

**Diseño Conceptual de un Robot para la Elaboración de Conductos  
Subterráneos de Pequeña Escala**

Juan Manuel López Restrepo  
200720002113

Semillero de Física Teórica y Computacional  
Ingeniería Física  
Departamento de Ciencias Básicas  
Universidad EAFIT  
Medellín, Colombia  
2011



Diseño Conceptual de un Robot para la Elaboración de Conductos  
Subterráneos de Pequeña Escala

Juan Manuel López Restrepo

200720002113

*Proyecto de Grado presentado como requisito parcial para optar al título  
de Ingeniero Físico*

Asesor: Javier Mauricio Betancur

Ingeniero Mecánico

Tecnologías Marte S.A.S.

Co-asesor: Juan Manuel Jaramillo

Ingeniero Eléctrico, Ph.D.

Departamento de Ciencias Básicas

Universidad EAFIT

Semillero de Física Teórica y Computacional

Ingeniería Física

Departamento de Ciencias Básicas

Universidad EAFIT

Medellín, Colombia

2011



Nota de Aceptación

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

Medellín, ... de ... 2011



# Agradecimientos

Agradezco enormemente a mis padres y hermanas, por brindarme un apoyo constante e incondicional a lo largo de toda esta etapa de crecimiento académico y personal, por siempre haber creído en mí. ¡Gracias por todo!

A Nicolás Guarín, Edward Villegas y Hernando Suárez por acompañarme en todo el proceso y brindarme su ayuda académica cuando más lo necesité.

A Clarita Saldarriaga, Juliana Jaramillo, Davinson Castaño, Sara Rodríguez, Yheffer-son Gutiérrez, Santiago Echeverri, Simón Uribe y Sebastian Montoya, compañeros de estudio quienes me acompañaron en el proceso.

Al Ing. Mauricio Betancur por ser el asesor de este proyecto y brindarme la oportunidad de trabajar con él.

Agradezco a todo el personal del Ingeniería Física, por su acompañamiento en este proceso.

A Jair Mira, Luis Cuellar, Óscar Molina, Hugo Murillo y Edith Barrera y a todo el personal de laboratorios por su disposición y voluntad para la elaboración de cada uno de los proyectos realizados.



# Tabla de Contenido

<b>Resumen</b>	<b>XIX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Definición del Problema . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	1
1.3. Justificación . . . . .	2
1.4. Metodología . . . . .	3
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>5</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	5
2.2. Productos Competidores y Productos Sustitutos . . . . .	8
2.3. Conclusiones . . . . .	15
<b>3. Consideraciones sobre la Elaboración de Microtúneles</b>	<b>17</b>
3.1. Introducción . . . . .	17
3.2. Clasificación de Perforaciones . . . . .	17
3.3. Consideraciones Geológicas y Geotécnicas . . . . .	18
3.4. Consideraciones del Nivel Freático . . . . .	19
3.5. Consideraciones de Diseño y Construcción . . . . .	20
3.6. Consideraciones Constructivas . . . . .	20
3.7. Trazado de Curvas . . . . .	22
3.8. Discusión . . . . .	22
<b>4. Diseño Conceptual</b>	<b>25</b>

4.1.	Introducción . . . . .	25
4.2.	Brief . . . . .	26
4.2.1.	Descripción de la Situación . . . . .	26
4.2.2.	Objetivo General . . . . .	26
4.2.3.	Objetivos Específicos . . . . .	26
4.2.4.	Estrategias Metodológicas . . . . .	27
4.2.5.	Entregables . . . . .	27
4.3.	Lista de Requerimientos - PDS . . . . .	27
4.3.1.	Desempeño . . . . .	29
4.3.2.	Entorno . . . . .	31
4.3.3.	Competencia . . . . .	31
4.3.4.	Vida en Servicio . . . . .	32
4.3.5.	Mantenimiento . . . . .	33
4.3.6.	Costos . . . . .	34
4.3.7.	Tamaño . . . . .	34
4.3.8.	Peso . . . . .	35
4.3.9.	Transporte . . . . .	35
4.3.10.	Empaque . . . . .	36
4.3.11.	Manufactura . . . . .	36
4.3.12.	Apariencia y Acabado . . . . .	37
4.3.13.	Vida Útil . . . . .	37
4.3.14.	Materiales . . . . .	38
4.3.15.	Ergonomía . . . . .	38
4.3.16.	Cliente . . . . .	39
4.3.17.	Calidad y Confiabilidad . . . . .	39
4.3.18.	Almacenamiento . . . . .	40
4.3.19.	Procesos . . . . .	40
4.3.20.	Escala Temporal . . . . .	41
4.3.21.	Pruebas . . . . .	41
4.3.22.	Seguridad . . . . .	42

4.3.23. Limitantes del Mercado . . . . .	42
4.3.24. Patentes y Datos del Producto . . . . .	43
4.3.25. Aspecto Social y Político . . . . .	43
4.3.26. Instalación . . . . .	44
4.3.27. Documentación . . . . .	44
4.3.28. Disposición - Desechos . . . . .	45
4.4. Síntesis Funcional . . . . .	46
4.5. Matriz Morfológica . . . . .	53
4.5.1. Subsistema de Apuntalado . . . . .	55
4.5.2. Subsistema de Remoción de escombros . . . . .	57
4.5.3. Subsistema de Excavación . . . . .	61
4.6. Matriz de Evaluación de Rutas . . . . .	65
4.6.1. Eliminación:Rutas Escombros y Rutas Soportes . . . . .	66
4.6.2. Eliminación de Rutas del Sistema Completo . . . . .	67
4.7. Propuesta Final . . . . .	71
4.7.1. Propuestas Resultantes . . . . .	71
4.7.2. Propuesta Final . . . . .	73
<b>5. Modelo Matemático</b>	<b>79</b>
5.1. Modelo Matemático . . . . .	79
5.1.1. Sistema de desplazamiento . . . . .	79
5.1.2. Sistema de desplazamiento vertical del brazo . . . . .	85
5.1.3. Elección del largo del brazo . . . . .	88
5.1.4. Determinación del la posición del rodillo . . . . .	90
5.2. Función de Transferencia . . . . .	91
5.2.1. Subsistema de Desplazamiento del Carro . . . . .	92
5.2.2. Subsistema de Rotación del Rodillo de Excavación . . . . .	93
5.2.3. Subsistema de Remoción de Escombros . . . . .	94
5.2.4. Subsistema de Movimiento Lateral del Brazo . . . . .	95
5.2.5. Subsistema de Movimiento Vertical del Brazo . . . . .	96

<b>6. Instrumentación</b>	<b>99</b>
6.1. Método de Control . . . . .	99
6.1.1. Alternativas de Control . . . . .	101
6.2. Arquitectura de Control . . . . .	102
6.2.1. Interfaz de Control . . . . .	104
 <b>Bibliografía</b>	 <b>108</b>
 <b>Anexos</b>	 <b>114</b>
 <b>A. Clasificación de Suelos y Rocas</b>	 <b>117</b>
A.1. Consideraciones . . . . .	117
A.2. Tipos de Suelos . . . . .	117
A.2.1. Suelos Granulares . . . . .	118
A.2.2. Suelos Cohesivos . . . . .	118
A.2.3. Suelos Orgánicos . . . . .	119
A.3. Clasificación de las Rocas . . . . .	119
A.3.1. Rocas Ígneas . . . . .	120
A.3.2. Rocas Sedimentarias . . . . .	121
A.3.3. Rocas Metamórficas . . . . .	123
A.3.4. Propiedades de las Rocas . . . . .	124
 <b>B. Suelos y Rocas en el Valle de Aburrá</b>	 <b>129</b>

# Lista de Figuras

2.1. Tunnel Boring Machine . . . . .	6
2.2. Lovat: MS40PJS . . . . .	9
2.3. Akkerman: MTBM SL . . . . .	10
2.4. Akkerman: BS + EX . . . . .	11
2.5. Herrenknecht AG:AVN250XC . . . . .	12
2.6. Herrenknecht AG:M-742M . . . . .	13
3.1. Microtunneling - Herrenknecht . . . . .	21
4.1. Modelo funcional . . . . .	46
4.2. Modelo Funcional en verbos . . . . .	46
4.3. Convenciones: Flujos genéricos . . . . .	47
4.4. Modelo Funcional relativo al objeto . . . . .	47
4.5. Estructura Funcional . . . . .	49
4.6. Convenciones: Tipos de genéricos de acciones . . . . .	50
4.7. Estructura Funcional . . . . .	51
4.8. Estructura Funcional: subsistemas principales . . . . .	52
4.9. Proceso de Eliminación de Rutas . . . . .	54
4.10. Subsistema 2: Apuntalar . . . . .	55
4.11. Subsistema 4: Remoción de escombros . . . . .	57
4.12. Subsistema 3: Excavar . . . . .	61
4.13. Vista lateral del Subsistema de Soporte . . . . .	73
4.14. Vista lateral del Subsistema de Excavación . . . . .	74
4.15. Vista superior del Subsistema de Excavación . . . . .	74

4.16. Vista lateral del sistema completo . . . . .	75
4.17. Boceto del Concepto . . . . .	76
4.18. Render del Concepto . . . . .	77
5.1. Diagrama del Carro . . . . .	80
5.2. Diagrama de cuerpo libre . . . . .	81
5.3. Descomposición en vectores sobre los ejes coordenados . . . . .	81
5.4. Fuerzas resultantes . . . . .	82
5.5. Diagrama de Fuerzas modificado . . . . .	84
5.6. Diagrama de fuerzas estáticas que actúan sobre el brazo . . . . .	86
5.7. Diagrama del actuador y el brazo . . . . .	88
5.8. Diagrama del ángulo de barrido azimutal del brazo de excavación . . . . .	89
5.9. $\theta$ (dado en grados) vs. $L$ dado en metros . . . . .	89
5.10. Diagrama geométrico del barrido azimutal del brazo de excavación . . . . .	90
5.11. Función de Transferencia del Sistema Completo . . . . .	92
5.12. Función de Transferencia General del Subsistema de Desplazamiento . . . . .	93
5.13. Función de Transferencia del Subsistema de Desplazamiento . . . . .	93
5.14. Función de Transferencia General del Subsistema del Rodillo de Excavación . . . . .	94
5.15. Función de Transferencia del Subsistema del Rodillo de Excavación . . . . .	94
5.16. Función de Transferencia General del Subsistema de Remoción de Escombros . . . . .	95
5.17. Función de Transferencia del Subsistema de Remoción de Escombros . . . . .	95
5.18. Función de Transferencia General del Subsistema de Movimiento Lateral del Brazo . . . . .	96
5.19. Función de Transferencia del Subsistema de Movimiento Lateral del Brazo . . . . .	96
5.20. Función de Transferencia General del Subsistema de Movimiento Vertical del Brazo . . . . .	97
5.21. Función de Transferencia del Subsistema de Movimiento Vertical del Brazo . . . . .	97
6.1. Simplificación del Subsistema 1 . . . . .	99
6.2. Simplificación del Subsistema 1 . . . . .	100
6.3. Arquitectura de Control 1, empleando una <i>board</i> . . . . .	101

6.4. Arquitectura de Control 2, empleando un microcontrolador . . . . .	102
6.5. Modelo detallado de comunicación . . . . .	103
6.6. Interfaz de Control en LabView . . . . .	104



# Lista de Tablas

2.1. Lovat: MS40PJS . . . . .	9
2.2. Akkerman: MTMBSL . . . . .	10
2.3. Akkerman: BS + EX50 . . . . .	11
2.4. Herrenknecht AG:AVN250XC . . . . .	12
2.5. Herrenknecht AG:M-742M . . . . .	13
3.1. Clasificación de Perforaciones . . . . .	18
4.1. Desempeño . . . . .	30
4.2. Entorno . . . . .	31
4.3. Vida en Servicio . . . . .	32
4.4. Mantenimiento . . . . .	33
4.5. Costos . . . . .	34
4.6. Tamaño . . . . .	34
4.7. Peso . . . . .	35
4.8. Transporte . . . . .	35
4.9. Empaque . . . . .	36
4.10. Manufactura . . . . .	36
4.11. Apariencia y Acabado . . . . .	37
4.12. Vida Útil . . . . .	37
4.13. Materiales . . . . .	38
4.14. Ergonomía . . . . .	38
4.15. Cliente . . . . .	39
4.16. Calidad y Confiabilidad . . . . .	39

4.17. Almacenamiento . . . . .	40
4.18. Procesos . . . . .	40
4.19. Escala Temporal . . . . .	41
4.20. Pruebas . . . . .	41
4.21. Seguridad . . . . .	42
4.22. Limitantes del Mercado . . . . .	42
4.23. Aspecto Social y Político . . . . .	43
4.24. Instalación . . . . .	44
4.25. Documentación . . . . .	44
4.26. Disposición - Desechos . . . . .	45
4.27. Matriz morfológica: Subsistema de apuntalado . . . . .	56
4.28. Matriz morfológica: Subsistema de Remoción de Escombros . . . . .	60
4.29. Matriz morfológica: Subsistema de Excavación . . . . .	62
4.30. Matriz de Eliminación: Subsistema de apuntalado y de remoción de es- combros . . . . .	65
4.31. Matriz de Eliminación: Sistema completo . . . . .	67
4.32. Matriz de Evaluación . . . . .	70
5.1. Resistencias Unitarias de Fricción . . . . .	85
A.1. Rocas Ígneas . . . . .	121
A.2. Rocas Sedimentarias . . . . .	123
A.3. Rocas Metamórficas . . . . .	124
A.4. índice de dureza según la escala de Mohs . . . . .	125
A.5. Densidad seca de varias rocas . . . . .	126
A.6. Abrasividad según el índice de Cerchar . . . . .	127
A.7. Resistencia a la Compresión . . . . .	127
A.8. Resistencia a la Compresión en tipos de roca . . . . .	128

# Resumen

En este trabajo se presenta el diseño conceptual de un artefacto cuya función principal es realizar túneles continuos de diámetros inferiores a los manejados por mini TBMs actualmente. Ésta función tiene asociados 3 elementos constitutivos: el proceso de excavación, el proceso de remoción de escombros y el proceso de estructuración interna del túnel.

***Palabras Claves:*** *Diseño Conceptual, TBM, perforación horizontal, robótica, túneles urbanos, mecatrónica.*



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Definición del Problema

La realización de conductos subterráneos y la extracción de escombros asociados a dicho proceso son problemas inherentes a obras civiles de gran magnitud, pudiendo ser túneles bajo grandes montañas o zonas habitadas. Sin embargo este problema se encuentra también a diario en las pequeñas obras urbanas (menores a 1 metro de diámetro), en las cuales se ve la necesidad de realizar excavaciones que incluyen rompimiento de pavimento con el propósito de realizar cableados subterráneos o instalaciones de tuberías. Como solución al problema específico de obras urbanas pequeñas, se busca diseñar conceptualmente un dispositivo robótico que compuesto por una serie de estructuras mecatrónicas, realice conductos subterráneos de baja escala.

### 1.2. Objetivos

#### Objetivo general

Diseñar conceptualmente un robot, que compuesto por artefactos mecatrónicos, realice excavaciones subterráneas continuas a profundidades bajas en terrenos de suelos blandos, de tal forma que genere conductos horizontales que posibiliten la inserción de tubos y la realización de cableados eléctricos.

## Objetivos específicos

- Identificar los problemas esenciales inherentes a la perforación y elaboración de conductos subterráneos.
- Establecer las principales estructuras funcionales que hacen parte del dispositivo robótico.
- Identificar el principio de solución más adecuado para la realización de la excavación continua en suelos blandos, evaluando los aspectos teóricos asociados.
- Evaluar el aspecto teórico de la solución más apropiada para el problema de remoción de escombros resultantes de la perforación.
- Seleccionar el mejor mecanismo de posición de estructura del conducto, por medio de la evaluación desde un punto de vista teórico.
- Reunir cada una de las soluciones planteadas y analizadas, de tal forma que se obtenga el diseño conceptual global del dispositivo de elaboración de conductos subterráneos a pequeña escala.

## 1.3. Justificación

Este proyecto tiene como propósito realizar el diseño conceptual de una máquina que permita elaborar conductos subterráneos horizontales a baja escala (diámetros inferiores a 1 metro) en terrenos secos y homogéneos, evadiendo la exposición a riesgos de los exploradores y evitando realizar rompimientos de obras superficiales y excavaciones a lo largo de los trayectos, obteniendo así mejor seguridad y menores costos en los procedimientos mineros y de construcción.

A lo largo de las últimas décadas, la tecnología ha propiciado un aumento en la seguridad de los seres humanos y la optimización de procedimientos por medio del desarrollo de dispositivos, en este caso de exploración y construcción, para lograr resultados más confiables, seguros y rápidos, manteniendo el bajo costo tanto en las operaciones como en las máquinas.

El vínculo entre la mecánica y la electrónica, sumados a la planeación y al mismo hecho de buscar una solución adecuada para el problema, evidencian claramente la ingeniería involucrada en este proyecto. También, es posible percibir la física y la geología, en la comprensión e implementación de los conocimientos de fenómenos y terrenos respectivamente, obteniendo así la multidisciplinariedad necesaria para lograr los objetivos planteados. A partir de esto se infiere la necesidad de muchos campos de acción, brindando oportunidades de conocimiento, aprendizaje y trabajo a los académicos y profesionales que puedan estar involucrados en éstas áreas.

Además de lo mencionado, este proyecto tiene importancia en el país y la región ya que expande las posibilidades y los recursos disponibles, bien sea por su desarrollo o por su aplicación, aún más considerando a Antioquia como un departamento minero. Estos artefactos se pueden implementar en campos como la exploración y la excavación, así como también se pueden implementar estas tecnologías en las líneas de ensamble y construcción.

## 1.4. Metodología

Inicialmente se llevó a cabo una etapa de investigación, de tal forma que se identificaron cada uno de los problemas asociados con la perforación de suelos blandos y homogéneos y la elaboración de conductos subterráneos de diámetros inferiores a 1 metro. Posteriormente se elaboró una lista detallada de cada una de las estructuras funcionales que componen el dispositivo robótico, obteniendo así una visión global de la máquina en conjunto, satisfaciendo a su vez las necesidades y requerimientos básicos.

Más adelante se realizó e implementó una serie de diseños para cada uno de los tres mecanismos principales que componen el sistema. Cada uno de estos diseños fueron analizados por medio del diseño conceptual, permitiendo así plantead una solución óptima para cada uno de los subsistemas.

En cuanto a sistemas mecánicos se tuvo la siguiente distribución para su diseño: inicialmente se trabajó sobre el sistema de excavación, en la cual fue necesario tener en

cuenta el terreno objetivo: suelos blandos, secos y con contenidos poco contenido rocoso; posteriormente se concentraron los conocimientos en el sistema de remoción y transporte de residuos de la excavación, de tal forma que se aseguren secciones continuas libres de materiales; y por último se procedió a diseñar conceptualmente el sistema de construcción de las paredes estructurales que finalmente componen los conductos.

En paralelo al diseño de la parte mecánica, se planteó la implementación de los circuitos de control, permitiendo así dar solución al funcionamiento deseado. Éstos también hacen parte de una etapa de evaluación, logrando un empalme perfecto entre ambos desarrollos, el mecánico y el electrónico.

Una vez estuvieron los diseños escogidos, se llevó a cabo una agrupación de conceptos, logrando un diseño global que incluye los principios necesarios para describir la máquina y satisfacer cada una de sus funciones.

Con el propósito de lograr el cumplimiento de los objetivos, se realizaron reuniones con el asesor y co-asesor de proyecto de manera semanal, así como también se llevaron a cabo reuniones con personas externas que tuviesen conocimiento del tema, obteniendo la suficiente información y observaciones frente al desarrollo del proyecto.

# Capítulo 2

## Estado del Arte

### 2.1. Antecedentes

Con el propósito de acortar distancias y minimizar tiempos de recorrido y transporte, actualmente se construyen a nivel mundial carreteras dentro de conductos subterráneos y submarinos por medio de máquinas excavadoras de terrenos tanto blandos como rocosos. Estos artefactos, más conocidos con el nombre de *TBM*<sup>1</sup> cumplen la función de excavar y extraer todo tipo de materiales que se encuentren en los trayectos trazados, de tal forma que se logren cavidades de recorrido continuo para más adelante construir los soportes internos que permiten la elaboración de carreteras [1, 2, 3]. Estas tuneladoras están compuestas básicamente por 3 sistemas: un mecanismo de excavación continua; un sistema de extracción de materiales y aguas subterráneas; y un sistema de construcción de paredes cilíndricas [4].

En la Figura 2.1 se presenta un modelo de una tuneladora implementada para la construcción del Gotthard Base Tunnel, ubicado en Los Alpes, Suiza.

En la minería subterránea se implementan también excavadoras que posibiliten la extracción de minerales preciosos así como el acceso mismo a las profundidades de los cuerpos rocosos. Estos artefactos son generalmente de una escala más baja, sin embargo se encuentran en crecimiento debido a las necesidades de expansión de las minas para

---

<sup>1</sup>TBM: Por sus siglas en inglés Tunnel Boring Machine



Figura 2.1: TBM S-210 usada en el Gotthard Base - Este. Tomado de Wikipedia. [5]

optimizar el transporte y la excavación de minerales; además resultan buenos impulsores de tecnología ya que en ocasiones se requieren mejores especificaciones técnicas debido a los minerales [6, 7]. En las perforaciones horizontales, se utilizan taladros de gran tamaño bien sea para posicionar cargas explosivas o para extraer muestras de los materiales que componen el frente de exploración [8].

La necesidad de elaborar túneles ha existido desde hace cientos de años con fines diversos tales como el transporte de personas, carga o a una escala más pequeña, de aguas y residuos. Sin embargo es con el desarrollo urbano que se ha acrecentado esta necesidad debido a la cantidad de elementos que se distribuyen por métodos subterráneos tales como el cableado de telecomunicaciones, las líneas de gas e incluso las redes eléctricas [1].

Los dos métodos para la elaboración de éstos conductos subterráneos están directamente ligados a la excavación de zanjas. El método tradicional consiste en excavar toda la trayectoria del tubo, desde principio hasta el fin según la necesidad, mientras que en el otro método se realiza un túnel continuo desde un punto A hasta un punto B. Éste

último sistema se inició en los 70's en Japón y posteriormente se empezó a desarrollar en Europa y Norteamérica a tal punto de crear sociedades exclusivas sobre este tema [9, 10, 11, 12, 13].

En el ámbito local no existen trabajos similares debido a la complejidad de los procesos de excavación y construcción de los conductos y a la falta de recursos económicos para el desarrollo. Sin embargo es posible identificar artefactos de excavación vertical y horizontal como taladros, que posibilitan la exploración de terrenos y la conducción de fluidos como el petróleo y los gases naturales [14]

Por otra parte sí es posible encontrar dispositivos de desplazamiento en terrenos abruptos y complicados, sin embargo cumplen funciones diferentes como desminado, alcance de objetos y vigilancia [15]; éstos son diseñados únicamente para usar en superficie. También existen artefactos de exploración de túneles de pequeña escala y oleoductos, pero es necesario recordar que ninguno de estos es para trabajo subterráneo y no realizan procedimientos de excavación.

La tecnología de conductos sin zanjas ha tenido tanta aceptación a nivel internacional que se han realizado estudios exclusivos para indicar a las alcaldías y demás entidades las diferencias y necesidades específicas para poder llevar a cabo este tipo de procedimientos debajo de carreteras [16, 17, 18] . Así mismo se han planteado tanto las ventajas como las desventajas de la realización de acueductos y cableados subterráneos por medio de los métodos de zanjas y los métodos de túneles [19]. Una de las soluciones más completas es la técnica llamada *microtunneling*<sup>2</sup>, la cual ha tenido gran desarrollo ya que realiza excavaciones, remueve escombros y a su vez ubica los soportes internos de los túneles [20, 21]. Esta técnica consiste en empujar el cabezal de corte por medio de los tubos de recubrimiento, es decir, en el lugar se inicio del túnel se posiciona una estructura que por medio de actuadores hidráulicos empujan una a una las secciones internas del túnel y por ende al disco de corte frontal, determinando así la velocidad de avance [14].

---

<sup>2</sup>Método por medio del cual se realizan túneles de diámetros inferiores a 3 metros

En el ámbito científico internacional es posible encontrar grandes desarrollos a los métodos de elaboración de túneles sin zanjas. Los métodos de excavación son un claro ejemplo ya que debido a la investigación se han desarrollado elementos para diferentes clases de suelos y rocas, tales como los llamados *roadheaders*<sup>3</sup>, taladros horizontales y discos de corte. Éstos últimos tiene gran aplicación en las TBMs, permitiendo fracturar los frentes rocosos [8, 22, 23, 24].

Los llamados *roadheaders* tienen una aplicación bastante amplia ya que permiten realizar perforaciones de distintos tamaños a partir de la misma máquina, además la diferencia en los diseños y materiales posibilita las fracturas en diferentes materiales [25, 26]; han sido centro de investigaciones durante la última década debido a sus aplicaciones y desempeños [27, 28].

## 2.2. Productos Competidores y Productos Sustitutos

En el ámbito comercial es posible encontrar diversos fabricantes que utilizan el método de túneles sin zanja. Los principales métodos son el uso de MTBM<sup>4</sup> o el uso de excavadoras y *roadheaders* para realizar la excavación, sin embargo conservando el mismo mecanismo de desplazamiento y de ubicación de soporte.

El funcionamiento principal consiste en anclar una máquina en la cavidad inicial donde empieza el túnel, la cual empuja los segmentos de tubo insertados y por consiguiente empuja la el cabezal de corte. A continuación se presenta una serie de tablas representativas en la cual se pueden observar las diversas características de cada uno de los sistemas.

---

<sup>3</sup>Cabezales de corte giratorios compuestos por dientes de diferentes materiales

<sup>4</sup>Micro Tunneling Boring Machine, máquina excavadora de túneles de tamaño micro, es decir de diámetros inferiores a 3 metros

Tabla 2.1: Lovat: MS40PJS

<b>Lovat: MS40PJS</b>	
<b>Tipo de corte</b>	TBM
<b>Tipo Motor</b>	Eléctrico
<b>Potencia Motor</b>	200 HP (150 kW)
<b>Revoluciones por minuto</b>	0-14 rpm
<b>Diámetro Interno final</b>	1000 mm
<b>Peso sistema completo</b>	>10000 kg
<b>Longitud</b>	2000mm
<b>Tipo de Control</b>	Computarizado
<b>Imagen</b>	2.2



Figura 2.2: Lovat: MS40PJS

Tabla 2.2: Akkerman: MTMBSL

---

<b>Akkerman: MTBM SL</b>	
<b>Tipo de corte</b>	TBM
<b>Tipo Motor</b>	Eléctrico
<b>Potencia Motor</b>	75 HP (56KW)
<b>Torque máximo</b>	45.400 lbf-ft (0-13 rpm)
<b>Diámetro Interno final</b>	762-1168 mm
<b>Peso sistema completo</b>	>15000 kg
<b>Longitud</b>	3300 mm
<b>Consumo</b>	480VAC/1200A
<b>Tipo de Control</b>	Computarizado

---

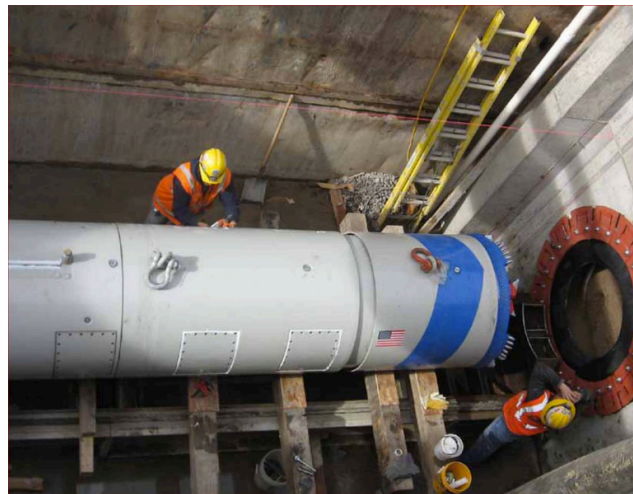


Figura 2.3: Akkerman: MTBM SL

Tabla 2.3: Akkerman: BS + EX50

---

<b>Akkerman: BS + EX</b>	
<b>Tipo de Corte</b>	Brazo excavador
<b>Tipo Motor</b>	Hidráulico
<b>Potencia Motor</b>	273L/min @ 1.724 kPa
<b>Diámetro Interno final</b>	2540-4267 mm
<b>Peso sistema completo</b>	11000 kg
<b>Longitud</b>	3300 mm
<b>Tipo de Control</b>	Joystick

---



Figura 2.4: Akkerman: BS + EX

Tabla 2.4: Herrenknecht AG:AVN250XC

<b>Herrenknecht AG:AVN250XC)</b>	
<b>Tipo de Corte</b>	TBM
<b>Tipo Motor</b>	Eléctrico
<b>Torque Motor</b>	5.9-40.1 kNm
<b>Revoluciones por minuto</b>	0-44
<b>Diámetro Interno final</b>	368-800 mm
<b>Peso sistema completo</b>	850-4400kg
<b>Longitud</b>	1400-2500 mm
<b>Potencia</b>	45 kW
<b>Tipo de Control</b>	Computarizado

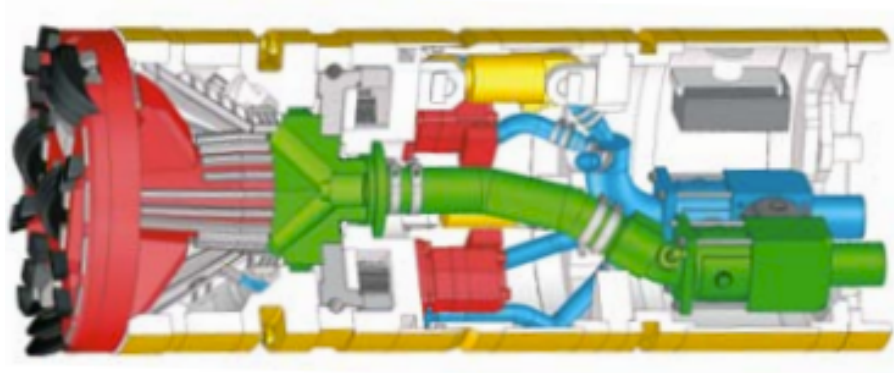


Figura 2.5: Herrenknecht AG:AVN250XC

Tabla 2.5: Herrenknecht AG:M-742M

<b>Herrenknecht AG:M-742M</b>	
<b>Tipo de Corte</b>	Roadheader,excavadora
<b>Tipo Motor</b>	Eléctrico
<b>Torque Motor</b>	23500 kNm
<b>Revoluciones por minuto</b>	–
<b>Diámetro Interno final</b>	2000-11700 mm
<b>Peso sistema completo</b>	3050-4400 kg
<b>Longitud</b>	1400-2500 mm
<b>Potencia</b>	160 kW
<b>Tipo de Control</b>	Computarizado+joystick

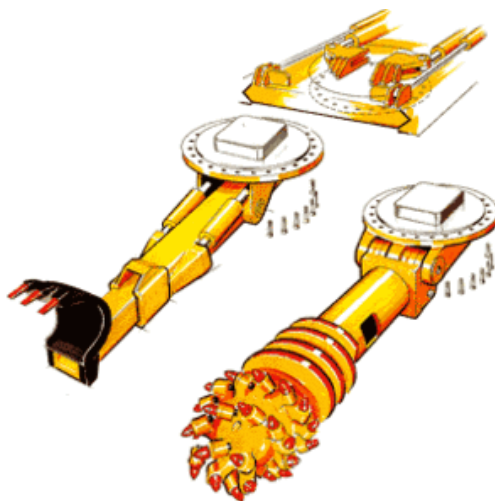


Figura 2.6: Herrenknecht AG:M-742M

El artefacto presentado en la Figura 2.2[29], es de muy buenas características técnicas. Su desventaja, al igual que el resto de MTBMs es la cantidad de accesorios requeridos para su instalación.

La máquina hecha por Akkerman [30] presentada en la Figura 2.3, posee muy buen torque máximo, sin embargo su consumo es elevado. Además, requiere de muchos accesorios para su funcionamiento.

Akkerman [31] posee también un diseño presentado en la Figura 2.4, en la cual se resalta el uso de una *garra* excavadora que permite la excavación en suelos con poco contenido rocoso, sin embargo requiere un gran montaje en el pozo inicial del túnel.

En la Figura 2.5 se presenta un MTBM realizada por Herrenknecht [32], en la cual se resalta el sistema de remoción de escombros por medio de flujos de agua. Por ser una MTBM requiere gran variedad de accesorios en el inicio del túnel.

Herrenknecht [33] tiene también una versión de MTBM presentada en la Figura 2.6, en la cual se pueden reemplazar las herramientas de corte, posibilitando así mayor versatilidad. Requiere igualmente de una instalación compleja para su funcionamiento.

En el ámbito industrial es necesario considerar las patentes concedidas a los mecanismos y herramientas relacionadas con la construcción de túneles para carreteras y con los métodos de perforación sin zanjas, ya que proporcionan muy buena información acerca de la actualidad de éstos temas.

La utilización de TBMs ha sido vital para el desarrollo de las estructuras viales especialmente en Europa, donde la geografía ha demandado la implementación de túneles, reduciendo las distancias. Allí resulta importante el avance tecnológico para diferentes tipos de suelo, lo que a su vez implica mejoras en todo el sistema [34, 35, 36]. Sin embargo es también necesario resaltar los grandes desarrollos de la industria en los túneles de diámetros inferiores a 3 m, ya que conlleva la reducción de muchos mecanismos de corte y de avance [37, 38, 39].

Uno de los temas más importantes en la perforación subterránea son las herramientas de corte implementadas según el tipo de suelos encontrados en el frente de operación, al igual que los materiales con los que se fabrican. Existen por ejemplo varias patentes concedidas a Veemer Manufacturing Co. en las cuales se muestran un ingenioso cabezal de corte que además permite ampliar túneles existentes con diámetros de menor tamaño [40] y una mecanismo de corte implementado por medio de un acople de ejes,

que permite aumentar las distancias de perforación [41].

Una patente muy importante es la concedida a Hughes Tool Company, en la cual presentaron el control de dirección de una máquina para realizar túneles por medio de la utilización de un sistema láser en el cual la máquina en movimiento contenía un receptor, el cual permitía la retroalimentación del sistema [42]. Esta patente es de relevancia significativa ya que actualmente muchos sistemas de perforación sin zanjas la emplean para controlar la dirección.

### **2.3. Conclusiones**

A partir de lo observado en el estado del arte es posible observar que esta tecnología ha tenido un gran avance en las últimas décadas, pero aún no se ha logrado implementar en todos los países debido a sus altos costos y a la falta de iniciativa de los gobiernos por utilizar nuevos métodos. Es importante resaltar que los países líderes en la construcción de estos dispositivos son Alemania y Estados Unidos, los cuales proveen de servicios y productos a los demás países. Es importante resaltar el hecho de que todas estas máquinas necesitan de muchos equipos, herramientas, hombres y espacio para entrar en uso, ya que por un lado su consumo es muy alto y por el otro, es indispensable adecuar extremadamente bien el punto de partida del túnel.



# Capítulo 3

## Consideraciones sobre la Elaboración de Microtúneles

### 3.1. Introducción

En este capítulo se presentan consideraciones relevantes a la hora de realizar un túnel, tanto para los suelos como los sistemas a implementar según las condiciones y el entorno. En ocasiones será necesario acudir al Anexo A para obtener mayor información acerca de rocas y suelos.

Esta información es fundamental para el diseño del artefacto, ya que además de proveer un estado del arte, permite definir funciones y tener en cuenta ítems adicionales al diseño mecánico.

### 3.2. Clasificación de Perforaciones

Las perforaciones tanto verticales como horizontales se pueden clasificar por diferentes elementos tales como las dimensiones, los componentes geológicos y los propósitos; sin embargo es la subdivisión por componentes geológicos la que se pretende resaltar debido a la naturaleza de la investigación. A continuación se presenta la Tabla 3.1 [ref de volvo] en la cual se clasifican las perforaciones según los componentes geológicos a perforar.

Tabla 3.1: Clasificación de Perforaciones

Clase	Descripción
Perforación Fácil	Tierra suelta, arena, gravilla.
Perforación Mediana	Tierra comprimida, arcilla seca dura, tierra con menos del 25 % de roca.
Perforación Mediana a Dura	Tierra compacta dura con alrededor del 50 % de contenido rocoso.
Perforación Fuerte	Rocas sueltas, tierra con mínimo 75 % de contenido rocoso.
Perforación Dura	Arenisca, caliche (carbonato de calcio), esquisto, ciertas calizas, nieve dura.

### 3.3. Consideraciones Geológicas y Geotécnicas

La información acerca de cómo se ha formado el subsuelo puede proveer datos sobre la posible presencia de troncos, rocas de gran tamaño y áreas cementadas. Así también, el conocimiento del área donde se va a llevar a cabo la obra es fundamental, ya que permite tener en cuenta diversos factores tales como zonas aledañas a vertientes aluviales, que afectan los tiempos y los procedimientos a realizar.

La ejecución de este tipo de obras puede tener repercusiones sobre demás obras existentes en sus proximidades, por lo cual es necesario tener presente este tipo de situaciones y se hace determinante una investigación geotécnica por medio del estudio físico de los materiales, obteniendo parámetros geométricos y su distribución espacial. [14] Para el ingeniero responsable de la obra, es fundamental conocer los comportamientos del terreno, tales como presiones, corrimientos, fallas, fracturas y fluencias.

En cuanto a los ensayos de los suelos, se resaltan los establecidos según la norma técnica ASTM<sup>1</sup> siguientes: contenido de humedad, curva granulométrica, ensayos de compresión, ensayos de deformaciones y sobre aguas subterráneas [14]

<sup>1</sup>ASTM: conocida anteriormente como *American Society for Testing and Materials*, es actualmente un organismo internacional que establece estándares técnicos

Para suelos cohesivos arcillosos<sup>2</sup>, los parámetros más importantes son: densidad, contenido en humedad y test de penetrabilidad.

Para los suelos no cohesivos los parámetros más relevantes son: distribución del tamaño de granos por tamizado, densidad, permeabilidad y test de penetrabilidad.

Para los suelos de relleno se consideran los mismos parámetros que para los suelos cohesivos, sin embargo es necesario resaltar la compactación y materiales constituyentes.

Para los materiales altamente rocosos es necesario conocer su densidad, dureza según escala de Mohs<sup>3</sup>, descripción de la calidad de la roca, resistencia e índice de fracturación.

En ocasiones de arenas calcáreas o aguas ácidas es importante conocer resistividades eléctricas y constituciones mineralógicas, de tal forma que se pueda prever corrosiones sobre los materiales.

Con el propósito de enmarcar el proyecto dentro de un área geográfica, en el Anexo B se encuentra información acerca de los suelos predominantes en los municipios que componen el Valle de Aburrá.

### **3.4. Consideraciones del Nivel Freático**

Por el hecho de ser una técnica sin zanjas, es posible localizar el nivel freático<sup>4</sup> muy cerca de la trayectoria establecida, por lo cual se deben considerar las posibles fluctuaciones de éste debidas tanto a la naturaleza como al ser humano. Además, es fundamental conocer los estados de aguas subterráneas cercanas, ya que pueden afectar el sistema de sostenimiento interno, y llevarlo a colapsar.

---

<sup>2</sup>Revisar el Anexo A, *Clasificación de Suelos y Rocas* para su explicación

<sup>3</sup>Revisar Anexo A, Tabla A.4

<sup>4</sup>Es la distancia entre la superficie y el lugar donde se encuentran las aguas subterráneas

### **3.5. Consideraciones de Diseño y Construcción**

A la hora de realizar una obra subterránea a nivel urbano es imprescindible elaborar un plan de excavación, en el cual los técnicos asociados a la obra conozcan previamente los posibles obstáculos de la trayectoria del túnel, además de posibles áreas con aguas contaminadas ya que éstas pueden atrasar e incluso modificar la obra. Es importante considerar también los establecimientos cercanos a la obra, ya que lugares como: zonas industriales, gasolineras, gasoductos y áreas comerciales pueden añadir elementos a la trayectoria establecida.

Un punto adicional son los servicios públicos tanto subterráneos como superficiales implantados en la zona, ya que pueden convertirse en obstáculos, alterando el trazado y la construcción bien sea del túnel o de los pozos iniciales y finales.

### **3.6. Consideraciones Constructivas**

Cuando se pretende usar como método de excavación un escudo de corte, se debe considerar una sobre-excavación de al menos 20 mm con relación a las medidas de la estructura de soporte, posibilitando así su arrastre o empuje a lo largo de la perforación; sin embargo es necesario aplicar bentonita para ayudar a disminuir la fricción de estos materiales contra las paredes de los suelos [14]

Para llevar a cabo la obra, se deben establecer condiciones óptimas de trabajo, permitiendo la ubicación y organización de todos los elementos de trabajo de manera adecuada. En ocasiones es necesario emplear una distribución lineal, por ejemplo cuando se trabaja sobre una vía. A continuación se presentan una serie de elementos posibles a incluir:

- Plantas eléctricas
- Bombas hidráulicas y neumáticas
- Filtros de agua
- Cabinas de Control

- Almacenamiento de estructuras de soporte interno
- Grúas, poleas y puentes grúa
- Herramientas y equipos de excavación vertical

En la Figura 3.1 se pueden identificar algunos elementos previamente mencionados.

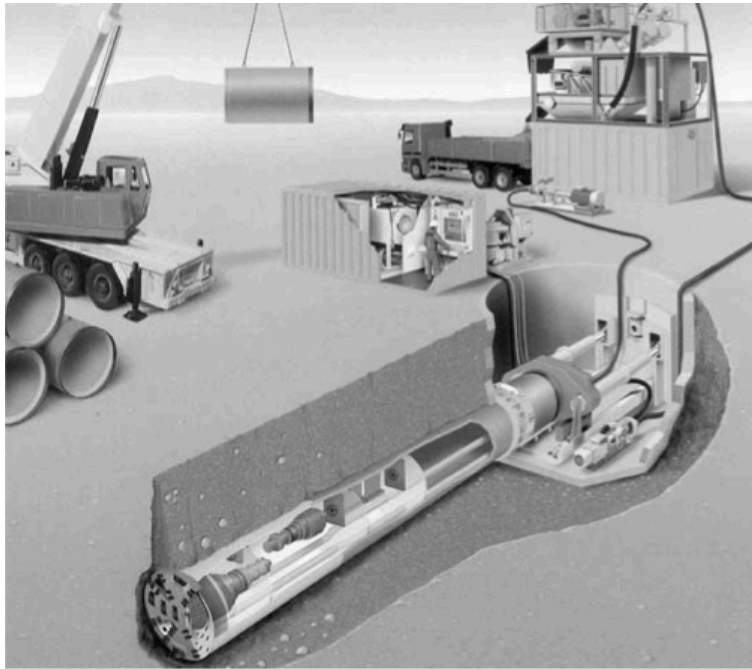


Figura 3.1: Microtunneling Method, de Herrenknecht [33]

Normalmente el pozo inicial del túnel tiene una distancia superficial variable entre 3-4.5 x 3-4.5 *metros* para diámetros de tuberías cercanos a 600 *mm*, y entre 5-7.5 x 5-7.5 *metros* para diámetros de 1800 *mm* [14]. Esto es debido a la necesidad de permitir la ubicación de escombros a un lado de la entrada del túnel, así como también la presencia de personal de la obra para facilitar las tareas de perforación y ubicación. El tamaño del pozo de llegada es mucho menor al de partida, ya que sólo es necesario retirar la herramienta utilizada para la perforación, normalmente no excede los 4.5 x 4.5 *metros* de área.

### 3.7. Trazado de Curvas

La técnica más implementada para controlar trayectoria de perforación es mediante el uso de un rayo láser que permite corregir cualquier tipo de desviaciones no deseadas, o por el contrario, controlar las curvas previamente establecidas. Cuando se consideran túneles de más de 150 *metros* en línea recta, es necesario tener en cuenta la refracción en las capas de aire a diferentes temperaturas, además de la dispersión propia del láser [14]. El rayo láser está ubicado en el pozo inicial, donde comienza el túnel, mientras que la máquina de perforación tiene adaptado un sistema de detección del haz el cual posibilita la retro-alimentación del sistema de control.

En ocasiones será necesario adicionar elementos al sistema de control debido a la existencia de curvas en el trazado; así, en cada *codo* es necesario posicionar una estructura que detecta el haz proveniente del inicio del túnel y además envía un segundo haz hacia la máquina excavadora, donde es recibido por un sensor. Los dispositivos más comunes además del dispositivo de recepción del haz, son un goniómetro y un inclinómetro, permitiendo establecer la orientación del sistema.

El mecanismo de actuación más utilizado son 4 cilindros hidráulicos, los cuales empujan las secciones de tubería a lo largo de la excavación. Este sistema permite aplicar cargas en diferentes puntos de tal manera que se logre la modificación de la trayectoria del cabezal de corte.

### 3.8. Discusión

A partir de lo anterior es posible enmarcar esta primer etapa del proyecto en una perforación mediana, compuesta por tierra comprimida, arcillas secas y tierras con menos del 25 % de contenido rocoso, evitando así condiciones adversas tales como frentes de excavación 100 % rocosos.

Es importante considerar los suelos que forman el Valle de Aburrá, ya que en dicho lugar se realizarán pruebas a futuro cuando exista un prototipo funcional. En el Anexo B se encuentra una breve clasificación de los suelos de los municipios que componen

dicho valle.

Teniendo en consideración profundidades máximas de alrededor de 3 metros, es posible considerar niveles freáticos con poca cantidad de agua, así como caudales de agua de infiltración. Sin embargo es aconsejable conocer previamente las características geológicas y geotécnicas del terreno.

Por último, es vital incluir en el diseño elementos externos que fundamenten la aplicación y delimiten el artefacto. Además es imprescindible considerar cada uno de los ítems mencionados durante el capítulo ya que permiten llevar a cabo un procedimiento óptimo de excavación.



# Capítulo 4

## Diseño Conceptual

### 4.1. Introducción

En el ámbito del diseño conceptual se ha tornado fundamental mencionar el trabajo desarrollado por Stuart Pugh con su libro *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering* [43], quien propuso un método integrado para el diseño de productos. En este libro, Pugh propone 32 ítems significativos a partir de los cuales se debe realizar la lista de requerimientos de un artefacto.

El método de diseño implementado es una compilación de pasos y elementos de tres fuentes fundamentales [43, 44, 45, 46]. Éste se compone de un *brief*<sup>1</sup>, el cual describe el artefacto de una manera muy resumida; el PDS<sup>2</sup> (por sus siglas en inglés *Product Design Specification*), presentando la lista de requerimientos para el diseño; la síntesis funcional, la cual presenta la concepción tanto global como específica de la máquina; la matriz morfológica, en la cual se presentan las posibles soluciones para cada uno de los sub-conceptos; matriz de evaluación de rutas, para escoger la combinación más adecuada de soluciones; y finalmente se realiza la propuesta final del artefacto. Como resultado se obtiene un concepto capaz de excavar la tierra, al tiempo de remover los escombros resultantes y adecuar la cavidad con refuerzos internos.

---

<sup>1</sup>Hace referencia a una breve descripción de la máquina, sus objetivos y justificación, expresando en contexto la situación de diseño y posibles las soluciones. Normalmente no supera las 2 páginas

<sup>2</sup>Son las Especificaciones del Diseño del Producto, es decir, la Lista de Requerimientos del sistema o producto.

## **4.2. Brief**

### **4.2.1. Descripción de la Situación**

- Se pretende introducir al mercado un producto capaz de realizar perforaciones horizontales continuas en suelos con condiciones específicas.
- La oportunidad de negocio radica en la reducción de tamaño en comparación con las TBMs existentes en el mercado, empleando una menor cantidad de elementos para su funcionamiento.
- El contexto principal a cual está dirigido este artefacto es la elaboración de conductos subterráneos urbanos para cableado eléctrico, conductos de gas y acueductos.

### **4.2.2. Objetivo General**

Diseñar conceptualmente un robot, que compuesto por artefactos mecatrónicos, realice excavaciones subterráneas continuas a profundidades bajas en terrenos de suelos blandos, de tal forma que genere conductos horizontales que posibiliten la inserción de tubos y la realización de cableados eléctricos.

### **4.2.3. Objetivos Específicos**

- Identificar los problemas esenciales inherentes a la perforación y elaboración de conductos subterráneos.
- Establecer las principales estructuras funcionales que hacen parte del dispositivo robótico.
- Identificar el principio de solución más adecuado para la realización de la excavación continua en suelos blandos, evaluando los aspectos teóricos asociados.
- Evaluar el aspecto teórico de la solución más apropiada para el problema de remoción de escombros resultantes de la perforación.
- Seleccionar el mejor mecanismo de posición de estructura del conducto, por medio de la evaluación desde un punto de vista teórico.

- Reunir cada una de las soluciones planteadas y analizadas, de tal forma que se obtenga el diseño conceptual global del dispositivo de elaboración de conductos subterráneos a pequeña escala.

#### 4.2.4. Estrategias Metodológicas

- Asesorías puntuales con personas directamente involucradas en la elaboración de zanjas y túneles.
- Realizar una adecuada lista de requerimientos.
- Asesorías con expertos en el proceso de diseño de conceptos.
- Actualización continua del estado del arte.

#### 4.2.5. Entregables

- Proceso de Diseño del Concepto del artefacto
- Modelo matemático del artefacto
- Modelo de Control del artefacto

### 4.3. Lista de Requerimientos - PDS

Las especificaciones de diseño de producto son elementos muy importantes del diseño conceptual, ya que permiten definir los parámetros para los cuales se está diseñando, además funciona como un mecanismo de control sobre los resultados que se obtienen a lo largo del proceso. Es posible que en ocasiones sea necesario reformular ideas e incluso realizar modificaciones sobre las condiciones iniciales y esto se debe a que el *PDS* no está pensado como un documento estático sino como uno dinámico que permite un proceso iterativo de diseño.

A continuación se presenta la lista de requerimientos según los descritos por Stuart Pugh. Éstos se presentarán a modo de tabla, presentando como demanda ***D*** o deseo ***d*** las especificaciones del cliente, las cuales son presentadas también en un lenguaje

técnico y cuantitativo en la medida de lo posible, de tal forma que se logren unas especificaciones detalladas para la concepción del diseño. Los elementos empleados son:

- Desempeño
- Entorno
- Competencia
- Mantenimiento
- Vida en Servicio
- Costos
- Transporte
- Empaque
- Manufactura
- Tamaño
- Peso
- Apariencia y Acabado
- Materiales
- Vida Útil
- Ergonomía
- Cliente
- Calidad y Confiabilidad
- Almacenamiento
- Procesos
- Escala Temporal

- Pruebas
- Seguridad
- Limitantes del Mercado
- Patentes y Datos del Producto
- Aspecto Social y Político
- Aspecto Legal
- Instalación
- Documentación
- Disposición y Desechos

#### **4.3.1. Desempeño**

En la Tabla 4.1 se presentan las especificaciones técnicas de la máquina relativas a su funcionalidad.

Tabla 4.1: Desempeño

Desempeño	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
	D	Debe hacer un túnel.	Realizar una excavación horizontal continua de máximo 30 <i>metros</i> . Velocidad de corte: mínimo 0.5 m/h, máximo 5 m/h Diámetro mínimo final incluyendo soporte interno: 30 <i>cm</i> .
	D	Debe sacar los escombros del túnel.	Remover un volumen de 10 $cm^3$ de suelos y rocas de la trayectoria establecida Transportar 10 $cm^3$ de escombros hasta el inicio del túnel. Tamaño material particulado: inferior a 4 cm de arista mayor.
	D	Debe poner algo para soportar el túnel.	Posicionar una sección de la estructura interna a la vez. Transportar una estructura de soporte hasta el lugar de posición. Evitar la caída del material particulado empleando soportes internos.
	D	Debe tener un controlador a distancia para el usuario	Emplear una unidad de procesamiento Emplear actuadores controlados Emplear protocolo de comunicación a distancia alámbrico

### 4.3.2. Entorno

En la Tabla 4.2 se presentan las condiciones debidas al entorno que debe soportar el artefacto.

Tabla 4.2: Entorno

D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
d	Debe soportar altas temperaturas.	Temperatura de operación máxima: $45^{\circ}C$ , mínima: $-5^{\circ}C$ Temperatura de almacenamiento máxima: $55^{\circ}C$ , mínima: $-15^{\circ}C$
D	Debe soportar alta humedad.	Humedad de operación: $<75\%$
D	Debe soportar vibraciones.	Ensamblajes firmes Roscas de seguridad con caucho interno Cordones de soldadura para darle rigidez Ensamblajes amortiguados para aislar secciones de la máquina
D	Debe ser a prueba de agua	Ensamblajes sellados a prueba de rociado con agua Acoples de cables a prueba de agua Soportar lluvia y agua rociada
D	Soportar presiones atmosférica	Soportar 0.5 - 1.5 atm
D	Soportar contacto de escombros	Materiales a prueba de contacto con rocas, golpes de máximo 0.5 N Ensamblajes sellados a prueba de polvo y tierra superficial

### 4.3.3. Competencia

La competencia, como se presentó en el Estado del Arte, es internacional y no se cuentan con este tipo de productos en Antioquia. Actualmente se realizan este tipo de excava-

ciones empleando métodos de zanjas, por lo que la sociedad se ve afectada al cerrar las vías y andenes, además de generar altos ruidos durante la totalidad de la obra.

En Medellín la empresa que más necesita realizar este tipo de perforaciones es EPM<sup>3</sup>, ya que son los encargados de distribuir el acueducto, alcantarillado y redes tanto eléctricas como de telecomunicaciones.

#### 4.3.4. Vida en Servicio

Este elemento permite conocer los requerimientos en cuando a la vida de servicio del artefacto. Se presenta en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Vida en Servicio

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
<b>Vida en Servicio</b>	D	Perforación continua.	Trabajar 20 horas al día. En uso 5 días a la semana.
	d	Debe ser duradero.	Funcionar correctamente por 12 meses. Partes con cumplimiento de normas técnicas

<sup>3</sup>Grupo EPM: [www.epm.com.co](http://www.epm.com.co)

### 4.3.5. Mantenimiento

En la Tabla 4.10 se presentan los requerimientos en cuanto al mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.

Tabla 4.4: Mantenimiento

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Mantenimiento	d	Fácil mantenimiento.	Ensamblajes simples, no determinantes. Máximo 4 variedades de tornillos Artefacto separable en máximo 7 módulos
	d	Ciclos de mantenimiento	Mantenimiento preventivo: después de cada excavación Mantenimiento predictivo: después de cada excavación Mantenimiento correctivo: inmediatamente después de que alguna pieza lo exija
	d	Fácil acceso a partes internas	Tiempo de desarmado total <1.5 horas
	d	Tiempo corto de limpieza	Tiempo de limpieza <1 hora
	d	Fácil reemplazo de piezas.	Componentes reemplazables Evitar soldaduras en piezas no estructurales, para permitir el acceso Capacitación de personal para el uso Emplear herramientas comerciales para ensamble como raches, llaves hexágonas, destornilladores

### 4.3.6. Costos

Es importante considerar que los costos pueden ser altamente modificados por las piezas que no estén disponibles en el país, ya que implican procesos de importación, afectando así los tiempos de entrega y las reparaciones; se presenta en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Costos

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Costos	D	Debe ser de bajo costo.	Precio de la producción más 20 % - 25 %
	d	Repuestos fáciles de conseguir	Precio de artefacto de excavación inferior a 200 millones de pesos Piezas maquinables en Medellín El <50 % de piezas deben ser comerciales Materiales de producción comerciales en Medellín

### 4.3.7. Tamaño

Se presentan en la Tabla 4.6 las especificaciones en cuanto al tamaño del artefacto.

Tabla 4.6: Tamaño

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Tamaño	D	Debe permitir la inserción de una tubería de 10"	Ancho del la máquina inferior a 50 <i>cm</i> Altura de la máquina dependiente método de excavación Altura mínima de excavación: 45 - 60 <i>cm</i>
	d	Artefacto corto.	Máximo 2 metros de largo del artefacto de excavación

### 4.3.8. Peso

En cuanto al peso de la máquina, se exponen sus requisitos en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Peso

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Peso	d	Debe ser liviano	Peso de la máquina completa <1000 <i>kg</i>
			Peso de cada subensamble <250 <i>kg</i>
	D	Bajo peso del sistema completo	Peso del sistema completo <2.5 <i>ton</i>

### 4.3.9. Transporte

En la Tabla 4.8 se determinan las condiciones respecto al método de entrega del cliente y las especificaciones relacionadas.

Tabla 4.8: Transporte

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Transporte	d	Tiempo de entrega corto	Transportable por tierra empleando un camión de 2.5 <i>ton</i> . Garantizar el tiempo de entrega inferiores a 2 días hábiles si el producto está ensamblado
	D	Debe ser de fácil transporte	Piezas de amarre al medio de transporte Piezas de amarre para su elevación y descenso.

### 4.3.10. Empaque

El empaque posee también requerimientos y se exponen en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Empaque

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Empaque	D	Empaque de accesorios debe ser resistentes	Contener espumas para controladores
	d	Empaques livianos de controlador	Materiales con densidades inferiores a $2 \text{ g/cm}^3$
	d	Proteger partes superficiales de la máquina	Papeles plásticos que eviten suciedades durante almacenamiento y transporte
	d	Empaques desechables	Empaques con menos del 50% de materiales no reciclables

### 4.3.11. Manufactura

Con la idea de presentar una producción corta y sencilla, se presentan en la Tabla 4.10 los requerimientos.

Tabla 4.10: Manufactura

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Manufactura	D	Manufactura sencilla	Emplear moldes para piezas iguales Implementar láminas en la estructura Implementar procesos de producción relativos a láminas Procesos de manufactura posibles en Medellín Evitar piezas de más de 3 horas máquina

### 4.3.12. Apariencia y Acabado

En la Tabla 4.11 se presentan las especificaciones a seguir para los acabados y apariencia.

Tabla 4.11: Apariencia y Acabado

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Acabado	D	Tener acabados funcionales	Emplear redondeos con $r < 20 \text{ mm}$ Emplear chaflanes Texturas sin relieve para evitar acumulación de polvo Piezas estructurales para posibilitar el transporte y movimiento
	d	Emplear colores llamativos	Blanco, amarillo, anaranjado, verde, azul Amarillo
	d	Evitar ángulos agudos	Vértices mínimos de $45^\circ$
	d	Aspecto Tecnológico	Uso de materiales metálicos Formas geométricas y estructurales

### 4.3.13. Vida Útil

En la Tabla 4.12 se exponen los requerimientos sobre la vida útil de la máquina.

Tabla 4.12: Vida Útil

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Vida Útil	d	Vida media en el mercado	Adaptación a cambios de piezas con mejores características Al rededor de 24 meses de vida

#### 4.3.14. Materiales

En este elemento, presentado en la Tabla 4.13, se consideran todos los requerimientos impuestos por los demás elementos.

Tabla 4.13: Materiales

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Materiales	d	Materiales metálicos para piezas estructurales	Aceros Duraluminio
	d	Materiales fáciles de trabajar para acabados y accesorios	Aluminios Polímeros Aceros

#### 4.3.15. Ergonomía

Los requerimientos en cuanto a la relación hombre-máquina se consideran en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Ergonomía

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Ergonomía	d	Debe ser ergonómico	Piezas de contacto con medidas antropométricas Implementar piezas de control comerciales Fuerza máxima de operario en el controlador: 0.5 <i>N</i>
	d	Accesorios cómodos	Implementar accesorios comerciales Formas redondeadas (ver Tabla 4.11)

### 4.3.16. Cliente

La Tabla 4.15 expone los requerimientos específicos del cliente.

Tabla 4.15: Cliente

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Cliente	D	Fácil de operar	Procedimientos automatizados Controladores simples Guía de uso Interfaz de control sencilla con imágenes

### 4.3.17. Calidad y Confiabilidad

Los requerimientos de calidad y confiabilidad se especifican en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16: Calidad y Confiabilidad

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Calidad	D	Sistema de operación confiable	Sistema retroalimentado con sensores Indicar posibles fallas Indicar próximo mantenimiento por horas de trabajo
	D	Materiales confiables	Uso de materiales certificados (ver Tabla 4.13)
	D	Accesorios de calidad	Implementar accesorios con certificados

### 4.3.18. Almacenamiento

La Tabla 4.17 expone los requerimientos en cuanto al almacenamiento del artefacto.

Tabla 4.17: Almacenamiento

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Almacenamiento	d	Debe soportar buen tiempo de almacenamiento	Tiempo de almacenamiento <6 meses
	D	Resistente a la falta de uso	Rodamientos sellados Engranajes aislados del entorno Evitar fugas de líquidos Evitar alineaciones exactas aumentando tolerancias de ensambles a $\pm 5 \text{ mm}$

### 4.3.19. Procesos

Los procesos tanto de ensamble como de manufactura son presentados en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18: Procesos

	D/d	Especificaciones	Requerimiento Técnico
Procesos	D	Procesos simples de ensamble	Guía de ensamble Conectores únicos Diagrama de conexiones
	d	Procesos de manufactura simples	Más del 70% de las piezas con máquinas como fresadora, torno, taladro, dobladora, corte láser

### 4.3.20. Escala Temporal

Los requerimientos debido a la escala temporal se presentan en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19: Escala Temporal

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Tiempo	d	Tiempo corto para realización del proyecto.	1 año y medio hasta prototipo
			4 años hasta producto

### 4.3.21. Pruebas

Las pruebas a realizarse con e prototipo de plantean en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20: Pruebas

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Pruebas	D	Comprobar su funcionamiento después de producción	Realizar pruebas de excavación
			Realizar pruebas de remoción de escombros
			Realizar pruebas de ubicación de soportes
			Realizar pruebas de desplazamiento
			Realizar pruebas de controladores
			Realizar pruebas de retroalimentación

### 4.3.22. Seguridad

Resaltando la seguridad, se presentan sus requerimientos para la máquina en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21: Seguridad

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Seguridad	D	El artefacto debe ser seguro	Evitar puntas agudas Evitar cables expuestos Evitar explosiones Funcionamiento alejado de operarios Adicionar avisos de peligros y advertencia
	D	Indicar modo de operación.	Guía de uso de artefacto Guía de uso de sistema de control

### 4.3.23. Limitantes del Mercado

Con el fin de obtener una retroalimentación del mercado, se plantean las necesidades en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22: Limitantes del Mercado

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Mercado	D	Retroalimentación del mercado	Consultas a operarios Consultas a compradores
	d	Alta aplicabilidad de la máquina	Implementar elementos de alta tecnología Posibilidad de variar las condiciones de excavación

#### 4.3.24. Patentes y Datos del Producto

Como se indicó en el capítulo *Estado del Arte*, ésta es una tecnología que ha estado en desarrollo desde lo 70's y por consiguiente se han logrado grandes avances en cuanto al uso de dispositivos tecnológicos tales como controladores, elementos de corte y materiales de soporte. Es posible encontrar patentes recientes de productos excavadores sin embargo es importante considerar que ya muchas se han vencido y por consiguiente no hay riesgo de infringir alguna.

Con esta máquina en proceso de diseño se plantea la posible generación de una patente debido a la novedad en la implementación de los soportes.

#### 4.3.25. Aspecto Social y Político

El aspecto social es un punto fundamental y presenta requerimientos, los cuales son presentados en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23: Aspecto Social y Político

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Socio-político	d	Debe aportar a la sociedad	Evitar realización de zanjas Evitar altos ruidos de funcionamiento
	d	Generar políticas de mejora tecnológica	Implementar métodos tecnológicos

### 4.3.26. Instalación

La instalación es un procedimiento que implica requerimientos; éstos se presentan en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24: Instalación

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Instalación	D	Debe ser fácil de instalar	Implementar herramientas de ascenso y descenso en el pozo como cargadores, puentes grúa, poleas, etc. Conexiones eléctricas simples Dimensiones del pozo (mínimo 3 x 3 metros) Acoples diseñados para herramientas de instalación

### 4.3.27. Documentación

En la Tabla 4.25 se presentan los documentos que deben acompañar la máquina.

Tabla 4.25: Documentación

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
Documentación	D	Debe ser fácil de usar	Incluir guía de uso de artefacto Incluir guía de uso de controladores Incluir guía de mantenimiento y prevención Ficha técnica

### 4.3.28. Disposición - Desechos

La Tabla 4.26 presenta las especificaciones de disposición y desechos.

Tabla 4.26: Disposición - Desechos

	D/d	Especificaciones del Cliente	Requerimiento Técnico
<b>Disposición</b>	D	Reducir contaminación del empaque	<p>Materiales re-utilizables</p> <p>Empaques a la medida + 10%</p> <p>Producción de empaque empleando la menor cantidad de energía y recursos</p>
	d	Reducir contaminación de la máquina	<p>Disminución de ruidos de funcionamiento manteniendo un límite máximo de 10dB</p> <p>Implementar materiales re-utilizables como el cartón</p>

## 4.4. Síntesis Funcional

Una vez están definidos los requerimientos del sistema, es posible identificar las funciones principales de la máquina por medio de un diagrama de la función principal. En este caso se utilizará la palabra *tunelar*<sup>4</sup> para dar cuenta de la acción de realizar un túnel. Inicialmente se presenta la Figura 4.1, en la cual se especifica la función global de la máquina.

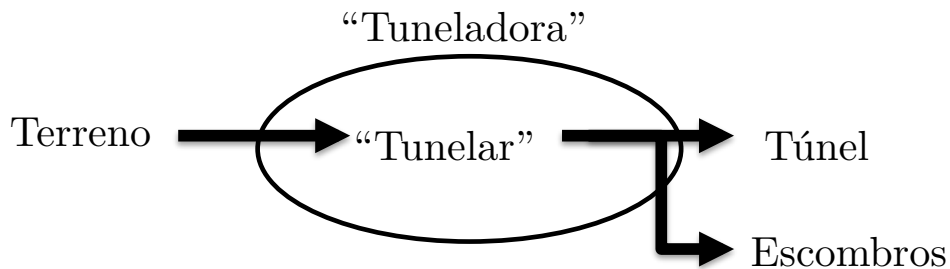


Figura 4.1: Modelo funcional

A partir de la figura anterior y de los requerimientos establecidos en el *PDS*, se pueden seleccionar las funciones principales que dan cuenta de los subsistemas del artefacto en cuestión. En la Figura 4.2 se presentan las tres acciones que dan cuenta del propósito general de la máquina: excavar, apuntalar y remover escombros.

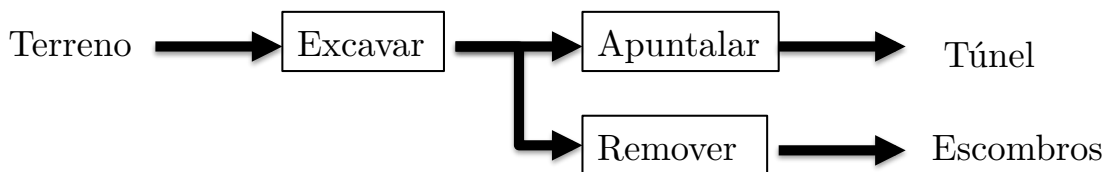


Figura 4.2: Modelo Funcional en verbos

Ahora con el fin de especificar las entradas y salidas de la máquina, se emplean una serie de conectores presentados en la Figura 4.3, los cuales indican los flujos de energía, materia e información tanto adentro como fuera del artefacto.

<sup>4</sup>Dicha palabra no aparece en la Real Academia de la Lengua Española, pero será usada a lo largo del texto para expresar la acción de realizar una perforación y colocar sus soportes internos




Elemento	Conector
Energía	
Materia	
Información	

Figura 4.3: Convenciones: Flujos genéricos

Con el uso de conectores especializados y los conceptos de la Figura 4.1 se posibilita ser mucho más preciso en cuanto a las entradas y salidas del sistema, identificándolas según cada uno de los posibles elementos. En la Figura 4.4<sup>5</sup> se presenta además, la relación entre la máquina y el medio, de tal manera que se pueda llevar a cabo la función de la máquina: realizar un túnel [46]. Es fundamental resaltar la transformación existente en la utilidad por medio del artefacto; además es clara la necesidad de ambas partes para poderse llevar a cabo la función.

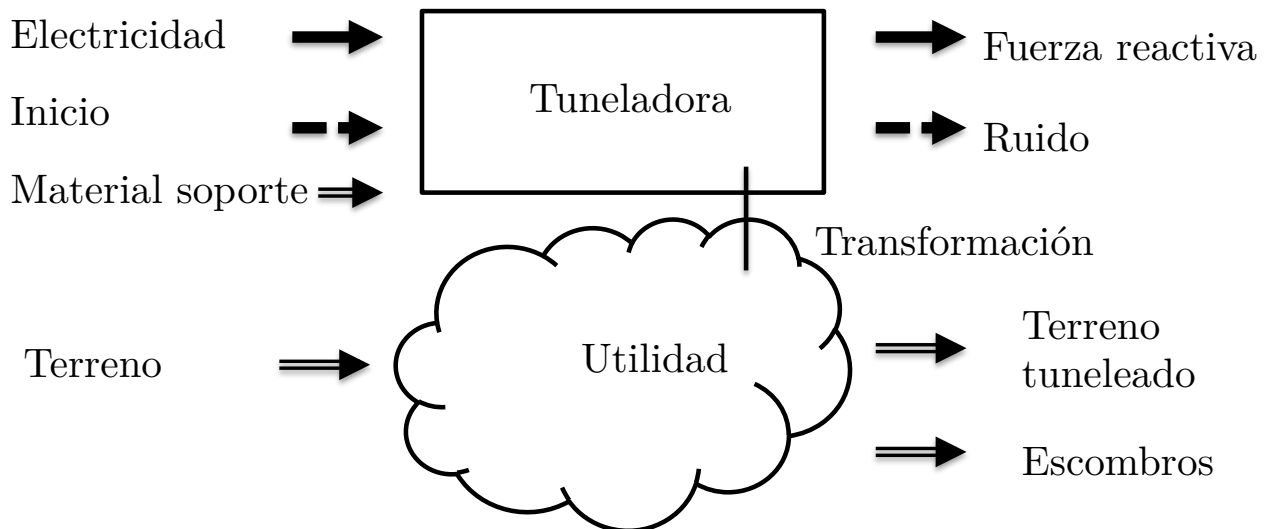


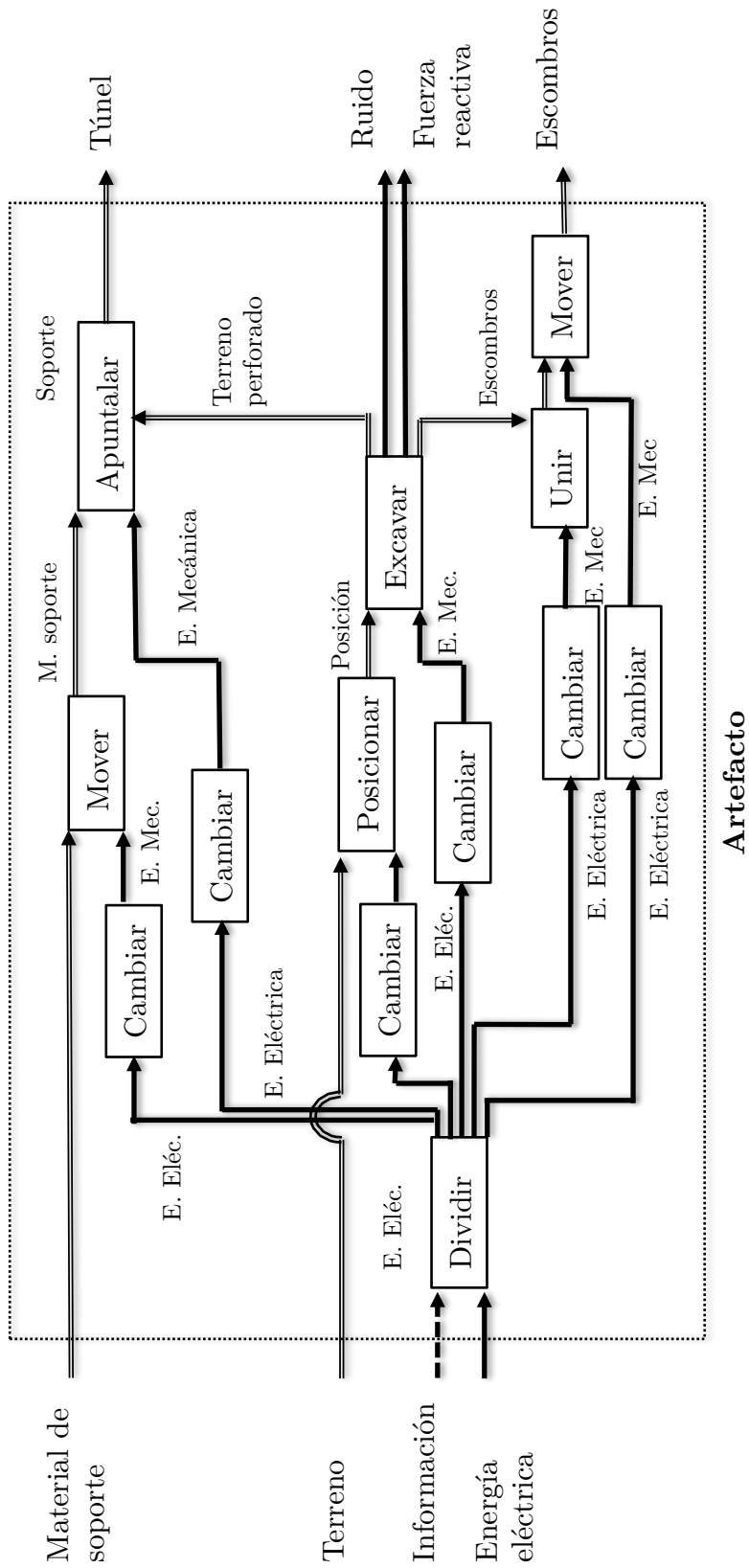
Figura 4.4: Modelo Funcional relativo al objeto

<sup>5</sup>Este modelo de diagrama es tomado de *Artefactos: Diseño Conceptual*[46]

En la Figura 4.4 se encuentran las siguientes entradas: Electricidad, que provee la energía necesaria para el funcionamiento; Inicio, que hace referencia a la señal de control ingresada por el operador; material de soporte, el cual se define a partir del subsistema de apuntalado presentado más adelante; y el terreno, el cual en esta ocasión es el *objeto* al cual se le va a realizar una transformación.

Por otra parte las salidas son: Fuerza reactiva, ésta es una pérdida como causa del proceso de perforación; el ruido, que también es una pérdida energética en forma de ondas mecánicas; el terreno tuneleado, que hace referencia al terreno perforado con soportes internos instalados; y los escombros, que son material sobrante de la excavación.

Una vez definidas las entradas y salidas del sistema, se realizó un diagrama detallado en el cuál se presentan los procesos y funciones detalladas. En la Figura 4.5 se emplean las convenciones presentas en la Figura 4.3 para dar cuenta de los procedimientos, es llamada la *Estructura Funcional* de la máquina. En ésta se presentan 3 verbos que normalmente no se emplean en dichos diagramas, sin embargo se presetan con el fin de indicar las tres acciones principales: apuntalar, excavar y mover escombros; además es posible considerar el verbo *cambiar* como sinónimo de *transformar*, el cual es usado en la mayoría de casos; sucede lo mismo con el verbo *mover*, cuyo sinónimo se puede plantear como *conducir*. Un diagrama más general y estricto es presentado en la Figura 4.7.



49  
 Figura 4.5: Estructura Funcional

Estando establecidas las funciones parciales, se pueden representar por medio de cinco tipos genéricos de acciones [ref] en la figura 4.6 permitiendo así construir combinaciones de flujos y acciones genéricos. En la figura

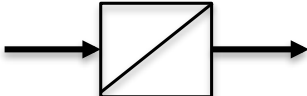
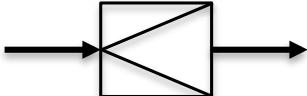





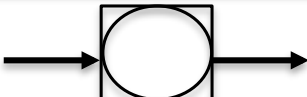
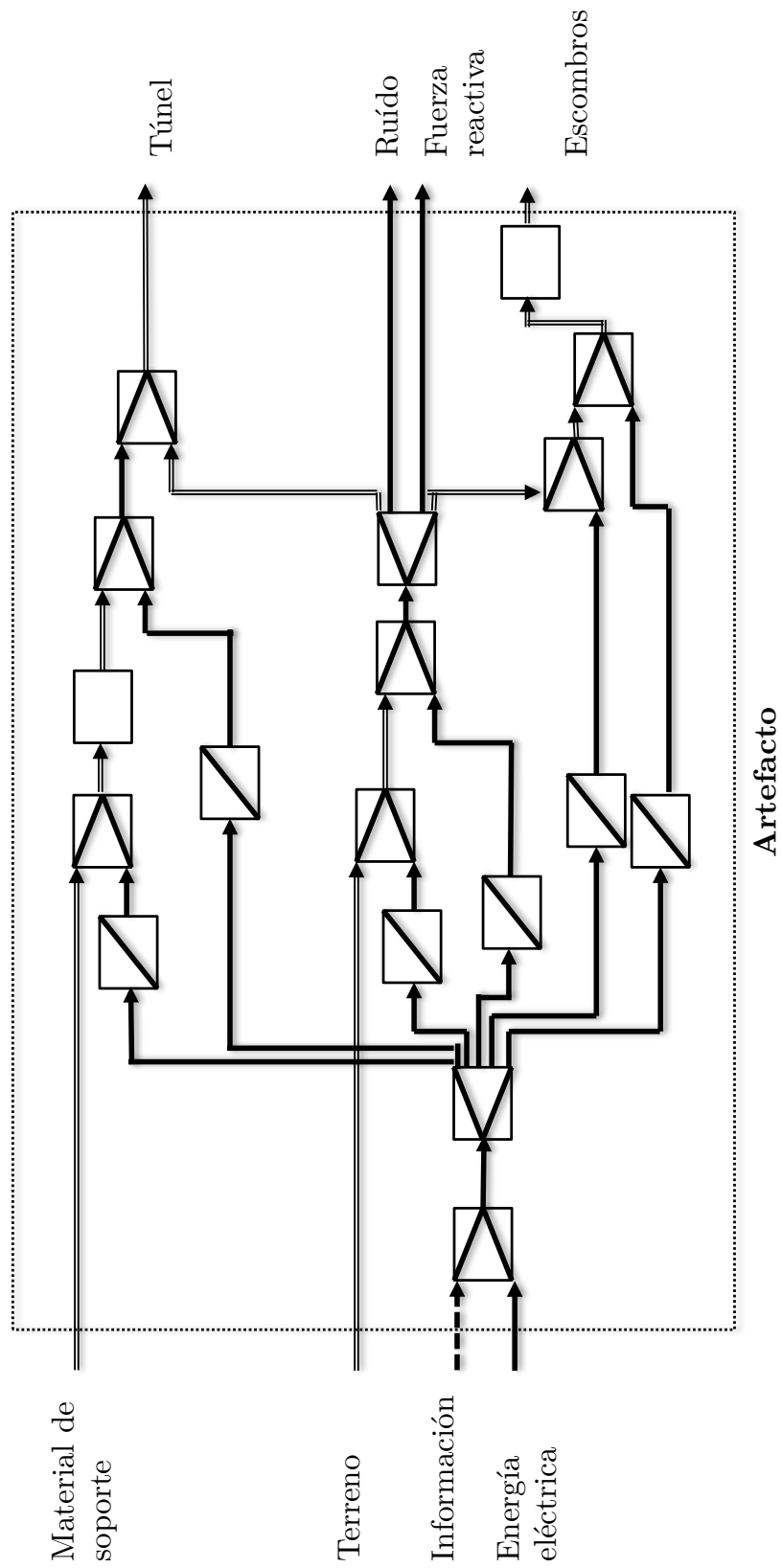
Forma	Verbo	Adjetivo
	Transformar	Tipo
	Variar	Magnitud
	Incrementar / reducir	
	Conectar	Número
	Dividir/ unir	
	Conducir	Lugar
	Continuar/ detener	
	Almacenar	Tiempo

Figura 4.6: Convenciones: Tipos de genéricos de acciones

Con estas convenciones, se puede formar un diagrama más abstracto de la funcionalidad de la máquina. En la figura 4.7 se presenta la *Estructura Funcional genérica* del artefacto a diseñar.



51  
 Figura 4.7: Estructura Funcional

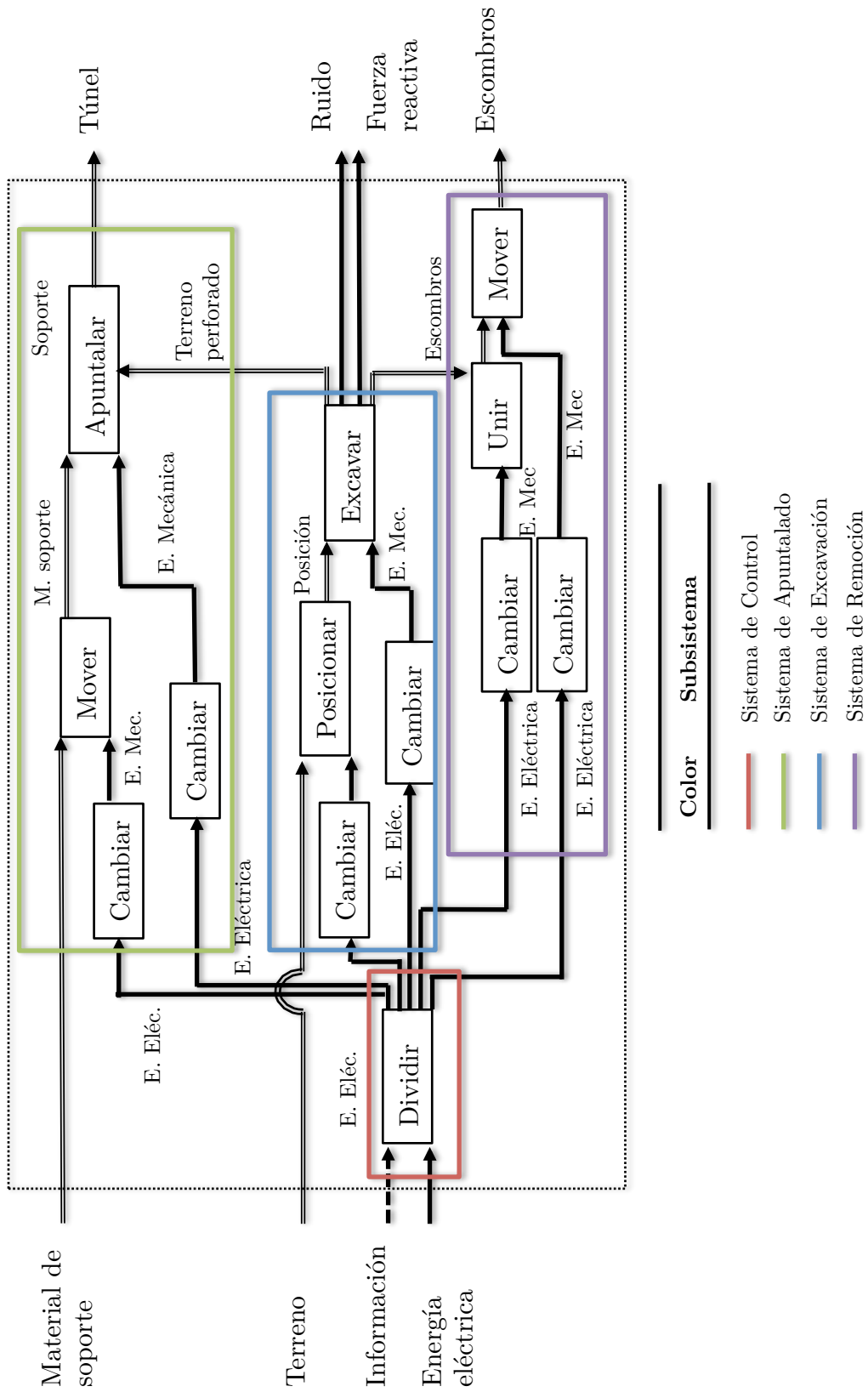


Figura 4.8: Estructura Funcional: subsistemas principales

## 4.5. Matriz Morfológica

Con el propósito de obtener la solución más adecuada para el sistema completo, es necesario identificar los principios funcionales que cumplen con el objetivo de cada portador de función<sup>6</sup>. A partir de la Figura 4.8, es posible identificar los cuatro subsistemas que componen esta máquina: sistema de control, de excavación, de apuntalado y de remoción de escombros. Es necesario considerar el sistema de control, ya que no hace parte de un diseño mecánico, se presentará más adelante como un capítulo completo debido a su complejidad y diferente desarrollo técnico.

Con el propósito de realizar una elección de rutas, se plantea el esquema presentado en la Figura tales, en el cual se observan los pasos de la metodología implementada. Es importante considerar que inicialmente se lleva a cabo un análisis para cada subsistema, desarrollando una matriz morfológica para cada uno y seleccionando las mejores rutas de éstos (paso 1). Más adelante se realiza una matriz de eliminación de rutas entre los subsistemas de colocación de soportes y remoción de escombros, obteniendo así un menor número de rutas posibles (paso 2). El siguiente paso es realizar una combinatoria con las rutas escogidas del subsistema de excavación, eliminando las no compatibles (paso 3). Éste último paso genera una serie de rutas finales que son evaluadas (paso 4) según diversos criterios empleando una matriz de evaluación de rutas implementada en el libro *Engineering Design: A Systematic Approach*[44].

Para comprender la metodología de elección de rutas, es necesario considerar un sistema matricial, de tal manera que se lee primero el número de la izquierda, es decir la fila, y después el número de la parte superior, la columna. Así se obtendrán número como 1,3 – 2,4, en la cual la primera fila hará pareja con la opción número 3, mientras que la segunda fila hará pareja con la opción número 4.

---

<sup>6</sup>Es cada uno de los recuadros encontrados al interior del Diagrama Funcional

# Proceso de Eliminación de Rutas

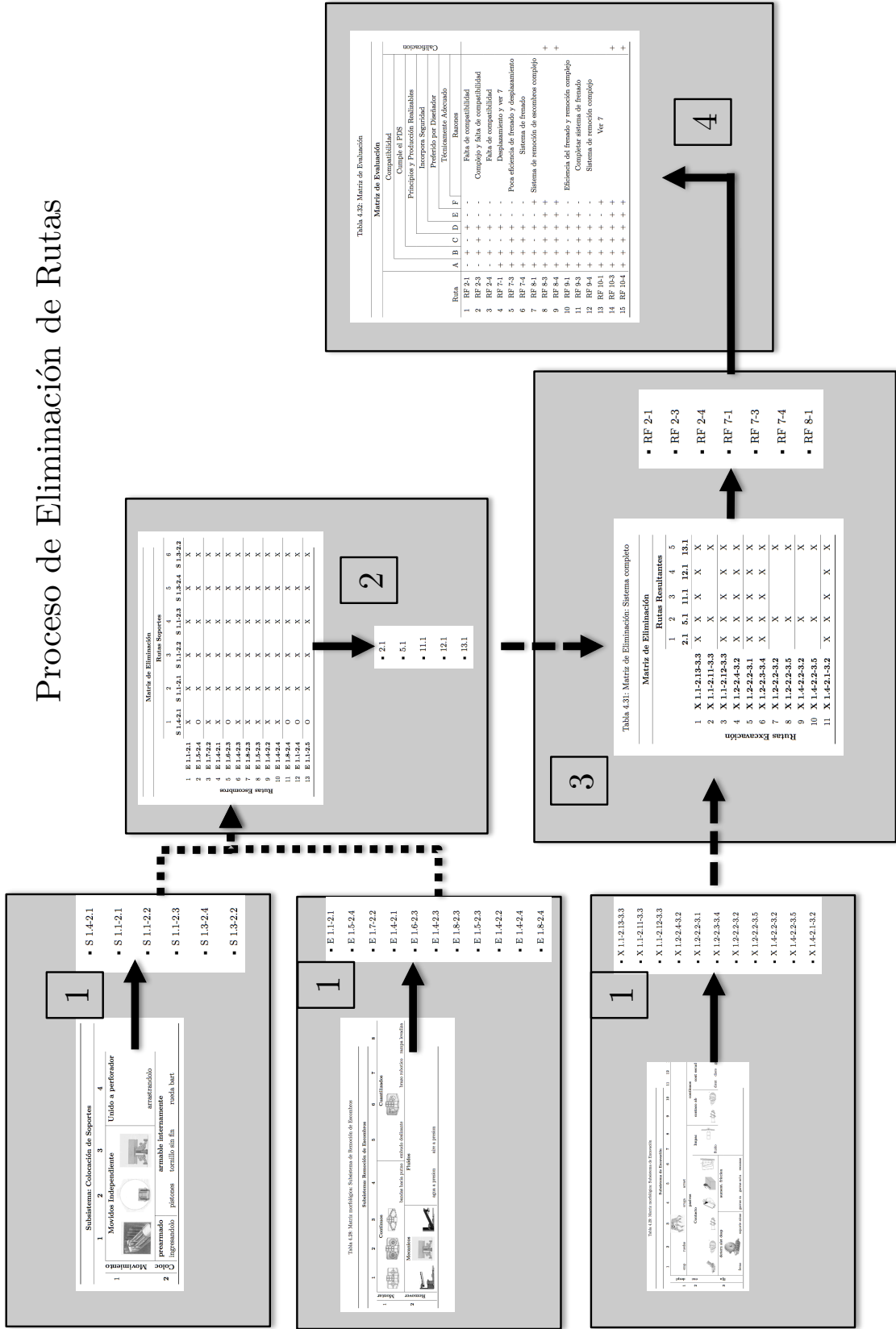


Figura 4.9: Proceso de Eliminación de Rutas

### 4.5.1. Subsistema de Apuntalado

La función principal de este subsistema es ubicar la estructura interna que da soporte al túnel utilizando como entradas el material de soporte, el terreno previamente perforado y energía eléctrica de tal forma que permita llevar a cabo la operación. En la Figura 4.10 es posible observar el planteamiento esquemático.

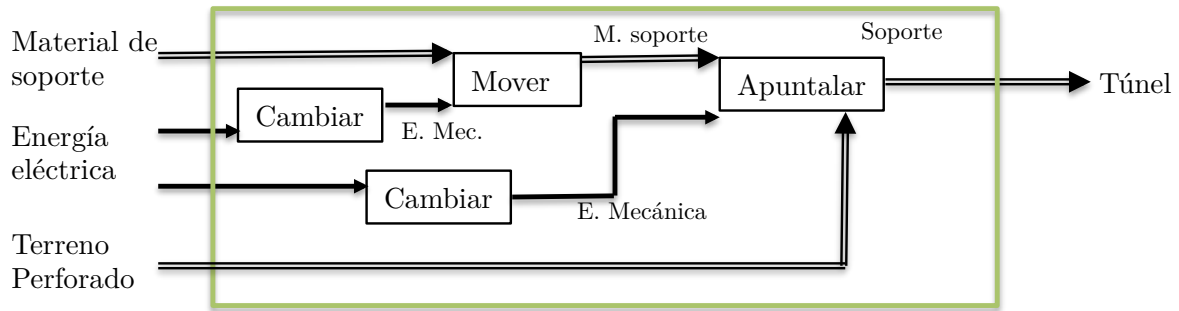


Figura 4.10: Subsistema 2: Apuntalar

A partir de los portadores de función encontrados en la Figura 4.10 se realiza una matriz morfológica presentada en la Tabla 4.27<sup>7</sup>, planteando así los principios funcionales que dan solución a éstos. Se consideran dos funciones: el desplazamiento de los soportes a lo largo del túnel y su colocación.

#### Explicación de Posibilidades

A continuación se explican cada uno de los principios de la Tabla 4.27.

- **1.1:** Un mecanismo hidráulico en el pozo de inicio del túnel. Este empuja una estructura armada a lo largo del túnel. Además empuja el mecanismo de excavación.
- **1.2;** Se ingresan los soportes por medio de un vagón en un riel magnético. Este afectaría el sistema de remoción de escombros.
- **1.3:** Se ingresan por medio de un carro que se moviliza sobre ruedas especiales para la cavidad. Afectaría también el sistema de remoción de escombros.

<sup>7</sup>Algunas imágenes tomadas de López Jimeno et. al [14]

Tabla 4.27: Matriz morfológica: Subsistema de apuntalado

		Subsistema: Colocación de Soportes			
		1	2	3	4
1	Movimiento	Movidos Independiente			Unido a perforador
					
2	Colocación	Prearmado	Armable internamente		
					

- **1.4:** En esta se considera un soporte previamente armado, el cual es arrastrado a lo largo del túnel por la máquina de excavación.
- **2,1:** En este se considera que ya el soporte ingresa armado.
- **2.2:** Una vez adentro, se ubican los soportes por medio de pistones hidráulicos o neumáticos.
- **2.3:** Se posicionan los soportes por medio de un mecanismo de motores lineales.
- **2.4:** Por medio de un motor se hace girar un eje que expande el soporte.

### Rutas Escogidas

Las rutas escogidas como posibles soluciones del subsistema de colocación son presentadas a continuación. La **S** significa que pertenece al subsistema Soportes.

- S 1.4-2.1
- S 1.1-2.1
- S 1.1-2.2
- S 1.1-2.3

- S 1.3-2.4
- S 1.3-2.2

#### 4.5.2. Subsistema de Remoción de escombros

En el subsistema de remoción de escombros es necesario considerar, a partir de la Figura 4.11, que existen dos funciones primordiales: recoger los escombros y transportarlos hasta el inicio del túnel.

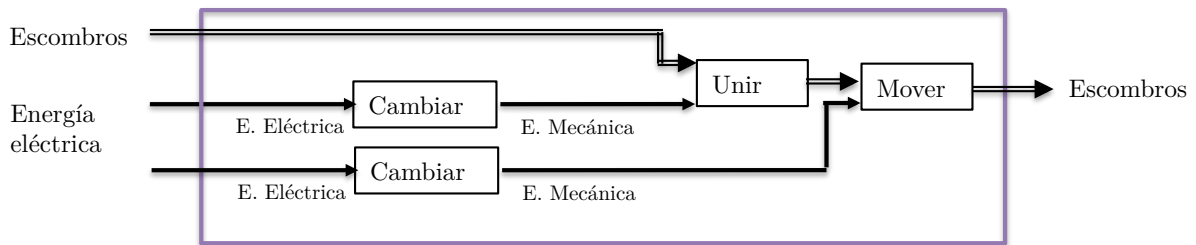


Figura 4.11: Subsistema 4: Remoción de escombros

#### Explicación de Posibilidades

A continuación se explican cada uno de los principios de la Tabla 4.28<sup>8</sup>.

- **1.1:** Son brazos giratorios que llevan los escombros al centro.
- **1.2;** Son discos giratorios inclinados que llevan los escombros hacia el medio.
- **1.3:** Por medio de una banda con paletas, se empujan hacia el centro.
- **1.4:** Una configuración de varias bandas que montan los escombros y los llevan a un punto.
- **1.5:** Una lámina pasa por encima de los escombros y baja al suelo; después los arrastra hasta un punto determinado.
- **1.6:** Son brazos articulados que se alternan para traer los escombros al centro.

<sup>8</sup>Algunas imágenes tomadas de López Jimeno et. al [14]

- **1.7:** Un brazo robótico cogería una cantidad determinada de escombros y los posicionaría en otra parte.
- **1.8:** El lugar donde caen los escombros gira sobre un pivote, haciendo deslizar los escombros a un embudo.
- **2,1:** Una banda transportadora.
- **2.2:** De la mano con el transporte de soportes, se considera un carro.
- **2.3:** Se emplea una serie de tornillos sinfin.
- **2.4:** Se utilizan dos tubos, uno de ingreso (con agua) y otro de salida (con escombros y agua). Este implicaría una bomba externa y un filtrado.
- **2.5:** Por un flujo de aire comprimido, retirar los escombros utilizando tubos. Conllevaría un compresor.

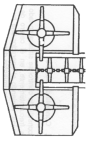

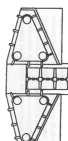
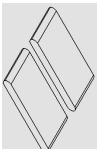
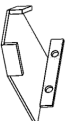
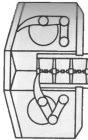
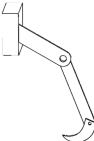
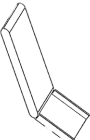
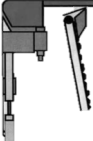
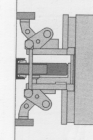
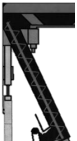


### **Rutas Escogidas**

Las soluciones escogidas para el subsistema de Remoción de Escombros se presentan a continuación. La **E** significa que pertenece al subsistema de Remoción de Escombros.

- E 1.1-2.1
- E 1.5-2.4
- E 1.7-2.2
- E 1.4-2.1
- E 1.6-2.3
- E 1.4-2.3
- E 1.8-2.3
- E 1.5-2.3
- E 1.4-2.2
- E 1.4-2.4

- E 1.8-2.4
- E 1.1-2.4
- E 1.1-2.5

Tabla 4.28: Matriz morfológica: Subsistema de Remoción de Escombros

		Subsistema: Remoción de Escombros							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Montar	Continuos				Cuantizados			
									
2	Remover	Mecanicos			Fluidos				
									

### 4.5.3. Subsistema de Excavación

En el subsistema de Excavación se considera el desplazamiento horizontal del artefacto ya que es fundamental desplazarse hasta el frente de operación y mantenerse estable en esa ubicación para proveer soporte a la herramienta de corte. En la Figura 4.12 se pueden identificar las funciones principales: posicionarse y excavar.

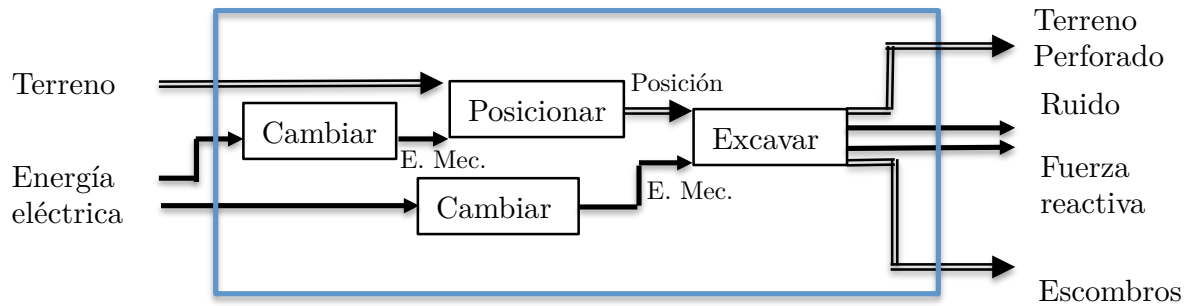





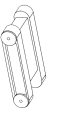
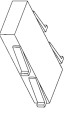




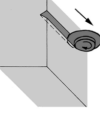
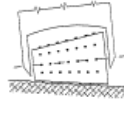
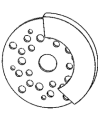









Figura 4.12: Subsistema 3: Excavar

Ahora se presenta la matriz morfológica, por medio de la cual se muestran cada uno de los posibles principios de solución que pueden satisfacer las necesidades de las 2 funciones establecidas para este subsistema.

Para la elaboración de esta matriz, se consideraron opciones de métodos termodinámicos como las explosiones e implosiones; sin embargo ambas se eliminaron desde el principio ya que podría generar alteraciones no controladas del frente de excavación, además requerirían de un mecanismo extra de perforación para poder ubicar las cargas internamente. Se consideraron también métodos varios como corte por láser o por elementos ultrasonido para destruir secciones pero debido a la falta de conocimiento en el tema y a la poca practicidad se eliminaron desde un principio.

En la Tabla 4.29 se presentan los posibles métodos de solución. Para comprender dicha tabla, es necesario tener en cuenta que existen métodos pasivos, en donde la máquina se posiciona en un lugar y realiza la excavación; y métodos continuos, donde la excavación se realiza mientras el artefacto se desplaza hacia el frente de operación.

Tabla 4.29: Matriz morfológica: Subsistema de Excavación

		Subsistema de Excavación													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	despl														
2	exc	Contacto pasivos													
3	fija							Impac						continuos	
					aument. friccion										
		determ sist desp													

## Explicación de Posibilidades

A continuación se explican cada uno de los principios de la Tabla 4.29.

- **1.1:** El artefacto de excavación es empujado desde el inicio del túnel.
- **1.2:** Se emplean una serie de ruedas.
- **1.3:** Se plantea el uso de patas para el desplazamiento sobre el terreno.
- **1.4:** Uso de orugas.
- **1.5:** Se plantea el uso de garras para arrastrar el artefacto.
- **2,1:** Una banda con inserciones de elementos de corte.
- **2.2:** Un rodillo horizontal con inserciones.
- **2.3:** Un taladro del diámetro completo de la perforación.
- **2.4:** Una garra para raspar el frente de operación.
- **2.5:** Un disco de corte.
- **2.6:** Una rueda dentada con eje de rotación vertical.
- **2.7:** Emplear un fluido para realizar cortes.
- **2.8:** Un impactador horizontal.
- **2.9:** Un taladro de corte. Este implicaría un desplazamiento continuo.
- **2.10:** Un rodillo de corte en un sistema de avance continuo.
- **2.11:** Escudo rotacional ubicado en la parte frontal, con dientes.
- **2.12:** Escudo rotacional con discos de corte.
- **2.13:** Escudo con garras en la parte frontal.
- **3.1:** Emplear frenos a las llantas.
- **3.2:** Emplear motores sin fin corona, aprovechando su bloqueo para frenar.

- **3.3:** Considerando un empuje desde el inicio del túnel, no habría necesidad de frenar.
- **3.4:** Clavar garras rotacionales por medio de motores.
- **3.5:** Apoyos verticales y horizontales por medio de actuadores lineales.
- **3.6:** La estructura tiene .<sup>es</sup>camas rígidas que sólo la dejan avanzar, mas no retroceder.

### **Rutas Escogidas**

Las rutas escogidas para el sistema completo de excavación se presentan en la siguiente lista. La **X** significa que pertenece al subsistema de Excavación. Es importante considerar que dependiendo del sistema de desplazamiento es posible restringir la tercer fila a una opción; tal es el caso de la opción 1.1, donde el sistema se desplaza por un empuje externo desde el inicio del túnel y por consiguiente el sistema de fijación va a ser el mismo es decir, el sistema de empuje, conllevando a la elección de 3.3.

- X 1.1-2.13-3.3
- X 1.1-2.11-3.3
- X 1.1-2.12-3.3
- X 1.2-2.4-3.2
- X 1.2-2.2-3.1
- X 1.2-2.3-3.4
- X 1.2-2.2-3.2
- X 1.2-2.2-3.5
- X 1.4-2.2-3.2
- X 1.4-2.2-3.5
- X 1.4-2.1-3.2

## 4.6. Matriz de Evaluación de Rutas

El sistema de elección de las rutas óptimas se hará de una manera especial, como ya se explicó en la Figura 4.9, ya que es necesario realizar una combinación de las rutas escogidas para el subsistema de Remoción de Escombros y el subsistema de Ubicación de Soportes, ya que sus soluciones pueden entrar en conflicto. Con tal motivo se presenta en la Tabla 4.30 una elección de rutas compatibles. Las casillas marcadas con **X** significan que son descartadas por posibles inconvenientes, mientras que aquellas casillas marcadas con  $\checkmark$ , significan opciones útiles.

Tabla 4.30: Matriz de Eliminación: Subsistema de apuntalado y de remoción de escombros

		Matriz de Eliminación						
		Rutas Soportes						
		1	2	3	4	5	6	
		S 1.4-2.1	S 1.1-2.1	S 1.1-2.2	S 1.1-2.3	S 1.3-2.4	S 1.3-2.2	
Rutas Escombros	1	<b>E 1.1-2.1</b>	X	X	X	X	X	X
	2	<b>E 1.5-2.4</b>	$\checkmark$	X	X	X	X	X
	3	<b>E 1.7-2.2</b>	X	X	X	X	X	X
	4	<b>E 1.4-2.1</b>	X	X	X	X	X	X
	5	<b>E 1.6-2.3</b>	$\checkmark$	X	X	X	X	X
	6	<b>E 1.4-2.3</b>	X	X	X	X	X	X
	7	<b>E 1.8-2.3</b>	X	X	X	X	X	X
	8	<b>E 1.5-2.3</b>	X	X	X	X	X	X
	9	<b>E 1.4-2.2</b>	X	X	X	X	X	X
	10	<b>E 1.4-2.4</b>	X	X	X	X	X	X
	11	<b>E 1.8-2.4</b>	$\checkmark$	X	X	X	X	X
	12	<b>E 1.1-2.4</b>	$\checkmark$	X	X	X	X	X
	13	<b>E 1.1-2.5</b>	$\checkmark$	X	X	X	X	X

### 4.6.1. Eliminación:Rutas Escombros y Rutas Soportes

Se elimina la fila 1 y la fila 4 porque no es posible tener una banda transportadora hasta el inicio del túnel.

Es necesario eliminar la fila 3 debido a que requiere la construcción de un brazo robótico exclusivamente para recoger los escombros y puede interferir con el mecanismo de excavación; si fuese el mismo brazo generaría demasiados retrasos.

Se eliminan las filas 3 y 9, y las columnas 5 y 6 debido a la utilización de un carro para llevar los escombros hasta el inicio del túnel y transportar los soportes. Dicho carro tendría que recorrer toda la distancia del túnel, y se podrían acumular demasiados escombros en el frente de operación, además generaría retrasos, ya que se necesita tiempo para ubicar los soportes.

Considerando las columnas 2, 3 y 4 es posible comprender la necesidad de emplear un sistema de actuación que empuje la estructura de soporte desde el inicio del túnel. Éste método es eliminado precisamente debido a la necesidad de instalar un artefacto extra en la entrada del túnel.

Como resultado de la matriz de eliminación de la Tabla 4.30, se presenta una serie de combinaciones posibles para dar solución a los dos subsistemas correspondientes: de remoción de escombros y de ubicación de soportes.

- 2.1
- 5.1
- 11.1
- 12.1
- 13.1

## 4.6.2. Eliminación de Rutas del Sistema Completo

Es fundamental recordar el diagrama de la Figura 4.9, donde se explican los pasos de eliminación de rutas. En paso, el número 3, se realiza una combinatoria de todas las opciones resultantes del paso número 2, con las rutas resultantes del subsistema de excavación; ésta se presenta en la Tabla 4.31.

Tabla 4.31: Matriz de Eliminación: Sistema completo

		<b>Matriz de Eliminación</b>					
		<b>Rutas Resultantes</b>					
		1	2	3	4	5	
<b>Rutas Excavación</b>		<b>2.1</b>	<b>5.1</b>	<b>11.1</b>	<b>12.1</b>	<b>13.1</b>	
	1	<b>X 1.1-2.13-3.3</b>	X	X	X	X	X
	2	<b>X 1.1-2.11-3.3</b>	√	X	√	√	X
	3	<b>X 1.1-2.12-3.3</b>	X	X	X	X	X
	4	<b>X 1.2-2.4-3.2</b>	X	X	X	X	X
	5	<b>X 1.2-2.2-3.1</b>	X	X	X	X	X
	6	<b>X 1.2-2.3-3.4</b>	X	X	X	X	X
	7	<b>X 1.2-2.2-3.2</b>	√	X	√	√	X
	8	<b>X 1.2-2.2-3.5</b>	√	X	√	√	X
	9	<b>X 1.4-2.2-3.2</b>	√	X	√	√	X
	10	<b>X 1.4-2.2-3.5</b>	√	X	√	√	X
11	<b>X 1.4-2.1-3.2</b>	X	X	X	X	X	

La fila 1 y la fila 4 se descartan debido a la implementación de una garra como sistema de excavación, ya que dicho método implicaría un aumento en 2 grados de libertad para poder realizar el barrido de excavación.

La fila 3 no es una opción a considerar en este modelo debido al tipo de suelo para el que convencionalmente está diseñado, para un maciso rocoso [4].

Se elimina la fila 6 debido a que la herramienta de corte es un taladro de tamaño completo, el cual tendría demasiado contacto con el frente de operación, implicando así un torque mucho mayor para su rotación ya que la fricción con el suelo y las rocas sería

considerable al aumentar el área.

La columna 5 se elimina debido al uso de un sistema neumático para impulsar los escombros, ya que sería mucho mejor cambiando el fluido a agua, y ésta es una opción.

La columna 2 resulta poco práctico ya que implicaría un tornillo sin fin desde el inicio del túnel hasta el frente de perforación de tal manera que se puedan extraer los escombros.

Se elimina la fila 5 debido al uso de frenos para detener el mecanismo de avance. Esto añadiría un sistema adicional en comparación con un bloqueo desde los motores directamente, el cual genera el mismo efecto.

Se elimina la fila 11 debido al uso de una banda excavadora. El gran problema de ésta es la cantidad de dientes que tiene asociados, los cuales aumentarían mucho el peso del brazo. Además no es fácil elaborar dicha banda con los elementos o dientes de corte.

### **Rutas Finales**

Después de realizar la eliminación por compatibilidad, se presentan las rutas finales del sistema completo. Para su identificación, es necesario tener en cuenta primero el valor de la fila y después el de la columna. **RF** hace referencia a *ruta final*.

- RF 2-1
- RF 2-3
- RF 2-4
- RF 7-1
- RF 7-3
- RF 7-4
- RF 8-1
- RF 8-3

- RF 8-4
- RF 9-1
- RF 9-3
- RF 9-4
- RF 10-1
- RF 10-3
- RF 10-4

Con el propósito de evaluar las soluciones obtenidas, se implementa en la Tabla 4.32 un formato de evaluación de rutas tomado de Pahl et al. 2007 [44]. En dicha tabla se consideran 6 aspectos evaluativos: compatibilidad, cumplimiento del PDS, su materialización, la seguridad, las preferencias del diseñador y su adecuación técnica. Para esta matriz es importante considerar que los signos + implican cumplimiento, mientras que los - implican que no satisface dicho elemento. Recordando el diagrama de la Figura 4.9, éste es el último paso, el número 4.

Tabla 4.32: Matriz de Evaluación

		Matriz de Evaluación						Calificación
		Compatibilidad						
		Cumple el PDS						
		Principios y Producción Realizables						
		Incorpora Seguridad						
		Preferido por Diseñador						
		Técnicamente Adecuado						
Ruta		A	B	C	D	E	F	Razones
1	RF 2-1	-	+	-	+	-	-	Falta de compatibilidad
2	RF 2-3	-	+	+	+	-	-	Complejo y falta de compatibilidad
3	RF 2-4	-	+	-	+	-	-	Falta de compatibilidad
4	RF 7-1	+	+	-	+	-	-	Desplazamiento y ver 7
5	RF 7-3	+	+	+	+	-	-	Poca eficiencia de frenado y desplazamiento
6	RF 7-4	+	+	+	+	-	-	Sistema de frenado
7	RF 8-1	+	+	-	+	-	+	Sistema de remoción de escombros complejo
8	RF 8-3	+	+	+	+	+	+	
9	RF 8-4	+	+	+	+	+	+	
10	RF 9-1	+	+	-	+	-	-	Eficiencia del frenado y remoción complejo
11	RF 9-3	+	+	+	+	+	-	Completar sistema de frenado
12	RF 9-4	+	+	+	+	-	-	Sistema de remoción complejo
13	RF 10-1	+	+	+	+	-	+	Ver 7
14	RF 10-3	+	+	+	+	+	+	
15	RF 10-4	+	+	+	+	+	+	

En la matriz de Evaluación final de la Tabla 4.32, es posible identificar una serie de elementos comunes que generaron calificaciones negativas:

- Falta de compatibilidad del sistema de posicionamiento de la estructura interna con el sistema de desplazamiento.
- El sistema de frenado por medio de motores sinfin-corona resulta poco útil como única solución ya que posibilitaría el deslizamiento del artefacto.
- El sistema de remoción de escombros que emplea el mecanismo: **E** 1.5-2.4 falla debido a la complejidad de este sistema, ya que implicaría diseñar un mecanismo que pasara por encima de los escombros y fuera hasta el piso, para más adelante empujarlos hasta el embudo.
- El sistema de desplazamiento que emplea ruedas (**X** 1.2-2.2-3.2 y **X** 1.2-2.2-3.5), no es eficiente ya que su contacto con la superficie es mucho que menor en comparación con el desplazamiento por oruga.

## 4.7. Propuesta Final

Como resultado de la matriz de evaluación de las rutas, se obtuvo un diseño relativamente parecido, sin embargo no se ha obtenido un modelo totalmente óptimo, ya que se encuentran falencias pequeñas en los diseños resultantes. A continuación se describen cada uno de éstos:

### 4.7.1. Propuestas Resultantes

En las propuestas resultantes se tiene un subsistema común, el de soporte interno del túnel (**S** 1.4-2.1). En éste se pretende ingresar el soporte estructural previamente armado, arrastrándolo por el mecanismo de excavación a lo largo de toda la cavidad.

#### **RF 8-3**

Está compuesto por:

**Remoción de escombros:** E 1.8-2.4, en el cual se tiene una rampa en la parte frontal del artefacto, en la cual se eleva su extremo de tal manera que los escombros que se encontraban encima, se deslicen hacia un punto determinado.

**Excavación:** X 1.2-2.2-3.5, en el cual es desplazamiento del artefacto se realiza por medio de ruedas comunes y con un sistema de freno por medio de actuadores, los cuales se ubican contra las paredes y/o suelo. Además, emplea como cabezal de corte un rodillo con inserciones.

Un punto débil de este diseño es el uso de ruedas, ya que por experiencia, se pueden generar inconvenientes con los tipos de terreno. Otro punto débil es el uso de la rampa, ya que se segmentaría la recolección de escombros y es posible que mientras la rampa este arriba, caigan escombros debajo que no serán recogidos.

#### **RF 8-4**

El mecanismo de excavación es el mismo que en RF 8-3, por consiguiente se tiene el mismo problema con el desplazamiento.

**Remoción de escombros:** Se utilizan unos brazos giratorios que llevan los escombros hacia el centro, donde son extraídos por medio de conductos de agua.

#### **RF 10-3**

Compuesto por el mismo mecanismo de remoción de escombros de RF 8-3. Conserva también el punto débil de la rampa de escombros.

**Excavación:** El mecanismo de excavación es X 1.4-2.2-3.5, en éste se emplean orugas para desplazar el artefacto de excavación; se utiliza un rodillo horizontal con inserciones; y su sistema de posicionamiento y frenado es por medio de actuadores lineales que se ubican en las paredes y/o suelo.

## RF 10-4

Este diseño está compuesto por el mecanismo de excavación presentado en RF 10-3 y por el mecanismo de remoción de escombros presentado en RF 8-4.

### 4.7.2. Propuesta Final

Para la propuesta final se emplea una combinación de dos rutas, en la cual se mezcla el sistema de frenado y posicionado del artefacto de excavación, ya que se emplean tanto actuadores lineales como motores sinfin corona, permitiendo así un sistema más óptimo. De esta manera, el diseño estaría determinado así:

**Subsistema de Ubicación de Soportes:** Se pretende emplear el *carro*<sup>9</sup> para arrastrar el la estructura de soporte a lo largo del terreno perforado, se muestra en la Figura 4.13; de esta manera no se necesitará realizar instalación alguna. Es importante resaltar que la estructura de soporte la deberá armar una persona en la parte inicial del túnel, mientras la máquina avanza en su perforación.

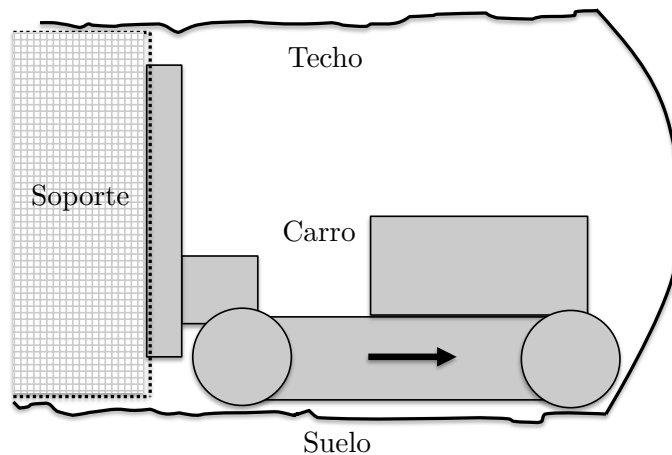


Figura 4.13: Vista lateral del Subsistema de Soporte

**Subsistema de Remoción de escombros:** Se empleará en la parte frontal del carro una lámina, sobre la cual se ubicarán dos rotadores los cuales empujan los escombros

<sup>9</sup>A partir de ahora se llamará carro al artefacto

hacia el centro, donde se empleará una banda transportadora para conducir los escombros hasta el inicio de los tubos de conducción de agua, los cuales llevarán los escombros hasta el inicio del túnel. Implica la utilización de una bomba y un sistema de filtrado de material particulado.

**Subsistema de Excavación:** Se empleará un brazo de 2 grados de libertad, cubriendo así el ancho y alto del túnel; se ve en las Figuras 4.14 y 4.15. Dicho brazo estará movido por 2 actuadores hidráulicos controlados, y tendrá como herramienta de corte un rodillo con inserciones de puntas de corte configuradas helicoidalmente, de tal manera que solo 2 puntas impacten a la vez al frente de operación, aprovechando mejor el torque de la máquina.

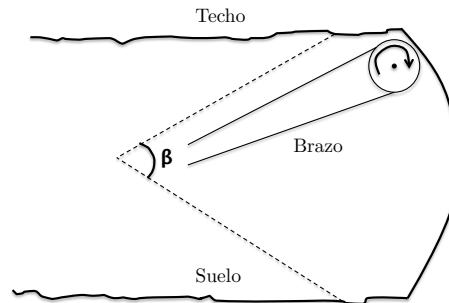


Figura 4.14: Vista lateral del Subsistema de Excavación

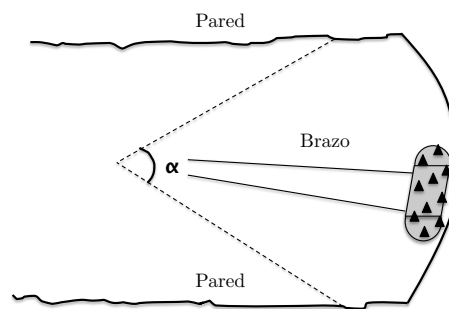


Figura 4.15: Vista superior del Subsistema de Excavación

En la Figura 4.16 se presenta una vista lateral del concepto final del artefacto.

En la Figura 4.17 se presenta un boceto del concepto resultante y en la Figura 4.18 se presenta un render del concepto final.

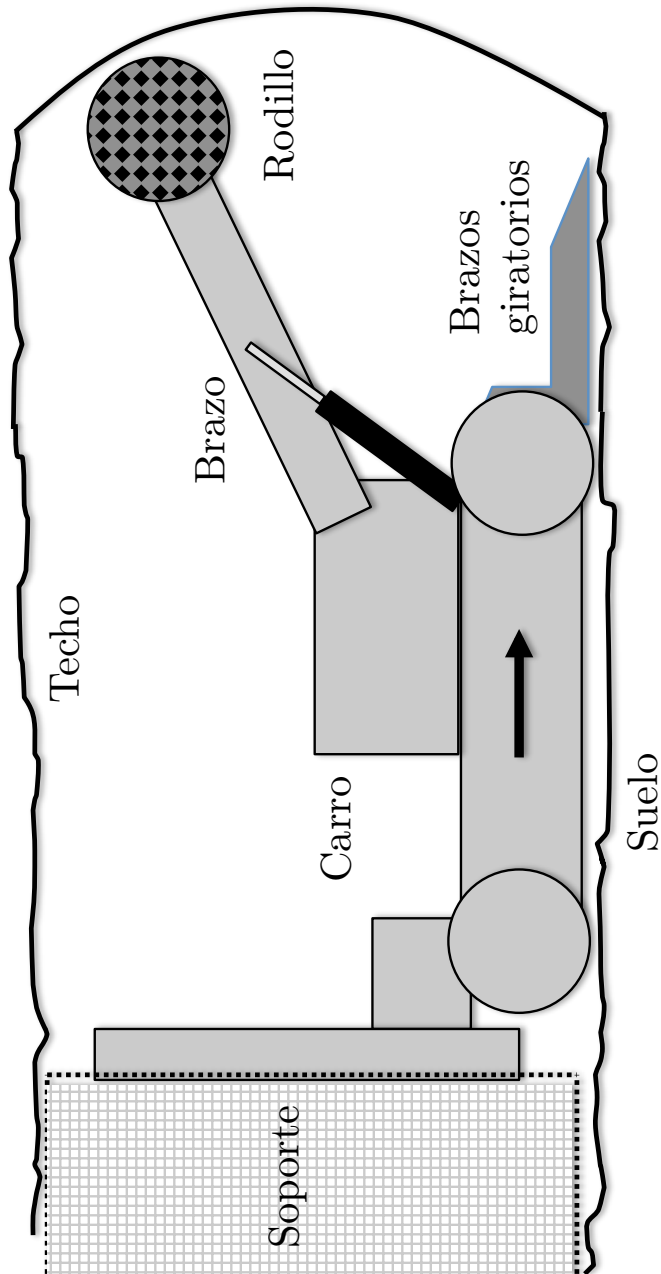


Figura 4.16: Vista lateral del sistema completo

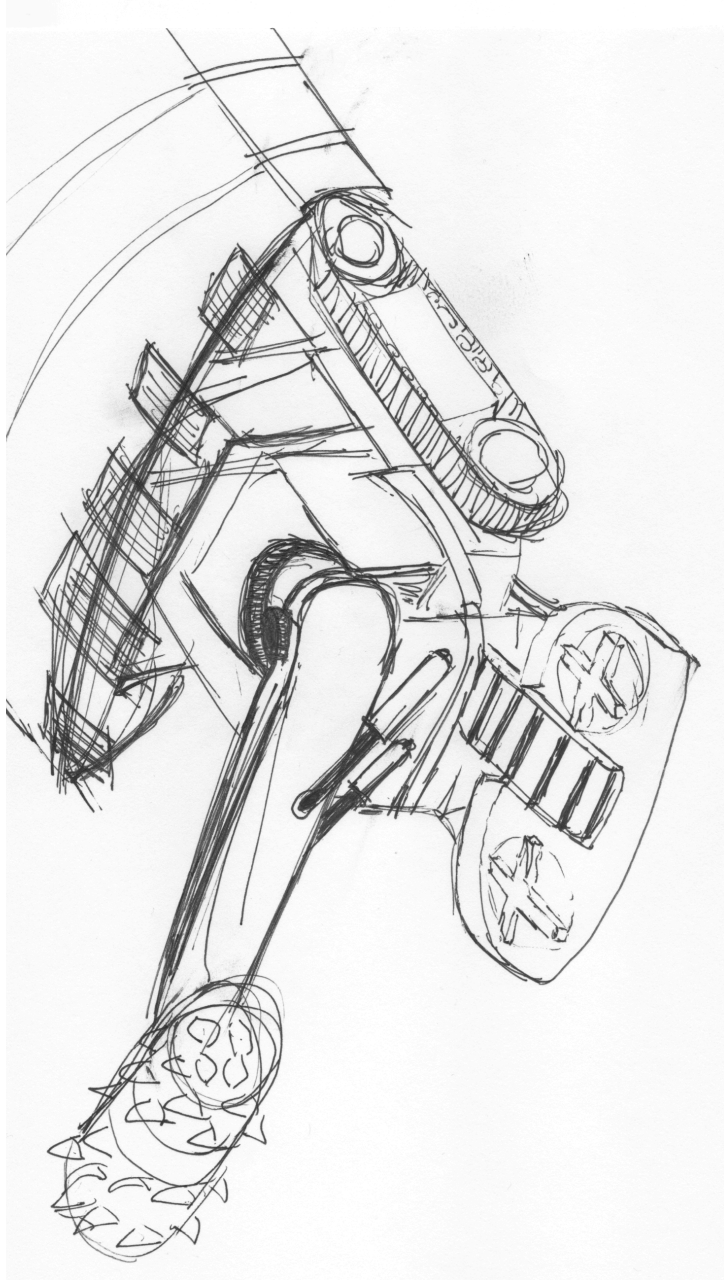


Figura 4.17: Boceto del Concepto



Figura 4.18: Render del Concepto



# Capítulo 5

## Modelo Matemático

### 5.1. Modelo Matemático

Este artefacto se rige por una serie de ecuaciones que dan cuenta del comportamiento de sus componentes. Se presenta el modelo de desplazamiento horizontal del carro, el modelo del movimiento tanto horizontal como vertical del brazo, el modelo de rotaciones del rodillo y la remoción de escombros. Además se presenta los análisis correspondientes para encontrar una longitud óptima del brazo de excavación, así como la posición del rodillo en función de los actuadores.

#### 5.1.1. Sistema de desplazamiento

La Figura 5.1 permite observar las fuerzas actuantes sobre el carro durante su movimiento. Así pues la mejor forma de escoger es sistema de coordenadas para el análisis es haciendo el eje  $x$  paralelo con la pendiente, de tal manera que la única fuerza por fuera de los ejes coordenados sea la generada por la aceleración de la gravedad.

Los parámetros a considerar son las siguientes:

- $m$  = masa del carro
- $r$  = radio de la llanta
- $g$  = aceleración de la gravedad
- $\alpha$  = ángulo de la pendiente

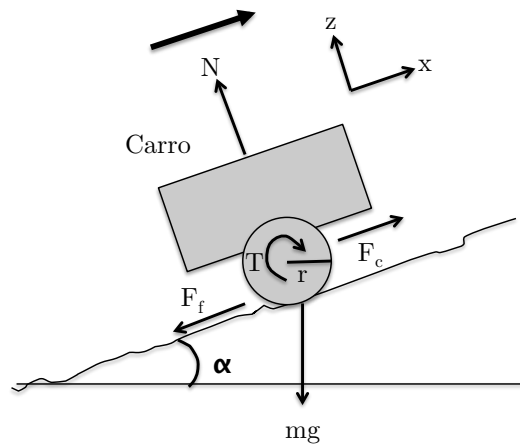


Figura 5.1: Diagrama del Carro

- $\beta$  = coeficiente de fricción dinámico
- $t$  = tiempo
- $V_o$  = velocidad inicial
- $V_f$  = velocidad final
- $a$  = aceleración del carro

El primer paso a realizar es ubicar las fuerzas en un diagrama de cuerpo libre, presentado en la Figura 5.2.

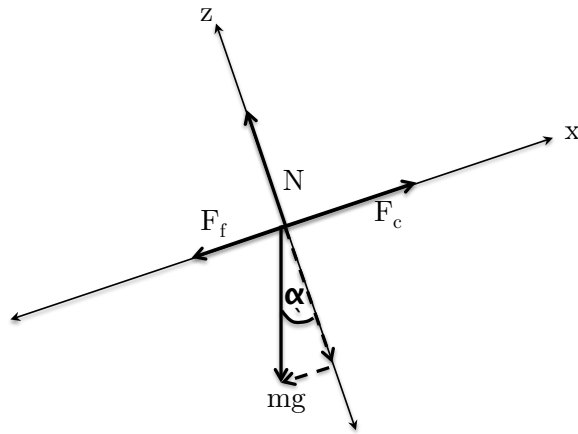


Figura 5.2: Diagrama de cuerpo libre

Después es necesario descomponer la fuerza debida a la gravedad de tal forma que se puedan obtener todas las fuerzas resultantes sobre los ejes coordenados. En la Figura 5.3 se observa el resultado.

Primero la componente  $mg_x$  y después las componente  $mg_y$ .

$$mg_x = \sin\left(\frac{1}{180} \alpha \pi\right) mg \quad (5.1)$$

$$mg_z = \cos\left(\frac{1}{180} \alpha \pi\right) mg \quad (5.2)$$

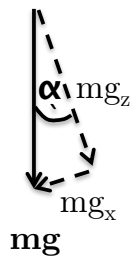


Figura 5.3: Descomposición en vectores sobre los ejes coordenados

Así pues el diagrama resultante esta ilustrado en la Figura 5.4

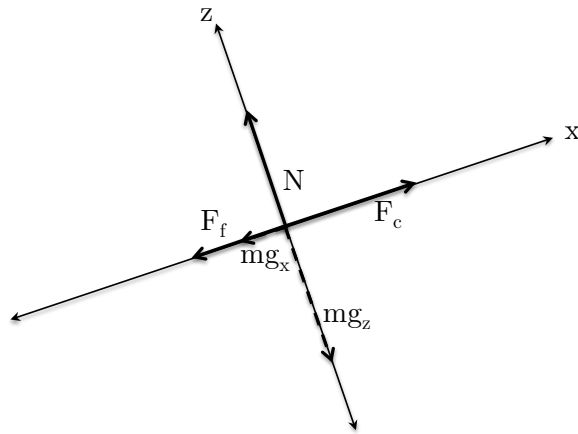


Figura 5.4: Fuerzas resultantes

Ahora procedemos a realizar la sumatoria de fuerzas en  $x$  y en  $y$ .

$$\sum F_z = ma_z \quad (5.3)$$

Pero no tenemos aceleración en el eje  $y$ , es decir que  $a_y = 0$  y nos queda:

$$\sum F_z = 0 \quad (5.4)$$

Y reemplazando las fuerzas en este eje:

$$\sum F_z = N - mg_z \quad (5.5)$$

Lo que implica  $N = mg_z$ , pero reemplazando lo que teníamos antes:

$$N = \cos\left(\frac{1}{180} \alpha \pi\right) mg \quad (5.6)$$

Ahora procedemos a realizar la sumatoria en el eje  $x$ .

$$\sum F_x = ma_x \quad (5.7)$$

En este caso la aceleración tiene un valor dado por un  $\Delta v$  entre la velocidad final  $Vx_f$  y la velocidad inicial  $Vx_o$  en un tiempo determinado, implicando un valor constante de aceleración.

$$a_x = \frac{Vx_f - Vx_o}{t} \quad (5.8)$$

Continuando con la sumatoria de fuerzas

$$\sum F_x = F_c - F_f - mg_x \quad (5.9)$$

Ahora igualamos las ecuaciones anteriores

$$F_c - F_f - mg_x = ma_x \quad (5.10)$$

y reemplazamos el valor de la aceleración

$$F_c - F_f - mg_x = \frac{m(Vx_f - Vx_o)}{t} \quad (5.11)$$

Ahora, despejamos  $F_c$  y reemplazamos el valor de  $mg_x$

$$F_c = \frac{m(Vx_f - Vx_o)}{t} + F_f + \sin\left(\frac{1}{180}\alpha\pi\right)mg \quad (5.12)$$

Sin embargo es necesario aún encontrar el valor de  $F_f$ , dado por:

$$F_f = \beta N \quad (5.13)$$

y reemplazando en valor previamente encontrar de  $N$

$$F_f = \beta \cos\left(\frac{1}{180}\alpha\pi\right)mg \quad (5.14)$$

Es importante recordar que ésta constante de fricción implica el coeficiente de fricción dado por el deslizamiento de la estructura a lo largo de túnel, así como el dado por el desplazamiento de carro.

Ahora sí podemos reemplazar los valores obtenidos

$$F_c = \frac{m(Vx_f - Vx_o)}{t} + \beta \cos\left(\frac{1}{180}\alpha\pi\right)mg + \sin\left(\frac{1}{180}\alpha\pi\right)mg \quad (5.15)$$

Finalmente, recordando la ecuación de momento de torsión igual a fuerza por distancia

$$\tau_{motor} = F_c r \quad (5.16)$$

Reemplazando obtenemos el valor del torque mínimo para mover el carro a lo largo de una pendiente con ángulo  $alpha$ .

$$\tau_{motor} = \left( \frac{m(Vx_f - Vx_o)}{t} + \beta \cos\left(\frac{1}{180}\alpha\pi\right)mg + \sin\left(\frac{1}{180}\alpha\pi\right)mg \right) r \quad (5.17)$$

Ahora bien, con el propósito de considerar las fuerzas de excavación y la fuerza de fricción debida al arrastre de la estructura de soporte, es necesario replantear la sumatoria de fuerzas en el eje  $x$ , sin embargo, recordando que el propósito es realizar excavaciones horizontales, vamos a considerar el ángulo  $\alpha$  con cero y lo reemplazamos en la ecuación (5.15).

$$F_c = \frac{m(Vx_f - Vx_o + \beta gt)}{t} \quad (5.18)$$

Considerando esta nueva fuerza total como  $F_{total}$ , la fuerza de excavación como  $F_{exc}$  y la fuerza de fricción debida al soporte como  $F_{fs}$ , podemos realizar la sumatoria con base en la Figura 5.5.

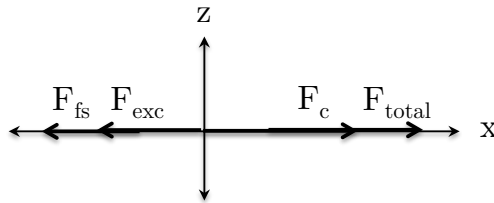


Figura 5.5: Diagrama de fuerzas incluyendo la fuerza de fricción del soporte y la fuerza de excavación

A partir de la Figura 5.5, podemos conocer las direcciones de las fuerzas y por ende plantear la ecuación.

$$F_{total} = F_{exc} + F_{fs} + F_c \quad (5.19)$$

Donde  $F_{fs}$ <sup>1</sup> está dada por:  $R$ , resistencia unitaria de fricción de la circunferencia, coeficientes presentados en la Tabla 5.1;  $S$ , perímetro de la sección del soporte; y  $L_1$  la distancia de desplazamiento

$$F_{fs} = RSL_1 \quad (5.20)$$

<sup>1</sup>Esta ecuación fue tomada de *Manual de Túneles y Obras Subterráneas*[14]

Reemplazando el valor previamente obtenido para  $F_c$  con  $\alpha = 0$

$$F_{total} = F_{exc} + RSL_1 + \frac{m(Vx_f - Vx_o + \beta gt)}{t} \quad (5.21)$$

Dicha ecuación daría la fuerza total mínima para iniciar un movimiento en el eje  $x$ . Es importante considerar que para vencer la inercia de dicho sistema es necesario considerar al menos un aumento del 30% en esta fuerza. Finalmente podemos reemplazar en la ecuación (5.16) sólo que cambiando  $F_c$  por  $F_{total}$  se obtiene

$$\tau_{motor} = \left( F_{exc} + RSL_1 + \frac{m(Vx_f - Vx_o + \beta gt)}{t} \right) r \quad (5.22)$$

Como complemento a dicha ecuación resultante, se presenta en la Tabla 5.1 unos valores de Resistencias Unitarias de Fricción para ciertos tipos de suelos.

Tabla 5.1: Resistencias Unitarias de Fricción. Tomado de *Manual de Túneles y Obras Subterráneas*[14].

<b>Resistencias Unitarias de Fricción</b>	
<b>Tipo de Suelo</b>	<b>R</b> <i>tf/m<sup>2</sup></i>
Arcilla	0.4
Limo	0.4
Tierra	0.5
Grava arcillosa	0.5

### 5.1.2. Sistema de desplazamiento vertical del brazo

Con el propósito de encontrar el torque requerido por el actuador para mover el brazo a una velocidad determinada, se plantea la siguiente ecuación

$$\tau_{vertical} = \tau_{estatico} + \tau_{dinamico} \quad (5.23)$$

Los parámetros a considerar son las siguientes:

- $m_{rodilo}$  = masa del rodillo

- $m_{brazo}$  = masa del brazo
- $L$  = longitud del brazo
- $g$  = aceleración de la gravedad
- $\alpha_{vertical}$  = aceleración angular del movimiento vertical
- $I_{brazo}$  = momento de inercia del brazo
- $I_{rodillo}$  = momento de inercia del rodillo
- $t$  = tiempo
- $V_o$  = velocidad inicial
- $V_f$  = velocidad final
- $a$  = aceleración del carro

Ahora, para hallar el torque necesario para que el actuador sostenga el brazo y el rodillo, se plantea la Figura 5.6.

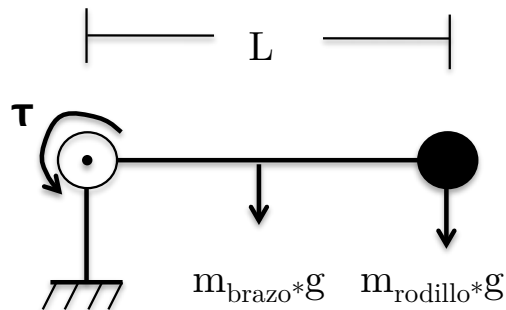


Figura 5.6: Diagrama de fuerzas estáticas que actúan sobre el brazo

Se plantea entonces el momento de torsión en función de las fuerzas actuantes y su distancia respecto al punto de rotación de la siguiente manera, donde  $L$  es la longitud total del brazo y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

$$\tau_{estatico} = Lm_{rodillo}g + \frac{1}{2}Lm_{brazo}g \quad (5.24)$$

Ahora es necesario determinar el torque mínimo para mover el brazo con una velocidad determinada. Así pues se plantea dicho torque como el momento de inercia  $I$  por la aceleración angular  $\alpha$

$$\tau_{dinamico} = I_{brazo}\alpha + I_{rodillo}\alpha \quad (5.25)$$

Podemos considerar por aproximación el siguiente como el momento de inercia del brazo

$$I_{brazo} = 1/3 m_{brazo}L^2 \quad (5.26)$$

y este como el del rodillo:

$$I_{rodillo} = m_{rodillo}L^2 \quad (5.27)$$

Reemplazando, obtenemos

$$\tau_{dinamico} = 1/3 m_{brazo}L^2\alpha_{vertical} + m_{rodillo}L^2\alpha_{vertical} \quad (5.28)$$

Ahora, es necesario determinar la aceleración angular, la cual se supone constante desde una velocidad  $\omega_0$  hasta una velocidad  $\omega_{vertical}$ . Esta última es la velocidad esperada de desplazamiento vertical.

$$\alpha_{vertical} = \frac{\omega_{vertical} - \omega_{vo}}{t_{vertical}} \quad (5.29)$$

Si reemplazamos la aceleración angular, tendremos

$$\tau_{dinamico} = 1/3 \frac{m_{brazo}L^2 (\omega_{vertical} - \omega_{vo})}{t_{vertical}} + \frac{m_{rodillo}L^2 (\omega_{vertical} - \omega_{vo})}{t_{vertical}} \quad (5.30)$$

Sin embargo, aún es necesario determinar el torque total requerido, sustituyendo las ecuaciones 5.25 y 5.19 en la ecuación 5.18

$$Tau_{vertical} = Lm_{rodillo}g + 1/2 Lm_{brazo}g + 1/3 \frac{m_{brazo}L^2 (\omega_{vertical} - \omega_{vo})}{t_{vertical}} + \frac{m_{rodillo}L^2 (\omega_{vertical} - \omega_{vo})}{t_{vertical}} \quad (5.31)$$

A este valor bastaría multiplicarlo por el factor de seguridad, en el cual se incluye una eficiencia del actuador del 90% y fenómenos físicos presentes como la fricción con el

aire y el movimiento de la tierra, éste último bastante despreciable.

Ahora, es necesario establecer que se empleará un actuador lineal para generar el movimiento y por consiguiente es fundamental expresar el el torque que este requiere. El paso siguiente es comprender el diagrama del brazo, presentado en la Figura 5.7, donde  $A$  es la distancia variable del actuador,  $B$  es una constante entre el punto de apoyo del brazo y del actuador y  $C$  es una distancia constante a la cual se apoya el otro extremo del actuador para generar movimiento.

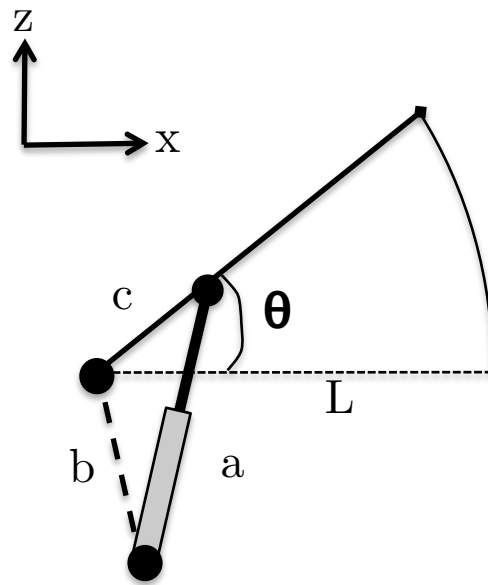


Figura 5.7: Diagrama del actuador y el brazo

Finalmente es posible relacionar la sumatoria de momentos en el pivote del brazo con la fuerza del actuador considerando su variación en la longitud, descomponiendo las fuerzas en el punto en que dicho actuador se une con el brazo.

### 5.1.3. Elección del largo del brazo

Con la idea de encontrar un  $L$  adecuado, que permita realizar el barrido del frente de excavación pero a la vez sea considerablemente corto para disminuir el torque de los actuadores, se plantea el siguiente análisis. Inicialmente se presenta un diagrama en la

Figura 5.8 en el cual se identifica el pivote del brazo y el ángulo de barrido máximo sobre el frente de excavación.

La longitud, en función del ángulo, considerando un ancho de barrido  $w$  igual a 0.5 m

$$\phi = 360 \arcsin\left(\frac{1}{2} \frac{w}{L}\right) \pi^{-1} \quad (5.32)$$

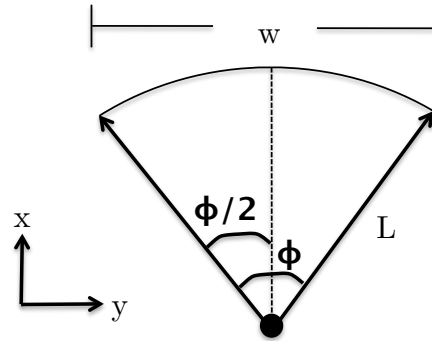


Figura 5.8: Diagrama del ángulo de barrido azimutal del brazo de excavación

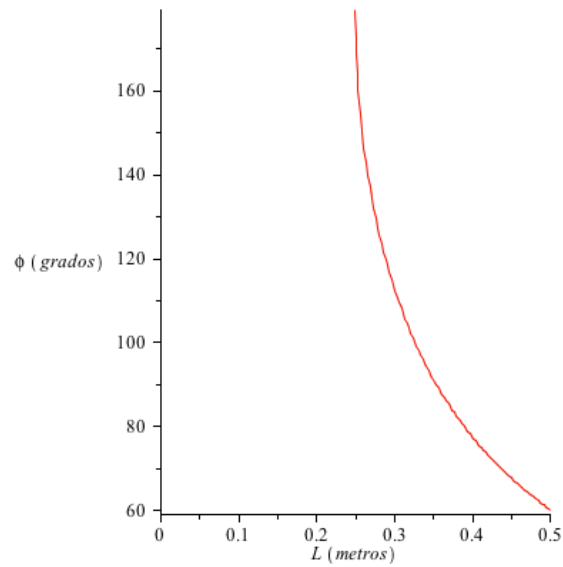


Figura 5.9:  $\theta$  (dado en grados) vs.  $L$  dado en metros

A partir de la Figura 5.9, elegimos  $L = 0,35m$ , para el cual el ángulo máximo de barrido será  $91,17^\circ$ .

#### 5.1.4. Determinación de la posición del rodillo

Con el propósito de conocer la posición del rodillo, se emplea el diagrama de la Figura 5.7 para realizar una construcción geométrica. Se presenta el respectivo diagrama geométrico en la Figura 5.10.

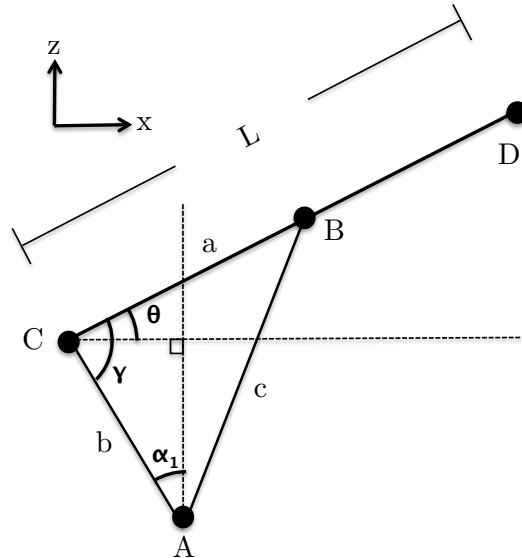


Figura 5.10: Diagrama geométrico del barrido azimutal del brazo de excavación

En la Figura 5.10 podemos identificar:

- $C$  es el pivote del brazo de excavación
- $B$  es el punto de unión entre el brazo y el actuador lineal
- $A$  es el punto de apoyo del actuador lineal
- $L$  es el brazo de excavación
- $a$  es la distancia desde entre  $C$  y  $B$
- $b$  es la distancia constante  $C$  y  $A$
- $c$  representa al actuador lineal, entre  $A$  y  $B$ . Esta distancia es variable y define el ángulo de inclinación
- $\gamma$  es el ángulo entre  $a$  y  $b$  sobre el punto  $C$

- $\alpha_1$  es el ángulo entre el eje vertical (línea punteada correspondiente al eje  $y$  y la arista  $b$ )
- $\beta$  es en ángulo a hallar. Dado entre la horizontal y la arista  $a$

De la Figura 5.10 podemos observar la siguiente relación geométrica

$$90^\circ - \alpha_1 = \gamma - \theta \quad (5.33)$$

Ahora basta despejar  $\gamma$  de la ecuación anterior, para así hallar el valor de  $\theta$  en función de la distancia variable  $c$ .

$$\gamma = \theta + 90 - \alpha_1 \quad (5.34)$$

Aplicamos el Teorema del Coseno presentado a continuación:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\gamma) \quad (5.35)$$

y reemplazamos, obteniendo una relación entre la longitud del actuador lineal y el ángulo  $\theta$  sobre la horizontal.

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\theta + 90 - \alpha_1) \quad (5.36)$$

Con el propósito de conocer la posición del rodillo de excavación en coordenadas esféricas, basta conocer el ángulo azimutal de rotación horizontal del brazo, dada por la rotación de un motor; de esta manera se obtiene un trío de valores  $(r, \phi, \theta)$ .

## 5.2. Función de Transferencia

El modelo matemático que rige cada uno de los subsistemas de este concepto de máquina se pueden representar por medio de un diagrama llamado Función de Transferencia, en el cual se identifican las variables matemáticas de salida en función de las variables matemáticas de entrada. En la Figura 5.11 se presenta el sistema completo de la máquina en función de sus variables de entrada y de salida.

Debido a la complejidad de la máquina, se divide la función de transferencia en cinco funciones de transferencia correspondientes a cada sistema de actuación diferente; es

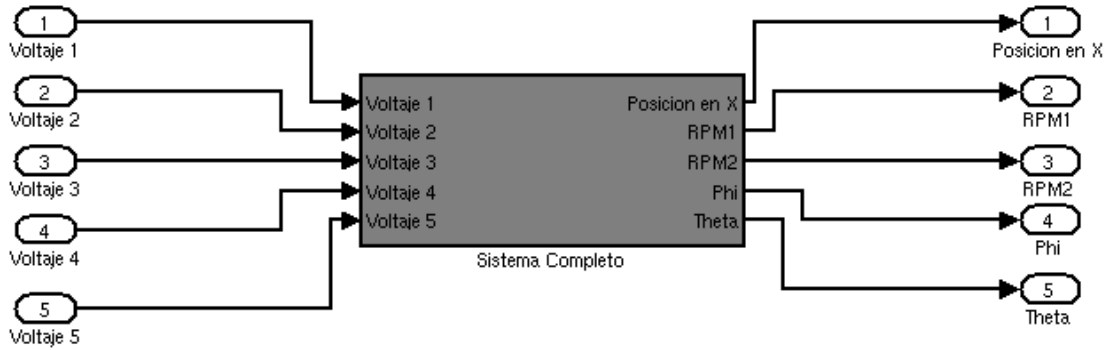


Figura 5.11: Función de Transferencia del Sistema Completo

importante resaltar que no necesariamente coinciden con los subsistemas designados en el capítulo anterior, ya que es debido a los grados de libertad que se pueden considerar subsistemas de actuación diferentes.

- Subsistema de Desplazamiento del Carro
- Subsistema de Rotación del Rodillo de Excavación
- Subsistema de rotadores de Remoción de Escombros
- Subsistema de Movimiento Lateral del Brazo
- Subsistema de Movimiento Vertical del Brazo

### 5.2.1. Subsistema de Desplazamiento del Carro

Este subsistema está describe el desplazamiento del carro con todos los accesorios a lo largo del eje  $x$ . A continuación se presenta la ecuación que describe la posición en función del voltaje de entrada, el cual es proveído por el controlador.

$$x(t) = \int (A_1 V_1(t) + B_1) r dt \quad (5.37)$$

El diagrama general de transferencia se presenta en la Figura 5.12.



Figura 5.12: Función de Transferencia General del Subsistema de Desplazamiento

Es necesario adentrarse en ese subsistema para poder evidenciar los componentes matemáticos que lo rigen. En la Figura 5.13 se presentan sus componentes internos según la ecuación (5.37).

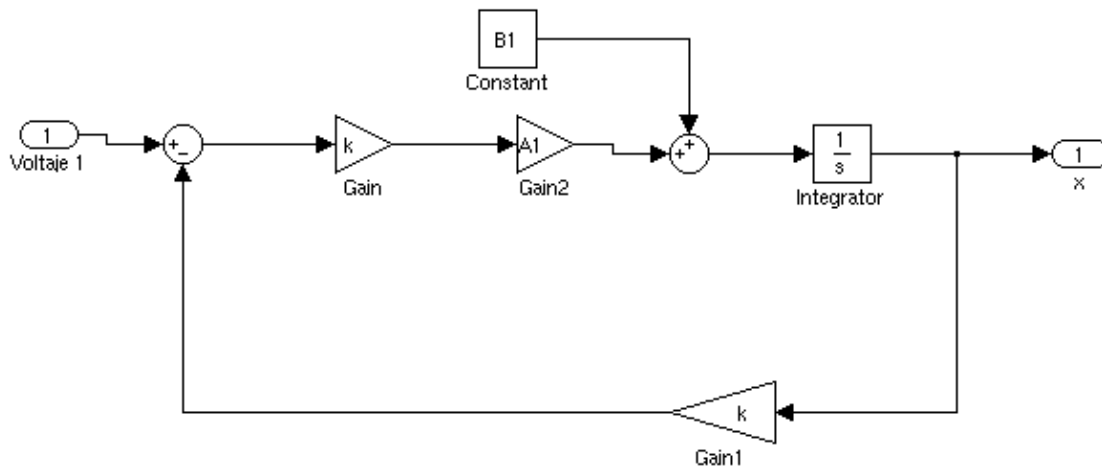


Figura 5.13: Función de Transferencia del Subsistema de Desplazamiento

### 5.2.2. Subsistema de Rotación del Rodillo de Excavación

El subsistema de excavación permite controlar las revoluciones por minuto del rodillo a partir de un voltaje de entrada dado por la unidad de procesamiento. En la ecuación (5.38) se presenta dicha relación.

$$rpm(t) = 30 \frac{A_2 V_2(t) + B_2}{\pi} \quad (5.38)$$

La forma general de describir este subsistema se expone en la Figura 5.14.

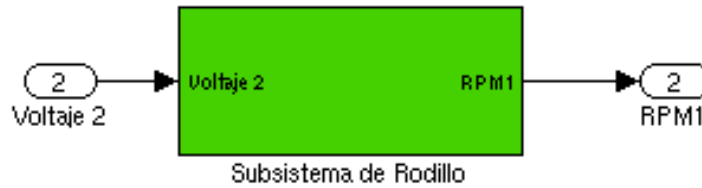


Figura 5.14: Función de Transferencia General del Subsistema del Rodillo de Excavación

Considerando la ecuación (5.38), se presentan en la Figura 5.15 las relaciones del subsistema.

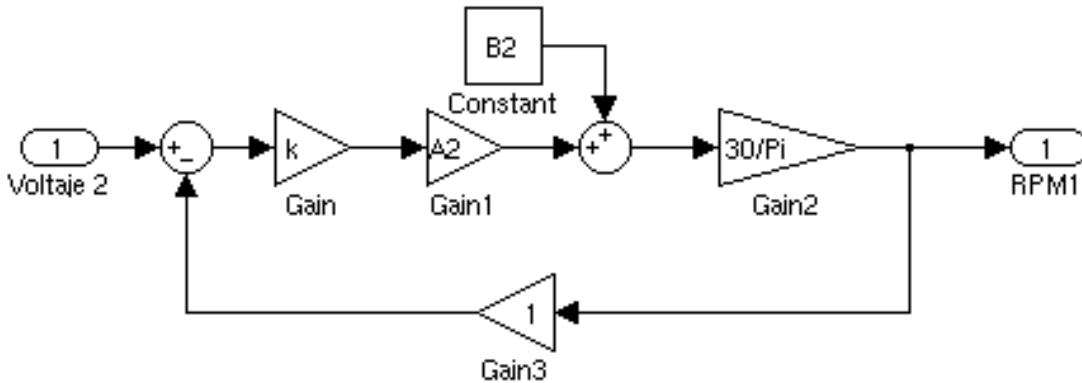


Figura 5.15: Función de Transferencia del Subsistema del Rodillo de Excavación

### 5.2.3. Subsistema de Remoción de Escombros

El sistema de remoción de escombros se determina como la rotación de dos ejes con paletas que permiten desplazar los escombros hacia un punto determinado. Dicho subsistema está descrito por la siguiente ecuación.

$$rpm(t) = 30 \frac{A_3 V_3(t) + B_3}{\pi} \quad (5.39)$$

El diagrama general para su función de transferencia se presenta en la Figura 5.16.

Partiendo de la ecuación (5.39), se expone en la Figura 5.17 las relaciones del subsistema.

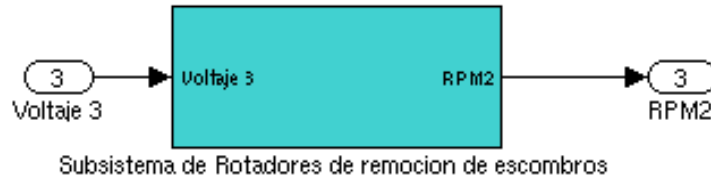


Figura 5.16: Función de Transferencia General del Subsistema de Remoción de Escombros

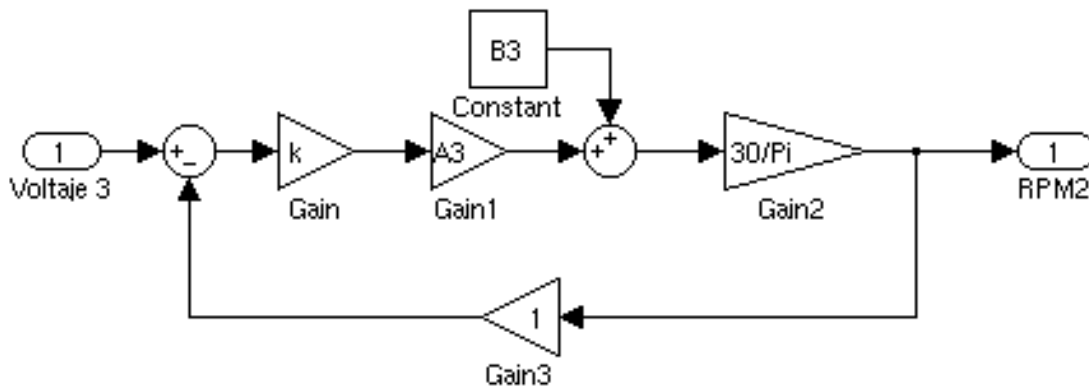


Figura 5.17: Función de Transferencia del Subsistema de Remoción de Escombros

#### 5.2.4. Subsistema de Movimiento Lateral del Brazo

El movimiento lateral del brazo se considera como los desplazamientos alrededor del eje azimutal, describiendo así una posición según el ángulo  $\phi$ . La siguiente ecuación describe su comportamiento teniendo como entrada un voltaje dado por el controlador.

$$\phi(t) = \int A_4 V_4(t) + B_4 dt \quad (5.40)$$

La forma general de describir este subsistema se expone en la Figura 5.18.



Figura 5.18: Función de Transferencia General del Subsistema de Movimiento Lateral del Brazo

A partir de la ecuación que rige este subsistema, se expresan sus componentes en la Figura 5.19

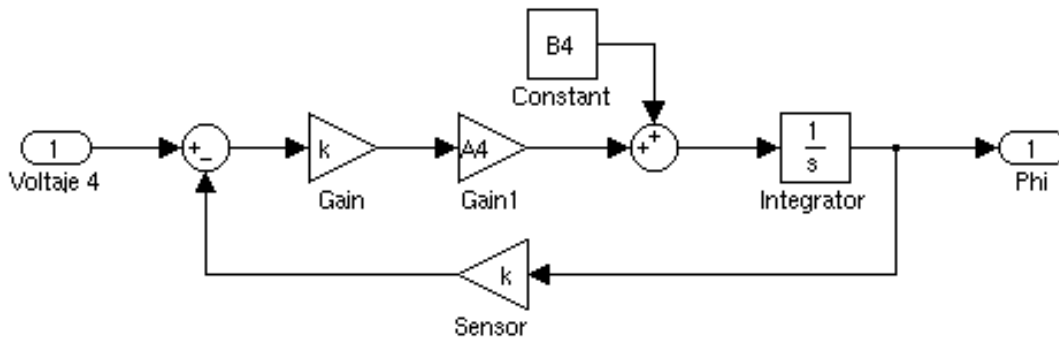


Figura 5.19: Función de Transferencia del Subsistema de Movimiento Lateral del Brazo

### 5.2.5. Subsistema de Movimiento Vertical del Brazo

El subsistema de movimiento vertical del brazo está determinado por la elongación del actuador lineal, el cual genera una variación angular. Dicha relación se presenta en función de un voltaje de entrada proveniente del controlador.

$$\theta(t) = -90 + \alpha_1 - \pi + \arccos \left( 1/2 \frac{(A_5 V_5(t) + B_5)^2 - a^2 - b^2}{ab} \right) \quad (5.41)$$

El diagrama general para su función de transferencia se presenta en la Figura 5.20.

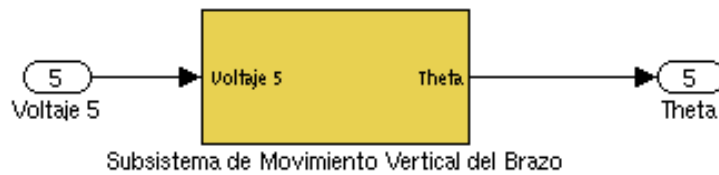


Figura 5.20: Función de Transferencia General del Subsistema de Movimiento Vertical del Brazo

Partiendo de la ecuación (5.39), se expone en la Figura 5.21 las relaciones del subsistema.

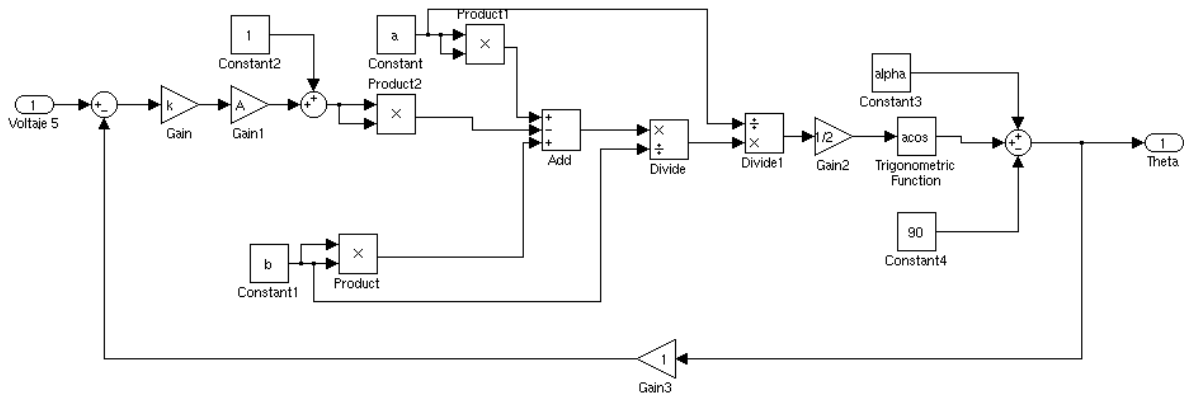


Figura 5.21: Función de Transferencia del Subsistema de Movimiento Vertical del Brazo

Así pues es posible obtener una descripción del funcionamiento del concepto planteado para la realización de excavaciones horizontales continuas.



# Capítulo 6

## Instrumentación

### 6.1. Método de Control

A partir de la Figura 4.8 es posible comprender los portadores de función involucrados en la etapa de control del artefacto, el cual tiene como entradas la energía eléctrica y los comandos de control por parte del operario. En la Figura 6.1 se puede evidenciar sus entradas y sus salidas.

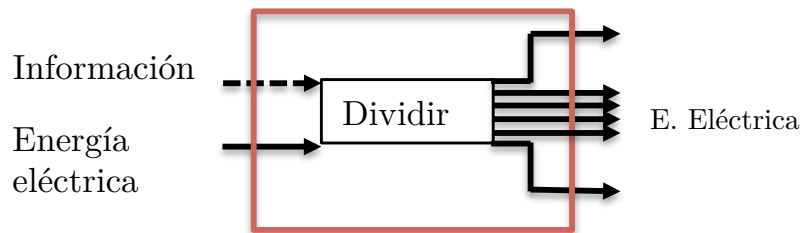


Figura 6.1: Simplificación del Subsistema 1

Como consecuencia de la necesidad de tener control sobre la máquina, se plantea la implementación de un sistema que permita al usuario tomar decisiones sobre el procedimiento a realizar. El diagrama presentado en la Figura 6.2 evidencia la importancia de una unidad de procesamiento a la cual le entren las señales de los sensores implementados.

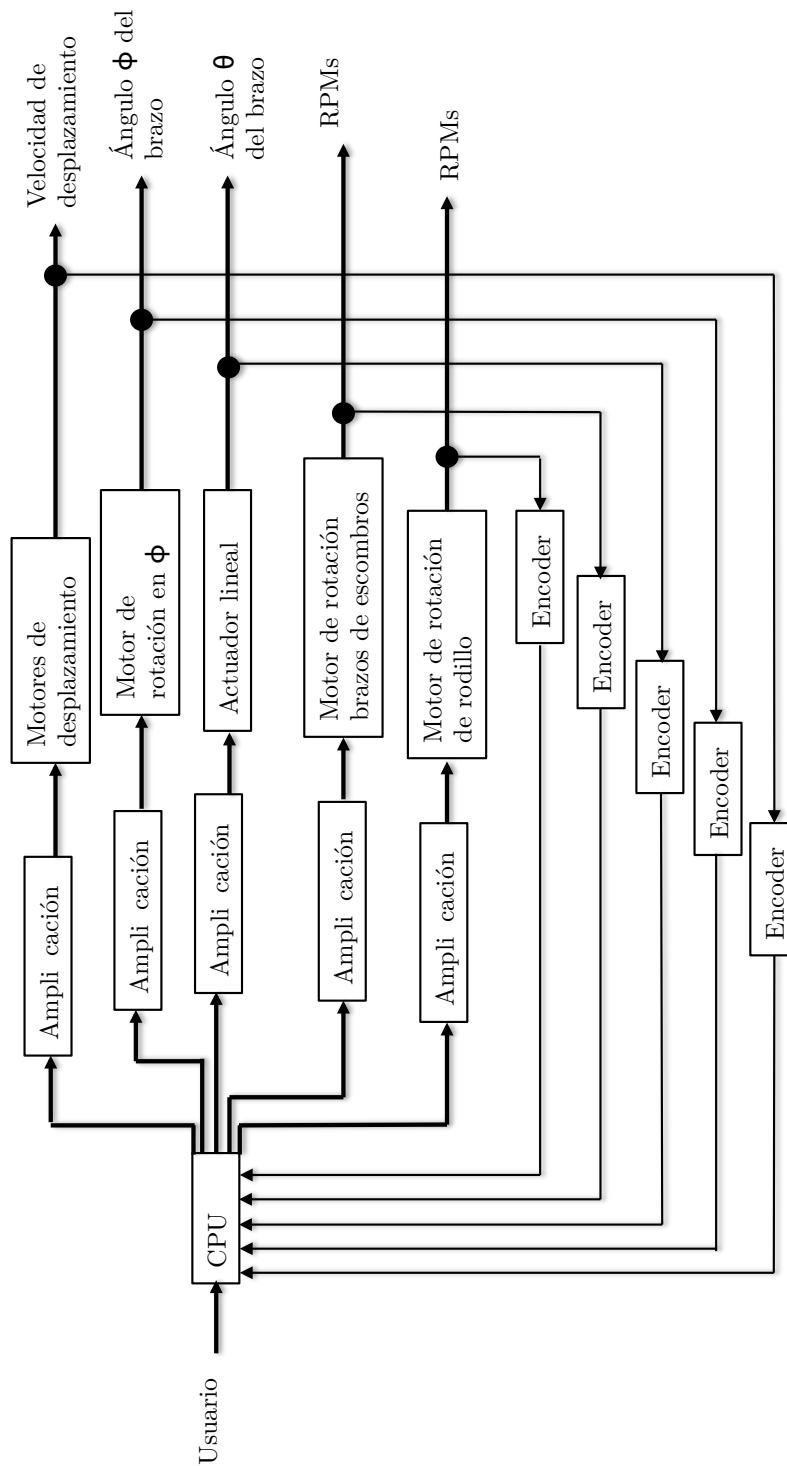


Figura 6.2: Simplificación del Subsistema 1

### 6.1.1. Alternativas de Control

Con el propósito de plantear un concepto para el método de control de la máquina y todos sus subsistemas, se plantearon dos posibles métodos: la implementación de una *board*<sup>1</sup> y la implementación de un microcontrolador como dispositivos receptores de información ubicados en el carro. Éstos permiten la comunicación con la unidad central de procesamiento que es un computador ubicado en la proximidad del pozo inicial del túnel. Para la selección se plantearon los siguientes aspectos fundamentales: espacio dentro del dispositivo de excavación, consumo de energía y confiabilidad y versatilidad.

Es importante considerar que ambas opciones fueron escogidas debido a su robustez y al conocimiento de ambas arquitecturas por parte del diseñador. En la Figura 6.3 y 6.4, se presenta cada arquitectura propuesta.

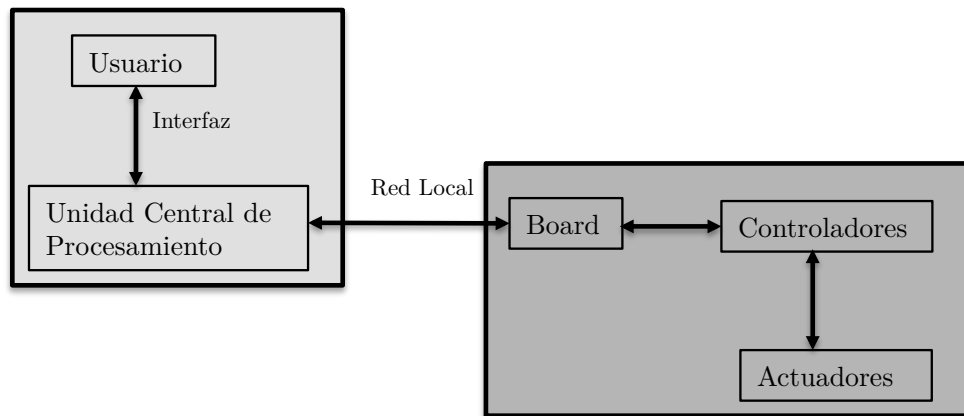


Figura 6.3: Arquitectura de Control 1, empleando una *board*

La arquitectura 1 está planteada para emplear una comunicación por red local entre la unidad central de procesamiento y la board o unidad esclava, la cual se encarga de recibir la información de los sensores presentes en la máquina y enviarla a la unidad central; además está encargada de recibir los comandos de la unidad central de procesamiento y reenviarlos a los actuadores. Este modelo no es versátil debido a los cuidados de que se deben tener con la tarjeta secundaria, además su consumo de corriente está por encima

<sup>1</sup>Tarjeta principal de un computador, donde se ubica la unidad de procesamiento

de los 2 amperios únicamente para la unidad de control; sin embargo es ampliamente conocido por el diseñador.

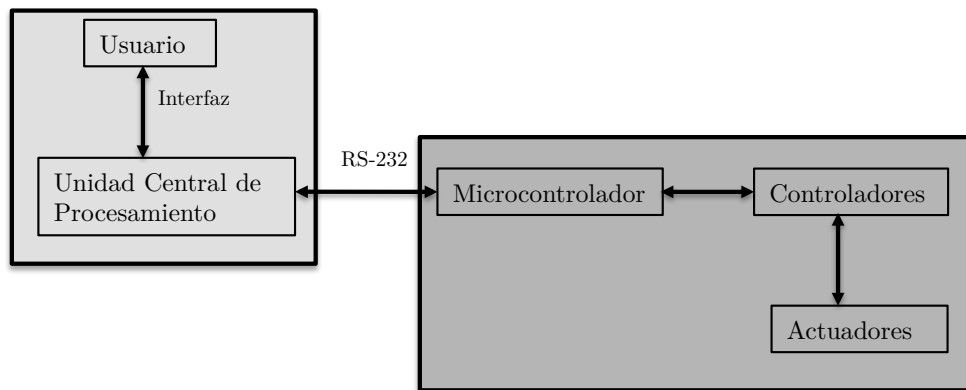


Figura 6.4: Arquitectura de Control 2, empleando un microcontrolador

La arquitectura de control 2 emplea el protocolo de comunicaciones RS-232 para comunicar un microcontrolador con la unidad central de procesamiento. Dicho sistema es más versátil, es de menores dimensiones, su consumo es inferior a 1 amperio y es además es ampliamente conocido por el diseñador.

Como consecuencia de los motivos expuestos, se empleará la segunda arquitectura, ubicando así un microcontrolador en el artefacto de excavación.

## 6.2. Arquitectura de Control

La unidad de procesamiento principal se plantea como un computador, debido a la facilidad de adaptación al usuario con este tipo de dispositivos; además se emplea LabView<sup>2</sup> como una herramienta de software muy completa que permite no sólo enviar señales de control sino recibirlas, implicando así una retroalimentación del sistema. Para el sistema de control se emplea el protocolo de comunicación RS-232 por medio del cual se transmiten cadenas de caracteres, las cuales contienen la información necesaria para el control. En la Figura 6.5 se presenta el modelo detallado de comunicación.

<sup>2</sup>Herramienta gráfica de control elaborada por National Instruments, <http://www.ni.com/labview/>

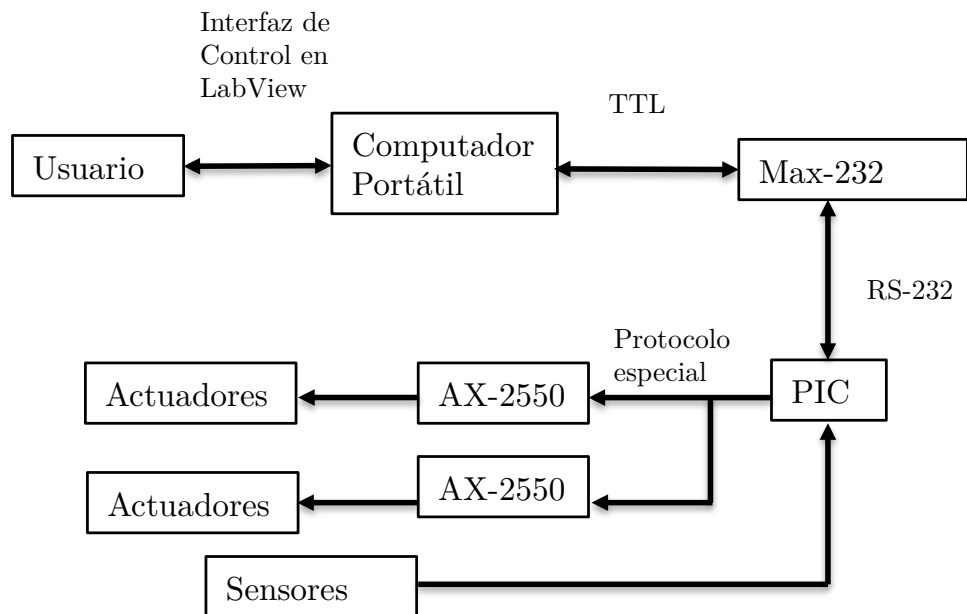


Figura 6.5: Modelo detallado de comunicación

Para realizar la retroalimentación del sistema se pretende emplear *encoders*<sup>3</sup> de tal forma que se pueda conocer el ángulo de rotación de ciertas mecanismos y piezas, permitiendo al usuario determinar el estado en tiempo real de la máquina.

Las AX-2550 son unas tarjetas tipo *punte en H*<sup>4</sup> que permiten controles de alta potencia. Estas tarjetas se seleccionaron debido a que se tiene una amplia experiencia.

El Max-232 es un circuito integrado que permite convertir niveles de voltaje tipo RS-232 a TTL y viceversa. Se posee gran experiencia con la implementación de estos dispositivos.

El microcontrolador PIC, perteneciente a la familia *Microchip*<sup>5</sup>, tiene gran versatilidad debido a su fácil programación en el lenguaje C, además su tamaño es inferior a 2 cm

<sup>3</sup>sensores que permiten contar la cantidad de revoluciones en un tiempo determinado

<sup>4</sup>Configuración determinada de transistores

<sup>5</sup>Microchip Technology, <http://www.microchip.com/>

x 3 cm x 1 cm. Se elige esta familia debido al amplio conocimiento del diseñador sobre ésta tecnología.

### 6.2.1. Interfaz de Control

Con el propósito de favorecer una buena comunicación hombre-máquina, se plantea una interfaz de control en LabView que permita evidenciar el estado en *tiempo real*<sup>6</sup> de los diferentes mecanismos de actuación. En la Figura 6.6 se presenta la interfaz en LabView.

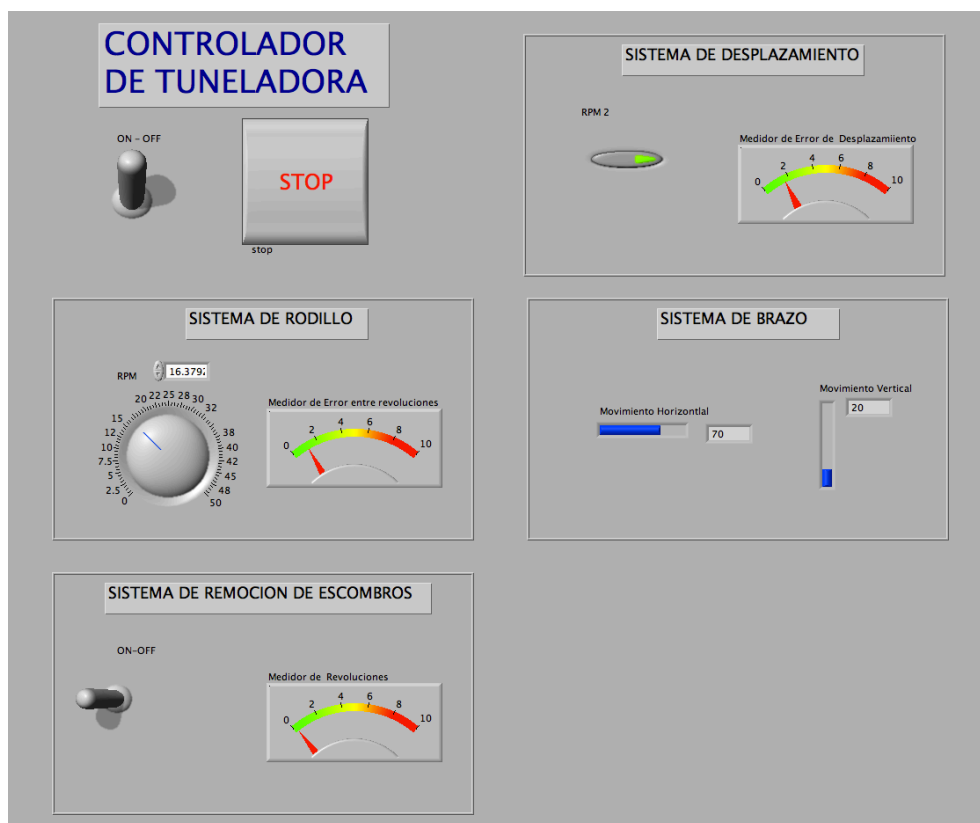


Figura 6.6: Interfaz de Control en LabView

En esta interfaz, se identifica el botón de encendido y apagado, el botón de parada de emergencia, el sistema de control del rodillo de excavación, el sistema de encendido/apagado del mecanismo de remoción de escombros, el sistema de desplazamiento del carro en el eje  $x$  y el sistema de control del brazo.

<sup>6</sup>Es necesario considerar los retrasos debido al protocolo y a las distancias

# Conclusiones

Se diseñó conceptualmente un artefacto robótico que permite realizar excavaciones horizontales continuas, remover los escombros resultantes y posicionar un soporte a lo largo de todo el recorrido, permitiendo así proveer una solución íntegra a la implementación del método de elaboración de conductos sin zanjas, el cual evita en gran medida las molestias a la ciudadanía bien sea por el cierre de vías o por los ruidos ocasionados.

Se comprendieron los requisitos y consideraciones necesarias para la elaboración de obras subterráneas intraurbanas a pequeña escala (diámetro de perforación inferior a 3 *metros*, posibilitando así unos fundamentos técnicos idóneos para el diseño de artefactos que realicen dichas funciones.

El breve estudio de suelos y perforaciones presentado es un muy buen punto de partida para la materialización del proyecto, ya que genera condiciones y limitantes directas sobre las diferentes variaciones de las máquinas excavadoras, considerando las diferentes propiedades de los suelos y rocas.

La investigación asociada al diseño de máquinas para este tipo de obras, permite conocer en gran medida las tecnologías empleadas por los diferentes fabricantes y por consiguiente, comprender el nivel de competitividad existente de cara a la fabricación del artefacto diseñado.

La metodología asociada al diseño conceptual que se empleó para este proyecto, permite obtener un alto grado de confianza sobre el concepto final de la máquina, ya que cada uno de los subsistemas que la componen están en total acuerdo con lo establecido en los requerimientos y además son perfectamente compatibles a la hora de pensar en el

diseño de detalles y la fabricación.

El modelo matemático de cada uno de los subsistemas, brinda una explicación detallada acerca del funcionamiento de la máquina. Además, los análisis realizados posibilitan la toma de decisiones técnicas para determinar elementos específicos dentro de los rangos permisibles.

La arquitectura de control planteada para dar solución al manejo adecuado de la máquina, permite tener plena confianza en el accionar de los actuadores en función de la obtención de resultados óptimos de excavación.

El diseño conceptual de esta máquina constituye un aporte significativo al proceso de implementación de nuevas tecnologías en la construcción de obras civiles, involucrando una gran variedad de aspectos a tener en cuenta para afrontar una posible materialización.

# Trabajo a Futuro

Con el propósito de continuar este proyecto durante la realización de una Maestría, es preciso establecer una serie de elementos que permitan el correcto desarrollo de éste y por ende la obtención de los objetivos propuestos. Sin embargo es necesario replantear un cronograma de tal manera que se establezcan fechas para la culminación y alcance de dichos objetivos.

En el aspecto matemático, es fundamental realizar un análisis dinámico detallado de cada uno de los subsistemas, permitiendo así tener plena certeza sobre el diseño detallado de los mecanismos y sobre la implementación de los actuadores necesarios, considerando siempre disminuir el consumo energético. Además, es posible continuar con los análisis que conllevan a un dimensionamiento correcto de cada una de las piezas.

Así pues, es fundamental también llevar a cabo un análisis por elementos finitos de las estructuras y piezas que conforman el artefacto, con el fin de obtener proporciones óptimas en cuanto a la relación peso-resistencia.

El paso a seguir según la metodología propuesta por Pahl et. al [44], es el diseño del cuerpo o carcasa, en el cual es fundamental considerar los detalles tanto de ensamble como de manufactura. De esta manera se pretende establecer referentes formales de diseño que den cumplimiento al *PDS* previamente establecido.

Por otra parte es necesario realizar tanto simulaciones computacionales como pruebas físicas de la arquitectura de control propuesta, implementando así algoritmos de control que permitan al usuario tener pleno control sobre las actividades semi-automatizadas y automatizadas de la máquina.

Conservando la idea de realizar el desarrollo del proyecto en el Valle de Aburrá, resulta indispensable llevar a cabo un estudio más detallado sobre los tipos de suelos y rocas que se encuentran en ésta área y si es el caso, en el resto del Departamento de Antioquia acudiendo a las autoridades competentes para que brinden la información necesaria.

Reconociendo la diversidad de áreas de conocimiento involucradas en este proyecto, se torna fundamental reunir profesionales en cada una de éstas áreas para así obtener resultados óptimos en los tiempos planteados. Además, es precisamente esta multidisciplinariedad la que brinda el camino correcto para llevar a cabo este gran proyecto.

□

# Bibliografía

- [1] TEC Proceedings. *Tunnel Boring Technology - Present and Future*, 1993.
- [2] Mauro Giraldo and Oswaldo Ortiz. Productividad de las máquinas tuneleras tipo tbm vs tipo de roca. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 11(22):7–12, diciembre 2008.
- [3] Mauro Giraldo. Las máquinas tuneleras tipo tbm como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: Desarrollo de túneles en yuncán. Master's thesis, Universidad Nacional de Ingeniería, 2010.
- [4] Dimitrios Kolymbas. *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunneling*. Springer, 2008.
- [5] Wikipedia Contributors. Tbm s-210 alptransit faido east, September 2006.
- [6] Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings. *Tunnel Boring Machine at the Stillwater Mine Nye, Montana*, 1989.
- [7] Unal E, Unver E, and Tercan E, editors. *Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine Development*. 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 2001.
- [8] Emilio Lopez, Carlos Lopez, and Pilar García. *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1994.
- [9] International tunnelling and underground space association.
- [10] British tunneling society.
- [11] Australian tunneling society.

- [12] International society for trenchless technology.
- [13] North american society for trenchless technology.
- [14] Carlos Lopez. *Manual de Túneles y Obras Subterráneas*. Gráficas Arias Montano S.A., Madrid, 2000.
- [15] Juan Carlos Luján. Tecnologías marte, en la élite de la innovación mundial.
- [16] Y. Jung and S. Sinha. Evaluation of trenchless technology methos for municipal infrastructure system. *Journal of Infrastructure Systems*, page 144, 2007.
- [17] T. Iseley and S.B. Gokhale. Trenchless installation of conduits beneath roadways. *National Cooperative Highway Research Program*, 1997.
- [18] R. A. McKim. Selection method for trenchless technologies. *Journal of Infrastructure Systems*, 3:119, 1997.
- [19] B Hashemi, M. Najafi, and R. Mohamed. Cost of underground infrastructure renewal: A comparison of open-cut and trenchless methods. *Proceedings of the International Conference on Geological Engineering*, 2007.
- [20] Paul Nicholas. Micro tunneling - methods and developments. Marzo 2006.
- [21] French Society for Trenchless Technology. *Microtunneling and Horizontal Drilling: Recomendations*. Antony Rowe Ltd., 2006.
- [22] North America Tunneling Conference and Exhibition. *Mini-Cutter technology. The answer to a truly mobile excavator*, June 1994.
- [23] ISDT Annual Technical Conference. *Testing and Performance Evaluation of a 32 inch Cutterhead using Mini Disc Cutters*, April 1994.
- [24] Erika Rönnkvist, James E. Friant, and Levent Ozdemir. Development of a mechanical alcove excavator for the yucca mountain exploratory study facility. Technical report, RSN contract # SC-YM-93-159, EMI, CSM, 1993.
- [25] K. Thuro and R. J. Plinninger. Geological limits in roadheader excavation – four case studies. *8th International IAEG Congress*, 1998.

- [26] K. G. Hurt and K. M. MacAndrew. Designing roadheaders cutting heads. *Mining Engineering*, 141:167–170, 1981.
- [27] Barla G., editor. *A Model to Predict The Performance of Roadheaders and Impact Hammers in Tunnel Drivages*. Eurock '96 on Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering, 1996.
- [28] Zhi wu Wang. Analysis of cutting speed regulation system in road-headers at home and abroad. *Colliery Mechanical & Electrical Technology*, Marzo 2004.
- [29] Lovat. Ms 40pjs.
- [30] Akkerman. Mtbm sl.
- [31] Akkerman. Bs + ex.
- [32] Herrenknecht. Avn250xc.
- [33] Herrenknecht. M-742m.
- [34] Shield tunneling machine. Patente 7073869; 3475055; 3784103; 4534427; 4624326, Nakakuro Construction Co., Julio 2006.
- [35] Larry L. Snyder. Tunnel boring machine. Patente 4494799, Harrison Western Corporation, Enero 1985.
- [36] Lok Home. All-conditions tunnel boring machine. Patente 7832960, The Robbins Company, Noviembre 2010.
- [37] Kevin Kostelnik. Microtunneling systems and methods of use. Patente 7070359, Battelle Energy Alliance, LLC., Julio 2006.
- [38] Andis Salins. Microtunneling system and apparatus. Patente 7942217, Vermeer Manufacturing Company, Diciembre 2010.
- [39] Ted R. Dimitroff. Method of forming a trenchless flowline. Patente 7581600, McKee, Voorhees & Sease, PLC, Septiembre 2009.
- [40] James Aker. Cutter head for trenchless boring machine. Patente 5687807, Vermeer Manufacturing Company, Noviembre 1997.

- [41] Andis Salins. Cutting apparatus for a microtunneling system. Patente 7942217, Vermeer Manufacturing Company, Mayo 2011.
- [42] John M. Mullins. Tunnel machine guidance by impingement of laser beam on pair of machine. Patente 3.321.248, Hughes Tool Company, Mayo 1967.
- [43] Stuart Pugh. *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Addison-Wesley Pub. Co., 1991.
- [44] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.H. Grote. *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer, third edition edition, 2007.
- [45] R. Norton. *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis of Mechanisms and Machines*. McGraw-Hill, New York, 1992.
- [46] Alberto Rodríguez. *Artefactos: Diseño Conceptual*. Fondo Editorial EAFIT, 2003.
- [47] Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación, 4 edition, 2003.
- [48] Carlos Kraemer, Jose Maria Pardillo, Sandro Rocci, and Manuel G. Romana. *Ingeniería de Carreteras*. McGraw Hill, 2004.
- [49] B. Singh and R. K. Goel. *Rock Mass Classification: A Practical Approach*. ELSEVIER, 1999.
- [50] Herbert L. Nichols and David A. Day. *Moving the Earth: The Workbook of Excavation*. McGraw-Hill, New York, 2010.
- [51] John A. Hudson, editor. *Tunneling in Weak Rocks*, volume 5. ELSEVIER, 2006.
- [52] Marcel Hurlimann. Propiedades de la roca matriz.
- [53] Richard E. Goodman. *Introduction to Rock Mechanics*. University of Michigan, 1989.
- [54] A. Metropolitana del Valle de Aburrá. *Microzonificación y Evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá*. Area Metropolitana del Valle de Aburrá, 2007.
- [55] Walter T. Huang. *Petrología*. Centro Regional de Ayuda Técnica, 1967.

- [56] Eulalio Juárez and Alfonso Rico. *Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*, volume Tomo 1. Editorial LIMUSA S.A., 2009.
- [57] *Analysis of Machine Elements: Using SolidWorks Simulation 2009*. Schroff Development Corporation, 2009.
- [58] *Design Handbook: Engineering Guide to Spring Design*. Bristol, Barnes Group, 1987.
- [59] J.O. Bickel, T.R. Kruesel, and E.H. King. *Tunnel Engineering Handbook*. Chapman & Hall, New York, 1996.
- [60] M. Najafi. *Trenchless Technology Piping - Installation and Inspection*. McGraw-Hill, New York, 2008.
- [61] Robert L. Boylestad. *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*. Pearson Educación, 2003.
- [62] M. Cigla and Levent OzdemirL. Computer modeling for improved production of mechanical excavators. *Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME)*, pages 1–12, 2000.
- [63] C. Lopez, E. Lopez, and F. Ayala. *Drilling and Blasting of Rocks*. Taylor and Francis, New York, 1995.
- [64] Takahiro Aoyagi. Representing settlement fot soft ground tunneling. Master’s thesis, Massachusetts Institue of Technology, Mayo 1995.
- [65] E. Leca, Y. Lablais, and K. Kuhnenn. Underground works in soils and soft rock tunneling. *GeoEng 2000*, 2000.
- [66] P. W. Lloyd, Z. Cai, and G Duyvestyn. Microtunneling challenges: Crossing under mayor railroad and highways in very soft glacial soils -the evolution of a ground assessment process. In *North American Tunneling*, pages 771–787, 2010.
- [67] D. C. Mathy and D. R. Nielson. The influence of geologic setting on microtunneling. In *Pipeline Division Conference*, pages 113–122. Piplines in the Constructed Environment, 1998.

- [68] Giovanni Barla and Sebastiano Pelizza. Tbm tunnelling in difficult ground conditions. *GeoEng 2000*, 2000.

# Anexos



# Anexo A

## Clasificación de Suelos y Rocas

### A.1. Consideraciones

Es importante tener en cuenta que este capítulo está dentro de un marco teórico relacionado con las perforaciones y por consiguiente se omiten muchos detalles técnicos sobre las taxonomía y posibles clasificaciones tanto de los suelos como de las rocas. Sin embargo, se presenta como una información altamente relevante ya que permite conocer acerca de las condiciones y el entorno de trabajo del artefacto en diseño [50].

### A.2. Tipos de Suelos

Los suelos resultan una parte fundamental en la construcción de túneles, ya que dependiendo de las características de la región a trabajar, es necesario tener ciertas consideraciones y precauciones con el fin de lograr el acometido.

Se considera como suelo la parte superficial de la corteza terrestre, el cuál está compuesto en su mayoría por partículas de rocas y minerales derivados sin material cementante, pero con ciertas cantidades de aire, agua y material orgánico [48].

Con el objetivo de establecer una clasificación para los suelos, se considera el tamaño de partícula constituyente como punto de referencia, ya que a partir de esta característica se pueden realizar consideraciones generales de sus propiedades fisico-químicas. Dicha

clasificación se realiza a partir de un ensayo de tamizado, en el cual se pretende determinar la proporción en masa que pasa por cada uno de los dos tamices. El tamiz que prácticamente marca el límite de separación entre los dos principales tipos de suelos es de 0.063 mm en Europa y 0.074 mm en Estados Unidos, es decir malla No. 200. La división se da considerando el porcentaje en masa de la muestra que logra pasar a través del tamiz. [56]

Para la clasificación se presentan tres tipos de suelos: granulares, cohesivos y orgánicos; estos últimos son importantes ya que representan una variedad diferente debido a sus propiedades y compuestos. A continuación se presentan los tres suelos principales:

### **A.2.1. Suelos Granulares**

Los suelos granulares son aquellos en la que más de la mitad de su masa son retenidos por la malla No. 200. Este tipo de suelos proviene de la alteración física de las rocas, formando partículas gruesas con formas angulosas o redondeadas. Dichas rocas no poseen una cohesión debido a que el material particulado es muy sólido y sólo es apreciable su resistencia por el rozamiento interno.

Los suelos granulares normalmente se dividen realizando nuevamente ensayos de tamizado pero esta vez con una malla No. 4 (equivalente a 0.5 cm de abertura) como referencia para el tamaño de partícula. Aquellos ensayos en los que más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla, se consideran *gravas*, mientras que aquellos en los que más de la mitad pasa a través de la malla son *arenas* [56].

### **A.2.2. Suelos Cohesivos**

Estos suelos son también llamados suelos de partículas finas, ya que realizando un ensayo de tamizado con una malla No. 200, más de la mitad pasa a través. Dichos suelos están constituidos por minerales arcillosos compuestos por silicatos hidratados de una variedad de metales. En general, presentan una porosidad alta, lo cual permite porcentajes de humedad elevado, lo cual implica grandes variaciones tanto volumétricas como resistivas.

Esos suelos se clasifican en *limos* y *arcillas*, sin embargo, estas están determinadas según su límite líquido, así, aquellas muestras que superen el 50 % del límite líquido [48].

### **A.2.3. Suelos Orgánicos**

Como su nombre lo indica la característica principal de estos suelos es su alto contenido de materia orgánica. Son fácilmente reconocibles debido a su olor, textura fibrosa y contextura esponjosa, además son fácilmente compresibles. Se suelen encontrar en pantanos y lugares con abundante vegetación; suele llamarse turba al suelo orgánico cuando aún se pueden apreciar los componentes vegetales.

## **A.3. Clasificación de las Rocas**

La principal fuente de generación de rocas son las corrientes de lava resultantes de las expulsiones volcánicas provenientes de las capas internas bajo la corteza terrestre, sin embargo es importante considerar los meteoritos que impactan la Tierra, ya que éstos dan origen a rocas con diferentes propiedades tanto físicas como químicas [55].

Según la petrología, la palabra *roca* aplica también para todos los resultantes de una explosión volcánica, es decir, tanto los mantos de arena suelta como las cenizas volcánicas deben ser considerados como partes de la corteza terrestre [55].

Con el firme propósito de conocer más acerca de los orígenes y la evolución de la Tierra, los geólogos toman en consideración a las rocas como fuentes directas de información, ya que sus propiedades fisico-químicas dejan en evidencia sucesos de millones de años. Precisamente a raíz de las observaciones realizadas a lo largo de la historia, los geólogos se han visto en la necesidad de clasificar las rocas terrestres según su origen; dicha división genera tres grandes grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas; la clasificación presentada está basada en *Petrología, de Water Huang* [55].

### A.3.1. Rocas Ígneas

Las rocas ígneas se forman como consecuencia del enfriamiento y posterior cristalización de la llamada lava o *magma*, la cual se encuentra en las capas internas de la corteza terrestre y llega a la superficie por medio de las grietas o aberturas volcánicas. Dicha lava es inicialmente una masa caliente sujeta a muy altas presiones y temperaturas, las cuales son liberadas por medio de movimientos y las erupciones volcánicas, liberando así la presión interna. Las rocas formadas por este proceso reciben el nombre de rocas volcánicas.

Sin embargo, no toda la lava existente en las capas internas alcanza la superficie, ya que una vez liberada la presión, se almacenan residuos de magma en las profundidades terrestres. Estos residuos se cristalizan lentamente y dan origen a las llamadas *rocas intrusivas* o rocas plutónicas (reciben este nombre debido a Plutón, divinidad de las regiones infernales), las cuales aparecen expuestas como consecuencia del movimiento de las rocas superficiales, la erosión y los agrietamientos.

A continuación se presentan las tres subdivisiones más importantes: las volcánicas, las plutónicas y las filonianas.

**Volcánicas:** Su proceso de cristalización se realiza en la superficie terrestre. El tamaño de grano es pequeño debido a la rápida solidificación de la lava considerando las temperaturas, humedades y presiones de la superficie, lo que repercute en los tiempos cortos de crecimiento del grano. Según su composición química y mineralógica se clasifican en traquitas, andesitas, riolitas y basaltos.

**Plutónicas:** El tamaño de grano es relativamente grande en comparación con las demás rocas ígneas. Esto se debe a los extensos tiempos de cristalización, los cuales permiten mayor crecimiento en los granos. Dentro de la subdivisión, la más destacada son los granitos, los cuales están formados por cuarzos, mica y feldespato. Sus principales aplicaciones han sido las esculturas y las construcciones.

**Filonianas:** Son las rocas que se forman dentro de las grietas generadas por los movi-

mientos tectónicos. El tamaño de grano es intermedio entre las volcánicas y las plutónicas. El grupo más significativo es el de las pagmatitas, dentro de la que se destacan el cuarzo y el feldespato. Se emplean en la elaboración de vidrios y cerámicas.

En la Tabla A.1 presentada a continuación evidencia las principales propiedades de cada división.

Tabla A.1: Rocas Ígneas

Tipo de Roca	Clase	Descripción
Ígneas	Plutónicas	Granito
		Sienita
		Diorita
		Gabro
		Peridotita
	Volcánicas	Riolita
		Traquita
		Andesita
	Filonianas	Basalto
		Pórfido
		Pegmatita

### A.3.2. Rocas Sedimentarias

Las rocas sedimentarias, como su nombre lo indica, se forman a partir de acumulación y asentamiento de sedimentos que con el tiempo se consolidan como rocas duras. En su mayoría, dichas rocas están compuestas por minerales resistentes, fragmentos de otras rocas y restos descompuestos de seres vivos, los cuales son productos de procesos químicos.

En específico, el proceso de solidificación a rocas, toma el nombre de diagénesis, litificación o cementación [55]. La consolidación de todos los componentes en forma de roca, se puede producir en la superficie o debajo de ésta y por consiguiente, los resultados

pueden variar debido a las presiones y temperaturas relativamente bajas en comparación con las presentes en el proceso de formación de las rocas plutónicas. Es importante considerar a factores como el agua, el viento y los movimientos rocosos como principales formadores de este tipo de rocas, ya que se encargan de transportar los elementos constituyentes y en alterar los órdenes en las capas a formar.

La acumulación de sedimentos tiende a ser mayor en las cuencas y da origen a capas sucesivas que pueden alcanzar millares de metros de profundidad. Los estudios estratigráficos permiten conocer las características de las diferentes capas y por consiguiente, conocer los procesos geológicos y climatológicos que han sucedido en determinadas áreas.

La clasificación más general de las rocas sedimentarias está fundamentada en los elementos constitutivos de las mismas, así, existen tres tipos fundamentales: las clásticas, biológicas y químicas, presentadas en la Tabla A.2 [49]. Como producto de las diversas características fisico-químicas de las rocas sedimentarias, es posible encontrar una subdivisión muy extensa, sin embargo aproximadamente el 90 % del volumen total está compuesto por tres rocas específicas: la pizarra blanda, la arenisca y la caliza.

***Clásticas:*** Están hechas a partir de fracciones de rocas pre-existentes. Generalmente se encuentran en cuencas y depresiones, ya que por diversos fenómenos la rocas son llevadas hasta allí para posteriormente ser cubiertas por sedimento. Estas rocas puede tener tamaños de grano muy variables, desde arcilla hasta piedra.

***Biológicas:*** Se forman por acumulación de restos de seres vivos. Normalmente son plantas ricas en carbono y cubiertas de animales.

***Químicas:*** Son rocas formadas por precipitaciones químicas. Este proceso ocurre cuando se disuelven minerales en aguas que fluyen a través de las formaciones rocosas; estos minerales son depositados en otros lugares como consecuencia de la evaporación de las aguas o cuando hay sobre-saturación.

Tabla A.2: Rocas Sedimentarias

<b>Tipo de Roca</b>	<b>Clase</b>	<b>Descripción</b>
<b>Sedimentarias</b>	Clásticas	Caliza
		Dolomita
		Arenisca
	Biológicas	Carbón
		Xilita
		Diatomita
	Químicas	Yeso
		Halita

### A.3.3. Rocas Metamórficas

Existe un tipo de rocas que han sufrido procesos de transformación tanto de sus componentes como de su estructura; éstas son llamadas rocas metamórficas. Es posible entonces afirmar que este tipo de rocas se forma a partir de las rocas ígneas y sedimentarias que son sometidas a condiciones ambientales y fisico-químicas determinadas. Los cambios más importantes en las rocas metamórficas son la estructura interna y el carácter mineralógico y es a partir de ésto que se pueden diferenciar del resto.

Las principales causas de cambios morfológicos en las rocas son la temperatura, la presión y los fluidos activos químicamente. Al aumentar la profundidad en la corteza terrestre, las temperaturas aumentan también y más aún si se está cerca de una zona con actividad ígnea, generando así cambios drásticos en la estructura interna de las rocas. Es posible también alcanzar temperaturas considerables cuando existen movimientos entre capas, ya que la fricción involucrada eleva la temperatura. Las presiones son generadas debido a las cargas que ejercen las capas superiores, causando deformaciones, compresiones y fracturas. Por otra parte, el fluido activo más importante es el agua, sumada al bióxido de carbono, los ácidos y demás emanaciones de fuentes volcánicas, actúan como catalizadores o disolventes, facilitando reacciones químicas y cambios estructurales en las rocas.

Las rocas metamórficas se pueden clasificar por sus componentes mineralógicos o por su estructura, sin embargo la más usual es la subdivisión en foliadas y no foliadas [55]; se puede observar en la Tabla A.3

**Foliadas:** Son aquellas en las que las presiones aplicadas por las cargas de las capas superiores, generan láminas de minerales y materiales constitutivos, por lo cual tienden a fracturarse rápidamente en la dirección de las láminas.

**No foliadas:** Éstas no poseen estructura laminar. Las rocas no foliadas se pueden generar de diversas maneras, pero la más común es la metamorfosis de rocas compuestas por materiales no elongables, es decir, que por sus características físicas y estructurales no permiten adaptarse a una forma lineal perpendicular a la dirección de la presión aplicada. Otro tipo, es el metamorfismo por contacto, en el cual una roca ígnea caliente se introduce en otra roca pre-existente, causando un calentamiento al resto de la roca y por consiguiente a la estructura misma sin necesidad de ejercer algún tipo de presión.

Tabla A.3: Rocas Metamórficas

Tipo de Roca	Clase	Descripción
Metamórficas	Foliadas	Gneis
		Esquisto
		Anfibolita
	No Foliadas	Pizarra
		Cuarcita
		Eclogita
	Mármol	

#### A.3.4. Propiedades de las Rocas

Las propiedades principales a tener en cuenta para la elaboración de una excavación o una perforación son: la dureza, la densidad y abrasividad [63].

## Dureza

La dureza depende del grado de alteración y de la composición mineralógica de la roca. Para realizar las medidas se pueden utilizar dos aparatos: el martillo de Schmidt o la indentación por cono. Para este caso se considera la Escala de Mohs, presentada en la Tabla A.4, como referencia para los índices de dureza [52].

Tabla A.4: índice de dureza según la escala de Mohs

<b>Mineral o Roca</b>	<b>Índice de Dureza</b>
Diamante	10.0
Cuarzo	7.0
Basalto	7.0
Sílex	6.5
Feldespatos	6.2
Gneis	5.2
Esquisto	5.0
Dolomita	3.7
Caliza	3.3
Pizarra	3.1
Calcita	3.0
Antracita	3.0
Mármol	3.0
Carbón	2.5
Mica	2.3
Yeso	2.0
Talco	1.0

## Densidad

Los datos contenidos en la Tabla A.5 [53] son a partir de densidades de las rocas secas.

Tabla A.5: Densidad seca de varias rocas

<b>Mineral o Roca</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Carbón	0.7-2.0
Pizarra	1.6-2.7
Yeso	2.3
Riolita	2.37
Sienita	2.6
Granito	2.65
Caliza	2.7
Mármol	2.75
Basalto	2.77
Esquisto	2.82
Diorita	2.85
Anfibolita	2.99
Gabro	3.0

## Abrasividad

La abrasividad se mide utilizando el Ensayo de Cerchar, a partir del cuál se genera el índice de Cerchar. Es una propiedad muy útil para conocer el coste de la perforación de un túnel en roca utilizando medios mecánicos. En la Tabla A.6 se presentan los rangos de y la clasificación de algunos tipos de roca y suelos [14].

## Resistencia a la Compresión

En la Tabla A.7 se muestran los rangos de rocas y suelos según su resistencia a la compresión. En la Tabla A.8 tales se muestra los valores de algunos tipos de roca [14].

Tabla A.6: Abrasividad según el índice de Cerchar

<b>Mineral o Roca</b>	<b>Índice de Cerchar</b>	<b>Clasificación</b>
Gneis, pegmatita, granito	>4.5	Extremadamente abrasiva
Anfibolita, granito	4.25-4.5	Altamente abrasiva
Granito, esquistos, piroxenita	4.0-4.25	Abrasiva
Arenisca	3.5-4.0	Abrasividad media
Granito californiano, dolerita	2.5-3.5	Poco abrasiva
Arenisca Portland	1.5-2.5	Muy poco abrasiva
Caliza	<1.2	-

Tabla A.7: Resistencia a la Compresión

<b>Resistencia a la Compresión</b>		
	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
		MPa
<b>Rocas</b>	Roca Extremadamente Resistente	200 y >
	Roca Muy Resistente	100-200
	Roca Resistente	50-100
	Roca Moderadamente Resistente	12.5-50
	Roca Moderadamente Débil	5-12.5
	Roca Débil	1.25-5
	Roca Muy Débil	0.6-1.25
<b>Suelos</b>	Duro (cementado)	0.15-0.6
	Firme (compacto)	0.08-0.15
	Blando (suelto)	0.04-0.08
	Muy Blando (muy suelto)	<0.04

Tabla A.8: Resistencia a la Compresión en tipos de roca

<b>Tipos de Rocas</b>	<b>Resistencia a la Compresión (MPa)</b>
Arenisca	30-180
Bauxita	2-140
Calcarenita	30-150
Caliza Cristalina	70-150
Caliza detrítica	50-200
Carbón bituminoso	8-45
Filita	30-100
Laterita	1-40
Lignito	3-35
Lutita	10-75
Mármol	5-75
Pizarra arenosa	20-100
Yeso	20-60

## Anexo B

# Suelos y Rocas en el Valle de Aburrá

Con el propósito de ubicar el diseño de este artefacto dentro de una región, se presenta un breve recuento de la composición de los suelos en el Valle de Aburrá, Antioquia. En este se incluyen los siguientes municipios de sur a norte: Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa. Este estudio es tomado de *Microzonificación y Evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá, Diciembre de 2007*. [54]

**Caldas:** Se caracteriza por tener un relieve montañoso con unidades de origen metamórfico, ígneo tanto volcánico como plutónico y además, depósitos aluviales tanto recientes como antiguos. Las principales aflorantes corresponden a: anfibolitas del Alto de Minas, Anfibolitas Granatíferas del Caldas y Esquistos de Caldas. Las unidades principales son: rocas sedimentarias sobre graníticas; metasedimentos conformados por esquistos silíceos negros, filitas grafitosas y cuarcitas de grano fino; ígneas: pertenecen a un grupo de rocas verdes debido a la alta cloritización de rocas basálticas.

**La Estrella:** Es básicamente un complejo montañoso con pendientes fuertes y vertientes suaves. Compuesto por Esquistos de Caldas, rocas ultramáficas asociadas a gabros, lavas básicas y periodotitas.

**Sabaneta:** Está limitado en gran parte por una cuenca hidrográfica. Compuesto por Esquistos de Cajamarca, migmatitas del Puente Peláez y los depósitos de vertiente y aluviales.

**Envigado:** Relieve variado, compuesto por ladera y altiplano. Las rocas metamórficas están representadas por los Esquistos de Cajamarca altamente grafitosos; además están presentes anfibolitas de Medellín, migmatitas del Puente Peláez y gneises miloníticos y esquistos con intercalaciones de anfibolitas.

**Itagüí:** Está conformado por una secuencia de depósitos de vertiente y depósitos aluviales, que reposan sobre rocas graníticas.

**Medellín:** Debido a su extensión, está constituido por todas las secciones del valle. Está compuesto por rocas metamórficas, Esquistos de Cajamarca, Anfibolitas de Medellín, Gneises miloníticos, además de migmatitas de Puente Peláez. Dentro de las rocas ígneas se encuentran las rocas verdes producto de la cloritización de rocas basálticas. Las volcanosedimentarias relevantes son los silíceos negros, filitas grafitosas y cuarcitas de grano fino. Los depósitos corresponden a depósitos de talud, secuencias de flujos de escombros, lodos y aluviales.

**Bello:** Es un relieve de altiplano limitado por un gran escarpe hacia el valle de Aburrá. Contiene una sección de los componentes del municipio de Medellín: anfibolitas, esquistos anfibólicos, rocas basálticas. Los depósitos son aluviales y presentan flujos de escombros y lodos.

**Copacabana:** Es un valle mucho más estrecho que el de la zona central. El grupo de rocas metamórficas está compuesto por esquistos silíceos negros, filitas grafitosas y cuarcitas de grano fino, gneises miloníticos y anfibolitas de Medellín. Dentro del grupo ígneo están los batolitos y los gabros. Sus depósitos son aluviales y de vertiente.

**Girardota:** Presenta un relieve montañoso de vertientes largas. Las rocas metamórficas más representativas son los esquistos de Cajamarca y las Anfibolitas de Medellín. Sus

depósitos son tanto de vertiente como aluviales.

**Barbosa:** Está conformado por un respaldo montañoso de vertientes largas. Su composición es idéntica a la del municipio de Girardota, agregándole batolitos.



Medellín, ... de ... de 2011

Señores

UNIVERSIDAD EAFIT

Medellín

Estimados señores:

Con el fin de optar por el título de *ingeniero físico* he presentado a la Universidad EAFIT el trabajo de grado titulado *Diseño conceptual de un robot para la elaboración de conductos subterráneos de pequeña escala*.

Por medio de este escrito autorizo en forma gratuita y por tiempo indefinido a la Universidad para situar en la Biblioteca un ejemplar del trabajo con el fin de que este sea consultado por el público.

Igualmente autorizo en forma gratuita y por tiempo indefinido, a publicar en forma electrónica o divulgar por medio electrónico el texto del trabajo con el fin de que este pueda ser consultado por el público.

Toda persona que consulte ya sea la biblioteca o en medio electrónico podrá copiar apartes del texto citando siempre la fuente, es decir el título del trabajo y el autor.

Esta autorización no implica renuncia a la facultad que tengo de publicar total o parcialmente la obra.

La Universidad no será responsable de ninguna reclamación que pudiere surgir de terceros que invoquen autoría de la obra que presento.

Atentamente,

Nombre Juan Manuel López Restrepo

Firma \_\_\_\_\_

Documento de identidad CC 1053806810

Dirección Calle 1 A Sur # 43A-206, Medellín

Teléfono 268 32 72