

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA

Estudios con Reconocimiento de Validez Oficial por
Decreto Presidencial del 3 de abril de 1981



“EVALUACION DEL COSTO DE LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD APLICADO A LA CONSTRUCCION DE TUNELES”

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería con especialidad en la Administración de la Construcción

Presenta:

José Antonio García Escoto

Director: Mtro. Víctor Antonio López Rodríguez

Lectores: Dr. Manuel del Moral Dávila

Mtro. Sergio Macuil Robles

INTRODUCCION

En la construcción de túneles, las empresas diseñadoras y fabricantes de equipo especializado en máquinas tuneladoras en conjunto con las constructoras especializadas, han venido implementando avances tecnológicos en los últimos años, los cuales han permitido alcanzar mucho mayores rendimientos de excavación. Los procesos de excavación aprovechando la tecnología, se han industrializado a tal grado que también se han reducido considerablemente las plantillas de personal encargadas de la ejecución de estos trabajos.

Por otro lado, la evolución tecnológica permite dar seguimiento a los procesos de excavación de los túneles en tiempo real, desde la oficina de campo ubicada en superficie. Se tienen diversos avances siendo solo algunos de estos los siguientes: cámaras donde se observa el material excavado, ubicación topográfica mediante rayo láser y programación automática del desplazamiento de la máquina tuneladora, sensores que registran y programan los parámetros de empuje de los gatos que desplazan las maquinas tuneladoras.

Estos son solo algunos de los avances que han tenido las máquinas tipo TBM (Tunnel Boring Machine), los cuales se siguen depurando y mejorando de manera sostenida por las empresas fabricantes de estos equipos.

Todos estos avances se tuvieron con las máquinas TBM's usadas en la excavación de los 62 kilómetros del Túnel Emisor Oriente ejecutado en nuestro país del 2009 al 2019 para el desalojo de las aguas combinadas del valle de México, y en la excavación de los túneles paralelos que forman parte del sistema de ferroviario que enlaza a la ciudad de Toluca con la Ciudad de México, el cual está por entrar en operación a finales del 2023.

Sin embargo, en estos y en otros proyectos de túneles a nivel mundial la aplicación de la tecnología ha quedado rezagada en lo que respecta a la seguridad de los trabajadores, ya que aun cuando existe documentación que presenta algunos proyectos en diversos países en los que se ha implementado tecnología a base de sensores y de equipos de comunicación, encaminados a mejorar la seguridad de los trabajadores dentro del proceso de la excavación

de túneles, no contemplan un sistema integral de seguridad, que conjunte diversas vertientes encaminadas a reducir la presencia de accidentes dentro de estos trabajos.

El objetivo de este trabajo parte de la siguiente hipótesis: la implementación de un sistema integral de seguridad en la excavación de túneles apoyado en la tecnología de punta existente, basándose en el monitoreo e interacción del personal, el cual sea capaz de detectar eventos/zonas de riesgo en tiempo real y que permitan tomar acciones inmediatas para eliminar o mitigar el riesgo de presencia de incidentes, establecerá un alto impacto positivo en los pilares de la dirección de proyectos de construcción de túneles (costo, tiempo y calidad).

En primer lugar, se presenta el estado del arte de algunas áreas específicas en la que la tecnología ha intervenido en aspectos relacionados a la seguridad en los túneles. Cabe señalar que muchas de las experiencias más recientes se han reportado en China, ya que es el país que ha excavado la mayor cantidad de túneles en los últimos años, por lo que se ha colocado a la vanguardia dentro de la construcción de túneles.

En el segundo capítulo referente a los antecedentes, presentamos la gran cantidad de riesgos que pueden presentarse durante la ejecución de un proyecto relacionado a la excavación de túneles y por qué se hace necesario girar nuestra atención para reducir la incidencia de estos.

En el tercer capítulo se exponen las ventajas que se pueden obtener al incorporar la implementación de la tecnología en un sistema integral de seguridad dentro de la excavación de túneles. Ahí se aborda el efecto económico que se genera como consecuencia de la presencia de accidentes durante la ejecución de procesos en la excavación de túneles. Así mismo, se expone la mejoría de la percepción de la sociedad y de la misma base del personal al mejorar las condiciones de seguridad en el trabajo.

También se expone la mejoría en la productividad, como resultado de la baja en la presencia de incidentes, y por último la ventaja que representa la implementación de un mejor sistema de seguridad para dar cumplimiento con las obligaciones que tienen las empresas ante las autoridades tales como la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS).

En el capítulo cuarto se evalúa el impacto económico que representan los incidentes y/o accidentes dentro de excavación de los túneles. Se analiza como

la presencia de riesgos incrementa el costo del proyecto ante el aumento del pago de la prima de seguro al Instituto Mexicano del Seguro Social. También se hace un análisis del costo que genera la suspensión de actividades, al tener el personal y el equipo inactivo y en espera de la reanudación de operaciones.

En el capítulo quinto se ahonda sobre los riesgos que se presentan en la construcción de túneles, sobre su tratamiento y la posible mitigación para dar curso a las actividades que son objeto de estudio y de ser tomados en cuenta dentro de los conceptos que deben considerarse para ser incorporados en un sistema integral de seguridad en túneles apoyado en tecnología de punta.

Dentro del capítulo sexto se hace referencia a las diferentes tecnologías que es necesario amalgamar para desarrollar un sistema integral de seguridad en los túneles. Se presentan las bases del internet de las cosas (IoT), su relevancia y su incorporación al sistema. También se toca el tema de las redes de comunicación necesarias para interconectar los sensores y los diferentes dispositivos necesarios para implementar el sistema. Adicionalmente se presentan la utilización del sistema de cámaras y de generación de tickets, así como la presentación en un centro de monitoreo en la superficie.

Por último y previo a las conclusiones, en el capítulo siete, se realiza una evaluación aproximada del costo que representa el desarrollar e implementar dentro de un proyecto de un túnel de aproximadamente 4000 metros, el sistema de seguridad que estamos proponiendo.

Cabe señalar que para efectuar este trabajo se ha tenido que solicitar el apoyo de diversos especialistas de las diferentes áreas de tecnología que intervienen y que es necesario amalgamar o realizar su orquestación como se menciona en el argot de los desarrolladores tecnológicos.

Este documento representa la conjunción de una amplia experiencia en la construcción de túneles con máquinas tuneladoras tipo TBM, enfocándose específicamente en el área de la seguridad y la búsqueda de la aplicación de nuevas fuentes de tecnología, todo, con el propósito de desarrollar un sistema de seguridad integral que pueda ponerse a corto plazo en la práctica dentro de proyectos futuros de excavación de túneles.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a los docentes y directivos de la Universidad Iberoamericana por haberme dado la oportunidad de cursar esta Maestría después de tantos años de estar ausente de las aulas.

También mi agradecimiento sincero a los profesores de esta Maestría por su generosidad en haber compartido su experiencia y conocimientos, siendo estos los conceptos más valiosos que uno puede recibir.

Agradezco la oportunidad de haber recibido el apoyo contundente en la dirección de este trabajo, por parte del Mtro. Víctor Antonio López Rodríguez, comprometido profundamente con la enseñanza dentro de esta Universidad Iberoamericana.

Mención especial merece mi agradecimiento al Dr. Manuel del Moral Dávila, quién durante el curso de la materia Seminario de Investigación fue un guía exigente y necesario para seleccionar el tema de este trabajo, e iniciar con su elaboración.

Al Mtro. Sergio Macuil Robles le agradezco sus observaciones sobre la presentación de este trabajo y por sus palabras de apoyo.

Un agradecimiento de todo corazón para mi hermano Arturo, mi gran amigo de toda la vida, por haberme compartido sus conocimientos sobre tecnología, necesarios para el desarrollo de este trabajo.

Tabla de contenido

1. INNOVACIONES TECNOLOGICAS APLICADAS EN TUNELES	12
1.1 SEGURIDAD EN TÚNELES DEDICADOS AL TRANSPORTE.....	13
1.2 MONITOREO DE LA SEGURIDAD DEL TUNEL, DESDE EL PUNTO DE VISTA ESTRUCTURAL.....	14
1.3 UTILIZACIÓN DE ROBOTS.....	16
1.4 UTILIZACIÓN EN LOS PROCESOS DE EXCAVACIÓN.....	17
1.5 MONITOREO EN MINAS DE LOS GASES QUE PUEDAN AFECTAR A LA SEGURIDAD Y A LA SALUD DEL PERSONAL	18
2. ANTECEDENTES.....	20
3. VENTAJAS DE LA IMPLEMENTACION TECNOLOGICA EN SEGURIDAD	24
3.1 IMAGEN DE LA EMPRESA	25
3.2 PRODUCTIVIDAD.....	26
3.3 INTEGRACIÓN A ISO 45001	28
4. IMPACTO ECONÓMICO DE INCIDENTES DENTRO DEL PROYECTO.....	29
4.1 IMPACTO EN EL COSTO POR LAS PRIMAS DE RIESGO.....	29
4.1.1 Prima de riesgo	29
4.1.2 Costo de mano de obra y prima de riesgo	31
4.2 COSTO EN MANO DE OBRA Y EQUIPO POR SUSPENSIÓN DE ACTIVIDADES.....	34
5. EVALUACIÓN DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL.....	37
5.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS	37
5.2 TRATAMIENTO DE RIESGOS	39
5.3 RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.....	41
6. TECNOLOGÍAS POR UTILIZAR EN EL SISTEMA DE SEGURIDAD PROPUESTO	43
6.1 PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	43
6.2 TECNOLOGÍA DE SENSORES IoT	46
6.2.1 Sensores	47
6.2.2 Actuadores	49

6.2.3 Integración de dispositivos IoT a plataforma de monitoreo.....	50
6.3 AMAZON WEB SERVICES	51
6.4 TECNOLOGÍA EN LA RED DE COMUNICACIÓN.....	52
6.4.1 Conceptos, componentes y terminología de una red	53
6.4.2 Características de la red dentro del túnel.....	54
6.4.3 Capacidad de la red a considerar	55
6.4.4 Seguridad de la red	57
6.5 SISTEMA DE CCTV POR IP	59
6.6 SISTEMA DE TICKETS	61
7. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	66
7.1 SENSORES IoT.....	66
7.2 SISTEMA CCTV.....	68
7.3 RED WiFi	69
7.4 AWS / DASHBOARD /TICKET SYSTEM	71
7.5 RESUMEN DE COSTOS.....	73
8. CONCLUSIONES.....	75
9. REFERENCIAS	79
ANEXO 1. COSTO DE CUADRILLAS DE EXCAVACIÓN EN TÚNEL CON TBM.....	82
ANEXO 2. COSTO DE CUADRILLAS DE MAQUINARÍA EN PROCESO DE EXCAVACIÓN EN TÚNEL CON TBM.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.

Tecnologías aplicadas en la construcción de túneles. Diseño de figura de creación propia.

Figura 2.

Accidentes más comunes en la construcción de un túnel, Figura de creación propia. Iconos de imágenes varias obtenidos de internet.

Figura 3.

Repercusión de los accidentes en la construcción de túneles. Figura de creación propia

Figura 4.

Variación del costo de mano de obra versus prima de riesgo. Figura de creación propia.

Figura 5.

Tratamiento de riesgos. Figura de creación propia utilizando templates de gráficos comprados a Infographics (Brain Google slides + Funnel Google Slides)

Figura 6.

Ejemplo de “Dashboard” que involucra la visualización del monitoreo. Figura de creación propia utilizando templates de gráficos comprados a Infographics (Dashboard Google slides)

Figura 7.

Ejemplo de “Dashboard” de estatus de tickets de mantenimiento. Figura de creación propia utilizando templates de gráficos comprados a Infographics (Dashboard Google slides)

Figura 8.

Ejemplo de Interfaz de la aplicación de tickets en el teléfono celular. Figura de creación propia utilizando templates de gráficos comprados a Infographics (Technology Google slides).

Figura 9.

Diagrama de sensores a instalar. Figura de creación propia.

Figura 10.

Ejemplo básico de arquitectura de 4 etapas de IoT. Figura de creación propia.

Figura 11.

Topología de Red del Sistema de Seguridad de un túnel. Figura de creación propia combinando templates de gráficos comprados a Infographics (Infographic icons, Dashboard Google slides).

Figura 12.

Diversidad de sistemas presentes en la construcción de un túnel. Figura de creación propia utilizando templates de gráficos comprados a Infographics (Mind Map Google slides).

Figura 13.

Menú de navegación en aplicación (App) móvil. Figura de creación propia.

Figura 14.

Funciones básicas del sistema de tickets. Figura de creación propia.

Figura 15.

Diagrama resumido de implementación en campo. Figura de creación propia combinando templates de gráficos comprados a Infographics (Infographic icons, Dashboard Google slides), Iconos de AWS de la publicidad de internet e iconos de cámaras de reconocimiento facial obtenidos de Internet.

Figura 16.

Diagrama resumido de una estación de acceso de señal WiFi. Figura de creación propia.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.

Áreas de aplicación de la tecnología dentro de los túneles. Tabla de creación propia.

Tabla 2.

Primas medias de riesgo. Artículo 73 de la Ley del Seguro Social. Tabla de creación propia.

Tabla 3.

Desglose de costos del proyecto versus mano de obra. Tabla de creación propia.

Tabla 5.

Impacto del costo de mano de obra al incrementarse el factor de salario real. Tabla de creación propia.

Tabla 6.

Relación de FSR versus Costo Mano de Obra. Tabla de creación propia.

Tabla 7.

Costo de Cuadrillas de excavación en túnel con TBM. Tabla de creación propia.

Tabla 8.

Costo de cuadrillas de maquinaria en proceso de excavación en túnel con TBM. Tabla de creación propia.

Tabla 9.

Suma de costos de cuadrilla de personal y maquinaria. Tabla de creación propia.

Tabla 10.

Impacto de un evento. Ver referencia [16]

Tabla 11.

Probabilidad de ocurrencia de un evento. Ver referencia [16]

Tabla 12.

Matriz de evaluación de riesgo. Ver referencia [16]

Tabla 13.

Evaluación de riesgos y tratamiento en la construcción de túneles. Tabla de creación propia.

Tabla 14.

Costos de equipamiento de dispositivos IoT y gastos asociados. Tabla de creación propia.

Tabla 15.

Costos de equipamiento de sistema CCTV. Tabla de creación propia.

Tabla 16.

Costos de equipamiento e implementación de red Wifi. Tabla de creación propia.

Tabla 17.

Costos de equipamiento necesario para los paneles de visualización (“dashboard”). Tabla de creación propia.

Tabla 18.

Costo anual de los servicios de AWS. Tabla de creación propia.

Tabla 19.

Resumen de costos totales (USD) del sistema de seguridad. Tabla de creación propia.

1. INNOVACIONES TECNOLOGICAS APLICADAS EN TUNELES

La tecnología está avanzando cada vez más rápido y extendiendo su aplicación en diversas áreas. En forma específica la tecnología del internet de las cosas (IoT), redes inalámbricas / alámbricas, redes de telefonía 5G celular, robótica e inteligencia artificial, vienen impactando a la sociedad y a la industria. Estas tendencias se puede apreciar en desarrollo de edificios inteligentes, hogares inteligentes, ciudades inteligentes, transporte inteligente, en sistemas ambientales, en medicina digital y en muchos otros campos[1]

En cuanto a la aplicación de tecnología avanzada relacionada a los túneles existe una gran cantidad de artículos asociados a la aplicación tecnológica en el área de túneles, los cuales han sido presentados en diversos congresos de la ITA (International Tunnel and Underground Space Association) [2], y en algunas publicaciones de Tunnels and Tunneling International [3]. Existen diversas áreas de aplicación siendo algunas de ellas las expuestas en la siguiente tabla:

Tecnología en túneles	Uso	Aplicada en
Seguridad ante incendios y gases	Aplicado en túneles en operación para el transporte vehicular y trenes	Túneles terminados
Monitoreo de desplazamiento estructural	Aplicado en túneles para verificar su estabilidad estructural ante la presencia de construcciones de infraestructura en zonas aledañas	Túneles terminados y en construcción
Robots en actividades de alto riesgo	Aplicado durante la excavación de túneles en actividades de alto riesgo para el personal, ejemplo: cambio de herramientas de corte en el frente de excavación de las TBM's.	Túneles y minas en excavación

Tecnología en túneles	Uso	Aplicada en
Control de parámetros en equipos en procesos de excavación	Levantamiento, registro y análisis de los parámetros de operación de los distintos equipos empleados dentro de la excavación del túnel	Túneles y minas en excavación
Monitoreo de gases	Monitoreo de gases emanados por el subsuelo y de equipos de combustión durante la etapa de excavación de túneles y minas	Túneles y minas en excavación

Tabla 1. Áreas de aplicación de la tecnología dentro de los túneles

1.1 SEGURIDAD EN TÚNELES DEDICADOS AL TRANSPORTE.

En lo que se refiere a seguridad en túneles dedicados al sistema de transporte (ferrocarril o carretero) existen una gran cantidad incendios reportados en túneles teniendo presencia de gases, los cuales han tenido consecuencias fatales. Entre los más recientes y relevantes se encuentran [4]:

- En el 2003 en el túnel Daegu Subway ubicado en Corea del Sur (inaugurado en 1998) con 25 km de longitud y un reporte de 130 personas fallecidas.
- En 2001 en el túnel San Gotardo ubicado en Suiza (inaugurado en 1980) y con 11 fallecimientos.
- En 2000 el túnel Kitzsteinhorn Funicular ubicado en Austria (inaugurado en 1974) con 155 fallecimientos.
- En 1999 el túnel Mont Blanc Road ubicado entre Francia e Italia (inaugurado en 1965) con 39 fallecimientos.

- En 1999 el túnel Tauern Road ubicado en Austria (inaugurado en 1975) y con 49 fallecimientos.

Lo anterior ha obligado a las autoridades, enfocadas al transporte relacionadas con túneles, a realizar mayores inversiones en los aspectos de seguridad para tratar de mitigar los desastres y buscar que el nivel de riesgo, siempre presente, sea aceptable.

Entre los sistemas propuestos para mejorar la seguridad se han implementado métodos que hacen uso de tecnología como el “Internet de las cosas” (IoT) y la de sistemas más avanzados en redes de comunicación. El objetivo es reducir y/o evitar los desastres originados por incendios y acumulación de gases nocivos [5]

Estos sistemas de seguridad realizan el monitoreo de diversos aspectos dentro de los túneles, tales como temperatura, presencia de gases nocivos, etc. Para tal efecto, se lleva a cabo la implementación e instalación de sensores para hacer el registro, análisis y monitoreo, a través de redes de comunicación capaces de enviar la información a repositorios de datos para su procesamiento. Esto permite presentar, en caso de ser necesario, las respuestas en forma oportuna a base de rociadores de agua o de polvos químicos [6].

1.2 MONITOREO DE LA SEGURIDAD DEL TUNEL, DESDE EL PUNTO DE VISTA ESTRUCTURAL

Alrededor de los túneles construidos en ciudades, existen diversas construcciones que pueden afectar su comportamiento estructural. La afectación puede ser llevada a cabo ya estando en operación estos túneles, por lo que es necesario llevar un monitoreo constante de las condiciones de estabilidad y revestimiento de los túneles.

No solo se refiere a la construcción de obras de infraestructura, ya que también se debe revisar situaciones como la presencia sísmica, la degradación del concreto en túneles de drenaje por la presencia de gases y también pueden incidir variaciones en los niveles piezométricos dentro del subsuelo.

Todo lo anterior puede poner en riesgo la estabilidad estructural de un túnel, por lo que es necesario revisar continuamente su estabilidad para evitar un colapso el cual puede ser catastrófico en caso de falla en una ciudad.

“El fatídico derrumbe del suelo en el Barrio del Carmel (Barcelona) en enero del 2005 debido a la ampliación del TMB marcó un punto de inflexión en la ejecución de las infraestructuras públicas”[7]

Con el propósito de verificar y dar seguimiento a la seguridad estructural de los túneles construidos en la ciudad de Barcelona principalmente en la zona centro, se presenta en el 2020 una propuesta para instalar un sistema de monitoreo con la utilización de sensores y fibra óptica para reproducir el comportamiento de túneles en tiempo real. Los sensores conceptualizados para este proyecto son capaces de registrar con precisión las deformaciones en túnel y cotejarlo con el modelo teórico para verificar deformaciones, con las cuales se puede considerar la tendencia y realizar la toma de acciones de manera oportuna.[7]

Cabe mencionar que en el Túnel Emisor Oriente construido en México del 2009 al 2019, se tenía contemplado la instalación de sistemas de monitoreo de las condiciones de esfuerzo y deformación en la estructura del túnel dentro del revestimiento definitivo. Inclusive se dejaron algunas preparaciones para realizar los cableados y la instalación de los sensores, sin embargo, debido al costo que representaba la instalación de los sensores, el cableado, así como el equipo de monitoreo, se tomó la decisión de cancelarlo por parte de las autoridades competentes.

1.3 UTILIZACIÓN DE ROBOTS.

En la construcción de túneles excavados con TBM en presencia de suelos inestables y con presencia de niveles piezométricos considerables, es necesario presurizar el frente de excavación para realizar el cambio de las herramientas de corte en la cabeza frontal.

Esto obliga a que personal especializado (buzos en aire comprimido) tenga que entrar a trabajar en presiones de varias atmosferas (la cual puede ser variable en función de las características piezométricas y las características del estrato del suelo en excavación) y realizar el cambio de los discos de corte los cuales pueden pesar más de 100 kg.

Además del inconveniente de la presurización, hay que considerar que los espacios en el frente de excavación son muy restringidos para maniobrar (catalogado como “trabajos en áreas confinadas”, de acuerdo con la definición de la Secretaria del Trabajo y Previsión Social), por lo que el cambio de herramientas de corte de la cabeza frontal se vuelve una operación lenta, complicada y riesgosa. Adicionalmente en caso de que sean varios los discos a cambiar se tienen que suspender los trabajos de excavación durante varias horas, ya que el personal no puede laborar por mucho tiempo de manera continua por cuestiones de seguridad.

Con el objeto de evitar los riesgos que tiene el personal que realiza el cambio de las herramientas de corte y agilizar el proceso de cambio de herramientas, se han realizado en China prototipos de robots que puedan realizar estas actividades [8]

En el artículo referenciado anteriormente presentan dos robots de inteligencia avanzada, siendo el primero un robot de inspección de la condición de las herramientas de corte y de la cabeza frontal en general. El segundo robot es el encargado de realizar los cambios de las herramientas de corte.

El primer robot es una estructura multi articulada, lo cual le permite llegar a todas las posiciones dentro de la cámara frontal. Cuenta con una boquilla que envía agua a presión para lavar las superficies a revisar, un sistema de

iluminación, un sistema de video, y un sistema de control lo que permite navegar dentro del espacio frontal y realizar la inspección de objetivos.

El segundo robot está compuesto por sistemas hidráulicos capaces de manipular herramientas de corte hasta de 250 kg y tiene por objetivo realizar el cambio de las herramientas. El robot debe realizar la extracción del cortador de disco desgastado y el montaje del nuevo disco de corte.

Cabe señalar que este prototipo fue presentado en 2019, pero a la fecha no se encontró información de que se tenga operando alguno en las máquinas trabajando actualmente.

1.4 UTILIZACIÓN EN LOS PROCESOS DE EXCAVACIÓN.

En la excavación del Túnel Emisor Oriente realizado en México de 2009 al 2019 se emplearon maquinas TBM's fabricadas por las empresas Herrenknecht [9] y Robbins [10] que son las que se encuentran a la vanguardia a nivel mundial en el diseño y fabricación de máquinas tuneladora.

Estas máquinas tienen incorporada tecnología de punta que tiene como propósito ser más eficiente en los procesos de excavación de túneles. Cuentan entre otras tecnologías de:

- Sensores que registran y envían información sobre la temperatura del aceite en los sistemas hidráulicos de la transmisión principal de la rueda de corte y de los sistemas de gatos de empuje.
- Sistema de rayo láser para la guía topográfica y software de programación para llevar sin la intervención del personal el empuje con el sistema de gatos hidráulicos para alinear y nivelar la excavación con las TBM's de acuerdo con el proyecto.
- Sensores de sincronización entre las bandas de extracción de rezaga (vertical y horizontal) con la excavación del túnel.

- Sensores de gases en el frente de la excavación del túnel.
- Sensores que registran la carrera de los gatos hidráulicos de empuje.

Cabe señalar que existen otras funciones tales como el registro de los procesos y consumos de inyección de mortero, consumos de aditivos de acondicionadores del terreno, etc. los cuales permiten controlar los consumos y la eficiencia de operación de las maquinas tuneladoras.

1.5 MONITOREO EN MINAS DE LOS GASES QUE PUE DAN AFECTAR A LA SEGURIDAD Y A LA SALUD DEL PERSONAL

Dentro de la excavación de túneles, pero principalmente en aquellos relacionados con la minería existen riesgos asociados a la presencia de gases, ya sean emanados del subsuelo o los que son producto del uso de equipos de combustión. Los gases pueden provocar explosiones fatales o intoxicación a los trabajadores, lo que fue el caso en uno de los tramos realizados durante la excavación del Túnel Emisor Oriente. Así mismo, se pueden presentar fuertes repercusiones económicas en el caso de explosiones.

Para tal efecto, se ha llevado desde hace muchos años el monitoreo de gases, para lo cual se contaba con equipos portátiles de baja precisión, los cuales eran afectados por las condiciones de humedad y temperatura que existen dentro de los túneles por lo que tenían que calibrarse continuamente, lo que los hacia poco confiables.

Actualmente en la minería, los sensores para la detección de gases son mucho más eficientes y están asociados con tecnologías de punta. “Con el rápido desarrollo del Internet de las cosas (IoT), la tecnología de comunicación 5G, el “big data” y otras nuevas tecnologías, el IoT en seguridad minera, las minas inteligente se han convertido gradualmente en una nueva tendencia”[11].

Los sistemas de monitoreo de gases que se menciona en el artículo de la referencia [11], indica que la detección con la nueva tecnología ha reducido

notablemente la cantidad de accidentes dentro de las minas de carbón en el país de China.

Existe una cantidad de información importante relacionada a los avances tecnológicos aplicados en la excavación de túneles en los últimos años principalmente proveniente de China, ya que en los últimos años ha sido el país que ha realizado la mayor cantidad de túneles. Aun cuando existen señalamientos como el de la mejora en los sistemas de monitoreo de gases, no detectamos un sistema integral con tecnología de vanguardia aplicada en la mejora de la seguridad de los trabajadores dentro de la excavación de los túneles.

Este trabajo pretende aglutinar varios aspectos tecnológicos que permitan mejorar la condición de seguridad en la ejecución de los túneles, con el propósito de repercutir en la disminución de accidentes, y también reducir la posibilidad de la presencia de gastos y costos no contemplados que se presentan inevitablemente cuando se tienen incidentes dentro de la excavación de túneles.

2. ANTECEDENTES

Aun cuando la industria de la construcción en nuestro país ha reaccionado de una manera más lenta que otras industrias en la incorporación de la tecnología, en los últimos años esta se ha venido implementando de manera acelerada en diversas áreas tales como el diseño, programación, presupuestación y construcción. Dentro de la construcción de túneles en nuestro país la tecnología se ha desarrollado principalmente en las siguientes áreas:

- **Diseño.** En el diseño de proyectos de túneles, existen varios sistemas de software que se usan para analizar la interacción suelo-estructura y que permiten simular el comportamiento de la construcción de túneles durante el proceso, definiendo deformaciones, asentamientos y esfuerzos sobre la masa del suelo permitiendo de esa manera diseñar la estructura de refuerzo necesario y analizar los procesos constructivos.
- **Presupuestos y Programación.** Para los proyectos de construcción en general, se tienen también varias alternativas de software que permiten llevar a cabo la programación y la presupuestación de proyectos de construcción, los cuales también son usados por el área de construcción de túneles.
- **Procesos de excavación.** La automatización se ha hecho presente en diversos procesos dentro de la construcción de túneles, lo cual aunado a la implementación de sensores dentro de las máquinas tuneladoras que permiten evaluar y modificar de una manera muy ágil los parámetros de excavación, han permitido una mayor eficiencia en los procesos de producción lo cual ha repercutido en rendimientos antes insospechados en lo que es la ejecución de túneles.



Figura 1. Tecnologías aplicadas en la construcción de túneles.

No obstante que existen diversos avances tecnológicos dentro de la construcción de túneles, queda pendiente una situación muy importante que es la seguridad del personal durante los procesos de construcción, ya que la presencia de accidentes e inclusive fallecimientos de los trabajadores dentro del túnel sigue siendo elevada.

Tan solo en la construcción del Túnel Emisor Oriente ejecutado del 2009 al 2019, para apoyar en el desalojo de aguas combinadas del Valle de México, se tuvieron varios fallecimientos de trabajadores relacionados a temas de seguridad, además de los diversos accidentes que se reportaron. Algunos de los fallecimientos o accidentes estuvieron asociados entre otras causas a:

- Intoxicación por gases emanados dentro del túnel
- Utilización de equipo inadecuado en el proceso de ingreso y extracción del personal a lumbrera y túnel
- Descarrilamiento de equipos de la vía en túnel
- Falla de bandas verticales y horizontales dentro de lumbreras y túnel



Figura 2. Accidentes más comunes en la construcción de un túnel

Por lo anterior es necesario visualizar la factibilidad de aprovechar los avances tecnológicos y enfocar recursos suficientes en el área de seguridad de la construcción de túneles que mitiguen la presencia de accidentes, los cuales no solo pueden generar pérdida de vidas, ya que también pueden repercutir en sobrecostos considerables.

No existe un sistema tecnológico dentro del mercado que atienda esta perspectiva de seguridad de una manera integral.

Por ejemplo, existen en el mercado sensores de gases que actúan como un sistema particular, pero el reto es amalgamar todos los aspectos en un sistema integral de seguridad, con capacidad de reacción en tiempo real, en el cual puedan revisarse diversos aspectos que puedan representar un riesgo.

En concreto, no se ha usado en nuestro país un sistema tecnológico que apoye una mejora en el grado de seguridad en la construcción de túneles, por lo que el principal obstáculo será el convencimiento a las empresas y a las autoridades a implementarlo en los proyectos por venir.

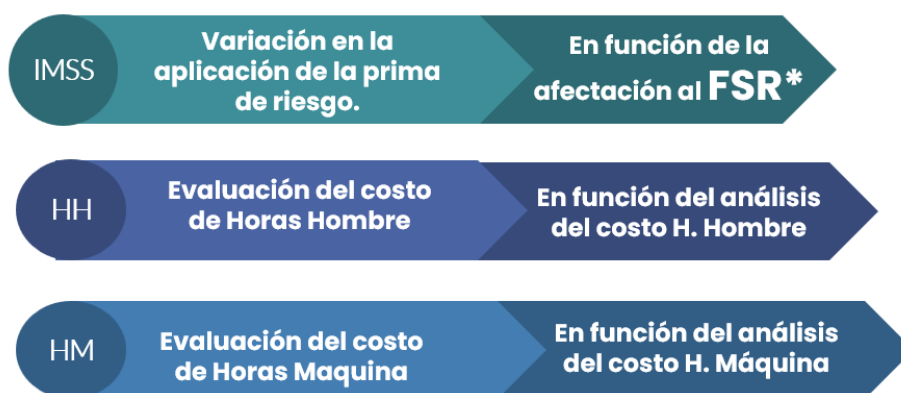


3. VENTAJAS DE LA IMPLEMENTACION TECNOLOGICA EN SEGURIDAD

En nuestro país, y especialmente en el área de la construcción existe una renuencia dentro de la empresa a inyectar recursos en áreas o procesos que no tengan un retorno de inversión a corto plazo, sin embargo, se tendría que considerar que el destinar recursos para mejorar la seguridad dentro del trabajo en la construcción de túneles es más una inversión que un gasto, y que a corto y a mediano plazo retribuirá a la empresa lo invertido.

Esta inversión en el área de la seguridad no sólo se justifica desde el punto de vista del bienestar del personal que labora dentro de la obra, lo cual por sí mismo debiese ser un factor suficiente. También se debe considerar que las suspensiones generadas por los accidentes dentro de la obra generan gastos irrecuperables asociadas a las horas hombre perdidas y en ocasiones al daño de instalaciones y el costo de su restauración. Así mismo, el historial de las empresas en la incidencia de accidentes y fallecimientos repercuten directamente en las primas de riesgo y por ende en los pagos que se deben hacer al Instituto Mexicano del Seguro Social.

Repercusión de los accidentes en el costo de la obra



* FSR Factor de salario real

Fig. 3. Repercusión de los accidentes en la construcción de túneles.

A continuación, se visualizan algunos de los aspectos favorables que puede ganar la empresa constructora de túneles al invertir y comprometerse con un sistema de seguridad con tecnología de vanguardia.

3.1 IMAGEN DE LA EMPRESA

En el pasado las empresas enfocaban principalmente sus esfuerzos en obtener resultados económicos, pero en la actualidad la sociedad exige que las empresas sean responsables con el personal, con el entorno ambiental y con la sociedad, por lo que es un hecho que cada vez sean más las empresas que destinen mayores recursos para mejorar la percepción que tienen ante los clientes y al mundo como empresas socialmente responsables.

Al respecto, existe una tendencia en los últimos años en las empresas a nivel mundial a buscar ser reconocidas como **Empresas Socialmente Responsables**, lo cual implica tanto el interés de crear procesos y productos amigables con el medio ambiente, como el de ser empresas preocupadas por el ámbito social dentro y fuera de la empresa. En el ámbito interno está contemplado la relación y el interés que tiene la empresa por sus trabajadores y sus proveedores o subcontratistas, siendo uno de los aspectos primordiales la seguridad y salud de los trabajadores, por lo que, en gran parte de las empresas medianas y grandes a nivel mundial, existe un fuerte interés por ser certificadas con la norma internacional ISO 45001.



La Norma ISO 45001 [12] está enfocada a la Seguridad y Salud en el Trabajo y apenas fue publicada en el 2018, por lo que su aplicación es relativamente reciente, a diferencia de la ISO 9001 relativa a la Gestión de la calidad publicada desde 1987 en su primera versión (ISO 2000), y la ISO 14001 relacionada al medio ambiente y publicada en su primera versión en 1996.

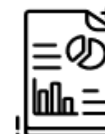
Lo anterior deja claro que las empresas en lo general no solo las de construcción y las de nuestro país, han priorizado otras áreas por arriba de la seguridad en el trabajo.

En resumen, al comprometerse la empresa a reducir los accidentes mediante la utilización de la tecnología de vanguardia en la seguridad dentro de la construcción de túneles, tendrá como resultado una mejoría en la percepción de una empresa responsable ante sus trabajadores, y ante la sociedad en general.

3.2 PRODUCTIVIDAD

La implementación de un sistema de seguridad apoyado en la tecnología que ayude en la reducción de accidentes repercutirá en una mejoría económica y en una mayor productividad para la empresa, como se comenta en los siguientes puntos:

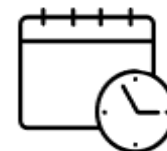
1. Primas de seguro. Al reducirse los accidentes en los centros de trabajo se reduce el pago que tiene que hacer la empresa por primas de seguro, las cuales se basan en el historial que la empresa va desarrollando con el pasado reciente.



2. Suspensión de proceso productivo. Un incidente o un accidente dentro de un proyecto de construcción es muy probable que repercuta en una suspensión de los procesos, lo cual puede afectar los tiempos de producción en horas, días y en ocasiones hasta en semanas.



3. Ausentismo. Los periodos de incapacidad que se tienen por personal accidentado repercuten directamente en la productividad dentro de la empresa, por el ausentismo del personal asociado a estos accidentes.



En el primer punto (primas de seguro), es factible analizar en un proyecto de construcción de túneles, como repercute la variación de las primas de riesgo en la integración de los factores de salario real de los trabajadores, y como este valor incide directamente en los costos reales de ejecución del proyecto. De esta manera al mejorar nuestras condiciones de seguridad dentro del proyecto repercutirá en un menor costo de la mano de obra, por lo que la inversión en el sistema de seguridad queda completamente justificada.

En lo que concierne al segundo punto (suspensión de proceso productivo), al presentarse un incidente o un accidente dentro de los frentes de trabajo, esto repercute de manera inmediata en la suspensión de actividades dentro de los procesos, y la afectación es variable pues podría suspenderse toda actividad o solo un segmento del proceso general de la construcción del túnel. En este caso la evaluación de la afectación se debe hacer en base al costo de las horas hombre, asociando también el costo en suspensión del equipo involucrado.

En el capítulo 4, se ahonda en el impacto económico que representa tanto la afectación en las primas de riesgo, así como el sobrecosto que implica la suspensión de actividades dentro de la ejecución del proyecto.

En cuanto al tercer punto (ausentismo), se tiene que considerar la ausencia del personal que ha tenido un accidente y el costo que implica al ser sustituido o la posible baja en la productividad al prescindir de una persona insertada en los procesos de construcción. En este caso la valoración de la ausencia de personal es un poco más difícil de analizar por la diversidad que se puede presentar en cada caso.

En concreto se puede resumir que el invertir en un sistema de seguridad apoyado en tecnología, tendrá un retorno al aumentar la productividad y al reducirse los costos reales de la mano de obra.

3.3 INTEGRACIÓN A ISO 45001

La norma internacional ISO 45001[12] es el sistema de gestión en seguridad y salud en el trabajo reconocido y aplicado mundialmente por lo que se debe tomar de base para alinear el sistema de seguridad apoyado en la tecnología. De esta manera el sistema propuesto de seguridad integral con aplicación de tecnología, funcionaria como un complemento para dar cumplimiento a las obligaciones legales y compromisos morales que se tiene como empresa para la reducción de accidentes y mejora en los lugares de trabajo.

3.3.1 Comunicación

El sistema propuesto propicia una mayor comunicación de valor entre las personas involucradas, ya que al reconocer la aportación de sus observaciones en el sistema de seguridad permitirá al personal tener un mejor sentido de identificación con el proyecto y con la empresa al saber que es tomado en cuenta, por lo que puede construirse un puente de comunicación más sólido entre dirección y trabajadores.

3.3.2 Mejora Continua

El mantener una comunicación continua dentro de los canales del sistema de seguridad permitirá detectar de manera anticipada aspectos que pudieran representar un riesgo y que no hubieran podido ser identificados de origen en el sistema de gestión de seguridad tradicional. Esta retroalimentación permitirá actualizar y mejorar de manera continua el sistema de gestión de seguridad, lo cual debe repercutir en una reducción de la presencia de incidentes y accidentes dentro del proyecto.

4. IMPACTO ECONÓMICO DE INCIDENTES DENTRO DEL PROYECTO

La presencia de incidentes y accidentes dentro de la ejecución de los trabajos de construcción de un túnel pueden generar sobre costos importantes dentro del proyecto, así como retrasos que repercuten también en afectaciones económicas hacia la empresa encargada de la ejecución.

En primer lugar, se presenta en este capítulo como la presencia de accidentes afecta directamente las primas de riesgo que se encuentran directamente asociadas a los pagos que hacen las empresas al IMSS, y como esto afecta el costo de un proyecto por la variación de las cuotas obrero-patronales.

En la segunda parte, se presenta la afectación económica que se tiene por la suspensión de actividades durante los procesos de construcción. En este caso se revisa el personal y el equipo que interviene dentro del costo directo en la ejecución de una excavación de túnel empleando una TBM.

4.1 IMPACTO EN EL COSTO POR LAS PRIMAS DE RIESGO

En nuestro país las empresas están obligadas a registrarse y a registrar a los trabajadores en el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), y a cumplir con el marco regulatorio estipulado en la Ley del Seguro Social [13].

4.1.1 Prima de riesgo

La industria de la construcción está catalogada como una de las que tiene mayor grado de peligrosidad, y por consecuencia el IMSS la tiene clasificada de origen *con la mayor prima de riesgo*. Esta prima de riesgo es un factor que está asociado con las cuotas obrero-patronales que las empresas deben cubrir para prever cualquier posible accidente que se de en el lugar de trabajo. De acuerdo con lo referido en la Ley del Seguro Social, en donde se indica que al registrarse por primera vez una empresa ante el IMSS, el pago de cuotas

se debe hacer considerando los valores ahí mencionados los cuales se muestran en la siguiente tabla 2.

<u>Prima Media</u>	<u>Porcentaje</u>
Clase I	0.54355%
Clase II	1.13065%
Clase III	2.59840%
Clase IV	4.65325%
Clase V	7.58875%

Tabla 2. Primas medias de riesgo. Artículo 73 de la Ley del Seguro Social

Sin embargo, también se debe tener en cuenta que los porcentajes relacionados a las primas de riesgo no son fijos, ya que al principio de cada año las empresas están obligadas a revisar y a declarar su siniestralidad, la cual servirá de base para calcular la prima de riesgo a través de la fórmula plasmada en el artículo 72 de la misma Ley del Seguro Social. Esta fórmula toma en cuenta el registro del año anterior de la empresa los siguientes puntos:

- accidentes reportados
- fallecimientos asociados a los accidentes reportados
- incapacidades por accidentes de trabajo
- días subsidiados
- y cantidad de personal que labora dentro de la empresa.

En función del resultado revisado por el IMSS este porcentaje puede modificarse en más o menos, pudiendo oscilar entre un 0.5% hasta un 15% que son los límites máximos y mínimos fijados por el artículo 74 de esta ley, y los cuales se aplican al salario base de cotización.

Cabe mencionar que la variación de la prima al realizarse la revisión anual no podrá tener una variación mayor al uno por ciento con respecto a la del año

anterior, por lo que la búsqueda de la obtención de la reducción de la prima de riesgo debe ser un esfuerzo consistente de la empresa.

4.1.2 Costo de mano de obra y prima de riesgo

La variación en la prima de riesgo repercute directamente en el análisis del costo real de la mano de obra dentro de un proyecto.

Como ejemplo, se presenta en un ejercicio breve lo que implica la variación porcentual de la prima de riesgo en el costo de una obra como la que fue el Túnel Emisor Oriente (TEO), construida desde el 2009 al 2019 y cuyo precio de venta fue de alrededor de 23,000 millones de pesos a fecha de octubre del 2009, valor que actualizándose a enero del 2023 con un factor de 1.78 referido por el INPC (Índice Nacional de Precios al Consumidor) sería de aproximadamente 41,000 millones de pesos

Costo de proyecto TEO* 2009	23,000 millones de pesos
Factor de actualización de 2009 al 2023 (INPC)	1.78
Costo actualizado del TEO al 2023	40,940 millones de pesos

Tabla 3. Costo a valor presente del proyecto TEO*

*Túnel Emisor Oriente

Operando en orden inverso y considerado un factor de utilidad del 10% en este proyecto, el costo directo e indirecto sería de 37.200 millones de pesos, de los cuales el 27 % correspondía a la mano de obra. De esta manera el costo de la mano de obra en este proyecto ya con los factores de seguridad social, vivienda y afores sería de aproximadamente 10,000 millones de pesos.




Costo del proyecto sin utilidad	37,200 millones de pesos
Mano de obra (27% del costo)	10,000 millones de pesos

Tabla 4. Desglose de costos del proyecto versus mano de obra

De la publicación del 2020 de cimentaciones profundas de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción [14] se aprecia que el factor de salario real para varias categorías de trabajadores tiene valores cercanos a 1.67

con respecto al salario nominal cuando se analiza con la prima de riesgo de 7.58875 %, que es la señalada por el IMSS como clase V para el registro de empresas.

De este mismo análisis se puede proyectar que el factor de salario real puede incrementarse hasta llegar a un valor aproximado a 1.75 al incrementar la prima de riesgo al valor máximo que es del 15%, o en caso de reducirla al valor mínimo autorizado por el IMSS que es el 0.5% se podría llegar a tener un factor de salario real de 1.6 aproximadamente.

Variación	Prima	Factor de salario real	Costo M.de Obra MP
 Mínima prima de riesgo	0.5 %	1.6	9,580
 Prima de riesgo en construcción	7.58875 %	1.67	10,100
 Máxima prima de riesgo	15.0 %	1.75	10,480

* MP - Millones de Pesos

Tabla 5. Impacto del costo de mano de obra al incrementarse el factor de salario real

Lo anterior significa que con un factor de salario real de 1.75 el costo de la mano de obra sería de 10,480 millones de pesos, en tanto que si el factor puede reducirse a 1.6 el costo por mano de obra sería de 9,580 millones de pesos. Lo anterior indica que hay una diferencia de 900 millones de pesos al pasar del porcentual máximo al mínimo referido por la prima de riesgo.

Factor de Salario real	Costo mano de obra (millones de pesos)
1.6	9,580
1.67	10,000
1.75	10,480

Tabla 6. Relación de FSR versus Costo Mano de Obra.

La siguiente gráfica muestra la variación que podría tener el costo de mano de obra en función de la prima de riesgo

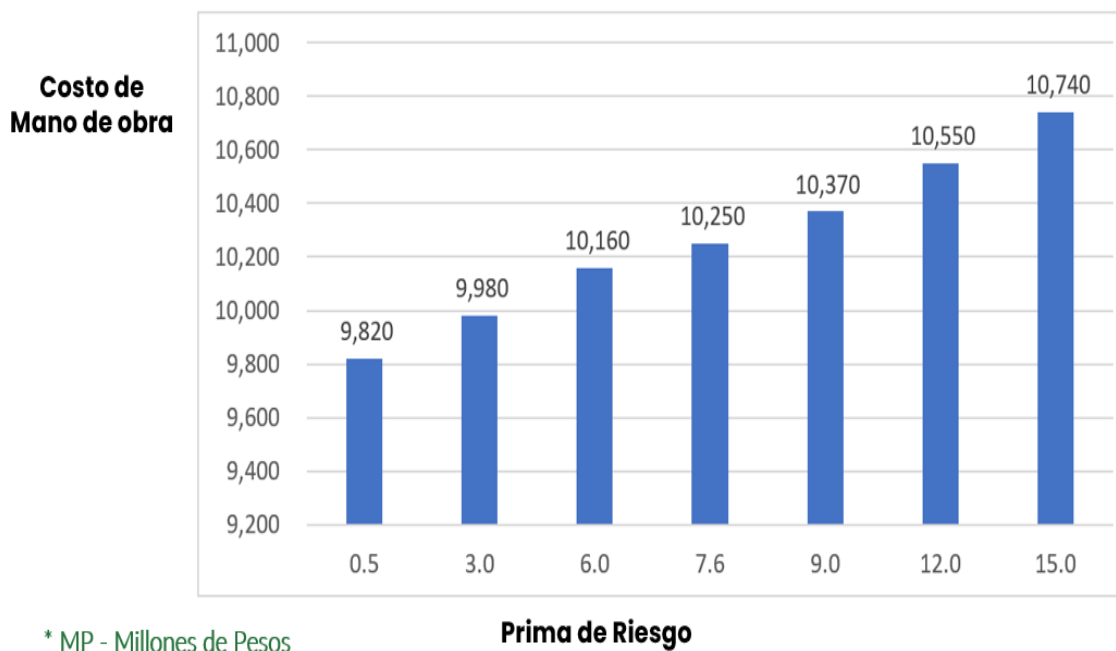


Figura 4. Variación del costo de mano de obra versus prima de riesgo

En la realidad sería complicado llegar a un valor de “cero accidentes” dentro de un proyecto de construcción y máxime en el área de túneles, sin embargo, teniendo como referencia el breve ejercicio y el análisis anterior se puede determinar que en una obra de esta envergadura por cada punto que baje o suba en el porcentual de la prima de riesgo repercute en aproximadamente una reducción o un sobrecosto de 60 millones de pesos.

Adicionalmente al análisis en el costo de la mano de obra por efecto de la variación en la prima de riesgo, se debe efectuar el análisis del costo de las horas hombre perdidas por efecto de los accidentes, mencionando un histórico de estas obras, aun cuando no se tuvo un registro fiel a la actuación dentro de la obra, se debe realizar el ejercicio considerando tiempo tentativo de afectación por los accidentes.

Los análisis económicos anteriores deben ser evaluados y cotejados contra los costos de implementar las herramientas tecnológicas para reducir el riesgo y los accidentes dentro de las obras de túneles. La siguiente tarea será, ya definidos el hardware y software a utilizar, realizar una evaluación del costo que representa introducir e implementar el sistema propuesto, aun cuando hay que considerar que las plantillas de personal de seguridad que se han empleado en proyectos de túneles contienen un número elevado de personal, así que el

costo se centraría en el hardware, software y aplicaciones a adquirir para desarrollar este proyecto.

4.2 COSTO EN MANO DE OBRA Y EQUIPO POR SUSPENSIÓN DE ACTIVIDADES

Como se comentó anteriormente la presencia de un incidente aun cuando no tenga como resultado la presencia de personal herido o fallecimientos que lamentar, regularmente tiene como consecuencia la suspensión de actividades, la cual puede ser muy variable en función de las características del incidente presentado.

Por ejemplo, en un túnel excavado con TBM y reforzado con anillos de concreto, se puede presentar el descarrilamiento de una corrida con las dovelas que presente un volcamiento de los carros que las transportan. Lo anterior provoca que se tengan que suspender las actividades hasta por 24 horas o más, con el propósito de realizar la restitución de la vía, y levantar y montar las dovelas nuevamente en los carros que las transportan (las dovelas tienen un peso de varias toneladas en función de su diseño y características del túnel). El tiempo de ejecución de lo descrito anteriormente depende del grado de afectación, el tamaño de las dovelas y las condiciones existentes dentro del túnel para realizar las maniobras.

Existen otro tipo de fallas como las que se presentan en las bandas horizontales o verticales, ya que una falla de estas independientemente que no provoquen daños al personal pueden representar suspensiones hasta de 5 a 6 días, en lo que se lleva a cabo el retiro de las bandas dañadas y la restitución por bandas nuevas, e inclusive en este caso se tendría que involucrar los costos que se tienen de la misma banda.

Para evaluar un costo aproximado de esta suspensión de actividades se requiere analizar el personal que interviene dentro del proceso de excavación del túnel. En el anexo 1 se presenta una valorización de una plantilla con las cuadrillas tipo en la ejecución de un túnel excavado con TBM, pudiendo variar dependiendo de las características de la TBM y del túnel, así como de la empresa constructora que lo ejecute.

En función del anexo 1, en la tabla 7 se presenta el costo aproximado de personal que se tiene en un turno de trabajo y el costo por hora de ese personal.

Incidente	Horas improductivas	Costo por evento (MXP)	Eventos al año	Total por año
Descarrilamiento	24	\$ 219,000.00	2	\$ 438,000
Falla en bandas de extracción	144	\$1,314,000.00	1	\$ 1,314,000

Tabla 7. Costo de Cuadrillas de excavación en túnel con TBM

En el anexo 2 se encuentra la relación de equipo y el costo que representa por hora de inactividad. Para este caso se debe realizar un análisis contemplando el costo de la maquinaria inactiva.

En la tabla 8 se refleja el costo de la maquinaria que interviene directamente en la ejecución (en función del resumen del anexo 2).

Los valores que se están manejando tanto en personal como en maquinaria son aproximados al 2023, y pueden variar en función de las características del túnel y de la empresa que ejecute los trabajos

Incidente	Horas improductivas	Costo por evento (MXP)	Eventos al año	Total por año
Descarrilamiento	24	\$ 179,280.00	2	\$ 358,560
Falla en bandas de extracción	144	\$1,075,680.00	1	\$ 1,075,680

Tabla 8. Costo de cuadrillas de maquinaria en excavación en túnel con TBM

En la tabla 9 se encuentra un resumen de las tablas y ahí se puede revisar lo que puede representar una suspensión por “un incidente aun sin afectación a trabajadores” en las vías o en el sistema de bandas.

Incidente	Horas improductivas	Costo por evento (MXP)	Eventos al año	Total por año
Descarrilamiento	24	\$ 398,280.00	2	\$ 796,560.00
Falla en bandas de extracción	144	\$2,389,680.00	1	\$ 2,389,680.00

Tabla 9. Suma de costos de cuadrilla de personal y maquinaria

Cabe señalar que no se contempla el costo del personal que entra dentro de los costos indirectos, el cual puede llegar a ser más de un 20% del costo reflejado del personal que interviene dentro del costo directo. Lo anterior

también aplica en equipos que intervienen dentro del costo indirecto de la obra. No solo el personal y equipo que interviene en el costo indirecto se verán afectados, en general todos los costos indirectos que se desprenden del tiempo que dura la obra también se verán afectados, como por ejemplo las rentas de bodegas, oficinas, el costo de las fianzas, etc.

Por otro lado, cuando se presentan accidentes que producen la muerte de un trabajador, las actividades también se detienen completamente debido a que las autoridades realizan peritajes en la búsqueda de deslindar responsabilidades.

En conclusión, el impacto que representan los accidentes dentro de la excavación del túnel, aun cuando no sean de fatales consecuencias, repercuten directamente en un costo dentro de la obra, el cual puede llegar a ser significativo. Estas repercusiones se generan tanto en el corto plazo en el sobre costo por efecto de la suspensión de actividades y en el largo plazo en la afectación de primas del Seguro Social las cuales inciden directamente sobre el costo de la obra.

5. EVALUACIÓN DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL

Existen diversos métodos de construcción de túneles y cada método presenta diferentes secuencias programadas de actividades preestablecidas; se debe tener en cuenta que cada una de estas actividades tendrá implícitos sus propios riesgos.

En este caso particular se analiza la construcción de túneles usando máquinas tuneladoras tipo TBM (Tunnel Boring Machine), sin embargo, en esta propuesta de Seguridad el objetivo es que el sistema aplique para cualquier método de construcción realizando algunos ajustes para cada caso en particular.

Para tal efecto, se debe llevar a cabo la revisión y definición de las actividades y los conceptos que representan algún riesgo potencial dentro de la construcción del túnel y hacer el análisis de evaluación de riesgos para cada uno de ellos, y de esa manera tamizar y seleccionar los que deberán ser considerados dentro del sistema de seguridad integral empleando tecnología de punta.

5.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS

La evaluación de los riesgos en las actividades realizadas en un proceso deberá ejecutarse considerando estadísticas de probabilidad de ocurrencia, así como el impacto que genera ya sea tanto hacia la salud física del personal como la afectación económica hacia las empresas.

Para efecto de llevar esta evaluación, es importante considerar la lista de actividades completa y realizar un análisis de cada una de las actividades tal como lo declara la norma de la Secretaria del Trabajo y Previsión Social [15].

Los valores de Impacto y Probabilidad serán asociados a valores numéricos de 1 a 4.

Las siguientes tablas muestran una categorización del impacto y de la probabilidad con sus escalas correspondientes:

I M P A C T O	Grado	Nivel	Definición
	4	Muy alto	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de la vida, discapacidad permanente - Paro de operaciones por más de 72 horas - Poner en riesgo una o más vidas
	3	Alto	<ul style="list-style-type: none"> - Lesión severa, discapacidad parcial - Paro de operaciones por más de 24 horas y menos de 72 horas - Pone en riesgo de lesión al personal
	2	Medio	<ul style="list-style-type: none"> - Lesión menor, genera incapacidad temporal al trabajador - Paro de operaciones más de 8 horas y menor a 24 horas - Pone en riesgo de lesión al personal
	1	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> - Riesgo de lesión menor al trabajador - Paro de operaciones menor a 8 horas

Tabla 10. Impacto de un evento. Ver referencia [16]

P R O B A B I L I D A D	Grado	Nivel	Definición
	4	Muy alto	Casi con seguridad que ocurra Se consideraría que es muy normal que ocurra
	3	Alto	Es muy probable que ocurra. Podría ocurrir de alguna forma
	2	Medio	Podría ocurrir de alguna forma
	1	Bajo	Podría ocurrir bajo condiciones excepcionales

Tabla 11. Probabilidad de ocurrencia de un evento. Ver referencia [16]

Con el objeto de evaluar y ponderar un evento, la probabilidad y el impacto riesgo se conjugan en la siguiente matriz:





		1	2	3	4		
PROBABILIDAD	4	4x1=4	4x2=8	4x3=12	4x4=16		Muy Alto
	3	3x1=3	3x2=6	3x3=9	3x4=12		Alto
	2	2x1=2	2x2=4	2x3=6	2x4=8		Medio
	1	1x1=1	1x2=2	1x3=3	1x4=4		Bajo
		IMPACTO					

Tabla 12. Matriz de evaluación de riesgo

A modo de ejemplo, un posible incidente con Probabilidad = 3 e Impacto = 2 se traduce en un incidente de Alto Riesgo (ver tabla 12 realizando las intersecciones correspondientes). Ambos factores, Probabilidad e Impacto son multiplicados, por consiguiente, $3 \times 2 = 6$.

5.2 TRATAMIENTO DE RIESGOS

De manera subsecuente, se deberá llevar a cabo una iteración en el tratamiento de los riesgos residuales con el propósito de llevarlos a un valor “Medio” o “Bajo”. Si el valor residual después de evaluar un riesgo no se considera aceptable podría tener un 2º tratamiento para reducirlo aún más.

Iteración del Tratamiento de Riesgos

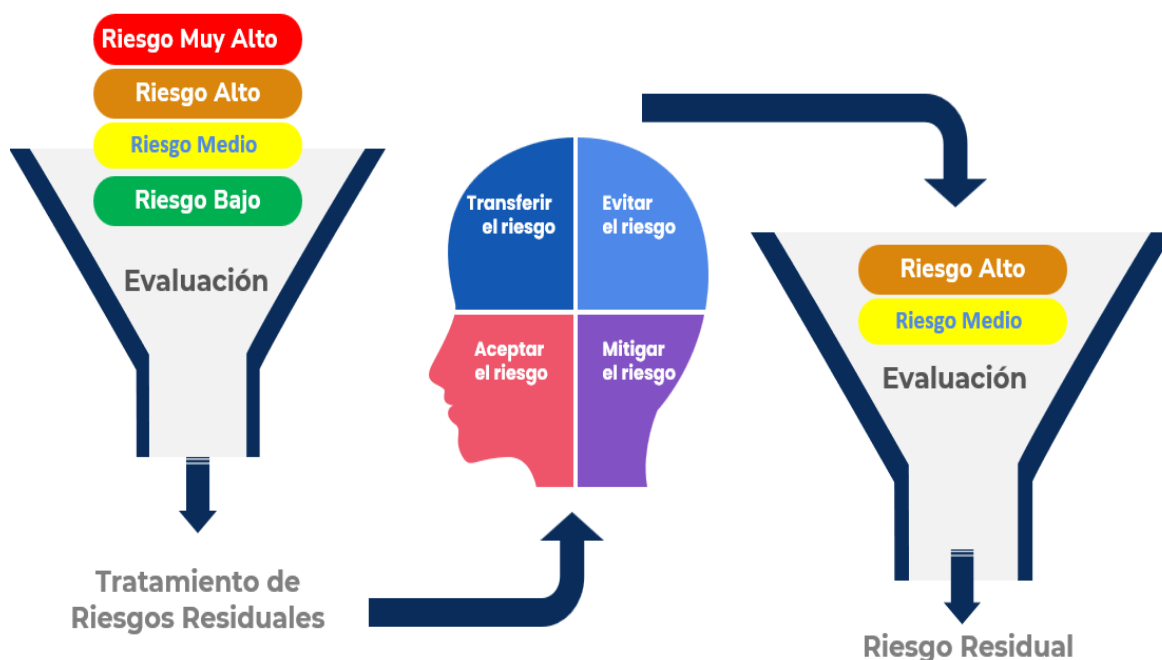


Figura 5. Tratamiento de riesgos

Considerando que se está ante la posibilidad de pérdida de vidas humanas, se debe buscar minimizar la posibilidad de ocurrencias de riesgo, así como buscar atenuar el impacto de este a niveles aceptables. Para tal efecto, el riesgo debe ser tratado con base a las siguientes opciones:

El tratamiento del riesgo involucra:

1. Aceptar el riesgo
2. Mitigar el riesgo
3. Transferir el riesgo
4. Evitar el riesgo

La evaluación de riesgos debe tener un proceso iterativo hasta que el riesgo residual sea razonablemente bajo.

5.3 RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

A continuación, se hace una evaluación de riesgos que determina cuales son aquellos riesgos que pueden ser tratados adecuadamente para evitar lesiones y pérdidas humanas.

Causa	Impacto	Prob.	Consecuencia	Tratamiento del riesgo	Acción
Gases tóxicos	MA	M	Fatalidad y paro de actividades	Mitigar	Sensores
Herramienta en mal estado (eslingas)	MA	A	Fatalidad y paro de actividades	Mitigar	Auditoria
Mal uso de la herramienta	MA	M	Fatalidad y paro de actividades	Mitigar	Entrenamiento y auditoria de uso
Herramienta de izaje en mal estado	MA	M	Fatalidad y paro de actividades	Evitar	Auditoria
Invasión de áreas de maniobra	MA	M	Fatalidad y paro de actividades	Mitigar	Sensores de presencia
Banda horizontal desalineada	MA	A	Fatalidad y paro de actividades	Mitigar	Sensores e inspección continua
Banda vertical, ruptura	MA	M	Fatalidad y paro de actividades	Mitigar	Auditoría e inspección continua
Falla de sensor en grúa	MA	M	Fatalidad y paro de actividades	Evitar	Mnto. + sensor adicional
Tanques de aire comprimido	MA	M	Lesión corporal	Mitigar	Auditoria

Causa	Impacto	Prob.	Consecuencia	Tratamiento del riesgo	Acción
en mal estado					
Mangueras de aire comprimido en mal estado	MA	M	Lesión corporal	Mitigar	Inspección de Calidad
Mangueras de aire comprimido mal instaladas	MA	M	Lesión corporal	Mitigar	Inspección de Calidad
Ventilación pobre	MA	M	Fatalidad y paro de actividades	Mitigar	Sensores
Vía en mal estado	MA	M	Descarrilamiento y paro	Mitigar	Inspección continua
Cables eléctricos dañados	MA	M	Sin energía eléctrica y paro de actividades	Mitigar	Sensor térmico

Tabla 13. Evaluación de riesgos y tratamiento en la construcción de túneles

El primer aspecto de la tabla 13 se relaciona a los gases que pueden emanar del suelo, y de los equipos que se tienen en el interior. Aun cuando se tienen detectores de la TBM estos funcionan solo cuando ésta se encuentra energizada, pero al existir una suspensión de energía eléctrica no se registran las condiciones de presencia de gas. Para tal efecto es necesario implementar un sistema dual de comunicación que tenga un respaldo por parte de la energía de la planta de emergencia y baterías internas, y que pueda enviar la información al tablero integral de supervisión de superficie y también pueda señalar la condición existente dentro del frente de túnel.

De esta forma lo que se buscaría es reducir la posibilidad de que se vuelva crítica la presencia de gases

6. TECNOLOGÍAS POR UTILIZAR EN EL SISTEMA DE SEGURIDAD PROPUESTO

La propuesta es proporcionar a las empresas constructoras de túneles un sistema de seguridad y salud en el trabajo apoyado en las nuevas tecnologías tales como IoT, sensores de última generación para monitoreo en tiempo real, redes de comunicación, procesamiento de datos, paneles de visualización de información (“*dashboard*”), que permitan detectar, notificar y prever condiciones de riesgo dentro de los túneles para que estas puedan ser eliminadas y mitigadas en forma oportuna teniendo como resultado la disminución de accidentes en este tipo de proyectos.

6.1 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

La propuesta utiliza varias tecnologías de punta para mejorar la seguridad, todo con un enfoque de prevención.

Así, se plantea cambiar el paradigma de Seguridad en la Industria de la Construcción de Túneles utilizando herramientas tecnológicas disponibles tales como:

- Remote Real Time Monitoring (Active dashboard)
- Sensores de gases con IoT
- Sensores de presencia con IoT
- Sensores biométricos
- Sensor de sensores
- CCTV con “Face Recognition”
- “Maintenance Ticket App” en Celular
- “Maintenance Ticket Management System”



A continuación, se muestra un ejemplo que se propone de los paneles de información, también denominados “*dashboard*” en el centro de monitoreo. Se observa que se puede visualizar el estatus de algunos sistemas (si están encendidos o apagados) así como la cantidad de personas que se encuentran en el túnel. También permite monitorear los porcentajes de presencia de gas proporcionados por los sensores IoT [17]

DASHBOARD SISTEMA DE MONITOREO DE ALARMAS



Figura 6. Ejemplo de “Dashboard” que involucra la visualización del monitoreo

Se está considerando que en el primer panel de información o “dashboard”, se represente la situación correspondiente a la presencia de gases al interior del túnel. Durante la excavación de túneles con TBM es necesario abrir eventualmente la cámara frontal para realizar cambio de herramientas de la cabeza cortadora o para hacer inspecciones visuales de la condición del material excavado, y es precisamente en estos momentos cuando se incrementa el riesgo por una mayor presencia de gases emanados del frente de excavación.

Es necesario que el sistema de ventilación y el sistema de inyección de aire al frente, trabajen adecuadamente cuando las compuertas frontales estén abiertas, y el sistema de panel debe alarmar sobre cualquier situación de concentración de gas o de deficiencias en los sistemas de ventilación y disipación de gas.

Otro aspecto que se propone es tener cámaras que registren las actividades en las principales ubicaciones dentro del túnel, las cuales podrían ser:

- Cámara frontal de la TBM
- Zona de ensamble de anillos de dovelas
- Plataforma superior de tren de arrastre
- Cambio de vía en interior de túnel
- Zona de lumbrera
- Patio superficial de maniobras

Otro panel de visualización estaría dedicado a la condición al estatus de los tickets de mantenimiento. En este caso se plantea que se tenga dentro del túnel un sistema de red Wifi, mediante el cual personal autorizado pueda conectarse para reportar y alertar sobre una condición incipiente o avanzada de riesgo en alguno de los diferentes sistemas que conforman el trabajo de excavación de túnel [18].

Por ejemplo, uno de los supervisores o ingenieros dentro del túnel podría apreciar que la banda de rezaga está rozando en algún punto dentro del túnel, y mediante una aplicación que tengamos preparada para llevar a cabo estos reportes, esta persona podría alertar sobre esta condición para que sea atendido y no pueda escalar y provocar un problema mayor.

ESTATUS TICKETS DE MANTENIMIENTO

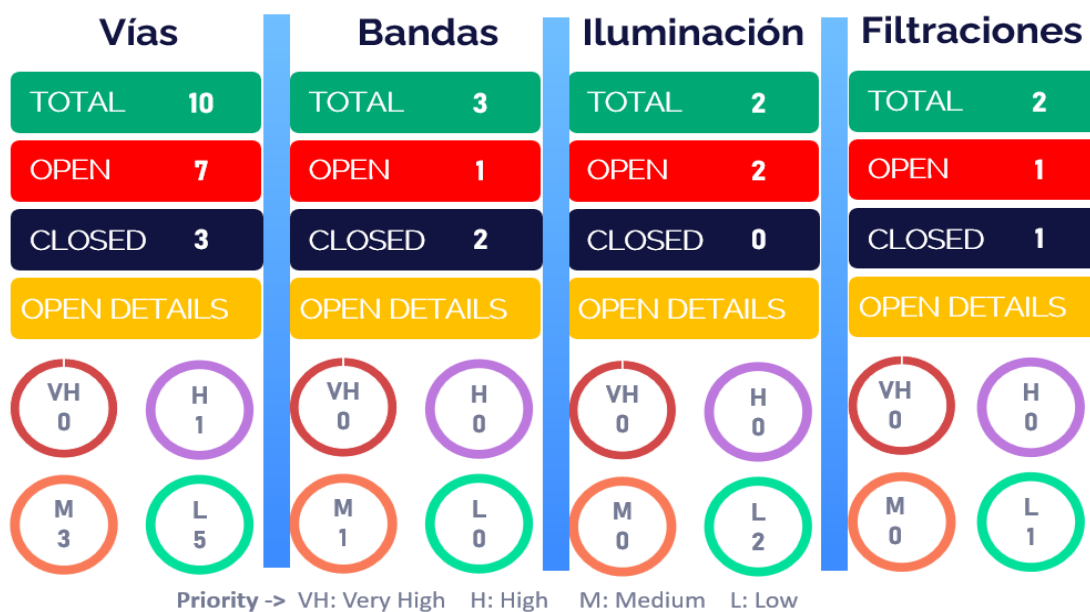


Figura 7. Ejemplo de “Dashboard” de estatus de tickets de mantenimiento.

El reporte anterior quedaría plasmado en una matriz de responsabilidades, la cual de manera automatizada notificaría al personal o al área correspondiente para que haga la verificación y le dé la atención necesaria al reporte levantado. El ticket de registro le podrá informar al personal encargado de atender la problemática, la ubicación precisa y el grado de riesgo que este implica.

Este procedimiento podría manejarse en cada uno de los diferentes sistemas, y podría alarmar al personal cuando se señale como nivel crítico de atención, pudiendo mandar en este momento el reporte inclusive a la dirección del proyecto [19].

Se observa también que el alcance involucra una interfaz para poder manejar los tickets; reportes, cambios y alarmas, a través de una aplicación del celular.

Interfaz de Seguridad en el Celular



Figura 8. Ejemplo de Interfaz de la aplicación de tickets en el teléfono celular

6.2 TECNOLOGÍA DE SENSORES IoT

Antes de entrar de lleno a la propuesta del sistema tecnológico de seguridad, es necesario hacer un repaso breve de lo que significa el Internet de las Cosas (*Internet of Things*), conocido como IoT, el cual es parte fundamental del trabajo y de la propuesta que se está realizando, así como de la forma en que se integra en la propuesta dentro de la seguridad del túnel.

“El internet de las cosas (dispositivos) IoT, es la interconexión de dispositivos físicos (cosas) que genera un intercambio de datos para crear una integración completa entre el mundo físico con una capacidad de detección para conectarse a una red” [20]. Lo anterior nos proporciona una capacidad de extender algunas funciones de monitoreo y control de sensores y actuadores ayudados por el Internet. Esto genera una gama amplia de posibilidades pues el IoT se convierte en un conjunto de dispositivos con capacidad de transferir datos a través de las redes y tomar acciones en consecuencia, sin la intervención humana lo que los hace muy prácticos.

Con el IoT se puede llevar a cabo un procesamiento completo de la información: captar, cotejar, transferir, analizar y ejecutar las acciones que se consideren pertinentes ya sea en forma manual o también “automatizada”.

De acuerdo con lo anterior, los dispositivos IoT están clasificados como sensores o actuadores.

6.2.1 Sensores

Los sensores son dispositivos que monitorean alteraciones físicas en un entorno. Estas variaciones pueden ser de luz, temperatura, sonido, movimiento, gas, etc. y los sensores recogen dicha información para enviarla a través de un sistema de comunicación para su procesamiento y de ser necesario tomar decisiones que pueden ser automatizadas o no. En sí, algunos dispositivos IoT tienen la capacidad de funcionar también como actuadores, es decir, pueden ser operados a distancia o realizar acciones automatizadas. Como ejemplo de esto se tienen algunos que realizan apertura o cierre de válvulas, encendido y apagado de equipos, iluminación etcétera.

Los sensores y dispositivos IoT envían la información y datos generados a través de diferentes tecnologías de comunicación, principalmente inalámbrica, ya que ésta a diferencia de los sistemas por cable presenta una mayor flexibilidad en su implementación, proporcionando un despliegue más rápido, una buena cobertura de área y notificación oportuna [21].

Las tecnologías inalámbricas empleadas pueden ser Wifi, Zigbee, NFC (Near Field Communications) etcétera, y la selección para su utilización depende de la aplicación y la parte del sistema donde se estén empleando.

De acuerdo con lo anterior, la utilización de detectores de gases con sensores inalámbricos IoT representan la mejor opción, y entre las ventajas de utilización se tendrán:

- Movimientos de las estaciones de monitoreo conforme se avanza en el frente de obra de excavación
- Redundancia en sensores de gas al instalar 5 al frente y otros 5 a una distancia de 12 metros atrás del primer grupo de sensores (amoníaco, ácido sulfhídrico, bióxido de carbono, oxígeno, óxido de nitrógeno)



- Escalabilidad en el número de sensores según el avance de obra
- Reingeniería de la solución en cuanto a las estaciones de monitoreo según la necesidad

Se define el término “estación de monitoreo” a un grupo de sensores IoT aglutinados ya sea en un área específica que ofrecen información al sistema de seguridad en forma inalámbrica. Se considera la posibilidad de que pueda agregarse algún sensor que resulte indispensable pero cuya necesidad no sea detectada en este momento.

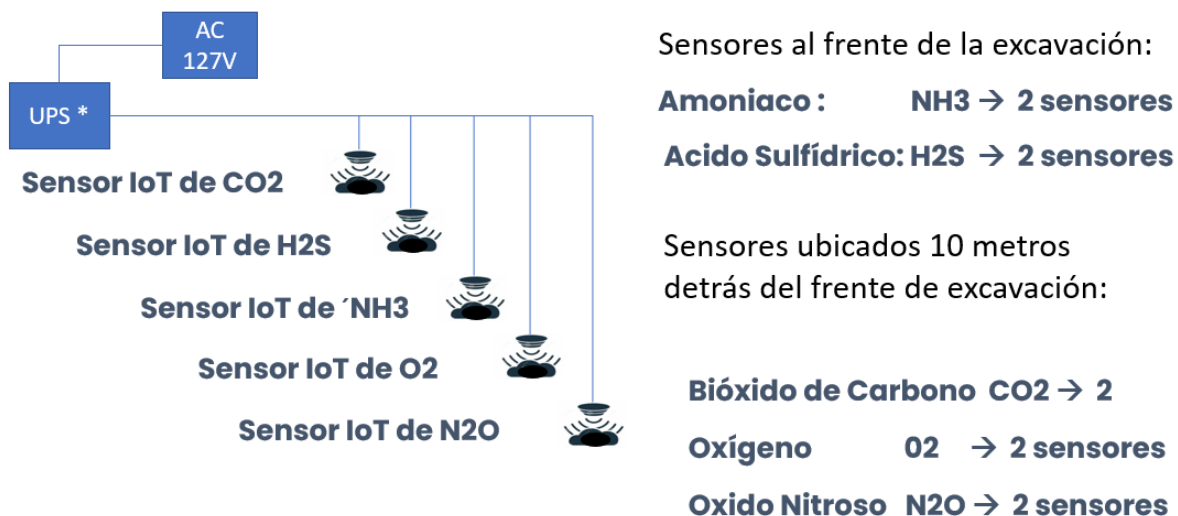
Así mismo, las tecnologías de sensores IoT permiten el monitoreo de otros sistemas como son compuertas abiertas, presión en flujos de aire, sistemas de ventilación, sistemas de iluminación fija y de emergencia, estatus de sistema de videovigilancia, presencia de personal en sitio, etcétera.

Los tipos de sensores pueden operar sobre campos muy diversos, los cuales entre otros pueden ser:

- **Físicos:** velocidad, temperatura, presión
- **Químicos:** gases, humo
- **Ambientales:** humedad, presión, temperatura ambiente
- **Eléctricos:** detector de metal, detector de voltaje,
- **Ópticos:** colorímetro, fotodiodo

La siguiente figura muestra la propuesta de los sensores IoT de gases a instalar en el frente de la excavación del túnel:

Sensores de Gases IoT



* UPS con respaldo de 48 horas

Figura 9. Diagrama de sensores a instalar.

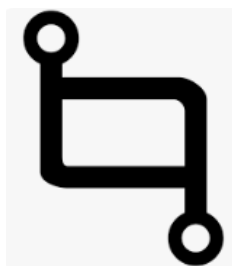
Los sensores se implementan en una amplia variedad de topologías con distintos protocolos de red basados en restricción de energía, los intervalos de muestreo, el área física, la distancia, etcétera.

6.2.2 Actuadores

Los actuadores son dispositivos físicos capaces de recibir órdenes e instrucciones del sistema de comunicación y ejecutar acciones concretas[20]

Ejemplos de actuadores son los siguientes:

- Brazos mecánicos
- Indicadores luminosos
- Cintas de transporte
- Conmutadores
- Interruptores
- Alarmas



6.2.3 Integración de dispositivos IoT a plataforma de monitoreo.

Ya ubicando los trabajos dentro del proceso de excavación del túnel, el sistema de seguridad debe ser capaz de enviar información de diferentes lugares y con diferentes tipos de dispositivos, situación que podría ser diferente para cada caso de tipo de túnel en particular.

Considerando un túnel excavado con TBM, se debe procesar información desde el frente, también de la zona de lumbrera, e inclusive de diferentes puntos a lo largo del túnel. Para tal efecto se requiere enviar toda la información a un punto de control centralizado al que se llamaría “Centro de monitoreo de seguridad del túnel”, el cual sería ubicado en superficie dentro de las oficinas de obra.

Los dispositivos IoT que se pretenden instalar o emplear en el proyecto de seguridad dentro del túnel, deberán estar integrados a través de una plataforma de tipo AWS (Amazon Web Services) o alguna similar [22].

Este centro de monitoreo tendrá asociado un “dashboard” o panel de visualización de información para cada frente de trabajo o aspecto importante a seguir. Para esto, se usará un esquema moderno de solución donde parte de la información obtenida de los sistemas y mostradas en el “dashboard” será obtenida apoyándonos en una plataforma de AWS (Amazon Web Services)[23].

La plataforma de Amazon permite a los usuarios acceder a los mismos archivos y aplicaciones desde cualquier dispositivo (IoT, Computadora, Celular, Tablet, etc.) ya que los procesos informáticos y de almacenamiento tienen lugar en servidores en un centro de datos.

Además de la plataforma de Amazon, existen en el mercado otras con algunas características diferentes [24], sin embargo, se empleará la AWS con el propósito de explicar los requerimientos y los demás elementos IoT para integrarlos en AWS.

Una característica importante, es que el poder de cálculo de los dispositivos IoT es casi nula pues su propósito es proporcionar datos sobre fenómenos

físicos. En sí, los dispositivos IoT simplemente suministran datos a través de Internet a un sistema de procesamiento de datos (Computadora o Servidor)



Figura 10. Ejemplo básico de arquitectura de 4 etapas de IoT

6.3 AMAZON WEB SERVICES

La AWS es una plataforma o nube que ofrece una infraestructura de servicios escalables ampliamente usada actualmente y desarrollada por la empresa Amazon. A continuación, describimos algunos de ellos:

- Procesamiento de datos
- Almacenamiento
- Base de datos
- Redes y entrega de contenido
- Análisis
- Machine Learning
- Seguridad, identidad y cumplimiento
- “Dashboard” a través de una aplicación de Amazon llamada “Grafana”

Esta plataforma AWS [23] nos puede apoyar dentro de nuestro proyecto con los siguientes aspectos:

- Gestión de dispositivos: alta, baja, cambios, búsqueda.
- Analíticas. Son métricas agregadas entre los estados de un dispositivo
- Seguridad. Es una comunicación segura online donde existen controles de seguridad y es posible realizar auditorías de monitoreo. Este punto cobra especial relevancia por el hecho de que, en un inicio, los dispositivos IoT estaban siendo utilizados para “hackear” sistemas. Sin embargo, esto queda totalmente bajo control al incluir una plataforma AWS que cuenta con una protección diseñada y que cuenta con Firewalls.
- Ejecución basada en reglas. Proporciona una activación de mensajes enviados de manera selectiva a otros sistemas y servicios de AWS

La plataforma AWS integra diferentes funcionalidades, entre ellas una denominada “Green Grass”[25] que permite:

- Dar de alta de un dispositivo IoT
- Crear un dispositivo virtual en la nube para administrar el dispositivo físico
- Creación y despliegue de certificados de seguridad

Sobre esos mecanismos de comunicación, Green Grass establece un conjunto de flujos de trabajo:

- descubrimiento/alta nuevos dispositivos
- actualización del estado del dispositivo
- ejecución de tareas actualización de software

Finalmente, se puede decir que los sensores IoT al igual que el “dashboard” proporcionado por los servicios de Amazon serán utilizados para simplificar y ejemplificar el desarrollo de integración de este proyecto de seguridad. La razón es porque AWS ofrece los servicios integrales facilitando la convivencia de tecnologías de la información.

6.4 TECNOLOGÍA EN LA RED DE COMUNICACIÓN

Dadas las condiciones que se tienen de trabajo durante la construcción de un túnel excavado con TBM es conveniente manejar un sistema híbrido de redes alámbrica e inalámbrica, con objeto de garantizar una mejor comunicación. Se debe realizar un cableado Ethernet desde el centro de monitoreo en superficie hasta el frente de excavación, en donde se aloja la cabina de operación sobre el tren de equipo de la TBM, y también se debe contar con un sistema de comunicación inalámbrico que permita al personal del túnel autorizado levantar un reporte desde cualquier punto dentro del túnel, por lo que es necesario también contar con un sistema inalámbrico de Wifi, el cual se encuentre trabajando en conjunto con el sistema alámbrico.

La red Ethernet dentro del túnel se convierte en un facilitador (red de transporte) para integrar datos de sensores, video, estado de dispositivos y comunicación generado por dispositivos virtuales, en resumen, una

interacción de datos en tiempo real con diferentes propósitos que consolidan el Sistema de Seguridad [18].

6.4.1 Conceptos, componentes y terminología de una red

Una red es una conjunción de dispositivos (tales como computadoras, sensores de diferentes tipos, impresoras, etc.) que se encuentran intercomunicados a través de un medio de transmisión común, el cual puede ser a través de un cableado o una red Wifi.

Dentro de la red, se debe tener una suite de protocolos que consiste en un sistema de reglas comunes que ayudan a definir el complejo proceso de transferencia de datos que se presenta en una red de comunicación. Este protocolo define como deben ser procesados, transmitidos, y recibidos los datos en una red.

A continuación, se presenta una breve descripción de los componentes y/o conceptos en una red de los cual se hace mención más adelante [26]:

Dispositivo terminal. Este puede ser un IoT, una PC, una Lap Top, un Smartphone, un Servidor o equipos conectados en la nube

Switch. Interconecta múltiples dispositivos terminales dentro de una red.

LAN. Red de área local (Local Area Network). Consiste en dispositivos intercomunicados de una manera local.

Adicionalmente puede manejar una densidad alta de dispositivos, generalmente de 24 a 48 e incluso más. Las velocidades pueden ir entre 1 GBps o 10 GBs por puerto. El switch utiliza la MAC address para identificar el dispositivo en el otro extremo de la red

Router. Interconecta múltiples redes (que podrían formar una WAN (Wide Area Network) y permite crear una red más grande. El Router utiliza las direcciones IP para identificar la fuente y el destino.

Firewall. Protege nuestra red de cyber-ataques. Normalmente es un servidor dedicado para tal fin

Medio de transmisión. Es el medio utilizado para transmitir la información, puede ser fibra óptica, señales de radio, cable coaxial, multiplex, cable UTP.

IP. Internet Protocol es quien identifica un dispositivo en una red o en el internet. La dirección IP es única e irrepetible.

Network Mask. Determina el tamaño de la red (es decir, el número de direcciones IP disponibles)

Default Gateway. Especifica las salidas de la red (un Router conectado a Internet)

DNS Server. Transforma un nombre (por ejemplo, Google.com) en una dirección IP (es decir 173.23.85.91)

La industria de redes de comunicación tiene un modelo estándar para la construcción de los protocolos de red denominado OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos), el cual ha servido como base para el crecimiento y desarrollo de las implementaciones de protocolos en las redes de transmisión. El modelo OSI representa un esfuerzo de ISO (Organización Internacional de Estándares) para estandarizar el diseño de los sistemas de protocolos de red.

Los aspectos y detalles de funcionamiento de las redes de comunicación se encuentran fuera del alcance de este trabajo, sin embargo, se puede consultar en la referencia [27] donde se puede profundizar sobre estos aspectos.

6.4.2 Características de la red dentro del túnel

Como se había expresado anteriormente se contempla utilizar un sistema híbrido de comunicación que utilice un sistema de cableado desde el centro de monitoreo en superficie hasta el frente de operación de la TBM ubicado sobre el tren de equipo. Adicionalmente se deberá tener un sistema de Wifi dentro del túnel para que el personal que sea autorizado pueda enviar reportes de situaciones de riesgo incipiente o en cualquier grado dentro del túnel, y para que puedan ser localizados los responsables de las áreas que tengan que atender los llamados de riesgo.

A modo de ejemplo, en la construcción del Túnel Emisor Oriente que da servicio a la Ciudad de México, se tuvo en uno de los frentes una longitud excavada de 4 km, pero no es necesariamente un límite pues es posible tener longitudes mucho mayores. En el caso de la solución propuesta, se considera utilizar fibra óptica debido a que este tipo de transmisor opera adecuadamente para grandes distancias.

Las características sugeridas que debe tener la red que estamos planteando son las siguientes:

- Debe tener un ancho de banda con capacidad suficiente para operar adecuadamente todo el tráfico generado por los distintos dispositivos.
- Debe contar con un sistema de energía eléctrica alterno en caso de falla de suministro.
- La red deberá contar con un esquema de protección a través de un firewall para evitar intrusiones externas (hackeos).

El tráfico generado son datos obtenidos del monitoreo de los sensores e información de estado de dispositivos (encendido/apagado) así como transmisión de video y voz.

El tener servicio de conexión a los teléfonos inteligentes (“smart phones”) plantea un problema ocasionado por los hábitos de la gente, por tal motivo, la política sobre el uso de la red Wifi dentro del túnel deberá ser diseñada, escrita, divulgada, acotada y aceptada por el personal que usará los dispositivos móviles.

6.4.3 Capacidad de la red a considerar

La definición de la capacidad de la red está en función del tráfico (volumen de información enviado) manejado por los dispositivos y equipos IoT dentro de la red, que se considera pueden estar operando simultáneamente en un momento dado.

De acuerdo con lo anterior, en un túnel excavado con TBM de una longitud de 4 km, el sistema de red debería dar servicio a los sistemas abajo descritos. En túneles con características diferentes en cuanto a proceso y/o longitud, se recomienda realizar una tabla de necesidades para evaluar nuevamente cantidades de equipo y anchos de banda. Esto para dimensionar adecuadamente las necesidades de la red.

- Sensores IoT: 10 piezas relacionadas al sistema de monitoreo de gases, ubicando 5 en el frente de la excavación y otros 5 en el tren de equipo de la máquina tuneladora.
- Cámaras IP de reconocimiento facial ubicadas en el acceso y salida del túnel. 2 cámaras.
- Cámaras IP: 6 cámaras ubicadas desde la superficie hasta el frente del túnel en diferentes zonas de interés
- App de tickets (10 personas simultáneamente)
- Reporte de estatus de sistemas de energía, extracción de aire, operación de bandas, presencia de personal

Para proponer el ancho de banda en la red, se deben considerar todos los dispositivos o cualquier otro sistema digital que transmite datos a través de la red informática.

Será necesario realizar algunas pruebas de dispositivos IoT para analizar el tráfico de datos generado. Esto puede solicitarse a los proveedores de sensores IoT realizando una prueba de integración de dispositivos IoT con la solución de AWS, lo cual dará una idea del tráfico generado.

Los datos preliminares muestran que un dispositivo IoT puede generar un tráfico de 1 MB/s por dispositivo. Esto a reserva de lo que confirme el proveedor.

Se estima un tráfico de 4Mb/s por cámara hacia el centro de control de cámaras (CCTV). Dependiendo del tipo de cámara, es el tráfico generado. La resolución mínima por cámara será de una calidad de definición de imagen de 1920x1080. A continuación, un cálculo de tráfico aproximado de acuerdo con equipos y funcionalidades a ofrecer:

- Sensores IoT: 10 Mb/s
- Cámaras: 32 Mb/s
- App de tickets: 20 Mb/s
- Reporte de estatus de sistemas: 10Mb/s

Capacidad estimada requerida: 72 Mb/s

6.4.4 Seguridad de la red

Si bien, la red no administra asuntos de nómina o datos bancarios y financieros, si es necesario protegerla manejando un acceso restringido. Sólo los dispositivos de monitoreo que sean definidos, así como los usuarios a través de las aplicaciones tendrán acceso a la red a nivel de túnel. Sin embargo, al salir del túnel, el sistema requiere acceso a la nube AWS por lo que será indispensable el uso del ruteador para separar el tráfico de los dispositivos de monitoreo con el tráfico de las cámaras IP y de la aplicación del “sistema de tickets”.

Será necesario un Servidor para implementar el Firewall. Por otra parte, es mandatorio que el equipo CCTV o NVR (Network Video Recorder) no sea conectado a ninguna otra red de internet. Ver fig.11.

Por razones de seguridad, la conexión y visualización de videos solo podrá hacerse a través del “Dashboard” por lo que el tráfico de video será canalizado a la aplicación sin conexiones adicionales del equipo NVR (Network Video Recorders). Esto para evitar hackeos o abrir una “puerta” trasera a la red que la haga vulnerable.

La topología de red puede ser replicada en varios frentes de excavación.

Esta condición puede suceder al realizar la ejecución de túneles paralelos como el caso de los que se hicieron en los túneles del tren México-Toluca. Esto, si se considera que al construir un túnel, se crean equipos de trabajo e incluso, el proyecto es asignado a diferentes compañías, la arquitectura será similar. Entonces es posible tener varias redes que convergen en un solo “Dashboard”, donde se encuentra el Centro de Control de Seguridad.

El diagrama de la figura 11 muestra la configuración básica

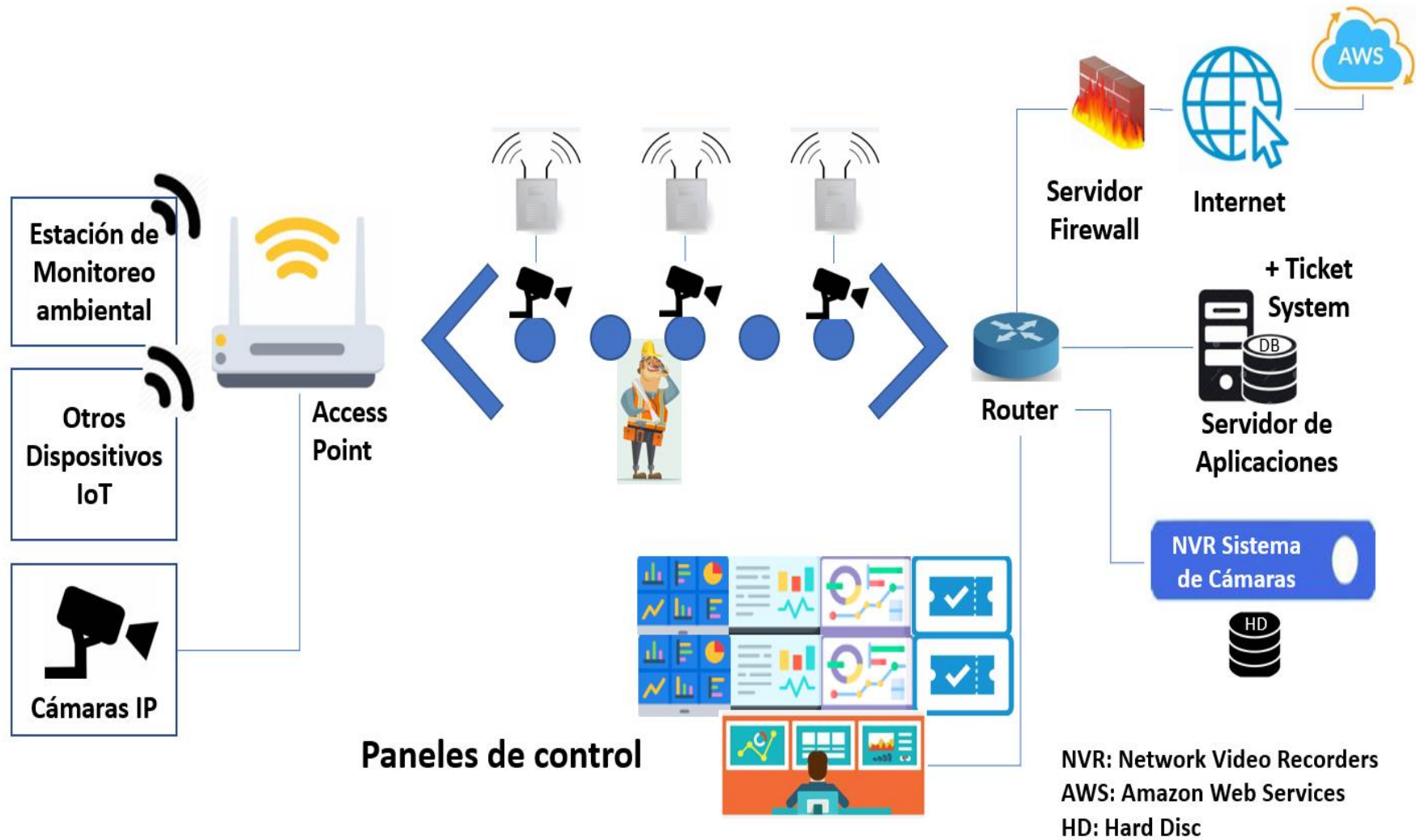


Figura 11. Topología de Red del Sistema de Seguridad de un túnel

La confiabilidad es generalmente el resultado de combinar una arquitectura sencilla, escalable, administrable acorde con el tráfico que se tiene. El responsable de la solución de red deberá estudiar cuidadosamente el diseño y eliminar los puntos clave de falla [27].

6.5 SISTEMA DE CCTV POR IP

Uno de los aspectos relevantes a cubrir en la seguridad del túnel es el control de la persona que ingresan ya que solo se debe permitir el acceso a personal autorizado. Por tal motivo se ha considerado la implementación de cámaras de reconocimiento facial [28]. Estas cámaras no solamente señalarán quien entra, pues también deberán garantizar que todo el personal que entra debe de salir. Esto se debe a que en ciertos horarios en donde se cierran las actividades dentro del túnel, se apagan algunos sistemas que son vitales.

Las cámaras IP (Internet Protocol) de reconocimiento facial serán instaladas tanto a la entrada como a la salida del elevador, por lo que será obligatorio el acceso y retiro mediante el registro de reconocimiento facial, para lo cual se montará aunado al sistema de reconocimiento, un torniquete de paso de uno en uno para obligar el ingreso y salida de frente a la cámara. El torniquete no activará la salida si la persona no registro la entrada.

Lo anterior se contempla porque se han presentado casos fatales dentro de la excavación de los túneles, al no llevar un estricto control de las entradas y salidas de personal. Al terminar labores, el último turno de trabajo de la semana, regularmente se detienen las actividades de ventilación y en algunas ocasiones personal correspondiente a otras áreas de excavación, tales como topografía, maquinaria u otra permanece realizando actividades en el frente de trabajo, pero al no existir ventilación se presentan concentración de gases que pueden ser fatales. De ahí la importancia de llevar un control estricto de la entrada y salida del personal mediante el reconocimiento facial y su información al sistema de monitoreo central.

Por otra parte, de manera automatizada se generará un control preciso con nombres, así como los siguientes datos:

- Número de personas que entran al día
- Número de personas que salen al día
- Cuántas personas hay en cierto momento

Se modificarán algunos protocolos de apagado de equipos de apoyo de vida. Este protocolo dicta que se deberá revisar el sistema de control de acceso para identificar qué personas faltan por salir del túnel. Las cámaras se instalan de la siguiente forma:

- 1 Cámara IP PTZ* en zona de maniobras de superficie de lumbrera
- 2 Cámaras IP de reconocimiento facial en el acceso y salida de la zona de elevador en superficie
- 1 Cámara IP panorámica (360, a 10m de altura) para verificar actividades al fondo de la lumbrera
- 1 Cámara IP fija en la zona de cambio de vías y zona de “cassette” (donde se empalma la banda transportadora de material)
- 1 Cámara IP fija frontal en zona de compuerta de excavación.
- 1 Cámara IP fija en zona de descarga de material y de ensamble de dovelas

**PTZ significa Panorámica, Inclinación (“Tilt”) y Zoom*

Las características del monitoreo de cámaras involucran:

- Respaldo de video de 30 días
- Sistema de visualización en Centro de Control en el “Dashboard”

6.6 SISTEMA DE TICKETS

Como se señalado anteriormente, se tiene considerado implementar un sistema de administración de tickets. Esta herramienta permitirá reportar, visualizar y gestionar ante “el centro de control” los casos o situaciones que representan un riesgo y que deben ser atendidos por las áreas encargadas de la construcción del túnel. Desde el nivel de reporte se puede señalar el nivel de riesgo y la premura con que se requiere atender el reporte, ya sea que requiera atención inmediata o programada.

El valor proporcionado por el sistema de tickets, es la colaboración de un grupo amplio de personal para documentar y llevar un registro de los datos, para que en lo sucesivo se puedan programar actividades preventivas y correctivas. Al quedar registrados los reportes, se pueden analizar los datos para determinar frecuencias de ajuste y calibración en bandas transportadoras, sensores y otros equipos.

El sistema de tickets apoya el funcionamiento y operación de diversos sistemas. La figura 12 muestra algunos de los sistemas que coexisten en la construcción.

Adicionalmente, las múltiples fuentes de datos obtenidos a través de sensores y estatus de estado de los equipos y sensores son recopilados y concentrados en una Base de Datos, la cual interactúa con el sistema de tickets. Estas funciones pueden llevarse a cabo en forma automatizada (programada en el sistema) y también con la posibilidad de aceptar una apertura manual de un ticket.

La apertura manual puede gestionarse a través de dispositivos móviles (teléfono celular, tablets, Lap Tops) que cuenten con una aplicación diseñada y configurada de manera exprefeso.



Figura 12. Diversidad de sistemas presentes en la construcción de un túnel.

Los requerimientos básicos de estos dispositivos son descritos a continuación

- Los usuarios autorizados deberán contar cada uno con un registro de User y Password. Se apegarán a reglas a normas de Seguridad de la Información.
- Deberá permitir ingresar al sistema con diferentes niveles de usuario asociados a diferentes “ventanas”. Es decir, dependiendo del perfil de usuario será las pantallas que despliegue.
- La navegación en el menú será de acuerdo con la siguiente estructura:

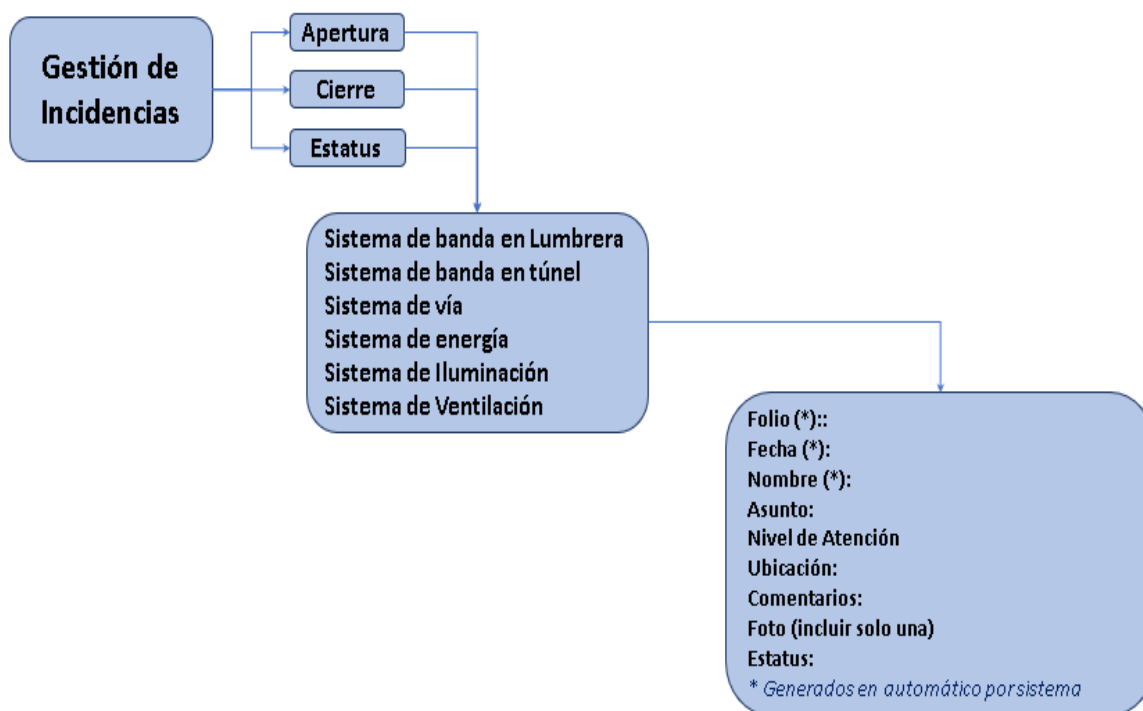


Figura 13. Menú de navegación en aplicación (App) móvil

Los menús arriba descritos son ejemplos y deberán ser de fácil navegación con opciones de:

Menús emergentes (Pop up). Que al tocar se abra la App mostrando detalles de por ejemplo un folio. Si quisiera revisar el estatus de algún folio abierto, tener la posibilidad de ver el contenido y los comentarios. Precisamente al revisarlos, algunas firmas deberán tener la autoridad de escalar o subir la prioridad del ticket convirtiéndolo en urgente.

Por ejemplo, mediante el sistema de tickets, cuando el personal autorizado haya detectado un posible punto de riesgo dentro del túnel, puede levantar un reporte mediante su teléfono celular en la aplicación preparada de manera expreso en el sistema de tickets. El riesgo podría ser por un durmiente en mal estado dentro del sistema de vía del túnel, que pudiera provocar un descarrilamiento de la locomotora y los “trucks” de dovela y personal. Al levantar el reporte, esta persona puede señalar la ubicación, el grado de riesgo e inclusive puede adjuntar una imagen que señale el grado de celeridad con que deba ser atendido.

El reporte es enviado al sistema de tickets, el cual lo procesa de manera automatizada sin comunicación personal y lo gestiona dentro de una matriz de responsabilidades y reporta a la persona o al grupo de personas encargadas de atender la problemática con la celeridad que corresponda.

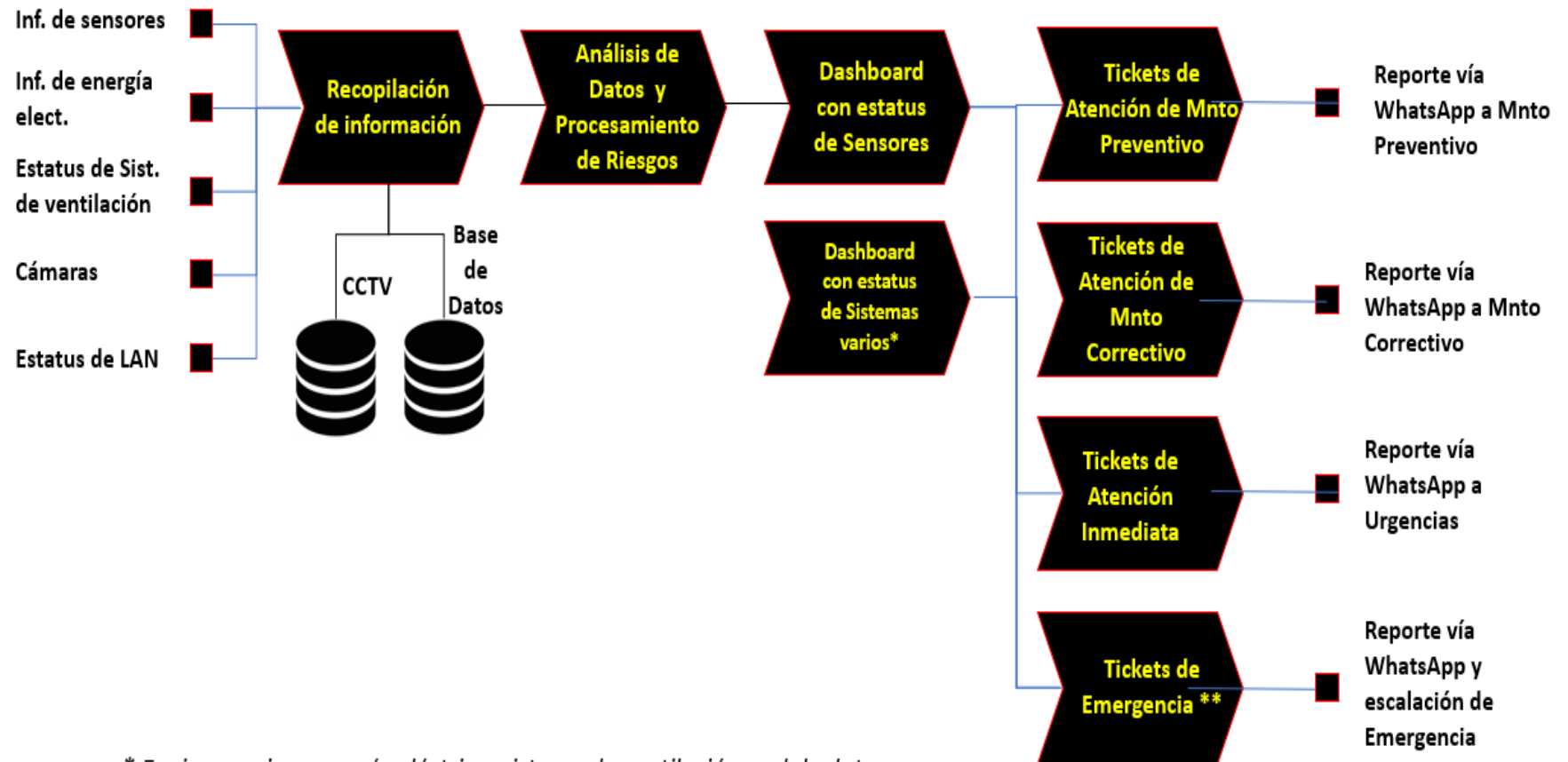
La información generada permite realizar estadísticas de desempeño, por ejemplo:

- Frecuencia de mantenimiento
- Nivel de celeridad de atención por grupo o persona
- Nivel de cumplimiento en tiempos de respuesta
- Frecuencia de fallas
- Fallas más comunes por rubro
- Fallas más comunes por categoría (vía, lumbrera, bandas...)

Existen en el mercado ya desarrollados sistemas de tickets actualmente aplicados en áreas de mantenimientos preventivos y correctivos, mercadotecnia (marketing), etcétera. Sin embargo, se deberá hacer una implementación adecuada a las necesidades de los proyectos de construcción de túneles.

La figura 14 muestra los procesos básicos del sistema de tickets. Obviamente, los sistemas actuales cuentan con muchas más funcionalidades. Aquí, solo se muestran los esenciales requeridos para el sistema.

SISTEMA DE TICKETS



* Equipos varios: energía eléctrica, sistema de ventilación, red de datos

** Emergencia: situación que pone en peligro la vida de una o varias personas

Figura 14. Funciones básicas del sistema de tickets

7. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Adicionalmente a los costos de adquisición de los equipos y de su instalación, se debe considerar como en cualquier otro tipo de equipos, el costo que representa el mantenimiento y el servicio del grupo de sensores, cámaras y equipos en general que estamos considerando para el sistema de seguridad.

Por ejemplo, en el caso de sensores de gas se deben realizar trabajos de recalibración periódicamente, situación variable en función del proveedor y de las características del equipo, así como de condiciones de humedad y temperatura dentro del túnel en el que van a operar.

En el caso de las cámaras, al igual que los equipos de red requieren de una revisión y mantenimiento durante su operación, no obstante que se están considerando equipos con resistencia a las condiciones ambientales requeridas.

7.1 SENSORES IoT.

Dentro del mercado se cuenta con algunos proveedores de dispositivos (sensores) para la medición de gases y para efecto de esta valorización de costos, se han considerado los precios promedio de estos equipos. Cabe señalar que se ha presentado en los últimos años una nueva generación de sensores de gas con mayor precisión en periodos más extensos de tiempo, los cuales también ya contemplan la conexión a bases de redes para el envío de los registros de las lecturas en tiempos predeterminados[11].

La información recopilada por los sensores será enviada a un controlador que integrará dicha información y la enviará a un Switch para ser convertida de señal eléctrica a señal óptica y sea transmitida por la fibra óptica hasta el Router, el cual direccionará los datos hacia el Firewall. Este se conecta a Internet para terminar almacenando la información en la Base de Datos de AWS (Amazon Web Services). Ver figura 15.

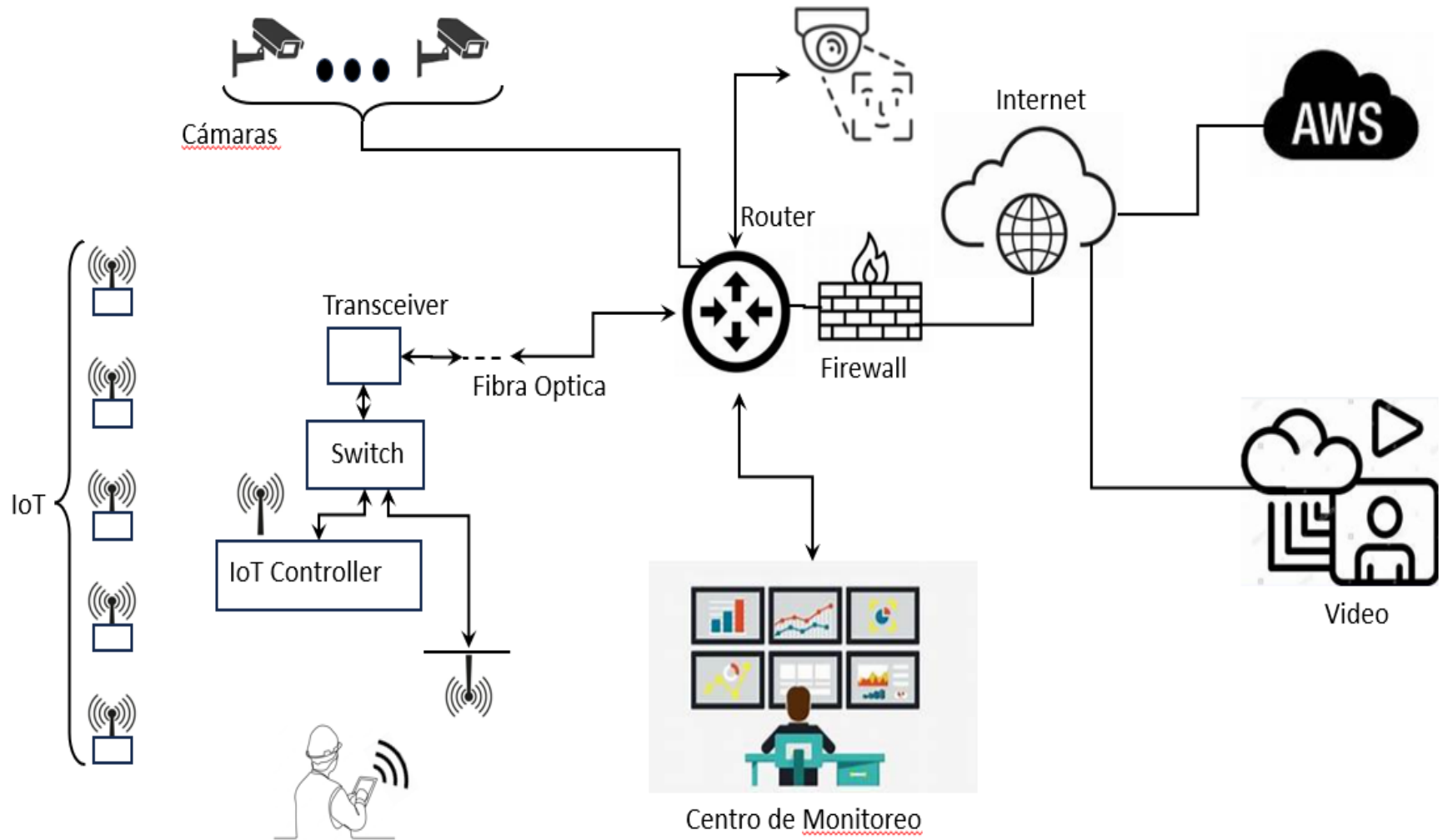


Figura 15. Diagrama resumido de implementación en campo

A continuación, se describen los costos estimados del sistema de IoT; los cuales incluyen los costos de los sensores, el controlador así como los costos de calibración y mantenimiento

Descripción de equipamiento de IoTs	Detalle	Cantidad	Precio unitario estimado en USD	Total en USD
Sensor IoT H2S Acido Sulfhídrico @ 900Mhz	TXP-WTA	2	312	624
Sensor IoT Metano CH4 @ 900Mhz	TXP-WTA	2	297	594
Sensor Oxido Nitroso NO@ 900Mhz	TXP-WTA	2	312	624
Sensor Oxigeno O2 @ 900Mhz	TXP-WTA	2	250	500
Sensor Bióxido de Carbono @ 900Mhz	TXP-WTA	2	250	500
Tarjetas de red		1	150	150
Fuente de alimentación de 24 Volts DC		2	25	50
UPS para IoTs, 100 Watts		2	150	300
Controlador TXP-WCR p/32 sensores	TXP-WCR	1	1500	1,500
Jgo de cables y conectores, splitters		2	100	200
Kits de fijación magnética de sensores		10	55	550
Total equipo IoT				5,592
Montaje y Prueba				1,398
Integración				671
Gran Total				7,661
Costo de calibración en sitio de sensores por evento		10	83.00	830
Total / año				830.00

Tabla 14. Costos de equipamiento de dispositivos IoT y gastos asociados.

7.2 SISTEMA CCTV

Los avances tecnológicos en cámaras de reconocimiento facial mantienen un incremento constante en la calidad de imagen. Por otra parte, la grabación de videos que anteriormente se realizaban en servidores locales denominados NVR, ahora a través de los mismos proveedores se ofrecen en un servicio de grabación a la nube y además se pueden recuperar y/o compartir en tiempo real con el centro de monitoreo. Es decir, se hace video streaming y se graban imágenes en la nube propiedad de los proveedores de estos equipos, lo que resulta en una mejor opción para lograr la continuidad del servicio sin perder detalle, ya que en los sistemas NVR tenían fallas frecuentes y períodos de vida de alrededor de 3 años.

Por otra parte, las cámaras PTZ requieren un mantenimiento periódico para su buen funcionamiento, dependiendo del ambiente de trabajo, independientemente de una limpieza continua. Estos servicios también deben ser considerados en los costos anuales del sistema.

Descripción de equipamiento de cámaras	Detalle	Cantidad	Precio unitario estimado en USD	Total en USD
Cámara 360°	Cámara IP @ 5Mbps	1	672	672.00
Cámara PTZ	Cámara IP, 15x	1	4,300	4,300.00
Cámaras de Rec. facial	Cámara IP	2	3,050	6,100.00
Cámara IP 110°	Cámara IP @ 5Mbps	3	890	2,670.00
Power Splitter		4	65	260.00
Cable estructurado UTP, 300m	CAT 6	1	174	174.49
Canalización, ductería y soportería		1	15,000	15,000.00
Gabinete IP65		1	450	450.00
PoE Router		1	115	115.00
Material misceláneo		1	1,500	1,500.00
Instalación y prueba		1	7,810	7,810.37
			Total equipo	39,051.86

Licencia de grabación anual en nube de fabricante de cámaras y NDA (No disclosure Agreement) Nota: Se recomienda licencia de grabación en videostreaming para evitar el NVR (grabador local)	1 mes de backup, cumple con: ISO 27001 norma de Seguridad de la Información	7	180	1,260
Mantenimiento anual		1	2,733.63	2,733.63
			Total / año	3,993.63

Tabla 15. Costos de equipamiento de sistema CCTV

7.3 RED WiFi

La complejidad técnica producto de la distancia a la que hay que extender la cobertura de la red Wifi en un túnel es un reto por ser en espacios confinados, ya que no es factible tener una comunicación totalmente inalámbrica. Por lo anterior, se ha considerado necesario la implementación de una solución híbrida, la cual consiste en la utilización de fibra óptica multimodo a colocar cada 400 metros estaciones base para dar funcionalidad de acceso de señal y poder ofrecer el servicio de Internet a lo largo del túnel. Así, por ejemplo, para

un túnel de 4 km de longitud tendremos distribuidas 10 estaciones de acceso comunicadas entre si a través de cable de fibra óptica. El punto de acceso es desde el Router y es distribuida con una fibra multimodo a una distancia de 400. La señal es recibida en la estación de acceso a través de un transceiver óptico el cual convierte la señal de óptica a eléctrica. Hecho esto, la señal se conecta con un cable a un Switch el cual se convierte en el punto de acceso de señal proveniente de antenas y cámaras (estas últimas cuando así se requiera ya que no todas las estaciones de acceso tendrán cámara). Ver figura 16.

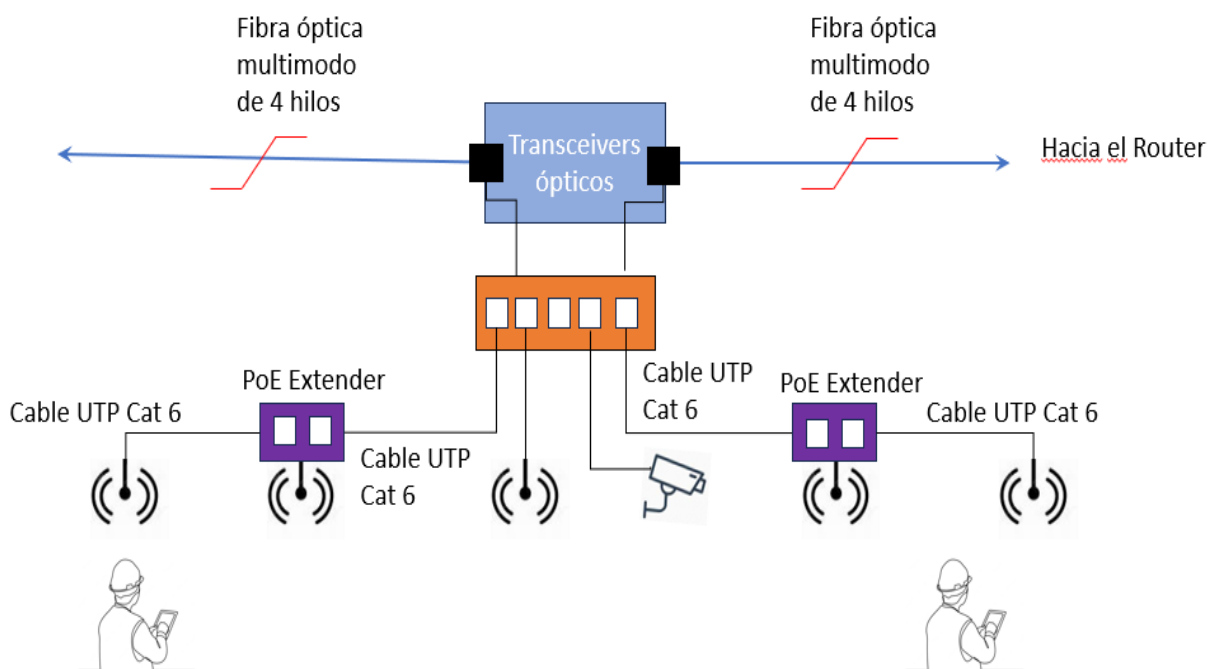


Figura 16. Diagrama resumido de una estación de acceso de señal Wifi

El Switch vuelve a insertar la señal al transceiver óptico hacia el siguiente segmento de 400 metros. En la figura 16 se aprecia que una persona de campo puede levantar un reporte vía un dispositivo móvil (celular) conectándose a través del Wifi, para lo cual, el servicio Wifi estará disponible a lo largo del túnel.

Es necesario que conforme se avanza en la excavación de los primeros 400 metros de túnel se instale la primera estación de suministro de Wifi y se hagan las pruebas pertinentes para ir ajustando la separación entre las estaciones, así como la definición de las antenas a emplear.

La tabla 16 muestra un estimado de los costos asociados a la red Wifi a instalar en el túnel.

Descripción de equipamiento de red de datos	Detalle	Cantidad	Precio unitario estimado en USD	Total en USD
Fibra Optica preconectorizada Multimodo, OM2, 900UM	4 hilos @ 400 metros (Optronics)	10	784.18	7,842
Switch Gigabit Ethernet 8 puertos PoE y 2 Puertos	Optronics	10	101.57	1,016
Convertidor de medios SC Gigabit Ethernet MM 850 nm @ 550m	Transciever, Optronics	20	44.01	880
Distribuidor de pared 12 puertos con 4 acopladores SC	Duplex para OM1/OM2, Optronics	20	53.02	1,060
Jumper Sc-SC Multimodo 50/125 OM2	Duplex de 1m Riser de 2mm, Optronics	20	17.97	359
Gabinete de Pared de 6 unidades, con todo el kit de montaje	Optronics	21	140.63	2,953
Barra de contactos de 19" Horizontal, 6 contactos	Optronics	21	33.20	697
Bobina de cable UTP Categoría 6 para int/ext sólido 23 AWG, 305 m	Optronics	22	174.49	3,839
Power extender 2 Puertos Gigabit PoE++	Optronics	20	113.29	2,266
Access Point Interior -2xGE - 1200 Mbps - 2.4 Ghz/5.8 Ghz	Para 120 usuarios, Optronics	1	136.72	137
Antena direccional WAVLINK N300 con WiFi Extender, 11dBi 1.5km, PoE Modo repetidor y punto de acceso	5 antenas por Switch	50	114.00	5,700
Firewall & Configuración		1	3500.00	3,500
			Total Equipo	30,249
			Montaje y Prueba	10,587
			Total	40,836
Mantenimiento anual	@ 5%	1	4,537	4,537
			Total / año	4,537

Tabla 16. Costos de equipamiento e implementación de red Wifi.

7.4 AWS / DASHBOARD / TICKET SYSTEM

Amazon Web Services ofrece de manera integral una solución que incluye:

- Almacenamiento en la nube (información de los sensores IoT)
- Sistema Dashboard configurable de acuerdo con las necesidades de información a mostrar en pantallas
- Servicios de Ticket System con funcionalidades de prioridad en un ticket, alarmas, transmisión de las mismas vía SMS, WhatsApp, mail. Adicionalmente, el sistema permite configurar alarmas en caso de que los

parámetros medidos por los sensores se encuentren en rangos no aceptables o situaciones riesgosas en el túnel.

Existe un área industrial del Amazon Web Services (AWS) enfocada al apoyo a empresas para todas las necesidades de monitoreo en diferentes tipos de equipos y maquinaria. Inclusive, existen ya funcionalidades de monitoreo automático en la industria proporcionadas por AWS que involucran gráficos estadísticos que son configurables según la necesidad, un ejemplo de ello es el registro de tiempos de operación y paro de un equipo, horarios de operación, etcétera.

En reunión con expertos en soluciones de AWS, estos indicaron que es completamente factible desde un punto de vista técnico, la implementación del Sistema de Seguridad propuesto, ya que la solución al interactuar con un sistema Dashboard, Ticket System e IoT es similar a la que se ha realizado en diferentes industrias química, automotriz, etc., dentro del área de procesos.

La tabla 17 muestra los costos asociados al equipamiento de los paneles de visualización (“dashboard”).

Descripción de equipamiento de dashboard	Detalle	Cantidad	Precio unitario estimado en USD	Total en USD
Server estación de trabajo	Tarjeta de video para soportar 6 monitores	1	5,200	5,200
Monitores de visualización	Alto desempeño @ 24 horas encendido	6	555	3,330
Soporte para monitores	Diseñado para 6 monitores de al menos 28 pulgadas	1	700	700
			Total	9,230

Tabla 17. Costos de equipamiento necesario para los paneles de visualización (“dashboard”).

Cabe señalar que AWS ofrece una gran cantidad de plataformas ya diseñadas dentro de diversas industrias, las cuales pueden ser aprovechables seleccionando las que más se ajusten a las necesidades, sin tener que hacer desarrollos de SW particulares que pudieran elevar el costo.

Los montos del servicio aprovechando las plataformas preestablecidas y considerando el nivel de dispositivos que se plantean dentro del sistema de seguridad, nos arrojan un valor de 600 USD al mes sin importar la cantidad de usuarios.

La tabla 18 muestra los costos de los servicios ofrecidos por Amazon Web Services (AWS) por un período de un año

Descripción de servicios AWS	Detalle	Cantidad	Precio unitario estimado en USD	Total en USD
AWS + Dashboard + Ticket System		12	600.00	7,200
			Total	7,200

Tabla 18. Costo anual de los servicios de AWS.

Obsérvese que incluye integración de IoTs, SW para los paneles de visualización (“dashboard”) así como el sistema de tickets con las funcionalidades básicas descritas en 6.6.

7.5 RESUMEN DE COSTOS

La tabla 18 presenta un resumen del costo aproximado de la implementación del sistema de seguridad, así como los costos de mantenimiento y calibración de sensores por un período de 2 años.

Cabe mencionar que las cotizaciones de los equipos y su instalación se realizaron en el tercer trimestre de 2023, y dadas las características de los equipos y servicios fueron cotizadas en dólares. Se debe considerar que los costos son aproximados y pueden variar en función de los ajustes a la solución conforme se vaya implementando y los cuales pueden variar en función de las características del túnel en el que se pretenda realizar la implementación.

Otro aspecto que debe considerarse es que dada la velocidad con que avanza la tecnología, por lo que la vida útil de los equipos propuestos puede proyectarse solo en un periodo de alrededor de 3 años. De acuerdo con lo anterior se considera que la amortización de los equipos sería al 100% en un tramo de túnel.

Algunos de los gastos serán conforme se vaya avanzando dentro de la excavación del túnel y también estarán supeditados a ser modificados en función de las pruebas que se hagan dentro del túnel.

Costos de suministro e instalación

Sistema	Costo en USD
IoT	7,661.04
Cámaras	39,051.86
Red Wifi	40,836.46
HW Dashboard	9,230.00
AWS + Ticket System + Dashboard @ 1 año	7,200.00
Total	103,979.35

Costos de mantenimiento / calibración /licencias

Número de años estimados ----->	2
Sistema	Costo en USD
IoT Calibración y Mnto, 2 veces al año	1,660.00
Cámaras, Mantenimiento + licencia videostraming	7,987.26
Red Wifi, Mantenimiento	9,074.77
Total	18,722.03
Total invertido en 2 años	122,701

Tabla 19. Resumen de costos totales (USD) del sistema de seguridad.

8. CONCLUSIONES

Los sistemas de seguridad dentro de la construcción de túneles que se tienen implementados en nuestro país siguen operando de la misma forma desde finales del siglo pasado, sin que se tenga un cambio sustancial que aproveche las nuevas tecnologías que se encuentran disponibles. En este trabajo se presenta un cambio de paradigma en cuanto al seguimiento y la aplicación de los sistemas de seguridad en las actividades de excavación de túneles.

Al introducir un nuevo sistema o producto que modifica los procesos ya establecidos en cualquier proyecto de construcción, existe de manera natural una renuencia a su utilización, situación que se da desde el personal directivo. No es tarea fácil, convencer a las empresas en invertir en plataformas de seguridad más allá de aquello exigido por la Secretaria de Trabajo y Previsión Social, lo cual es en parte debido a la falta de una cultura de la prevención.

Por tal motivo, es necesario presentar en forma convincente ante grupos de toma de decisiones del área gubernamental y de las empresas relacionados a la construcción de túneles, los beneficios que reporta el sistema de seguridad integral planteado, el cual tendría una reducción sustancial de la presencia de accidentes, mediante la mitigación o eliminación oportuna de riesgos.

El reducir la presencia de accidentes dentro de la base laboral debe de ser por sí mismo, un gran aliciente para disponer recursos para la utilización de un sistema de seguridad integral, ya que es una muestra de la valoración hacia todo el personal que trabaja dentro del medio de los túneles para la creación de la infraestructura que requiere nuestro país.

Por otro lado, es importante para las empresas evalúen y analicen el sistema de seguridad planteado para que puedan determinar el importante beneficio económico y la conveniencia que se puede obtener al aplicarlo, ya que lo convierte más en una inversión redituable que en un costo.

Al analizar en el capítulo 5, se vio el impacto que representa dentro de un proyecto la variación de las primas de riesgo (definidas por la historia de accidentes de la empresa), y como puede afectar sustancialmente los resultados económicos que esperan obtenerse dentro de un proyecto, por lo que se hace obligatorio para cualquier empresa seria, el buscar reducir la

presencia de accidentes. La búsqueda y la obtención de manera sostenida de la reducción de accidentes repercutirá casi de manera directa en un ahorro tangible y palpable dentro de los costos de mano de obra dentro de los proyectos.

Debe considerarse que no es solo la reducción de accidentes, ya que la eliminación o reducción de tiempos perdidos en los procesos asociados a la presencia de incidentes, repercutirá en una mejoría de los rendimientos netos de producción, lo que se traduce en resultados económicos dentro de la empresa.

Al iniciar con el desarrollo de este trabajo se tenía en mente que para implementar un sistema de seguridad con tecnología de punta se tendría que hacer una inversión onerosa, sin embargo, después de haber investigado y cotizado (capítulo 7) se determinó que el costo de la tecnología que estamos considerando cada vez se encuentra más accesible en diversos aspectos.

Como ejemplo, las cámaras de CCTV tenían hasta hace algunos años un costo considerable y ahora se encuentran en valores relativamente accesibles y con mucha mejor resolución y una base de aplicación más amplia. Lo anterior, también es cierto en lo que se refiere a sensores de gases y de otro tipo, los cuales inclusive son cada vez más compactos, más robustos y ya algunos están preparados para enviar información de manera inalámbrica.

En el capítulo 7 se determinó que la puesta en marcha del sistema propuesto representa un costo de aproximadamente 3 millones de pesos, por lo que es importante cotejar lo que representa este monto contra el costo de la construcción de un túnel. Esto es válido, aun cuando el costo de un túnel puede variar significativamente en función de diversos aspectos tales como el diámetro, la longitud, el material por excavar, la ubicación, etc., por lo que es complicado manejar un costo base de salida.

Sin embargo, es factible hacer un ejercicio tomando como base el Túnel Emisor Oriente. De acuerdo con lo visto en el capítulo 4, el costo (a valores del 2023) por km sería de 645 millones por km por lo que el costo de un túnel de 2.5 km sería de 1,600 millones de pesos contra 3 millones de pesos que costaría toda la implementación del sistema de acuerdo con lo visto en el capítulo 7.

En base a lo anterior el costo que representa la implementación del sistema de seguridad aplicando las tecnologías a que se ha hecho referencia en este

trabajo solo representa un 0.2% del costo total del proyecto, por lo que se considera completamente viable su aplicación.

En consecuencia, se tiene que la comparativa que se tiene entre el ahorro que representa el utilizar el un sistema de seguridad al reducir el nivel de incidentes, contra el costo que representa su implementación, da como resultado desde el punto de vista económico una factibilidad sobrada de la aplicación del sistema de seguridad planteado.

Por otro lado, para explorar la viabilidad técnica del sistema, se tuvo que solicitar el apoyo de personas de diferentes especializadas, algunas en IoT, en redes de comunicación alámbricas e inalámbricas, en temas como el sistema de tickets y la integración en plataformas de nube y su presentación en paneles de presentación de monitoreo (dashboard). Se tuvo comunicación y orientación de proveedores de sensores y de sistemas de red, así como de facilitadores de servicios de plataforma en nube, específicamente de Amazon.

Después de haber tenido esta investigación y la comunicación con los especialistas, se concluye que es totalmente viable desde el punto de vista técnico el sistema que se está planteando, sin embargo, para ponerlo en práctica será necesaria la conformación de un grupo multidisciplinario con un profundo conocimiento en cada una de las áreas a que se ha hecho referencia, para que converjan en la obtención del sistema final, ya que son especialidades que no son cubiertos por solo una persona o un grupo, por lo que se tendrá que amalgamar un equipo para su puesta en marcha.

Cabe mencionar que de acuerdo con lo señalado por especialistas de redes, será necesario ajustar y optimizar en la práctica dentro del túnel, para verificar los alcances de comunicación inalámbrica y así afinar los parámetros de instalación, ya que podría ser muy diferente las necesidades para un túnel recto de 9 metros de diámetro que para un túnel con diversas curvas con 5 metros de diámetro.

Otro de los aspectos que se debe tomar en cuenta es el compromiso del personal que labora en túnel para poner en la marcha este sistema. El operar un sistema de seguridad apoyado en la tecnología involucra una reconfiguración de las actividades y prácticas del personal que será encargado de la seguridad dentro de la obra, por lo que el grupo de personal seleccionado tendrá que ser entrenado con habilidades acorde a las tecnologías que los estarán apoyando. Esto se vuelve un desafío en la práctica, ya que personal

que tiene un enfoque primordialmente en el aspecto de producción dentro de un proyecto, además de su capacitación tendrá que asimilar la importancia y la necesidad de su intervención en lo que respecta a las áreas de seguridad.

También es importante mencionar que el tener un servicio de internet dentro del túnel puede ser mal empleado y convertirse en un gran distractor para el personal y por lo mismo, en un generador de riesgo lo que podría ser contraproducente en lo que se está buscando. Por lo anterior, el acceso a la red y a los sistemas de internet deben estar blindados y restringidos al grueso del personal dentro del túnel, y solo el personal seleccionado con un alto grado de responsabilidad, deberá ser autorizado para tener acceso a las redes y al sistema de comunicación inalámbrica a través de sus teléfonos celulares.

Por último, se ha expuesto que es factible y viable llevar a cabo la implementación del sistema de seguridad con las aplicaciones tecnológicas que se están considerando, con resultados que se prevén satisfactorios. Este trabajo se ha enfocado en túneles excavados con máquinas TBM, pero es posible extenderse a los ejecutados con diferentes procedimientos realizando diversos ajustes particulares para cada situación.

En resumen, se puede concluir que la puesta en práctica de este sistema es un reto que se aprecia alcanzable ya que el costo de implementación es más que aceptable contra los beneficios que pueden obtenerse. Además de contribuir a una mejora en la seguridad de los trabajadores del medio de los túneles, tendría una conveniencia económica dentro del costo del proyecto.

Adicionalmente se puede considerar que la aplicación de un sistema de seguridad con tecnología de punta por parte de las empresas se integrará como parte de las políticas y cultura organizacional de la empresa, las cuales forman parte importante del activo organizacional, base importante de la cultura y política organizacional de las empresas.

9. REFERENCIAS

- [1] A. Oppenheimer, *¡Sálvese quien pueda!: El futuro del trabajo en la era de la automatización*. 2018.
- [2] «ITA-AITES portal - Home». Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ita-aites.org/>
- [3] «Tunnels & Tunnelling International». Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.tunnelonline.info/>
- [4] (National Fire Protection Association – NFPA, «PC NL Tunnels PDF | PDF | Firefighting | Fires», Fire protection in tunnels: Focus on road & train tunnels. Accedido: 5 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/433027516/pc-nl-tunnels-pdf>
- [5] J. R. Mawhinney, «Fixed Fire Protection Systems in Tunnels: Issues and Directions», *Fire Technol*, vol. 49, n.º 2, pp. 477-508, abr. 2013, doi: 10.1007/s10694-011-0220-2.
- [6] B. J. Arends, S. N. Jonkman, J. K. Vrijling, y P. H. A. J. M. Van Gelder, «Evaluation of tunnel safety: towards an economic safety optimum», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 90, n.º 2-3, pp. 217-228, nov. 2005, doi: 10.1016/j.ress.2005.01.007.
- [7] «Structural Health Monitoring with Distributed Optical Fiber Sensors of tunnel lining affected by nearby construction activity».
- [8] Chen Gangqiang, «Design and Test of Intelligent Inspection and Replacement System of TBM Excavation Tools». Accedido: 30 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.iberio.elogim.com/document/8920794/>
- [9] «Mining - Herrenknecht AG». Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.herrenknecht.com/en/products/mining/>
- [10] «TUNELADORAS», Robbins. Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.robbinstbm.com/es/neustros-productos/tunnel-boring-machines/>
- [11] W. Gong *et al.*, «Recent advances in laser gas sensors for applications to safety monitoring in intelligent coal mines», *Frontiers in Physics*, vol. 10, 2022, Accedido: 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2022.1058475>
- [12] «Norma Internacional ISO 45001. Sistemas de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (2018).»
- [13] «LEY DEL SEGURO SOCIAL. Ultima reforma publicada DOF 25-04-2023».

- [14] Catalogo de costos directos de cimentaciones profundas 2020, «CMIC CIMENTACIONES PROFUNDAS».
- [15] «NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011, Construcción- Condiciones de seguridad y salud en el trabajo. DOF 25 de marzo de 2011». Accedido: 13 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://mx.search.yahoo.com/search?fr=mcafee&type=E211MX1357G0&p=Evaluacion+de+riesgos+laborales+STPS>
- [16] M. Talabis y J. Martin, *Information Security Risk Assessment Toolkit: Practical Assessments through Data Collection and Data Analysis*. Newnes, 2012.
- [17] «Envira DS. Software para el control de emisiones y calidad del aire», Envira. Accedido: 15 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://enviraiot.es/envira-ds/>
- [18] «Tecnología de redes industrial para túneles | Phoenix Contact». Accedido: 2 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.phoenixcontact.com/es-mx/industrias/aplicaciones/tecnologia-redes-industrial-tuneles>
- [19] D. Gómez, «Sistema de tickets: 18 herramientas de ticketing para 2023». Accedido: 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://blog.hubspot.es/service/sistema-tickets>
- [20] D. V. K. Sachan, *Internet de las cosas*.
- [21] «TracXP Wireless Applications», Macurco Gas Detection. Accedido: 15 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://macurco.com/applications/wireless-monitoring/>
- [22] S. Borsay, *AWS Serverless IoT: Inexpensive IoT Projects to take you from Zero to AWS IoT Hero*. 2022.
- [23] «Grafana Dashboards - Amazon Managed Service for Grafana - AWS», Amazon Web Services, Inc. Accedido: 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://aws.amazon.com/grafana/>
- [24] «What is a SCADA System and How Does It Work?», OnLogic Blog. Accedido: 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.onlogic.com/company/io-hub/what-is-a-scada-system-and-how-does-it-work/>
- [25] «Intelligence at the IoT Edge — AWS IoT Greengrass — Amazon Web Services», Amazon Web Services, Inc. Accedido: 24 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://aws.amazon.com/greengrass/>
- [26] B. Willsey y J. Casad, *Aprendiendo TCP/IP En 24 Horas*. 1999.

- [27] R. A. Nastase, *Computer Networking for Beginners: The Beginner's guide for Mastering Computer Networking, the Internet and the OSI Model: 1*. 2022.
- [28] «Smart VCA :: VIVOTEK »: Accedido: 16 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.vivotek.com/learning/feature-article/smart-vca>

ANEXO 1. COSTO DE CUADRILLAS DE EXCAVACIÓN EN TÚNEL CON TBM

SALARIOS CON FSR APROXIM. A 2023

1	Cuadrilla de excavación:	Unidad	Cant.	Costo *MN	Importe MN
	Operador de la TBM	Turno	1	\$ 2,000.00	\$ 2,000.00
	Operador del erector de dovelas	Turno	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
	Cabo de oficios	Turno	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
	Oficial Maniobrista	Turno	4	\$ 1,200.00	\$ 4,800.00
	Ayudante General	Turno	2	\$ 700.00	\$ 1,400.00
					\$ 11,200.00
2	Cuadrilla de Inyección	Unidad	Cant.	Costo * MN	Importe MN
	a) En superficie				
	Operador de planta de mortero	Turno	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
	Operador de retroexcavadora	Turno	1	\$ 1,300.00	\$ 1,300.00
	Ayudantes generales	Turno	2	\$ 700.00	\$ 1,400.00
	b) En túnel				
	Operador de truck de inyección	Turno	1	\$ 1,300.00	\$ 1,300.00
	Operador de bomba de inyección	Turno	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
	Inyectista	Turno	2	\$ 1,200.00	\$ 2,400.00
	Ayudante general	Turno	2	\$ 700.00	\$ 1,400.00
					\$ 10,800.00
3	Cuadrilla de Banda y ventilación.	Unidad	Cant.	Costo * MN	Importe MN
	Cabo de oficios	Turno	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
	Operador de banda	Turno	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
	Oficial mecánico	Turno	2	\$ 1,200.00	\$ 2,400.00
	Ayudantas generales	Turno	2	\$ 700.00	\$ 1,400.00
					\$ 6,800.00

4	Cuadrilla de manteo en lumbrera	Unidad	Cant.	Costo *MN	Importe MN
	a) En superficie				
	Cabo de oficios	Turno	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
	Operador de grúa pórtico	Turno	1	\$ 1,800.00	\$ 1,800.00
	Operador de grúa sobre orugas	Turno	1	\$ 1,800.00	\$ 1,800.00
	Oficial Maniobrista	Turno	2	\$ 1,200.00	\$ 2,400.00
	Ayudante general	Turno	6	\$ 700.00	\$ 4,200.00
	b) En túnel				
	Operador de bomba de achique	Turno	1	\$ 1,300.00	\$ 1,300.00
	Oficial Maniobrista	Turno	2	\$ 1,200.00	\$ 2,400.00
	Ayudante general	Turno	6	\$ 700.00	\$ 4,200.00
					\$ 19,600.00
5	Cuadrilla de suministro de dovelas	Unidad	Cant.	Costo * MN	Importe MN
	Operador de locomotora	Turno	1	\$ 1,300.00	\$ 1,300.00
	Oficial Maniobrista	Turno	1	\$ 1,200.00	\$ 1,200.00
	Ayudante general	Turno	1	\$ 700.00	\$ 700.00
					\$ 3,200.00
6	Cuadrilla de Topografía	Unidad	Cant.	Costo * MN	Importe MN
	Jefe de topografía	Turno	0.5	\$ 1,800.00	\$ 900.00
	Topógrafo	Turno	1	\$ 1,300.00	\$ 1,300.00
	Cadenero	Turno	1	\$ 700.00	\$ 700.00
					\$ 2,900.00
7	Cuadrilla eléctrica	Unidad	Cant.	Costo * MN	Importe MN
	Cabo de oficios	Turno	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
	Oficial eléctrico	Turno	2	\$ 1,300.00	\$ 2,600.00
	Operador de planta de emergencia	Turno	1	\$ 1,300.00	\$ 1,300.00
	Ayudante general	Turno	2	\$ 700.00	\$ 1,400.00
					\$ 6,800.00

ANEXO 2. COSTO DE MAQUINARÍA EN PROCESO DE EXCAVACIÓN EN TÚNEL CON TBM

1	Descripción del equipo	Unidad	Cant.	C. H. Inact. MN	Importe MN
	Grúa Pórtico de 100 ton	H.I.	1	\$ 1,100.00	\$ 1,100.00
	Grúa sobre orugas Link-Belt LS-118	H.I.	1	\$ 750.00	\$ 750.00
	Grúa Hiab 12 ton	H.I.	1	\$ 370.00	\$ 370.00
	Subestación 5000 KVA	H.I.	1	\$ 480.00	\$ 480.00
	Cargador frontal CAT 950	H.I.	1	\$ 420.00	\$ 420.00
	Excavadora CAT 320 o similar	H.I.	1	\$ 500.00	\$ 500.00
	Locomotora eléctrica SIG Mod ETBB70 (15 ton)	H.I.	3	\$ 370.00	\$ 1,110.00
	Compresor de 750 PCM	H.I.	1	\$ 250.00	\$ 250.00
	Planta de mortero (concreto)	H.I.	1	\$ 360.00	\$ 360.00
	Planta de emergencia de 500 KVA	H.I.	1		\$ -
	Elevador 12 personas	H.I.	1	\$ 650.00	\$ 650.00
	Carro transportador de mortero	H.I.	1	\$ 180.00	\$ 180.00
	Bomba sumergible de 4" (60 HP)	H.I.	3	\$ 300.00	\$ 900.00
	Ventilador de 36" (60 HP)	H.I.	1	\$ 400.00	\$ 400.00
					\$ 7,470.00

**Notas:

1. No se considera el cargo que representa la TBM. En México en diversos proyectos el equipo es suministrado por las dependencias.
2. Solo se contemplan los equipos mayores más representativos. En un análisis real se deben presentar también los equipos menores, tales como soldadoras, carros de dovelas, bombas de agua, agitadores de bentonita, etc.
3. Los costos horarios son considerados inactivos para realizar la evaluación y pueden variar en función de las consideraciones de quien realiza el análisis de costos.