue necesario un conocimiento adecuado del fenómeno a resolver para la selección de los parámetros de entrada que tienen mayor influencia en el resultado de este.

Los subconjuntos de datos para el entrenamiento y prueba de la red contienen, con respecto al alcance de este proyecto, la información necesaria y suficiente para la representación adecuada del fenómeno a resolver. En este caso se resolvió con información del control de procesos de una máquina tuneladora tipo EPB que excavó en macizos rocosos.

Como lo menciona la literatura, el diseño de una Red Neuronal Artificial es un proceso heurístico (conjunto de técnicas o métodos para resolver un problema complejo), para establecer la red más óptima y poder modelar este problema en específico, es importante mencionar que los resultados o la resolución del fenómeno también dependen de: el conocimiento del fenómeno a modelar y la experiencia en el entrenamiento de las redes neuronales artificiales.

Es importante mencionar que el alcance de este trabajo está limitado con respecto a la cantidad de información que se registra en el control de procesos de una tuneladora y al universo de metodologías en la solución de problemas por medio de la Inteligencia Artificial, y en este caso la aplicación de las Redes Neuronales Artificiales al campo de las Obras Subterráneas. Este proyecto es la pauta para seguir investigando y utilizar estas herramientas para la solución de problemas como la excavación mecanizada de túneles. La aplicación de este método como herramienta computacional, servirá para reaccionar eficazmente a los cambios geológicos-geotécnicos imprevistos durante la excavación con TBM.

Estas tecnologías mejorarán las operaciones de las tuneladoras, ya que involucran la utilización de parámetros de operación y monitoreo, producidos en el flujo de datos del control de procesos durante la excavación. Hasta la fecha se ha trabajado en la mejora de la operación de las tuneladoras, pero con la implementación de Inteligencia Artificial se abrirán nuevos enfoques para eficientar la autonomía de estas máquinas y observar su comportamiento e interacción en los suelos mixtos o cualquier otro. Esto se obtendrá por medio de la estimación de parámetros operacionales principales, que un modelo neuronal reconocerá por medio de patrones de datos de entrada y salida, mismos que son obtenidos de la base de datos del control de procesos.

La importancia principal de este proyecto es que la utilización de estas herramientas mejorará los rendimientos, ayudará al ingeniero a tomar mejores decisiones en el frente de la excavación para obtener una adecuada manipulación de la tuneladora en la ejecución del proceso constructivo. Y en un futuro con esta nueva aplicación y el avance tecnológico, las tuneladoras sean capaces de operar de forma más autónoma.

ANEXO

ANEXO

Tabla A. Subconjunto de datos utilizados para el entrenamiento del modelo neuronal

No.	ENTRADAS				SALIDAS	
	VELOCIDAD DE AVANCE mm/min	VELOCIDAD ANGULAR RUEDA CORTE (rev/min)	FUERZA DE EMPUJE (kN)	TORQUE (kNm)	PRESIÓN DE FRENTE (kPa)	PENETRACIÓN (mm/rev)
1	15	2.31	27371	1759	31.69	6.50
2	14	1.43	40388	1439	35.84	9.81
3	14	3.29	26200	707	25.83	4.25
4	15	2.35	16262	753	27.6	6.37
5	14	2.39	18955	737	25.23	5.87
6	13	2.47	19893	756	26.12	5.26
7	12	2.01	23451	1350	28.09	5.97
8	13	2.34	20359	842	21.4	5.56
9	15	2.43	21498	998	19.32	6.17
10	15	2.47	22615	983	19.6	6.07
11	14	2.43	22256	923	27.39	5.76
12	7	1.17	22002	859	22.84	5.97
13	14	2.35	26067	1176	30.99	5.96
14	14	2.66	23621	834	16.42	5.26
15	15	2.47	21778	748	22.76	6.07
16	14	2.13	22138	729	29.75	6.57
17	13	2.11	20771	961	29.92	6.17
18	14	2.43	24332	912	18.73	5.76
19	16	2.44	23694	926	37.64	6.57
20	16	2.40	22036	1044	20.13	6.68
21	14	2.43	22841	1087	24.13	5.76
22	14	2.35	23595	1032	19.81	5.97
23	15	1.93	23966	1053	32.74	7.78
24	13	2.52	19613	924	19.1	5.16
25	16	2.28	26856	1235	32.51	7.01
26	11	2.01	17310	1246	21.67	5.47
27	13	2.31	23177	1887	27.23	5.62
28	14	2.75	25748	1672	32.5	5.09
29	10	1.66	22674	980	42.51	6.04
30	11	1.63	19248	979	41.92	6.74
31	13	2.52	17993	902	38.75	5.16
32	13	2.18	22659	806	46.44	5.95

33	14	2.66	16457	798	40.66	5.26
34	13	2.57	22454	685	40.81	5.06
35	14	2.55	19472	1308	36.09	5.48
36	14	2.47	27916	1323	56.87	5.66
37	16	2.47	24699	1208	54.19	6.47
38	13	2.11	26368	805	41.19	6.17
39	13	2.26	25646	816	35.36	5.76
40	16	2.33	30361	828	54.11	6.88
41	19	2.44	29822	1056	42.56	7.79
42	16	2.17	21330	861	39.52	7.38
43	15	2.05	19802	921	29.45	7.33
44	14	2.01	25186	1080	36.48	6.96
45	14	1.85	26031	1150	27.99	7.58
46	13	1.5	35637	1293	38.44	8.67
47	14	1.91	25097	1405	48.31	7.33
48	12	1.91	21542	1029	48.18	6.28
49	13	2.1	18882	1429	48.6	6.19
50	13	1.61	19038	1774	40.7	8.07
51	13	1.61	18492	1699	44.55	8.07
52	12	1.61	22175	1573	39.82	7.45
53	9	1.5	25475	1409	43.17	6.00
54	8	1.5	27233	1223	42.87	5.33
55	7	1.5	29092	1116	41.26	4.67
56	9	1.5	28229	1670	30.24	6.00
57	10	1.5	26228	1876	32.15	6.67
58	9	1.5	32160	2732	40.63	6.00
59	9	1.5	25681	2463	5246	6.00
60	9	1.5	29290	2422	39.75	6.00
61	10	1.84	28548	2033	42.44	5.43
62	10	1.51	34540	2210	38.05	6.62
63	10	1.51	33665	2605	38.66	6.62
64	10	1.5	31070	2647	38.2	6.67
65	14	1.5	38430	2884	43.52	9.33
66	12	1.5	36946	2657	42.21	8.00
67	13	1.5	40776	2429	37.79	8.67
68	14	1.5	47796	2761	24.67	9.33
69	11	1.5	28777	2359	21.59	7.33
70	10	1.5	47574	1477	21.42	6.67
71	11	1.5	39705	1396	35.12	7.33
72	12	1.5	26845	1518	42.23	8.00
73	9	1.5	25465	3379	50.66	6.00

74	15	1.5	21621	2112	45.51	10.00
75	8	1.5	23797	2228	56.75	5.33
76	19	1.5	26485	2802	41.43	6.00
77	17	1.5	14308	1388	44.9	6.00
78	19	1.5	32127	2609	37.94	6.00
79	18	1.5	32907	2943	46.63	6.00
80	19	1.5	30112	2852	36.32	6.00
81	10	1.5	26844	2498	43.55	6.67
82	10	1.5	33037	2719	50.54	6.67
83	8	1.5	30342	2137	46.24	5.33
84	12	1.5	24525	3920	56.18	8.00
85	10	1.5	28327	4255	42.95	6.67
86	11	1.5	32561	3231	52.84	7.33
87	10	2.02	29962	3858	47.71	4.95
88	11	1.5	41095	4875	50.23	7.33
89	12	1.5	33365	3536	53.09	8.00
90	10	1.5	30342	3231	36.32	6.67

Tabla B. Subconjunto de datos de prueba para la red neuronal.

No.	ENTRADAS				SALIDAS	
	VELOCIDAD DE AVANCE mm/min	VELOCIDAD ANGULAR RUEDA CORTE (rev/min)	FUERZA DE EMPUJE kN	TORQUE kNm	PRESIÓN DE FRENTE kPa	PENETRACIÓN mm/rev
1	8	1.26	22833	775	56.2	6.35
2	7	1.17	22960	802	54.59	5.98
3	8	1.35	23741	765	59.14	5.91
4	6	0.75	23994	945	47.12	7.98
5	9	1.18	29748	1054	42.33	7.60
6	9	1.06	27858	978	31.74	8.50
7	8	0.90	19876	1113	25.57	8.90
8	9	1.38	19436	1043	26.41	6.50
9	10	1.73	18315	920	39.93	5.78
10	10	2.04	21659	849	42.01	4.90
11	9	1.53	33696	1934	32.73	5.90
12	13	1.51	33056	2470	35.24	8.60
13	10	1.40	35026	2809	45.89	7.13
14	12	1.50	26091	3023	48.21	8.00
15	11	1.56	26351	2204	39.58	7.07
16	10	1.43	33244	2074	46.65	7.01

17	11	1.57	37042	1846	45.87	7.02
18	8	1.29	22655	1573	33.5	6.20
19	10	1.73	22186	1524	60.77	5.78
20	10	1.81	22182	1751	56.67	5.52
21	11	1.81	22231	1687	63.46	6.08
22	10	1.81	24870	2390	60.49	5.52
23	11	1.45	18514	1246	46.87	7.59
24	10	1.81	23074	1828	68.49	5.52
25	9	1.81	24000	2550	5495	4.97
26	9	1.81	22675	2055	67.22	4.97
27	9	1.81	23468	1045	62.16	4.97
28	11	1.81	21530	1665	46.91	6.08
29	10	1.5	23925	2191	53.88	6.67
30	7	1.8	26324	1784	43.99	7.89
31	8	1.81	24007	1759	55.6	7.42
32	12	1.81	14593	1291	49.2	6.63
33	13	1.81	22893	2056	46.95	7.18
34	12	1.84	28993	1634	65.67	6.52
35	10	1.81	26744	2346	58.79	5.52
36	11	1.81	17417	1670	39.77	6.08
37	11	1.81	20312	1753	52.46	6.08
38	9	1.81	25585	1170	53.1	7.97
39	10	1.81	10576	1071	41.37	5.52
40	12	1.81	15689	1416	39.88	6.63
41	12	1.81	12413	1443	53.93	6.63
42	10	1.81	13654	1288	54.32	5.52
43	13	1.81	15500	1290	62.54	7.18
44	10	1.81	31304	1670	43.5	5.52
45	11	1.81	24486	1662	47.4	6.08
46	12	1.63	21664	858	21.11	7.35
47	14	2.01	29405	1083	28.12	6.96
48	15	2.05	29301	898	55.68	7.33
49	16	2.08	21319	1142	57.15	7.71
50	15	1.98	20401	1106	28.96	7.58
51	15	2.01	19256	1170	26.3	7.46
52	14	2.01	31334	1099	43.17	6.96
53	16	2.34	27446	1762	31.92	6.84
54	13	2.09	27338	1280	24.68	6.21
55	17	1.98	25257	1341	31.28	8.58
56	16	1.84	26627	1531	65.54	8.7
57	17	1.98	24649	1181	50.76	8.58

58	16	1.57	21491	890	27.22	10.19
59	18	1.86	15803	2033	16.92	9.7
60	19	1.99	35588	1190	18.57	9.57
61	19	1.99	18974	839	27.45	9.57
62	18	2.07	25109	1267	46.49	8.7
63	18	2.07	26901	1084	30.23	8.7
64	19	1.99	21560	857	33.87	9.57
65	18	2.37	19068	953	35.01	7.58
66	14	1.98	24450	804	58.29	7.08
67	13	2.05	31869	2157	69.53	6.34
68	12	1.72	27897	834	68.07	6.96
69	14	1.95	21525	2123	42.54	7.18
70	14	2.21	29156	1156	64.99	6.34
71	13	2.13	29444	992	45.15	6.09
72	13	2.09	30370	1219	37.98	6.21
73	14	2.05	28538	1248	70.44	6.84
74	14	2.01	24540	1291	43.14	6.96
75	15	2.19	24534	1089	46.66	6.84
76	13	1.87	23689	810	49.7	6.96
77	17	1.93	27874	1634	57.6	8.83
78	16	2.04	29879	2054	46.52	7.83
79	16	2.01	27794	1613	55.09	7.96
80	15	1.78	28441	1161	35.96	8.45
81	18	2.01	25094	1349	66.42	8.95
82	17	1.90	24352	1070	56.75	8.95
83	19	2.12	24937	1372	53.49	8.95
84	10	2.22	40280	1017	44.66	4.51
85	16	2.01	28566	826	44.66	7.96
86	17	2.01	33962	1260	47.02	8.45
87	17	2.07	33755	1512	35.17	8.2
88	14	2.01	44646	2501	50.94	6.96
89	16	2.25	28012	748	38.01	7.12
90	14	2.01	27874	2054	45.15	8.95

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Acevedo E, Serna A y Serna E, 1998, Principles and characteristics of artificial neural networks, Universidad Cooperativa, Medellín Colombia.
- Alcántara L, 2013, Análisis de movimientos sísmicos en las ciudades de Oaxaca y Puebla con Redes Neuronales (Tesis Doctoral), Programa de maestría y doctorado UNAM.
- Babendererde Engineers, 2013, Mechanized Methods for Soft Ground, Principles in Tunneling Design, ITA AITES, México.
- Basoqain X, 2001, Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones, Departamento de Sistemas y Automática, Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao.
- Bernardos A, 2006, Artificial intelligence in underground development: a study of TBM performance, National Technical University of Athens, School of Mining and Metallurgical Engineering, Greece.
- Boeree G, 1998, La Neurona, Departamento de Psicología, Universidad de Shippensburg.
- Brío B, Sanz A, 2002, Redes neuronales y sistemas difusos, México, Alfaomega.
- Buntine L, Weigend S, 1991. Bayesian backpropagation, Complex Systems.
- Canseco H, 1986, Escudos de Frente Abierto, Seminario de Escudos y Topos.
- Comulada M, 2005, Process Controlling and Data Management for Shield Tunnelling, Maidl Tunnelconsultants.
- Delisio A, 2015, Instrumentation and Monitoring, Travaux Souterrains, Laboratoire de Mécanique des Roches, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL.
- Didac A, 2009, EPB tunnelling in different sections of the metro line 9 in Barcelona, FCC Construcción.
- Di Pascua N, 2012, Navegación Topográfica Subterránea para Tuneladoras, Uruguay.
- Enzo C, 2016, Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de Túneles de Metro mediante Máquinas Tuneladoras, Universidad de Chile.
- Fritsch J, 1996, Modular Neural Networks for Speech Recognition, Carnegie Mellon University.
- García J, 2017, Estimación de parámetros sísmicos por medio de Redes Neuronales Artificiales, Instituto de Ingeniería UNAM.
- Gonzáles A, 2017, Excavación de Túneles en frentes Mixtos mediante Tuneladora tipo EPB, UNAM.
- González C, 2014, Rendimiento, Desgaste y Abrasividad en Excavación mecanizada de Túneles en terrenos heterogéneos, Escola Tecnica Superior d'Enginers de Camins, Canals i Ports, Barcelona.
- González R, 2019, Intervenciones Hiperbáricas, Moldequipo Internacional S.A. de C.V.,(Información académica en la maestría de túneles UNAM).

- González R, 2019, TBM's para Roca en Terreno Fracturado, Moldequipo Internacional S.A. de C.V. (Información académica en la maestría de túneles UNAM).
- Graves A, Mohamed R y Hinton G, 2013, IEEE international conference, IEEE.
- Guglielmetti V, Graso P, et al., 2007, Mechanized Tunnelling in Urban Areas, Design Methodology and Construction Control, Taylor & Francis Editors, Italia.
- Guglielmetti V, Grasso P, Mahta A y Xu S, 2008, Mechanized tunnelling in urban areas. Italia. Taylor & Francis.
- Grupo Terratest, 2005, Construcción de Túneles y Conducciones con Tuneladora, Eurohinca Teledirigida.
- Herrenknecht, 2019, Tunnelling Systems Pioneering Underground Together (<https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/mixschild/>).
- Huerta J, 2009, Diagramación de argumentos dialógicos y derrotantes en el sistema inteligente Expertius, Facultad de Derecho, UNAM, México.
- Labiouse V, Sandrone F, et al., 2015, Travaux Souterrains, Excavation Planning and DAT Simulation, Laboratoire de Mécanique des Roches, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL.
- Maidl B, Herrenknecht M, Maidl U y Wehrmeyer G, 2012, Mechanised Shield Tunnelling, Ernst & Sohn a Wiley Company, Germany.
- Marcano D, 2013, Estimación de parámetros geotécnicos por métodos estadísticos (Tesis doctoral), Universidad de Cantabria, Santander España.
- Martínez J, 2017, Procedimientos de Excavación con Microtuneladora: Antecedentes y Nuevas Tecnologías, UNAM.
- Mendaña F, y Fernández R, 2011, Excavación de Túneles con Máquinas Integrales para Roca y Suelo, México.
- MEYCO, 2008, Expanding Horizons Underground, Tratamiento de terreno en la Construcción de Túneles con Tuneladoras de Equilibrio por Presión de Tierras TBM-EPB, México.
- Mitchell M, 1997, Machine learning, McGraw-Hill, Science/Engineering/Math, WCB.
- Moreno A, 2020, Construcción de un túnel mecanizado en el centro histórico de Guadalajara, Jalisco, UNAM.
- Nicholas P, 2006, Optimizing TBM Selection for Risk Mitigation, AECOM, Tunneling Short Course, Colorado.
- Orozco J, Rincón R, 1986, Escudos Presurizados Japoneses, Seminario de Escudos y Topos.
- Pérez R, 2005, Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas, Excavación con Máquinas Integrales, Universidad de Cantabria UC.
- Pérez A, 2018, Predicción del Consumo de Cortadores de Disco en los Túneles de Base de Pajares y Guadarrama, Universidad de Oviedo,
- Pérez J, 2019, Gerencia de Obra y Verificación del Comportamiento, Control de Procesos, UNAM.

- Pérez J, 2013, Instrumentación y control de procesos de excavación a partir de un sistema telemétrico-híbrido, como parte de la evolución en la excavación de túneles con tuneladora. Cuarto Congreso Mexicano de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, CDMX.
- Ponce P, 2010, Inteligencia Artificial con aplicaciones a la Ingeniería, Alfaomega, México.
- Ponce J, Torres A, et al., 2014, Inteligencia Artificial, Iniciativa Latinoamericana de Libros LATIN.
- Quilez D, 2011, Seguridad en Trabajos con Tuneladoras, Safety Works in Tunnel Boring Machines.
- Rincón R, 1998, Curso Víctor Hardy-Construcción, Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas AMITOS.
- Romero J, Dafonte C, et al., 2000, Inteligencia Artificial y Computación Avanzada, Fundación Alfredo Brañas, Colección Informática.
- Sáenz C, 1998, Curso Víctor Hardy-Construcción de Túneles y Lumbreras en suelos blandos y firmes, Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas AMITOS.
- Sáenz C, 2016, Tuneleo Mecanizado en Materiales Blandos, Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Jalisco, CICEJ.
- Sáenz C, 2019, Construcción de Túneles y Lumbreras en suelos blandos y firmes, CSF Construcciones s.a. de c.v.
- Sáenz I, 2001, Estado Actual de la Tecnología en Tuneladoras, Estimación de coste y plazo en Proyectos de túneles mecanizados.
- Sánchez F, 2015, Ingeniería de Túneles, Ciudad de México: Reg. # 03-2015-012110003000-1, SEP-INDAUTOR.
- Sánchez F, 2019, Métodos Numéricos aplicados a obras subterráneas (Apuntes de la Maestría en Construcción de Túneles y Obras Subterráneas UNAM).
- Sánchez S, Laina C, et al., 2018, Túneles perforados con Tuneladoras EPB en entornos Urbanos, Condiciones de Operación y la Afección al entorno, España.
- Seingre G, 2017, Underground Construction Technology, Laboratoire de Mécanique des Roches, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL.
- Serradell D, 2017, Análisis de rendimientos en las diferentes etapas de excavación de un Túnel en suelo firme utilizando un escudo EPB, UNAM.
- Shahin A, Maier R y Jaksa B, 2005, Investigation into the robustness of artificial neural networks models for a case study in civil engineering, Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM, 2005), Australia.
- Shahin A, Jaksa B y Maier R, 2009, Recent Advances and Future Challenges for Artificial Neural Systems in Geotechnical Engineering Applications, Advances in Artificial Neural Systems.
- The Robbins Company, 2018, Tunnel Boring Machines TBM. (<https://www.robbinstbm.com/es/neustros-productos/tunnel-boring-machines/>),

- Tóth Á, Gong Q y Zhao J, 2013, Case studies of TBM tunneling performance in rock-soil interface. Tunnelling and Underground Space Technology.
- Trujillo J y March J, 2000, Aproximación metodológica al uso de redes neuronales artificiales para predicción de resultados en medicina, Grupo de Recerca de Biomatemática y Bioestadística, España.
- Varde O, 2018, Aplicación de Excavación Mecanizada de Túneles en áreas Urbanas, Academia de Ingeniería de la Provincia de Buenos Aires.