



# *Métodos Ópticos para la inspección de rieles*

## **Ingeniería Ferroviaria**

Preparó: Mag. Ing. Rodrigo Romero

Revisó: Dr. Javier Fava

Versión 2017

## INDICE

RESUMEN.....	3
INTRODUCCION.....	4
METODOS DE INSPECCION SIN CONTACTO.....	6
GEOMETRÍA DE LA VÍA.....	11
LIMITACIONES DE LAS INSPECCIONES AUTOMATIZADAS.....	16
DETERMINACIÓN DE LA UBICACIÓN.....	18
PORTABILIDAD Y VEHICULOS.....	22
CARACTERISTICAS POTENCIALES DE LA MEDICIÓN AUTOMATIZADA.....	25
OTRAS APLICACIONES EN EL SECTOR FERROVIARIO.....	30
CONCLUSIONES.....	41
BIBLIOGRAFIA.....	42

## RESUMEN

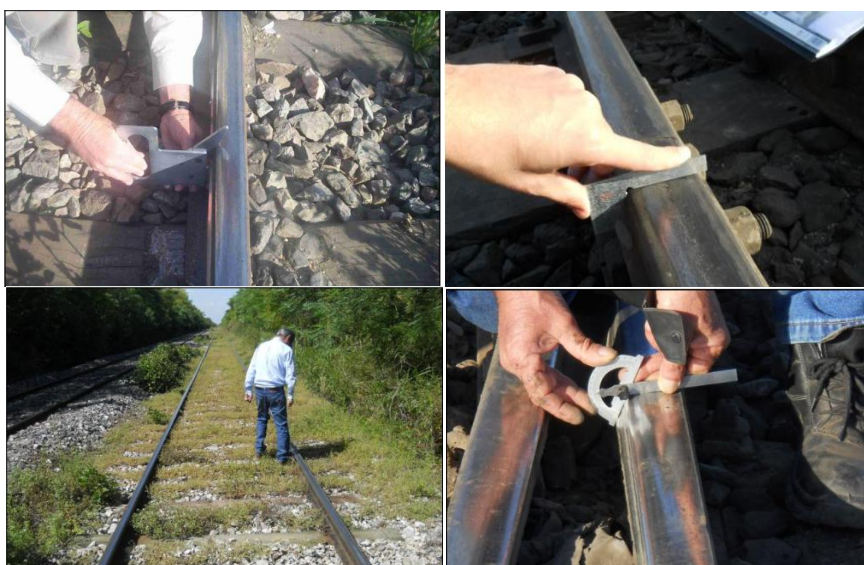
En el marco del estudio de rieles empleados en el ámbito ferroviario, anteriormente se presentó un documento en el que se describe la defectología asociada a éstos, sus características y métodos de ensayos no destructivos [1]. En dicho documento se mencionan las tecnologías vigentes para el control y mantenimiento de estos componentes, siendo la tecnología ultrasónica la preponderante en el sector ferroviario. No obstante, en los últimos años emergen nuevas metodologías\* que se están aplicando en el sector y que su impacto no deja de ser importante. Nos referimos tanto a la tecnología por métodos electromagnéticos (corrientes inducidas), como también a los métodos ópticos. La primera de estas ya fue abordada en dicho documento y su aplicación en otros países cumple ya un rol fundamental. Actualmente desde este grupo de trabajo se están avocando esfuerzos para que a futuro este tipo de tecnología salga a la luz dentro del ámbito local. Por otro lado, las mediciones sin contacto realizadas con métodos ópticos están llenando una vacante dejada por los otros métodos en lo que se refiere al seguimiento de un parámetros muy importante para la industria ferroviaria como lo es el control de los parámetros geométricos de la vía.

En este documento se presenta el estado del arte de los métodos ópticos que se han desarrollado en otros países con el propósito de controlar y mantener la enorme inversión en infraestructura que representa la red ferroviaria, en particular se hará hincapié en la inspección de rieles. Adicionalmente se presentan otras aplicaciones en el ámbito ferroviario que emplean esta tecnología.

\*No nos olvidemos de otras tecnologías como las mediciones de vibraciones con acelerómetros, mediciones termográficas y mediciones de deformaciones y temperatura mediante fibra óptica con sensores de Bragg.

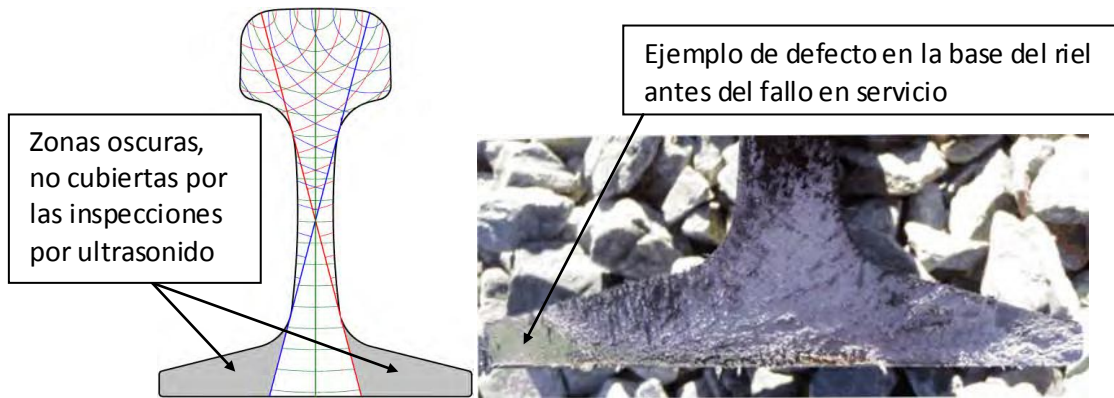
## INTRODUCCION

El aumento en los tiempos de fundonamiento, de las velocidades de operación y de las frecuencias operativas de los trenes produce un incremento en la carga de tráfico anual y aceleran el deterioro de la infraestructura, esto se traduce en aumento del número, la gravedad y la frecuencia de las operaciones de mantenimiento y renovación [2]. Esos mismos factores que acabamos de mencionar generan un requerimiento para que el material rodante se encuentre operativo durante las 24 horas del día, lo que conlleva a la disminución del tiempo disponible para su mantenimiento y conservación [3]. Estas circunstancias suscitan el replanteo de los sistemas que se emplean para las tareas de inspección y control. Si bien, en lo que a control de rieles se refiere, en muchas ocasiones dichas tareas eran ejecutadas por un operador caminando a lo largo de la vía [4], ver figura 1, hoy en día la tecnología ha prosperado en este sector y se emplean sistemas ópticos de medición sin contacto, que son adosados a distintos tipos de vehículos, permitiendo una evaluación más rápida, no dependiente del factor humano o la pericia del inspector y a la vez integral.

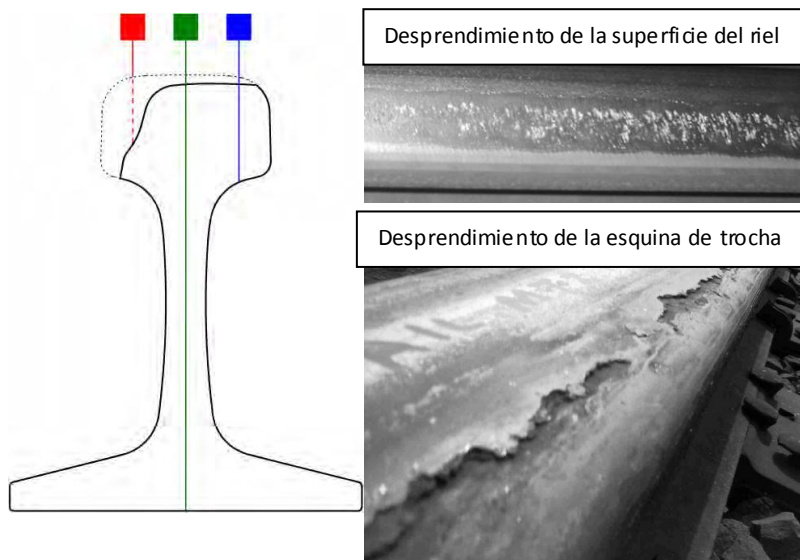


**Figura 1.** Ejemplos de inspecciones visuales y con instrumentos mecánicos [3].

Cabe mencionar que si bien la tecnología ultrasónica funciona muy bien para la detección de defectos volumétricos internos en la cabeza y el alma del riel [5, 6], y que por su parte la tecnología de corrientes inducidas se ajusta notablemente en la detección de defectos superficiales y subsuperficiales ubicados en la cabeza [7 - 11], ambas se encuentran limitadas en la detección de defectos que se encuentran en la parte inferior riel (patín). Como ejemplo se muestra la figura 2, en la cual se observa que a pesar de emplear varios transductores ultrasónicos con distintos ángulos, estos no llegan a cubrir el 100% del perfil transversal del riel y que las zonas laterales en el patín del riel quedan sin inspeccionar. Si consideramos otros factores como desgaste de la cabeza, superficies que presenten fatiga por contacto de rodadura (RCF por sus siglas en inglés), desprendimiento, descamación, o suciedad, ver figura 3, las señales que se obtienen pueden ser poco fiables [12].



**Figura 2.** Porciones de la base del riel no alcanzadas por las inspecciones de ultrasonidos [12].



**Figura 3.** Ejemplos de condiciones que impiden la inspección ultrasónica [12].

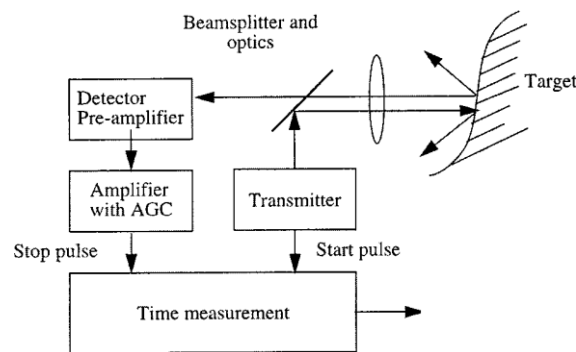
Ante esta problemática presente en los métodos ultrasónicos y electromagnéticos, surgen los sistemas ópticos de inspección sin contacto. Los avances en las últimas décadas tanto en las construcciones compactas de cámaras y láser, junto con el desarrollo de software inteligentes [13], han facilitado el desarrollo de sistemas de inspección que simplifican las tareas de control y monitoreo, y que son aplicados a distintas industrias [14 -16] entre ellas la industria ferroviaria. Sin embargo, estos sistemas aún no son capaces de reemplazar por completo a un inspector experimentado, ya sea por la variedad de anomalías que se pueden encontrar a lo largo de la vía, o por el nivel de destreza que requieren las inspecciones de los intrincados tramos de vía. Este tipo de tecnología se emplea para obtener la geometría del riel y además consigue reproducir la geometría completa de la vía, lo que comprende la posición de los rieles. Debido a alto grado de procesamiento de imágenes este tipo de inspecciones permite evaluar no solo parámetros geométricos sino también detectar fisuras, cuantificar desgastes en rieles, y a partir de estos establecer frecuencias de mantenimiento, minería de datos, entre otras. Este tipo de inspecciones se ha extendido a muchos componentes del ámbito ferroviario y hoy es posible evaluar el estado de durmientes, anclajes, balasto, catenarias, zonas de tránsito de trenes (claros) y túneles, catenarias y pantógrafos.

## MÉTODOS DE INSPECCION SIN CONTACTO

Actualmente podemos encontrar disponibles tres tipos de sistemas ópticos de inspección sin contacto: sistemas de escaneo por triangulación láser, sistemas de escaneo laser en base a tiempo de vuelo y sistemas de inspección basados en visión. De ellos trataremos de aquí en adelante, presentaremos detalles de la tecnología que contienen, las facilidades que ofrecen y la información que aportan para el control de la infraestructura ferroviaria.

### Método de tiempo de vuelo (TOF – TIME OF FLY)

La técnica de medición de distancias por tiempo de vuelo fue originalmente empleada en aplicaciones militares y topográficas. Se refiere al tiempo que le toma a un pulso de energía viajar desde su transmisor a un objeto observado y entonces volver al receptor. Si se emplea luz como fuente de energía, el parámetro relevante involucrado en la cuenta es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s). Un sistema de TOF mide el tiempo de viaje entre la emisión de un pulso de luz y el retorno del pulso eco resultante de la reflectancia del objeto. Haciendo uso de física elemental, la distancia es determinada multiplicando la velocidad de la luz por el tiempo que le toma a la luz recorrer esa distancia. En este caso el tiempo medido es representativo del doble recorrido de la distancia y debería por lo tanto reducirse a la mitad para obtener el rango actual del blanco.



**Figura 4.** Esquema de sistema de medición de distancias por tiempo de vuelo [17]

Un dispositivo de medición pulsada de TOF consiste de un laser emisor transmisor de pulsos con una duración de 5 a 50 ns, un canal receptor incluyendo un p-i-n o fotodiodo avalancha, amplificadores, control automático de ganancia (AGC) y discriminadores de tiempo. El pulso de luz emitido (pulso inicio) activa la unidad de medición de intervalo de tiempo, y el pulso de luz reflejado (pulso paro) lo detiene [17]. Un diagrama de bloques del buscador de rango laser se muestra en la figura 4

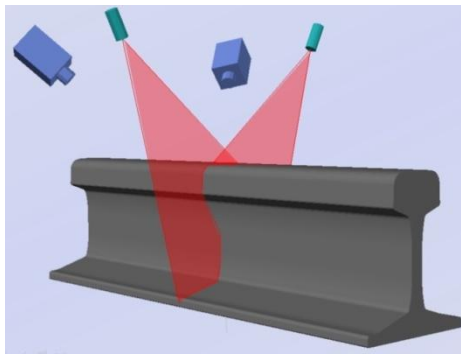
Los escáneres 3D de tiempo de vuelo utilizan un pulso láser emitido y lanzado a través de un espejo rotatorio. Este pulso es reflejado en la superficie escaneada y su reflejo retorna al escáner. A partir del tiempo de ida y vuelta de dicho pulso y su retomo se calcula la distancia, por esa razón se les denomina de tiempo de vuelo. Dependiendo del grado de inclinación y giro del espejo se conocen los ángulos de incidencia de dicho pulso láser, necesarios para poder calcular una posición en un sistema cartesiano x, y, z. Son los más extendidos dentro de la documentación del patrimonio arquitectónico debido a su versatilidad tanto por su larga distancia de adquisición en exteriores, como por su calidad y depuración en la toma de datos. Suelen incorporar una cámara integrada que proporciona el valor fotocromático RGB a cada punto adquirido, [18]. Estos sistemas requieren de puntos topográficos fijos que sirven como referencia, ver figura 5.



**Figura 5.** Equipo de escaneo láser por tiempo de vuelo [18].

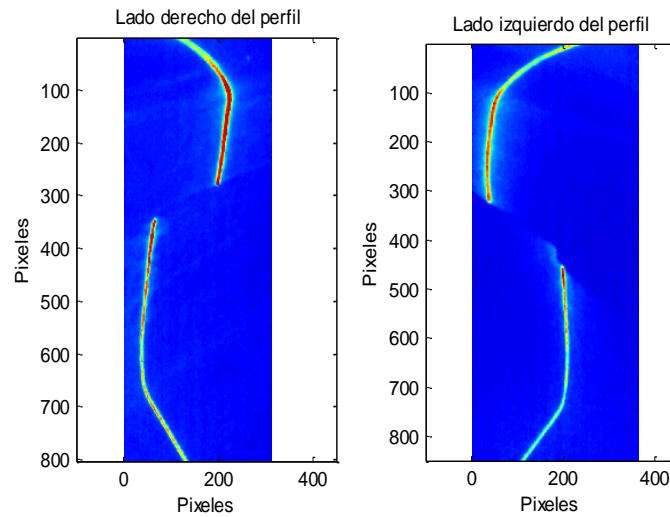
### **Método de triangulación láser empleando luz estructurada**

Los sistemas de escaneo láser se emplean para medir sin contacto la geometría de un componente mediante el uso de cámaras de alta velocidad y la proyección de líneas láser. En la Figura 6 se representa un esquema simplificado de la operación del dispositivo, en donde el proyector de línea láser se encuentra solidario a la cámara. El sensor es una cámara de alta resolución con alta velocidad de captura. La línea láser proyectada dibuja el perfil del objeto bajo estudio y éste es captado con el sensor.



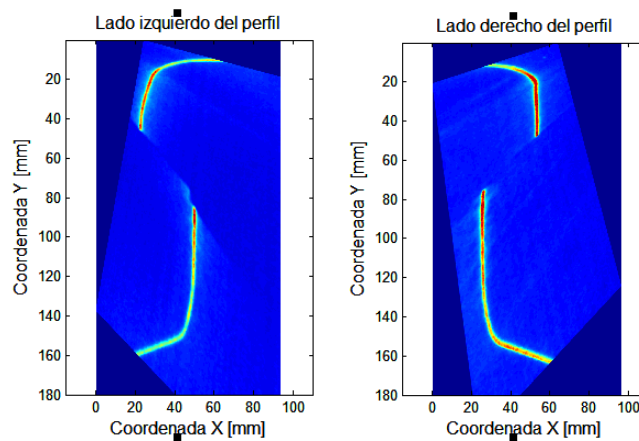
**Figura 6.** Esquema del dispositivo de escaneo láser con luz estructurada mediante método de triangulación [19]

La información del objeto se adquiere mediante el método de triangulación con luz estructurada, esto es, utilizando relaciones trigonométricas para interpretar la intersección del plano láser con el objeto examinado desde la cámara. La adquisición de datos se realiza a través de un video. Posteriormente cada cuadro de este video se analiza para obtener la línea proyectada sobre la muestra, como se muestra la figura 7.



**Figura 7.** Extracción de la línea láser proyectada sobre el riel [19].

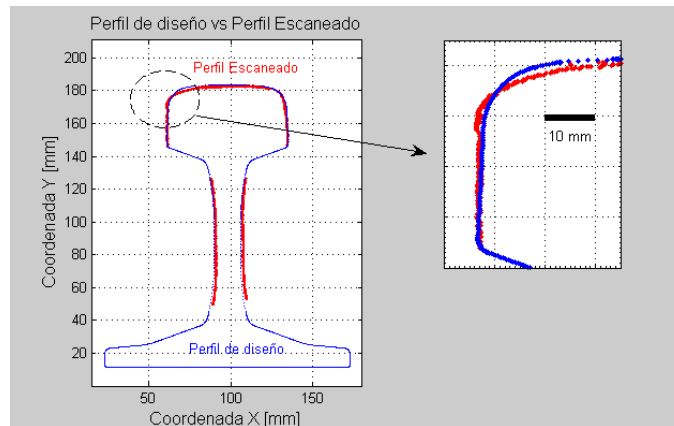
Posteriormente se aplica una transformación proyectiva debido a la orientación de la cámara para obtener el perfil corregido y la imagen antes en píxeles se convierte en una imagen en milímetros, ver figura 8.



**Figura 8.** Corrección de perspectiva de las imágenes de la figura 7 [19].

Al calibrar cada cámara con un sistema de coordenadas común entre ellas se puede acoplar los perfiles corregidos mostrados en la figura 8, los resultados de esta operación se muestran en la figura 9. En esta imagen se compara un perfil de diseños (color azul) con el resultado del escaneo láser.





**Figura 9.** Comparación entre resultados del perfil del escáner láser con un perfil de diseño [19].

### **Método de inspección basado en visión**

Los sensores de visión (visión artificial o sistemas de visión) son productos que consisten en una cámara de vídeo, pantalla e interfaz, y un procesador de computadora para automatizar procesos industriales y decisiones. Éstos se utilizan comúnmente para la medición, las decisiones pasa/no pasa y otras características observables relacionadas con la calidad del producto. Cuando la cámara tiene un procesador integral, se llama una cámara inteligente.

Los sistemas de visión artificial proporcionan el intercambio de datos entre una cámara de vídeo y un software basado en computadora. Las imágenes capturadas se comparan con los criterios especificados por el operador para determinar las acciones posteriores. Este criterio puede basarse en códigos de barras, detección de manchas/borrones, calibrado y alineación, y una variedad de otras características que pueden determinarse únicamente mediante examen sin contacto. Los sensores de visión son particularmente útiles cuando se deben inspeccionar múltiples características en el producto. Generalmente hay un cierto grado de tolerancia para cada artículo. Los sensores de visión son mucho más rápidos y precisos que los humanos empleados para la misma tarea.

Estos sistemas se componen de una cámara de barrido de línea (sensor lineal) y una unidad de iluminación. Construyen la imagen línea a línea realizando un barrido del objeto junto con un desplazamiento longitudinal del mismo. El hecho de construir imágenes de alta calidad a partir de líneas individuales, requiere de una alta precisión. La alineación y el sincronismo del sistema son críticos si se quiere obtener una imagen precisa del objeto a analizar [20]. El ángulo de iluminación juega un rol importante ya que según su orientación puede favorecer o no la detección de defectos [21].

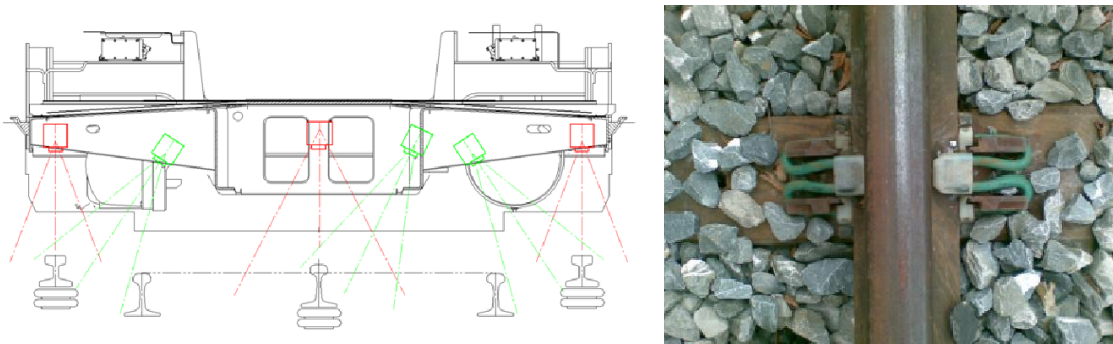
El concepto de barrido lineal se asocia a la construcción de una imagen línea a línea, utilizando un sensor lineal, de forma que la cámara se desplaza con respecto al objeto a capturar, o bien el objeto se desplaza con respecto a la cámara.

La tecnología de cámaras lineales fue desarrollada para aplicaciones de inspección de materiales fabricados en continuo, como papel, tela, planchas metálicas, etc. Sin embargo en la actualidad se está imponiendo en muchos otros procesos productivos y de inspección, que requieren alta resolución y / o alta velocidad a un precio competitivo.

Las cámaras lineales son cámaras industriales que utilizan sensores lineales que acostumbran a tener entre los 512 y 12.000 elementos (píxeles), con una longitud lo más corta posible, y con una gran calidad con el fin de obtener la mejor sensibilidad y prestaciones [22]. Se pueden configurar para adquirir espacialmente (por ejemplo, cada 1 mm). Cada imagen es equivalente a una sola línea de una cámara normal. El ensamblaje de todas estas líneas en una secuencia sin fin, da una imagen de flujo de la vía, es decir una imagen que tiene:

- en el eje transversal (Y), tantos píxeles como la cámara
- en el eje longitudinal (X), tantos píxeles como el número de mm recorridos por el tren

La figura 10 de la derecha muestra un ejemplo de la imagen ensamblada, para una sección corta



**Figura 10.** Izquierda: Configuración de cámaras e iluminación. Derecha: Ejemplo de una imagen ensamblada [2]

Estos tres métodos constituyen el marco de los métodos ópticos sin contacto para obtener las características geométricas e información acerca del estado de los rieles. De ahora en más nos referiremos a ellos como sistemas automatizados para inspecciones de vías.

## GEOMETRÍA DE LA VÍA

La geometría de la vía describe los diversos parámetros que se utilizan para determinar las condiciones de la vía. Los parámetros primarios que se pueden medir son:

**Trocha:** la distancia entre rieles (trocha), una práctica recomendada en el sector ferroviario es medir este parámetro 16mm por debajo de la parte superior del riel [23].

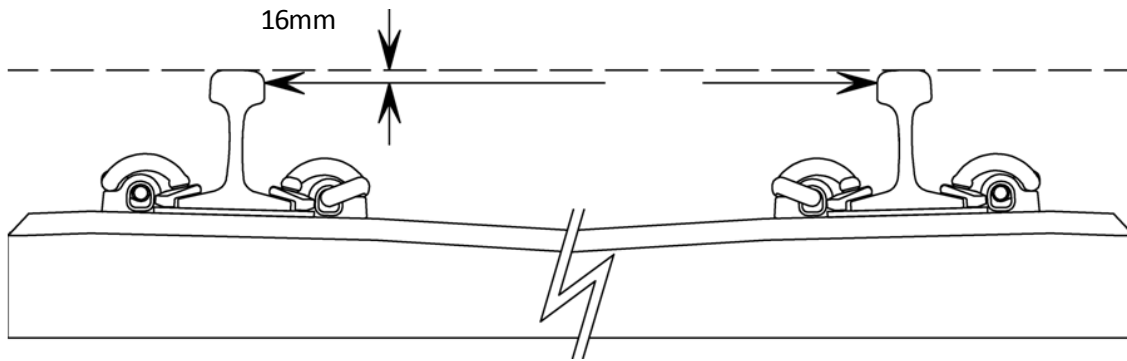


Figura 11. Trocha de la vía [12].

**Alineación:** El término alineación se utiliza tanto en planos horizontales como verticales para describir la uniformidad de línea (rectitud) de los rieles.

La **alineación horizontal (alineación)** se realiza usando una longitud predefinida de línea de cuerda (como 62 pies en los EE.UU. y 20 metros en Australia) para medir a lo largo del lado de trocha del riel de referencia. Es la distancia (en pulgadas o milímetros) desde el punto medio de la línea de cuerda a la trocha del riel de referencia. La alineación horizontal del diseño para la pista tangente es cero (línea recta perfecta en la disposición horizontal) [23].

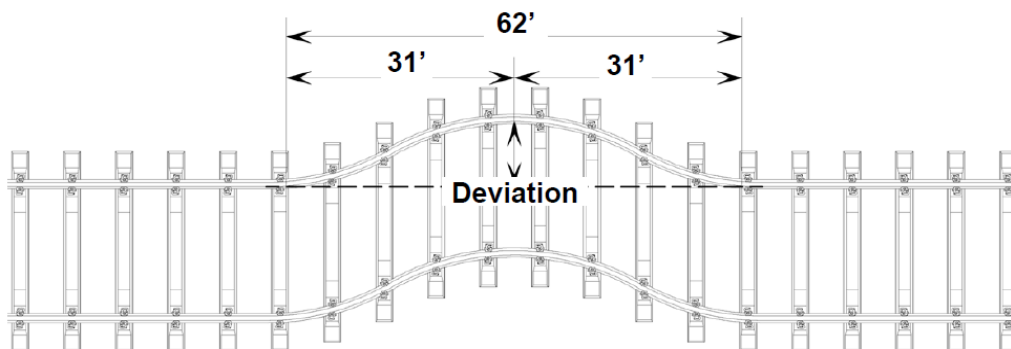
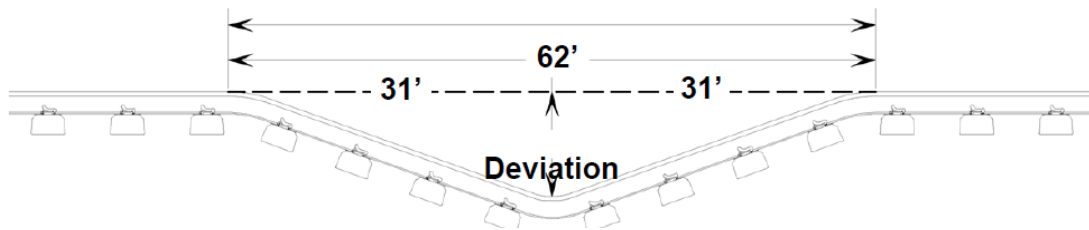


Figura 12. Alineación horizontal [12].

La **alineación vertical (o perfil)**, pero que no debe confundirse con el perfil del riel) es la uniformidad superficial en el plano vertical. La medición de la uniformidad se realiza usando una longitud predefinida de la línea de cuerda (normalmente la misma longitud usada en la alineación horizontal) a lo largo de la vía. Si el punto medio de la medición tiene una elevación

más alta, se denomina desviación de la joroba. Por otro lado, si el punto medio tiene una elevación más baja, se llama desviación de depresión.



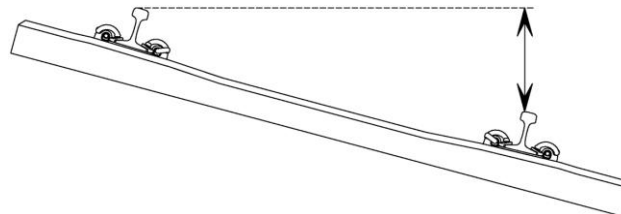
**Figura 13** Alineación vertical [12].

Estas desviaciones de la alineación del diseño se utilizan como parámetros para asignar límites de velocidad.

**Nivel transversal (cross level)** es la medida de la diferencia de altura entre la superficie superior de los dos rieles en cualquier punto de la vía del ferrocarril. Los dos puntos (cada uno en la cabeza de cada riel) se miden por los ángulos rectos al riel de referencia. Dado que el riel puede moverse ligeramente hacia arriba y hacia abajo, la medición debe realizarse bajo carga.

Se dice que nivel transversal es cero cuando no hay diferencia en la elevación de ambos rieles. Se dice que está invertido cuando el riel exterior de una vía curva tiene una elevación más baja que el riel interior. De lo contrario, el nivel transversal se expresa en la unidad de altura.

Los límites de velocidad se rigen por el nivel transversal de la vía. En vías rectas, se desea tener cero nivel transversal. Sin embargo, se pueden presentar desviaciones del cero. Muchas regulaciones tienen especificación relacionada con los límites de velocidad de cierto segmento de la vía sobre la base del nivel transversal [23].



**Figura 14.** Nivel transversal [12]

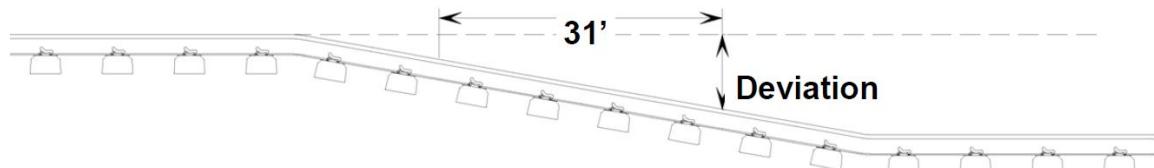
En las vías curvas, se diseña generalmente para levantar el carril exterior, proporcionando un giro de bancada, permitiendo así que los trenes maniobren a través de la curva a velocidades más altas que sería posible solo si la superficie fuera plana o nivelada. La medición de la diferencia de elevación entre el carril exterior y el carril interior se denomina **peralte (inclinación) o sobre elevación** en la mayoría de los países. En algunos casos el peralte se mide en términos de ángulo en lugar de diferencia de altura. En países como Estados Unidos, se mide en diferencia de altura y se llama nivel transversal, incluso para la pista curvada.

El **gradiente de peralte** es la cantidad por la cual se incrementa o disminuye la inclinación en una longitud determinada de la vía. El cambio de peralte es necesario para conectar una vía recta (sin peralte) a una vía curva (con peralte) a través de una curva de transición. La velocidad de cambio del peralte se utiliza para determinar el gradiente de inclinación adecuado para una velocidad de diseño dada. La torsión de la vía también se puede usar para describir el gradiente de inclinación que puede expresarse en porcentaje de cambio de peralte por unidad de longitud. Sin embargo, en el Reino Unido, el término torsión de vía se utiliza

normalmente en el contexto del gradiente de inclinación con valores más altos que se consideran como fallas.

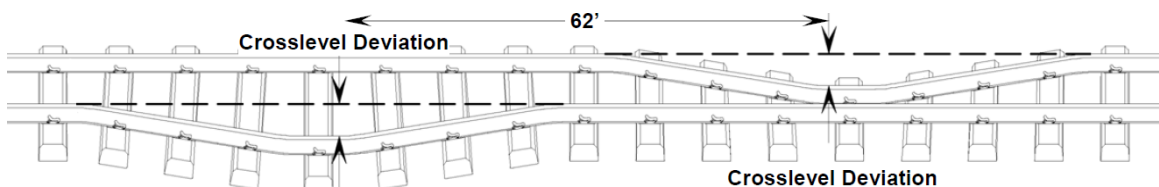
A partir de los parámetros básicos (nivel transversal, alineación, perfil y trocha) se pueden calcular los parámetros sintéticos de la geometría de la vía (torsión, runoff, velocidad máxima de la curva), basados en cambios con respecto al tiempo o a la distancia, o mediante comparaciones promediadas.

El gradiente de peralte requerido en una curva de transición para lograr una conexión suave entre la sobre elevación de la vía curva y el nivel transversal cero de la vía recta se denomina **deslizamiento de sobre elevación (runoff)**.



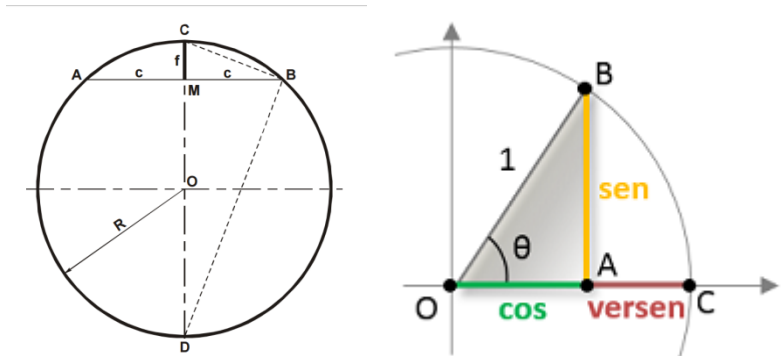
**Figura 15.** Parámetro sintético de la geometría de la vía: runoff [12]

**Torsión o alabeo de la vía – Track Twist (warp):** El alabeo es la diferencia en el nivel transversal de cualesquiera dos puntos dentro de la distancia específica a lo largo de la pista. El parámetro de torsión en la geometría de la vía se utiliza para especificar la máxima diferencia de nivel de la vía en cualquier segmento (rectas, curvas y espirales).



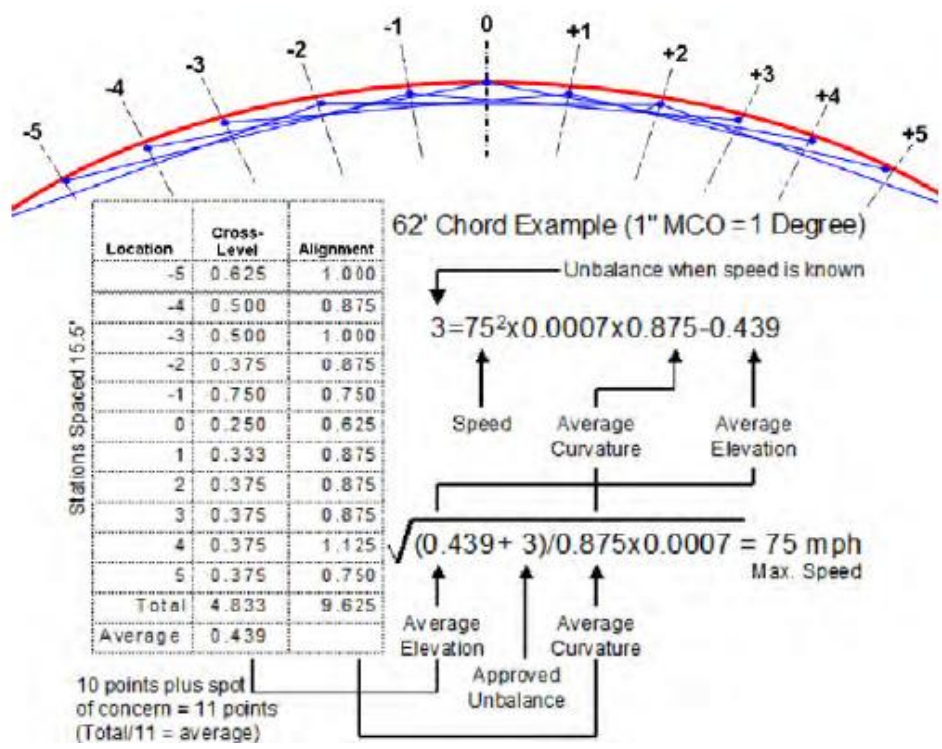
**Figura 16.** Parámetro sintético de la geometría de la vía: Torsión - Track Twist (warp) [12]

La **velocidad máxima de la curva** es un parámetro que se calcula mediante el trazado sucesivo de cuerdas. En el ámbito local se denomina método del diagrama de flechas al procedimiento para determinar la distancia entre el punto medio de una cuerda de longitud constante (AB) y el arco de circunferencia definido entre la cuerda, valor  $f$  de la figura 17 de la izquierda [4, 24, 25]. En otros países se emplea la función trigonométrica verseno, para calcular este valor, segmento AC de la figura 17 a la derecha. Dependiendo de la regulación de cada país, la longitud de la cuerda puede ser 20 metros o 61 pies.



**Figura 17.** Izquierda: método diagrama de flechas. Derecha: función trigonométrica verseno.

La figura 18 muestra el cálculo de este parámetro en función de los parámetros primarios como nivel transversal, alineación, curvatura, haciendo uso del promedio del desnivel a lo largo de ubicación de varias cuerdas. Actualmente el trazado de cuerdas se realiza mediante la proyección de un haz de luz mediante un láser.



**Figura 18.** Parámetro sintético: velocidad máxima de la curva [12]

Los sistemas computarizados de estos vehículos calculan los parámetros sintéticos y los comparan tanto con las mediciones registradas directamente como con los límites de operación admisibles del sistema o componente. Un ejemplo de un reporte generado por el sistema automatizado se presenta en la figura 19.

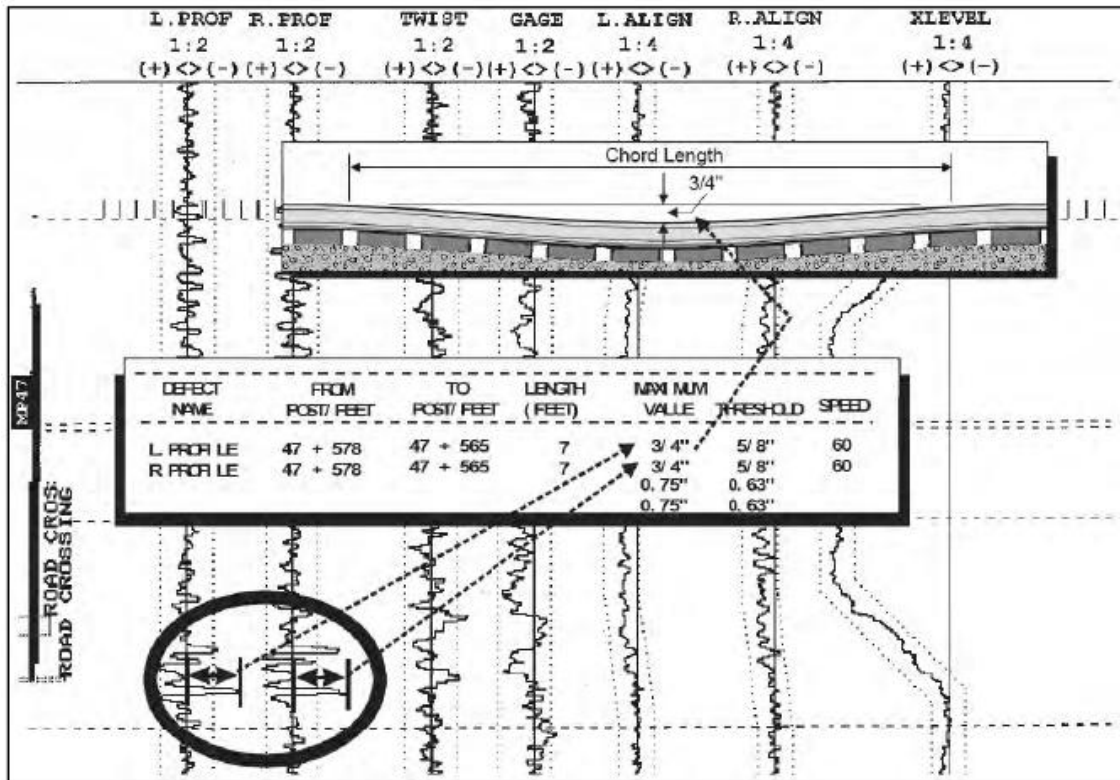


Figura 19. Ejemplo de defecto de la vía ubicado mediante un vehículo de inspección [12]

El procesamiento posterior permite realizar tareas de comparación en múltiples corridas (para determinar si ha ocurrido un cambio en la geometría de la vía), evaluando la calidad de las reparaciones hechas (reperfilamiento de la superficie del riel, alineación, reemplazos de vías, mejoramiento, renovaciones), o para planificar tareas de mantenimiento posteriores.



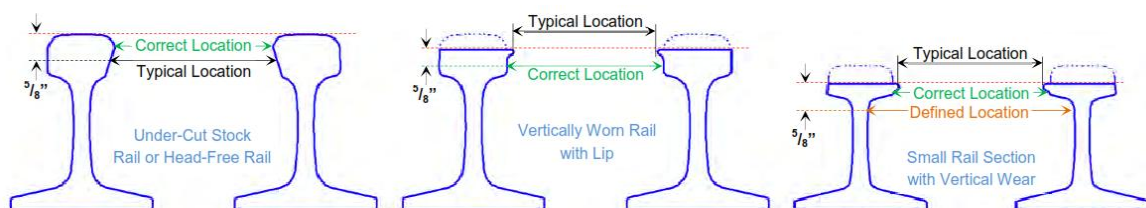
## LIMITACIONES DE LAS INSPECCIONES AUTOMATIZADAS

Las mediciones que brindan los sistemas de inspección automatizados no son estadios topográficos. Es decir que los datos que recoge no ubican a la vía en referencia a un marcador topográfico permanente. Por lo cual, estos sistemas no se ocupan de identificar si las vías están en la posición indicada según los planos de diseño, solamente nos dan información si las vías son de suave transitar o si están dentro de límites razonables para garantizar una correcta operación de los trenes.

Los sistemas modernos de inspección automatizada hacen uso de un sistema inercial sin contacto para medir la superficie y la alineación de la vía. Para que estos sistemas puedan trabajar se requiere que el vehículo al cual está adherido el sistema de inspección viaje a velocidades entre 15 y 30 Km/h. En caso de que este requerimiento no se cumpla, los datos de la superficie y alineación no pueden ser medidos apropiadamente.

Si bien los sistemas automatizados pueden proveer mediciones con un alto grado de exactitud y repetibilidad en los tramos estándares de la vía, estos presentan ciertas limitaciones cuando se encuentran con accesorios propios del diseño de las vías como pueden ser: cambios de vía, entrecruzamientos, enlaces entre vías, cruces vehiculares, rieles mecanizados (agujas), en donde las mediciones pueden resultar erróneas.

El desgaste del riel puede también afectar la exactitud de la medición que proporciona el sistema de inspección. Una práctica recomendada en la industria de los ferrocarriles es medir la alineación y la trocha 16 mm. por debajo de la parte superior del riel. Factores como el diseño del perfil de la cabeza del riel (Head Free Rails), socavaduras de material, rieles con severo desgaste vertical, formaciones de labios en el lado de trocha, o secciones mecanizadas de la cabeza del riel por factores de diseños, pueden producir mediciones erróneas o absurdas. No obstante esta limitación se puede superar mediante la comparación simultánea entre la medición del perfil registrada y una lista de ubicaciones conocidas de problemas de rieles o revisiones de campo. En la figura 20 se muestran algunos ejemplos de situaciones que causan inconsistencias en las mediciones de la trocha.



**Figura 20.** Condiciones en el riel que causan inconsistencias en las mediciones de trocha [12].

Otra consideración importante en cuanto a la repetibilidad de las mediciones tiene que ver con la dirección durante la adquisición de los datos. Sobre todo en los parámetros sintéticos en los cuales pueden presentarse diferentes resultados al cambiar la dirección de adquisición y pretender compararlos. Como ejemplo podemos mencionar el torcimiento de las vías, ya que este parámetro se calcula combinando mediciones de distancia con mediciones de nivel transversal, los resultados diferirán puesto que estos serán calculados con diferente orden de adquisición de los datos.

Un factor importante a considerar al momento de medir la trocha es la temperatura del riel, puesto que este puede moverse hacia adentro o afuera dependiendo de la temperatura y del



tipo de anclaje y sistema de fijación del riel. Sin embargo en un sistema de inspección automatizado apropiadamente calibrado y en buen estado, estas variaciones típicamente están cerca de los 3mm.

Las mediciones manuales efectuadas con sistemas de contacto - que se desarrollan bajo condiciones estáticas y sin carga - pueden diferir de aquellas realizadas con los sistemas de inspección sin contacto debido a que estas últimas se llevan a cabo bajo condiciones de carga y en donde el movimiento de los rieles debe estimarse. El personal técnico que verifica las condiciones encontradas por los sistemas de inspección debe ser entrenado para reconocer las diferencias en las técnicas de medición.

Las inspecciones automatizadas son rápidas y brindan información con un alto grado de exactitud, dependiendo del vehículo en el cual se monta el sistema pueden no afectar las operaciones habituales en el servicio de carga o pasajeros, mejoran la eficiencia en las inspecciones, entre otros. Pero a pesar de todos estos beneficios estos sistemas están limitados a sólo lo que pueden medir, es decir que proveen un listado de anomalías pero no diagnostican un problema, no pueden pensar, ver, sentir u oler. Por otro lado personal técnico entrenado para realizar inspecciones en la vía puede evaluar subjetivamente situaciones indefinidas. En muchas ocasiones una correcta evaluación requiere observar cada componente en un área entera del lugar que se inspecciona y discernir si la anomalía requiere o no de una reparación inmediata o posterior.

Como todo cambio es resistido, este tipo de tecnología de inspección – con sus destrezas y habilidades- frecuentemente encuentra sus detractores. Sin embargo no hay que perder de vista que los sistemas automatizados notifican con un alto grado de confianza que miles de kilómetros de vía no necesitan atención y que otra cantidad de vía si lo necesita, y es en donde debemos enfocar los trabajos de mantenimiento y preservación. Por lo cual debe verse como una herramienta útil y no desmerecer la gran cantidad de datos que aportan, que a su vez se pueden usar para mejorar y garantizar la seguridad en el transporte de pasajeros, que se puede considerar como uno de los más grandes propósitos de este tipo de tecnología.

## DETERMINACIÓN DE LA UBICACIÓN [12, 26]

Al momento de reportarse una anomalía, la exactitud en la ubicación del sistema de adquisición de datos es vital para una posterior inspección y reparación. En caso de que la ubicación comunicada al personal de reparación no sea efectiva, es posible que estos no puedan encontrar el problema y darle solución.

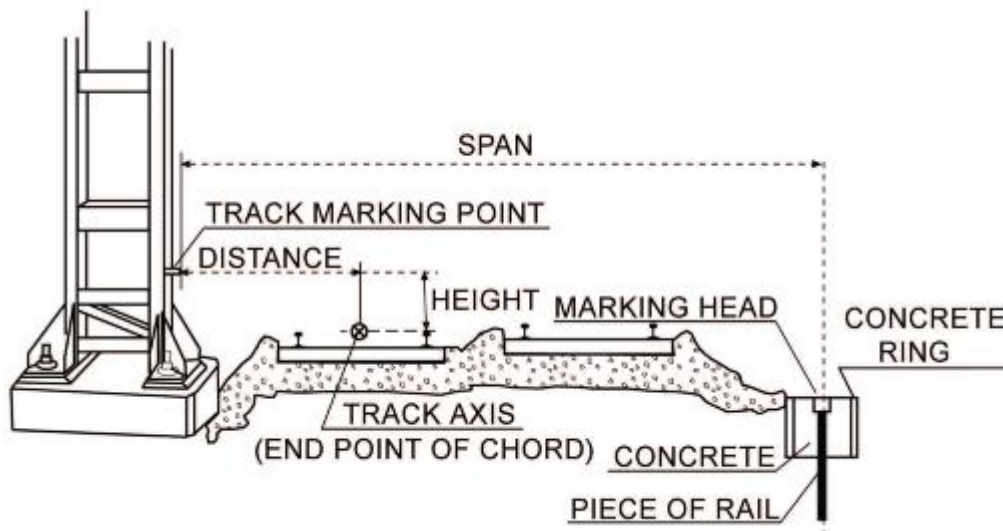
Los principales ferrocarriles y propietarios de infraestructuras miden sistemáticamente la geometría de la vía para vigilar el deterioro de la vía e identificar los defectos. Estos datos les permiten estimar la velocidad de deterioro de la vía, optimizar los tiempos de mantenimiento de las vías y establecer límites máximos de velocidad de la línea.

Determinar la geometría de la vía implica medir las propiedades geométricas de un riel individual, así como el desplazamiento relativo de un riel con respecto al otro. Para cuantificar la geometría de la vía, los rieles se modelan como líneas en el espacio tridimensional, y estas líneas se proyectan entonces en planos bidimensionales. Una vez que se mide la geometría de la vía, debe identificarse la ubicación geográfica de cada medición.

Durante el siglo pasado se han desarrollado una variedad de sistemas de medición de geometría basados en vagones, y muchos de estos diseños todavía están en funcionamiento. Los sensores mecánicos más comunes utilizan sensores móviles que están en contacto constante con los rieles. El movimiento de los sensores es una indicación de la geometría de la vía. Por ejemplo, se pueden utilizar las señales de tres palpadores horizontales, montados sobre tres ejes telescópicos que tocan continuamente los rieles, para medir la alineación de la vía. Aunque estos sistemas representan una mejora significativa con respecto a la medición manual de la geometría en tierra, los sistemas de geometría que utilizan sensores de contacto no pueden utilizarse en vías de alta velocidad, ya que los sensores no mantendrán un contacto constante con los rieles.

Algunos sistemas más nuevos utilizan sensores láser - ópticos sin contacto junto con acelerómetros y un giroscopio vertical para derivar las mediciones de geometría de la pista deseada. Este enfoque supera las restricciones de velocidad de los sensores mecánicos. Sin embargo, el uso de acelerómetros y un giroscopio vertical crea sus propios problemas. Cuando la señal del acelerómetro es doblemente integrada para calcular el desplazamiento del vagón, el error inherente del sesgo del acelerómetro produce un error de desplazamiento que crece cuadráticamente con el tiempo. Esto hace que el desplazamiento derivado del acelerómetro sea inutilizable para la medición de la geometría de la vía a bajas velocidades. Además, se sabe que los giroscopios verticales producen falsas lecturas de orientación cuando se someten a una fuerza centrípeta, lo que puede dar lugar a una medición incorrecta de la sobre-elevación durante las curvas.

Tradicionalmente, la ubicación de las mediciones de las características de la geometría de la vía se ha determinado midiendo la distancia recorrida desde un punto de referencia predeterminado (cero). Para esto se establecen puntos de referencia fijos, generalmente en los mástiles de catenaria (ver figura 21) o puntos de referencia ferroviarios tales como puntos de cambios de vías, cruces, que permitían definir la posición de la vía en relación con los puntos fijos y las versinas intermedias. Esto se hace manualmente o automáticamente usando detectores automáticos de localización (ALD). Ambos enfoques no son ideales, ya que la sincronización manual es propensa a errores, mientras que los ALD son costosos de instalar y pueden ser fácilmente dañados o dislocados por máquinas de mantenimiento de vías.



**Figura 21.** Esquema de ubicación de puntos de referencia sobre la vía[27].

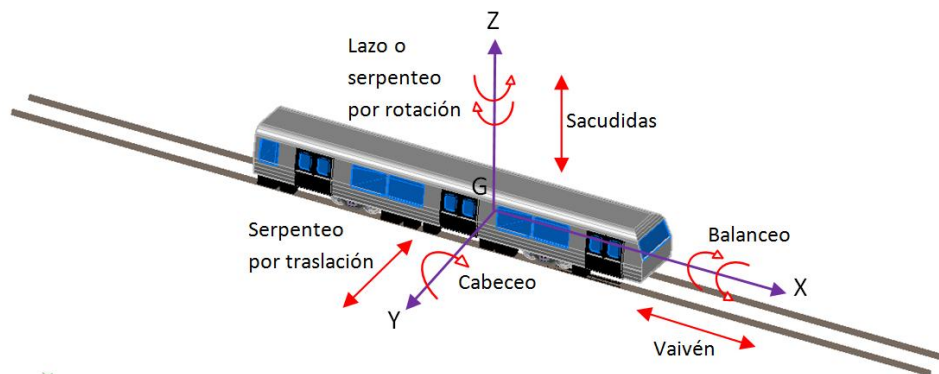
Los sistemas modernos han considerado las deficiencias inherentes a la geometría de la vía y a los sistemas de localización de características y para solventar estos inconvenientes se emplean soluciones integradas de navegación inercial para los sistemas de medición de la geometría de la vía empleando tecnología de Sistemas de Posición y Orientación (POS) Combinando datos de navegación de un receptor de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y sensores inerciales con las mediciones ópticas sin contacto de la trocha para medir exactamente la geometría de la vía e identificar su ubicación geográfica. Para ello emplea cuatro sensores: una Unidad de Medición Inercial (IMU), un Indicador de Medición de Distancia (DMI) y un Sistema de Medición Óptico de la Trocha (OGMS); todas las siglas provenientes del inglés.

La IMU es un conjunto integrado de sensores que consiste en acelerómetros lineales de silicio y giroscopios de fibra óptica. El receptor GPS procesa las señales de una red de satélites, proporcionando precisión de posición a pocos metros. Si se requiere una mayor exactitud de posición, se puede utilizar un GPS diferencial (DGPS). Los sistemas DGPS utilizan estaciones de base fija, cuyas ubicaciones han sido establecidas de manera muy precisa mediante mediciones topográficas. Cuando un vehículo de inspección viaja por la vía, se comunica con estas estaciones DGPS. La estación DGPS compara su posición conocida con la posición proporcionada por la señal GPS. A continuación, las correcciones se transmiten al vehículo de inspección a medida que se desplaza por la vía. Esto puede proporcionar una precisión de posición más fiable, tan baja como 30 cm.

El DMI emite pulsos que representan revoluciones fraccionales de la rueda. Los pulsos sumados proporcionan una medida de la distancia recorrida por el vehículo. A partir de los datos que proporciona el DMI se programa el cálculo de los parámetros de geometría de la vía y adicionalmente se emplean para mejorar la precisión de los datos de navegación, especialmente durante las interrupciones del GPS. . Generalmente en los vehículos de inspección se usan los encoders rotatorios. Estos dispositivos están acoplados a las ruedas del vehículo. A medida que el encoder gira, genera un número fijo de impulsos para cada revolución de la rueda. A través de la calibración los encoders se pueden utilizar para medir con precisión las distancias a lo largo de la pista.

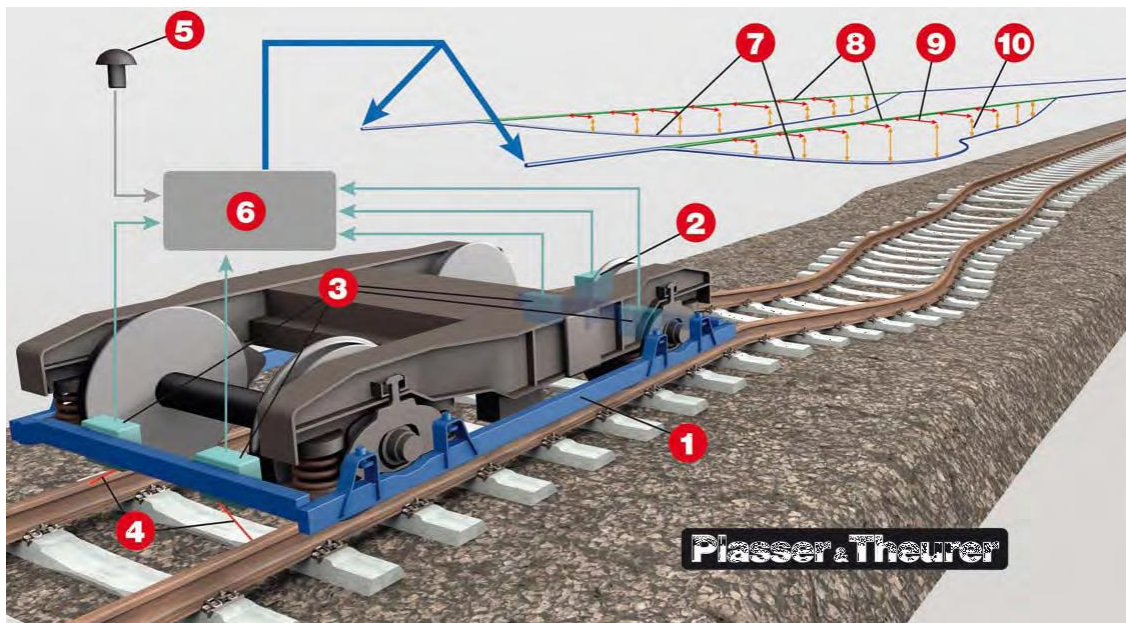
Los dos tipos principales de encoders son ópticos y magnéticos (efecto Hall). Con los ópticos, un haz de luz se muestra a través de un cristal rotativo grabado o placa metálica con ranuras uniformes. Los sensores de efecto Hall utilizan un engranaje giratorio y el sensor que crea un pulso a medida que cada diente de engranaje pasa el sensor. La mayoría de los sistemas de codificación tienen dos señales, con las señales ligeramente fuera de fase. Dependiendo del primer impulso que se produzca, se puede determinar el sentido de giro. Los errores de medición se pueden introducir en largas distancias debido a los errores de precisión inherentes de los dispositivos. También se pueden introducir errores de medición dependiendo de cuán bien se sincronice el encoder con la distancia a lo largo de la vía. El deslizamiento de las ruedas, las diferencias de distancia debidas a las longitudes del riel en los rieles interiores y exteriores de las curvas, el ángulo de ataque del eje con relación a la vía, etc., también pueden afectar a la precisión de la medición. Un método para aumentar la precisión de los sistemas de medición basados en encoders es el uso de múltiples encoders, montados en diferentes ejes. Con este tipo de sistema, las distancias medidas por los diversos encoders se promedian constantemente. Cualquier medida de distancia de un encoder particular que no coincide sustancialmente con los demás se descarta. Entonces se utiliza una media de las distancias de los encoders restantes. Este proceso aumenta la precisión del sistema de medición basado en el encoder.

El sistema de navegación proporciona continuamente la posición geográfica exacta (longitud, latitud y altitud), orientación del vector velocidad (ángulos de cabeceo, balanceo y serpenteo) y dinámica del vehículo (vectores aceleración y velocidad angular), considerando todos los tipos de oscilaciones que se producen en condiciones del tren en movimiento, como se esquematiza en la figura 22.



**Figura 22.** Clasificación de movimientos en el tren [1]

El OGMS es un sistema de medición de distancia láser que mide el desplazamiento de cada riel desde un punto de referencia, tal como el centro de la IMU. Como resultado de la combinación de todos estos sensores se obtiene la ubicación geográfica de la geometría de los rieles y esta se traduce en un modelo matemático de la vía que se denomina datos espacio-curva, ver figura 23. A partir de esta información, se pueden determinar todos los parámetros geométricos requeridos. Esta es la tecnología más flexible disponible, ya que se registra un conjunto de mediciones de la vía sin procesar, en lugar de simples ordenadas o excepciones basadas en la cuerda (medición de tres puntos). Los datos pueden utilizarse posteriormente para un número infinito de mediciones derivadas, así como para desarrollar modelos computarizados de la vía.



- |   |   |
|---|---|
| <p><b>1</b> Measuring frame with fixed vertical distance to the rail surfaces</p> <p><b>2</b> Inertial measuring unit (IMU)</p> <p><b>3</b> Sensors of the track gauge measurement</p> <p><b>4</b> Laser beams to scan the track gauge</p> <p><b>5</b> GPS data acquisition</p> <p><b>6</b> Navigation computer</p> | <p><b>7</b> Blue curves: space curves of both rails derived from the measurements along the track, synchronised with GPS data</p> <p><b>8</b> Green lines: track design line</p> <p><b>9</b> Red arrows (horizontal): alignment defects, calculated from the space curve</p> <p><b>10</b> Orange arrows (vertical): longitudinal profile defects, calculated from the space curve</p> |
|---|---|

**Figura 23.** Geometría de la vía, datos espacio – curva [28]

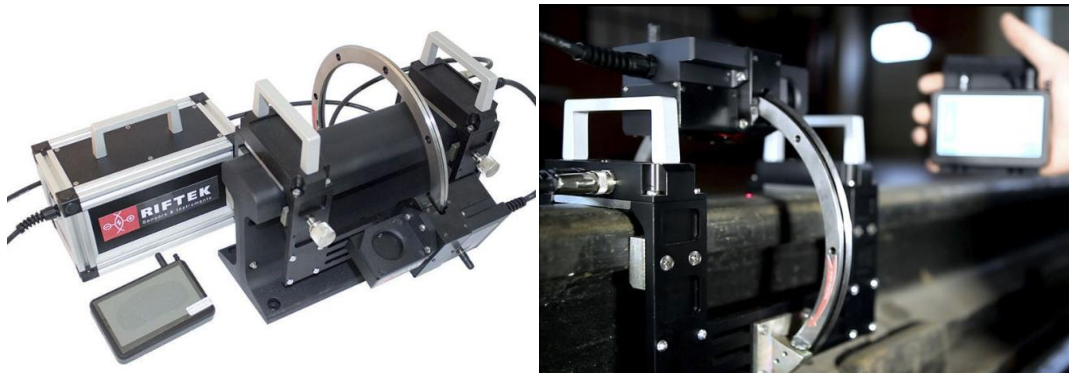


## PORTABILIDAD Y VEHICULOS

Los sistemas automatizados de inspección de vía sin contacto pueden ser instalados en varios tipos de vehículos, entre ellos pueden ser camionetas todo terreno (hi-rail), camiones, vagones sin motorización, trenes con motorización induida y vagones en trenes de servicio de pasajeros, e inclusive, con algunas limitaciones, pueden ser equipamientos portátiles. La elección de la mejor plataforma o plataformas pueden depender del financiamiento disponible, del personal, de las operaciones, de la logística, de las frecuencias previstas para los ensayos, de la accesibilidad de la vía, de las reglas de trabajo, etc.

### Equipos portátiles

Las inspecciones automatizadas se pueden llevar a cabo con equipamiento portátil de bajo peso. Estos sistemas están disponibles con características que van desde la simple medición de la geometría de la vía (sólo medición de la trocha) hasta los paquetes de geometría completa de la vía, medición de daros, medición de giros (cruces), ensayos ultrasónicos de rieles, etc. Algunos son lo suficientemente pequeños para caber en maletas que pueden ser fácilmente transportadas en la vía, ver figura 24. Si bien estos no son útiles para cubrir todo un sistema, podrían ser un suplemento útil para inspeccionar áreas limitadas de la vía que de otro modo son inaccesibles sin interferencia en las operaciones habituales. Algunos de estos equipos pueden ser empujados por un operador (troles, ver figura 25), y otros pueden ser arrastrados por otros vehículos motorizados.



**Figura 24.** Sistema portátil de escaneo láser de riel por proyección de punto mediante triangulación láser [29].



**Figura 25.** Sistema de trole de escaneo mediante triangulación laser [30].

## Vehículos Carretera/Riel

Un vehículo de carretera-riel (Hi-rail) es un vehículo que puede funcionar tanto sobre las vías férreas como en las carreteras o rutas convencionales. Estos vehículos tienen ruedas aptas para carreteras, con llantas y neumáticos de caucho, y un juego adicional de ruedas de acero retractiles, para circular sobre los rieles. El mayor beneficio de usar un vehículo hi-rail es su flexibilidad para moverse por el entramado ferroviario, sin deshabilitar la circulación sobre las vías. Las mediciones pueden hacerse sobre una porción de las vías, salir de ellas y conducir hacia una ubicación diferente para continuar con los ensayos, sin deshabilitar las vías entre las pruebas.



**Figura 26.** Izquierda: Camioneta adaptada para realizar inspecciones en rieles ferroviarios [31].  
Derecha: Dispositivo retráctil que se adapta a la camioneta [32.]

## Vehículos ferroviarios fijos

Los vehículos ferroviarios fijos son una plataforma estable y flexible que permite una expansión futura, la operatividad de este tipo de vehículos requiere considerar un habitáculo para el personal de apoyo y técnico que requieran estar presentes. Si están diseñados correctamente, también pueden maniobrar de manera fiable en las vías, permitiéndoles ser operados bajo las reglas de funcionamiento más flexibles de un tren, en lugar de un vehículo de mantenimiento. Pueden ser diseñados para operar a las velocidades máximas permitidas. Esto permite operar en todo el sistema, con poca o ninguna interferencia en las operaciones habituales.

Es posible modificar un vehículo existente y convertirlo en una plataforma de inspección, lo cual representa un ahorro significativo en los costos de diseño y construcción. Los vehículos ferroviarios fijos destinados a inspecciones automatizadas pueden ser unidades con motorización propia lo que le da la ventaja de una flexibilidad operativa completa, que le permite operar en cualquier vía que se necesite. Estos vehículos independientes tienen la ventaja de que funcionan bajo las reglas de operación del tren, en lugar de las reglas de operación del vehículo de mantenimiento. Ver figuras 27 y 28.



**Figura 27.** Sistema de inspección óptico – laser adosado a la estructura del tren con motorización independiente [33]

En el caso de ser un vagón sin motorización, el sistema de inspección opera en un tren especial o en un servicio regular ya sea de carga o pasajeros. Esta práctica es fácil de implementar en los sistemas de tránsito, donde los mismos trenes pueden realizar múltiples viajes de ida y vuelta en un día. El beneficio de usar un sistema de inspección en un vagón sin motorización es que no hay costos adicionales para las tripulaciones de trenes. Los únicos costos adicionales son para la logística necesaria para cambiar en el vehículo de inspección dentro y fuera de la formación. Típicamente, estos vagones son accionados al final de la formación, lo que proporciona una visión clara de la vía mientras se realizan las mediciones.



**Figura 28.** Detalle de instalación de sistema de inspección adosado a la estructura del bogie [12]



## CARACTERÍSTICAS POTENCIALES DE LA MEDICIÓN AUTOMATIZADA

Los sistemas de inspección brindan una gran cantidad de información acerca del estado de la vía. Como se ha visto anteriormente cada tipo de defectología asociada a los rieles ha sido caracterizada detalladamente y se conoce que dependiendo de la orientación, ubicación, forma y tamaño del defecto, la tasa de crecimiento será más alta o baja según el tipo de defecto que corresponda [1]. Por lo cual, no es necesario medir todas las características a la vez del estado de las vías. Y se debe establecer una frecuencia de inspección para el monitoreo de los defectos existentes. Esto ahorrará costos excesivos de procesamiento, almacenamiento y revisión. La determinación de las frecuencias de medición es un tema que excede los límites de este trabajo, por lo cual no se incluye en este informe, sin embargo debe hacerse hincapié en que es importante el registro de los defectos encontrados en vía y su monitoreo para poder ejecutar esta tarea, ya que sin información previa disponible es una tarea inviable si consideramos que cada vía opera bajo diferentes condiciones de carga, temperatura, materiales en la fabricación, entre otras.

### Medición de la trocha

Los sistemas de medición sin contacto para medir la trocha utilizan dos láseres y dos cámaras para localizar el riel. El método empleado es el de triangulación láser con luz estructurada. En este caso cada cámara registra el lado interno de la vía (lado trocha de cada riel). Ejemplos se muestran en las Figuras 29 y 30. Este tipo de sistemas también aporta información acerca del nivel transversal/peralte, torsión, alineación, nivel longitudinal, compensación por sistema a cuerda, entre otros.

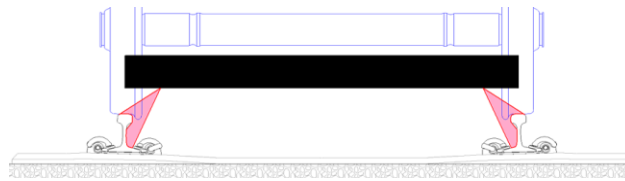


Figura 29. Esquema de sistema de medición de trocha [11]



Figura 30. Esquema de equipo comercial de medición de trocha [34]

### Medición de la cuerda mediante laser

Estos sistemas se emplean para velocidades de operación bajas, en donde se requiere un sistema de tres puntos [11], esto triplica el hardware necesario y puede duplicar el costo de un sistema de geometría básica. Ejemplos se muestran en las Figuras 31 y 32. Este tipo de sistemas también aporta información acerca del nivel transversal/peralte, torsión, alineación, nivel longitudinal, compensación por sistema a cuerda, entre otros.



Figura 29. Sistema de medición de cuerda en tres puntos [12]



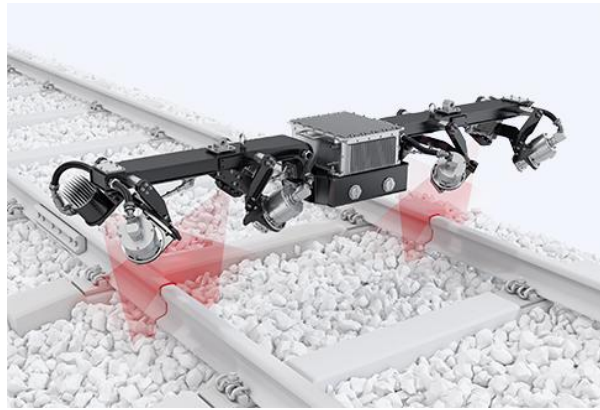
Figura 30. Esquema de equipo comercial de medición de trocha [34]

### Perfil completo de las vías

Los sistemas de medición sin contacto para medir el perfil completo de la vía utilizan un sistema como el mostrado anteriormente en la figura 6, haciendo uso de dos láseres y dos cámaras por cada riel. El método empleado es el de triangulación láser con luz estructurada. En este caso se registran el lado interno de la vía (lado trocha) y el externo (lado campo). Ejemplos se muestran en las figuras 31 y 32.

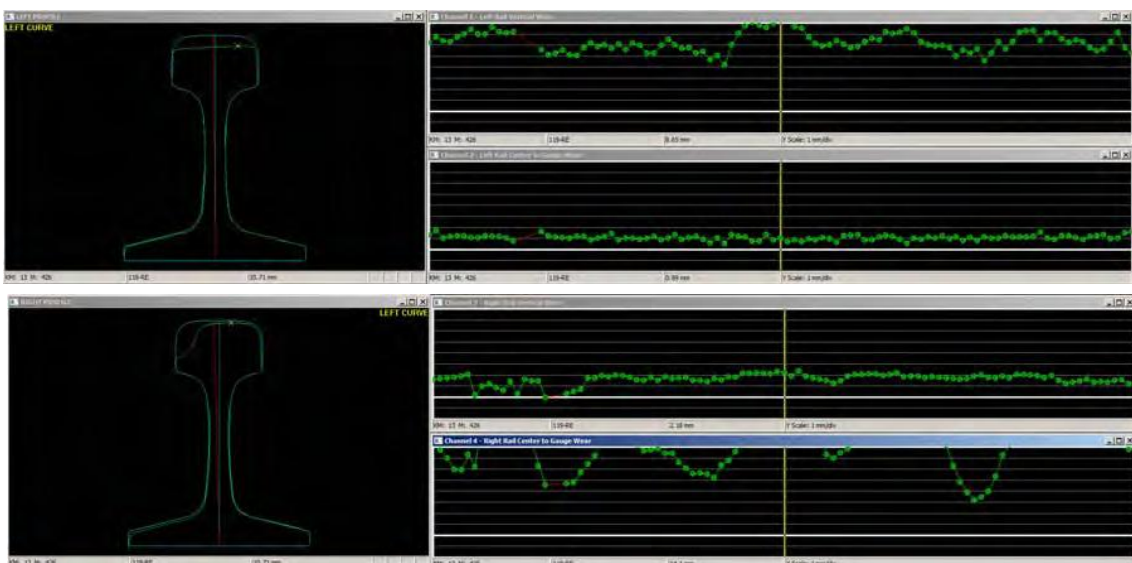


Figura 31. Sistema de medición de geometría de vía.



**Figura32.** Esquema de equipo comercial de medición de trocha [34]

Estos sistemas toman el perfil medido, identifican automáticamente el tipo de riel, se superponen y alinean con el perfil de diseño. A continuación, el sistema realiza operaciones matemáticas basadas en los perfiles de riel de diseño y el medido para calcular desgaste. Además de los perfiles reales del riel, los parámetros típicos incluyen: peralte de la vía, altura del riel, ancho de la cabeza, trocha y labio lateral, peso del riel, porcentaje de pérdida de la cabeza, desgaste de la cara de trocha, desgaste lateral del lado de campo, desgaste vertical, ancho de la cabeza, ángulo de la cara de trocha (borde) e identificación de la ubicación de la unión del riel. En la figura 33 se muestra un ejemplo de visualización del sistema medición identificando zonas de desgaste del riel.



**Figura 33.** Ejemplos de medición de desgaste de riel [12].

Los intervalos a los que se adquieren los perfiles de los trenes deben basarse en la experiencia del mantenimiento y según la estrategia de mantenimiento elegida [12]. Si los perfiles del riel se recogen demasiado separados se puede perder el peor desgaste; de otra forma, si está demasiado cerca puede recopilarse información innecesaria. Algunos proveedores proporcionan una operación a alta velocidad, no por tener un sistema capaz de recolectar,

almacenar y procesar la información del perfil de los trenes, sino sólo recolectando los datos a intervalos grandes.

### Medición de corrugaciones en el riel (defectos RCF) mediante cuerda laser

Las corrugaciones del riel son ondulaciones que pueden formarse en el riel como parte del proceso de desgaste normal, como se muestra en las figuras 34. En vías curvas, las ondulaciones del riel pueden crecer a velocidades más altas que en vías rectas. Dos remedios comunes utilizados para hacer frente a las ondulaciones de riel son el reemplazo del riel y el amolado (reperfilamiento) del riel. Este último es mucho más rentable que el reemplazo de los rieles. Hay ventajas adicionales para reperfilado del riel, incluyendo la eliminación de la fatiga superficial que puede conducir a los defectos en el riel, la extensión de la vida del riel, y a la vez puede mejorar vida de la rueda, reducir riesgo de descarrilamiento y reducir el ruido de trenes que pasan[12].



Figura 34. Corrugaciones en el riel.

Existen tres tipos básicos de sistemas de medición sin contacto de ondulación del riel: (1) Sistemas basados en acelerómetros, ver figura 35, (2) sistemas láser basados en la cuerda, ver figura 36 y (3) sistemas de perfilado de alta resolución mediante visión, ver figura 37. Los sistemas basados en acelerómetros no son eficaces a bajas velocidades.

Los sistemas láser basados en la cuerda pueden ser limitados en la velocidad de operación y, debido a su diseño, pueden filtrar corrugaciones de ciertas longitudes de onda. La decisión de qué sistema es el mejor utilizar se basa en el costo y la velocidad operacional esperada. Generalmente los datos de salida de estos sistemas son la profundidad de ondulación y la longitud de onda (paso).

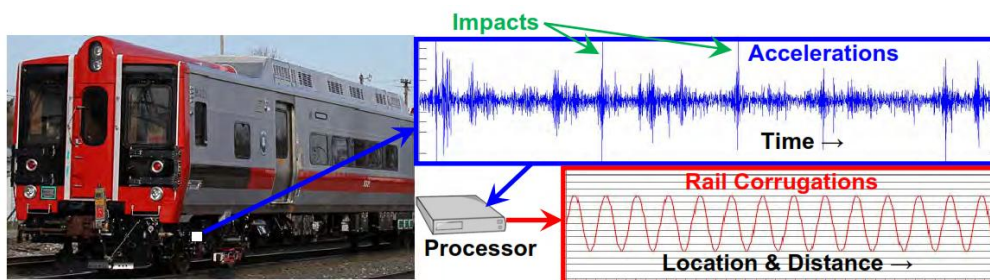
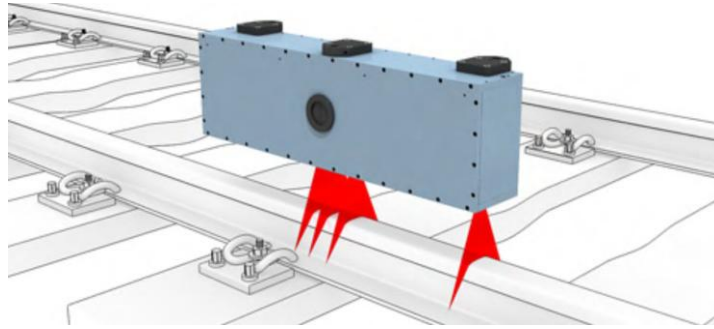
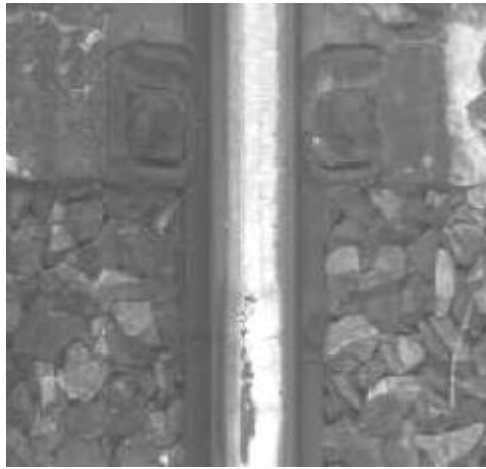


Figura 35. Sistema de detección de corrugaciones mediante acelerómetros [12].



**Figura 36.** Sistema de medición mediante cuerda láser [34].

Los sistemas basados en visión normalmente utilizan la imagen en blanco y negro para detectar defectos en la superficie del riel.



**Figura 37.** Imagen de defecto superficial detectado mediante un sistema de visión [2]

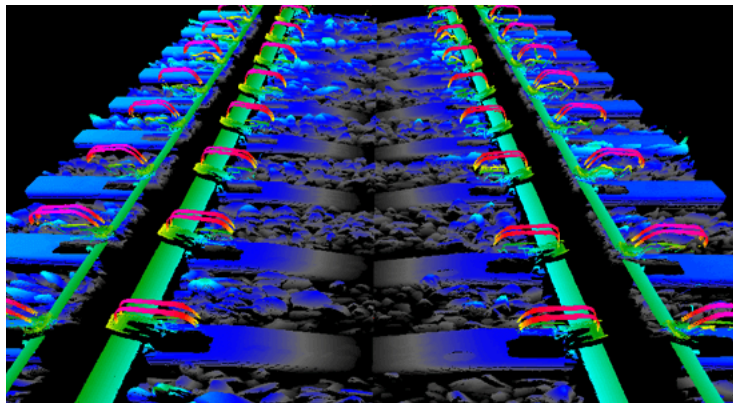


## OTRAS APLICACIONES EN EL SECTOR FERROVIARIO

A continuación se presentan brevemente algunas aplicaciones en el sector ferroviario que emplean el mismo tipo de tecnología acá analizado. Estas aplicaciones no sólo contemplan el estudio de rieles sino una gran variedad de componentes de gran importancia en el ámbito de los ferrocarriles.

### Inspección de fijaciones, placas de asiento y durmientes

En la figura 38, se muestra una imagen que corresponde a la inspección mediante triangulación laser, en ella se muestran que el procesamiento de imágenes es capaz de identificar los distintos elementos de la vía como rieles, dips (elemento de sujeción), durmientes y a la vez es capaz de analizar el estado de estos.



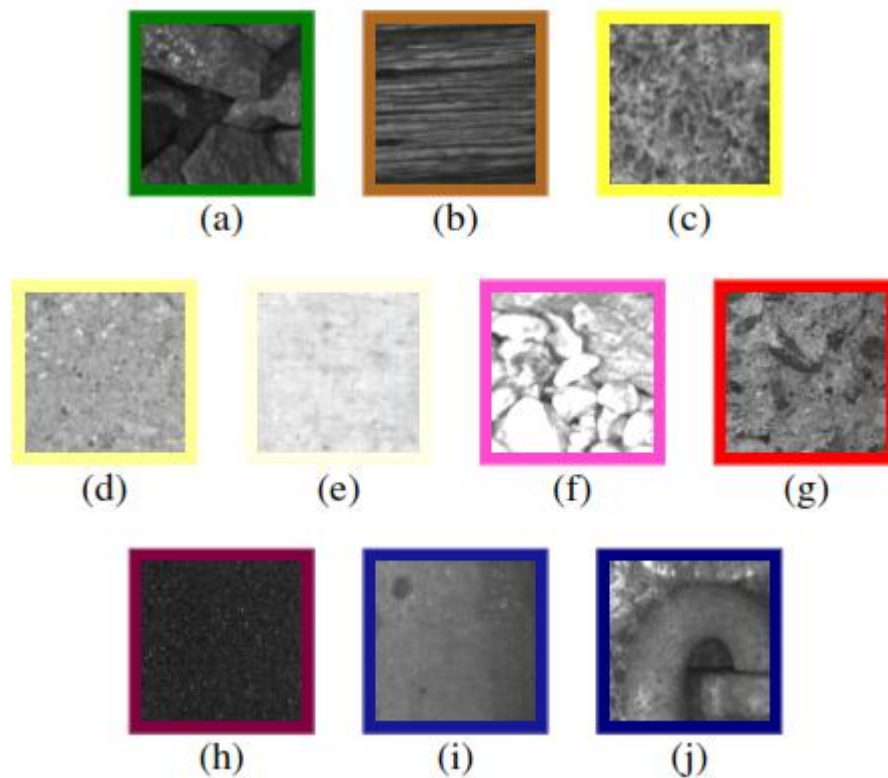
**Figura 38.** Resultado de inspección con triangulación laser [35]

En la figura 39, se muestran los resultados de inspección con sistemas basados en visión, en donde mediante el uso de software se identifica placas de asiento fuera de su posición correcta



**Figura 39.** Inspección con sistema de visión identificando placas de asiento en una posición incorrecta [2].

Mediante el uso de programación con la metodología de redes neuronales, hoy en día se pueden identificar distintos tipos de accesorios de la vía, el tipo de material con el que están contruidos y a la vez el estado en el que se encuentran. La figura 40 muestra los distintos tipos de materiales para varios elementos de la vía que se identifican vía software [36]



**Figura 40.** Categoría de materiales: (a) balasto, (b) madera, (c) hormigón áspero, (d) hormigón mediano, (e) hormigón liso, (f) hormigón desmoronado, (g) hormigón astillado, (h) lubricador (i) riel (j) sujetador [36].

#### **Inspección de geometría de la vía (topografía) y perfil de cama de balasto [37, 38]**

Algunos sistemas comerciales disponen de sistemas de medición sin contacto para topografiar la vía haciendo uso de puntos de referencia conocidos. Adicionalmente emplean el método de la cuerda láser para obtener la geometría de la vía y realizan las correcciones de estas contrastando con las señales de GPS. Además obtienen mediante escaneos por triangulación laser el perfil de la cama de balasto.

La figura 43 esquematiza el principio de topografiado de la vía. La distancia al primer punto de referencia se determina utilizando el dispositivo de medición de punto fijo integrado ubicado en el vehículo en la parte inferior, como el que se muestra en la figura 41 izquierda. Mientras tanto, el carro de satélite (parte superior) se ha colocado a una distancia adecuada delante de la máquina y su láser de nivelación y alineación dirigido a la cámara receptora en el vehículo de registro de medición , ver figura 41 derecha. Luego este último vehículo se desplaza hacia el

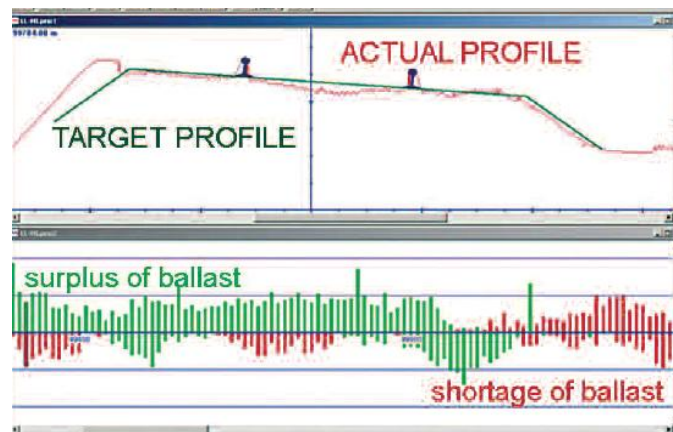
siguiente punto de referencia y mide la geometría de la pista, utilizando el rayo láser como base de referencia. A partir de aquí, se repite esta secuencia de trabajo cíclico.



**Figura 41.** Izquierda: Sistema de topografía mediante punto de referencia. Derecha: En la parte del frente se observa el vehículo satélite y en fondo el vehículo de registro.

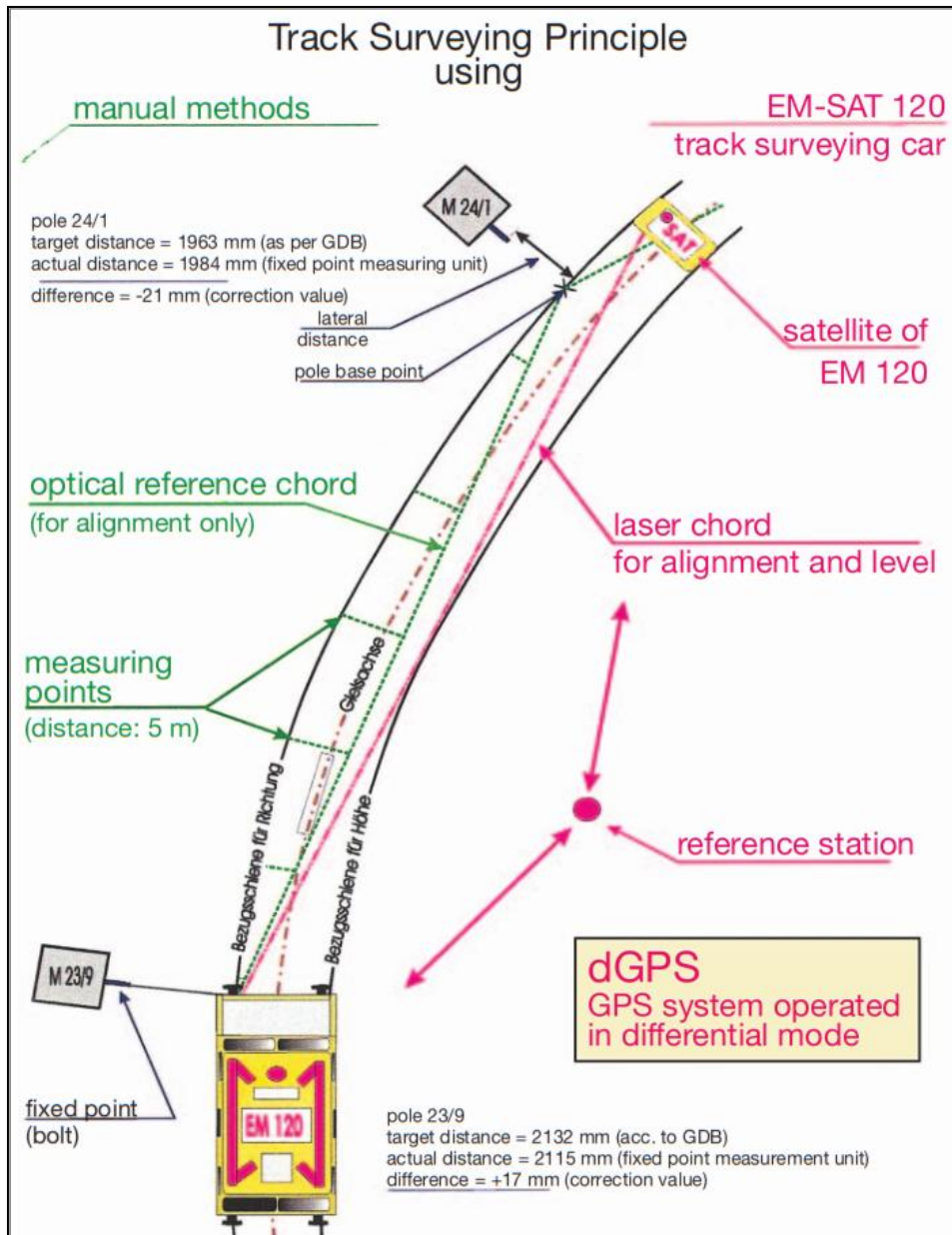
A continuación, el software compara los datos reales de geometría de pista con la geometría de destino y deriva de los datos los valores de corrección de geometría de pista para la máquina de apisonamiento.

La figura 42 muestra el perfil de la cama de balasto adquirido con el sistema de triangulación láser y la evaluación de dicho perfil. En la parte superior se compara el perfil medio en color rojo y en verde el perfil deseado. En la parte inferior detalla en color verde zonas de excedente de balasto y en rojo las zonas donde este es deficiente.



**Figura 42.** Evaluación del perfil de la cama de balasto [27].

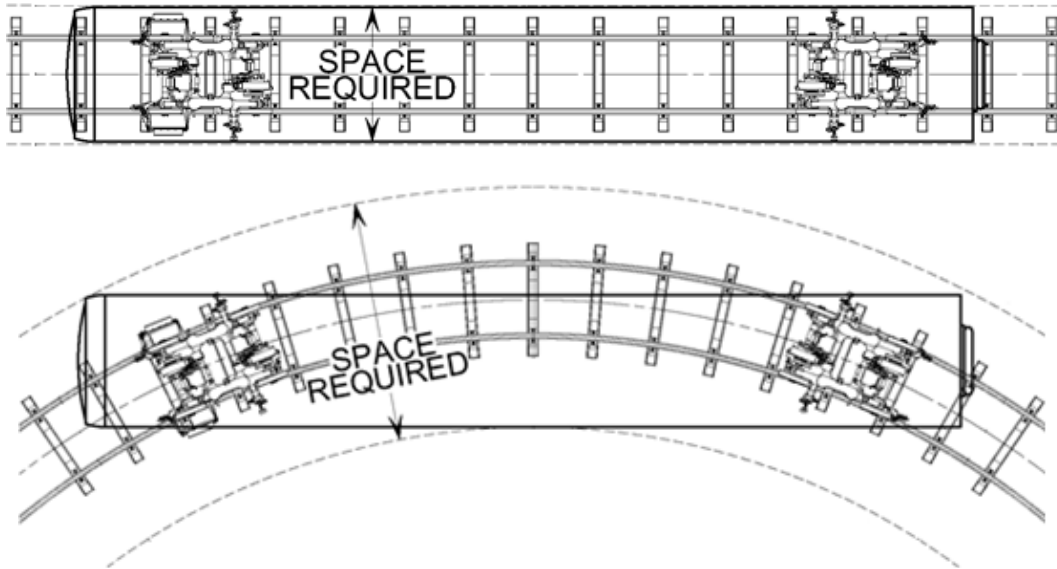




**Figura 43.** Esquema del método de tipografiado de la vía [38].

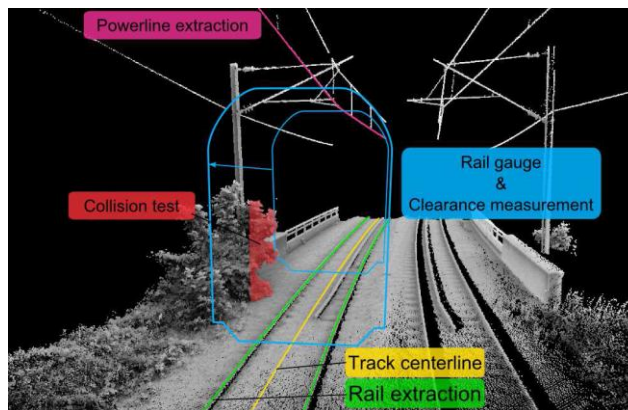
### Inspección de gálidos y túneles

El término gálibo, designa a las dimensiones máximas, tanto de altura como de anchura, que pueden tener todos los vehículos, ver figura 44. La medida del gálibo de seguridad de las líneas de ferrocarril es una labor imprescindible para asegurar la seguridad del tráfico.



**Figura 44.** Gálbos del tren para una vía recta y una vía curva [12].

A continuación se muestran algunos sistemas que se emplean para medir este parámetro. En la figura 45 se muestra el resultado de la evaluación mediante un sistema en base a tiempo de vuelo, y la detección de zonas que obstaculizan en tránsito de los vehículos ferroviarios. En la figura 46 se observa un sistema de inspección portátil



**Figura 45.** Inspección de gálbos por tiempo de vuelo [39].



**Figura 46.** Sistema portátil de medición de gálibos mediante método de tiempo de vuelo [40]

Para la inspección de túneles podemos encontrar sistemas que emplean los métodos analizados. Por ejemplo en la figura 46 se muestra un sistema con proyección de punto que rota a gran velocidad, al combinar este movimiento con el del avance del tren, este sistema realiza un barrido helicoidal a través del túnel para adquirir la geometría. Otros sistemas (ver figura 47) haciendo uso de elementos ópticos difractivos (DOE) proyectan conos de luz que intersecar con la superficie del túnel. Y brindan información de la sección transversal del túnel.



**Figura 44.** Medición de túnel mediante proyección de punto láser con método de tiempo de vuelo [41]

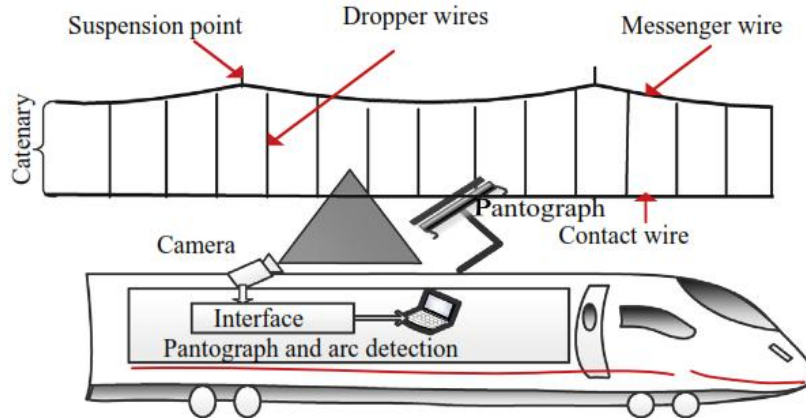


**Figura 44.** Medición de túnel mediante proyección de conos de luz mediante triangulación láser [34]

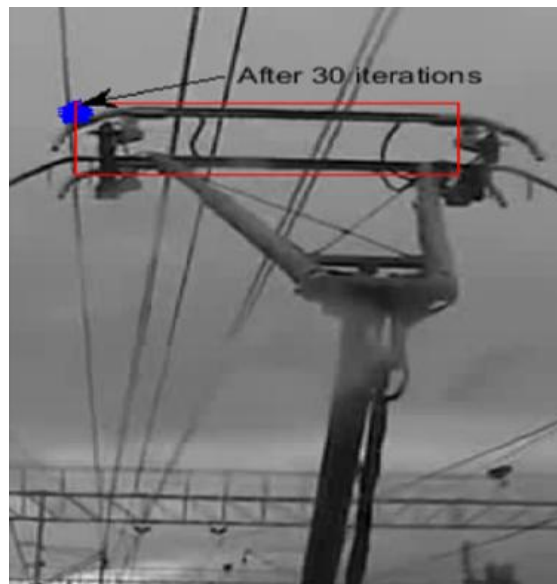
### **Inspección de catenarias y pantógrafos**

En la bibliografía se han encontrado trabajos que abordan la problemática de arcos eléctricos en los pantógrafos [42]. Para trenes eléctricos la potencia se puede obtener por el contacto entre un pantógrafo y un cable aéreo. La banda del pantógrafo se desgasta con el tiempo y se producirán irregularidades en el alambre de contacto. En dicho trabajo se detalla un sistema automático de inspección de arcos eléctricos mediante el algoritmo firefly (luciérnaga), este se

basa en el comportamiento de centelleo de las luciérnagas [43]. Para esto se hace uso de un sistema de visión que registra imágenes del pantógrafo y el cable, ver figura 45 y 45.



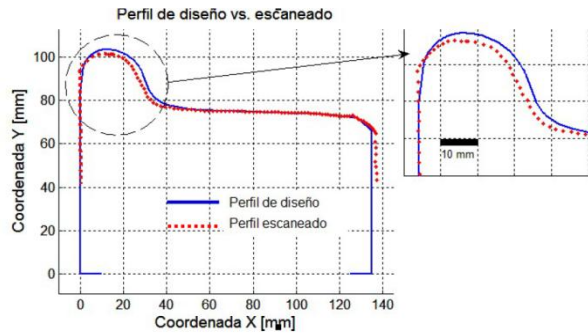
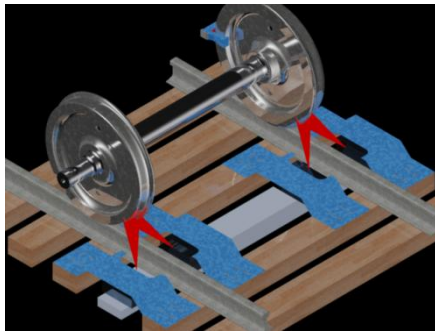
**Figura 45.** Esquema de sistema de inspección de arcos eléctricos en el pantógrafo [42].



**Figura 46.** Resultado de evaluación del sistema de inspección de arcos eléctricos en el pantógrafo [42].

### Inspección de ruedas mediante triangulación láser

Otra aplicación importante es el control dimensional de ruedas mediante el método de triangulación con luz estructurada. A diferencia de todos los sistemas vistos hasta acá este tiene la particularidad de ser un sistema estático que analiza parámetros de geometría y de desgaste en las ruedas en el momento en el que el tren pasa por una estación de monitoreo, ver figura 47. En la actualidad se encuentran también instrumentos portátiles (figura 48) con los cuales se puede obtener la geometría de este importante componente.



**Figura 47.** Izquierda: Esquema de sistema de inspección láser para control dimensional de ruedas. Derecha: Comparación perfil de diseño con resultados de la medición [19].



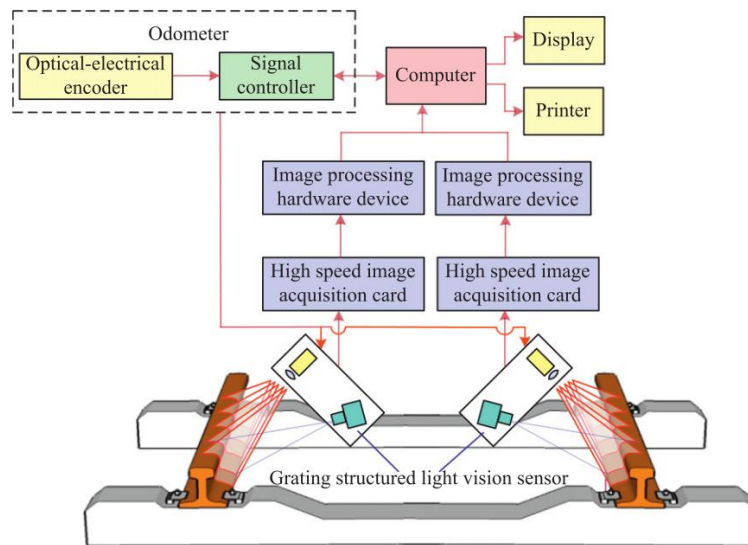
**Figura 48.** Sistema portátil por proyección de punto para medición del perfil de la rueda [44].

### Corrección de las mediciones debido a las vibraciones

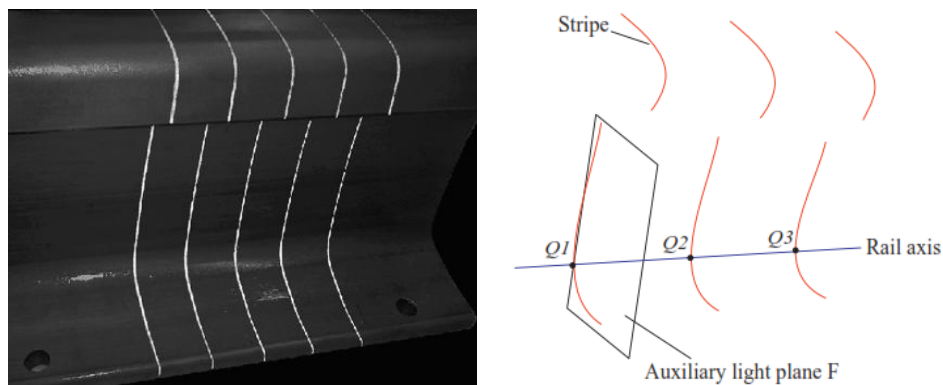
Hasta el momento no se ha contemplado la problemática de las vibraciones del tren en la adquisición de los parámetros de geometría de la vía. Presentamos dos enfoques, que se encontraron en la búsqueda de bibliografía, para tratar este problema que se aplican al método de triangulación láser.

Como hemos visto a lo largo de este documento, un enfoque ampliamente utilizado se basa en el sensor de visión de luz estructurada, que incluye una cámara y un proyector láser que genera un plano de luz en el lado interior del carril. Teniendo en cuenta el error de instalación del sensor y la vibración del tren durante el rodaje, es difícil asegurar la perpendicularidad entre el plano de luz y el carril, lo que conduce a un gran error de medición. Con el fin de superar el problema, el primer enfoque desarrolla un método de rectificación de desviación de movimiento. Para ello se obtienen los perfiles de la sección de raíl mediante un sensor de visión de luz estructurada de múltiples líneas con la proyección de múltiples planos de luz paralelos [45], ver figuras 49 y 50. Mediante la segmentación del perfil en varias curvas se establecen planos auxiliares tanto perpendiculares como paralelos a la dirección de avance del tren. El proceso de rectificación de desviación consiste en proyectar los perfiles de sección de la sección del raíl sobre el plano auxiliar para recuperar la perpendicularidad entre el plano de luz y el del raíl. Los resultados experimentales que se muestran en este enfoque indican que el método reduce el error de medición del desgaste del raíl, cumpliendo los requisitos para la medición dinámica en tiempo real del desgaste del raíl.



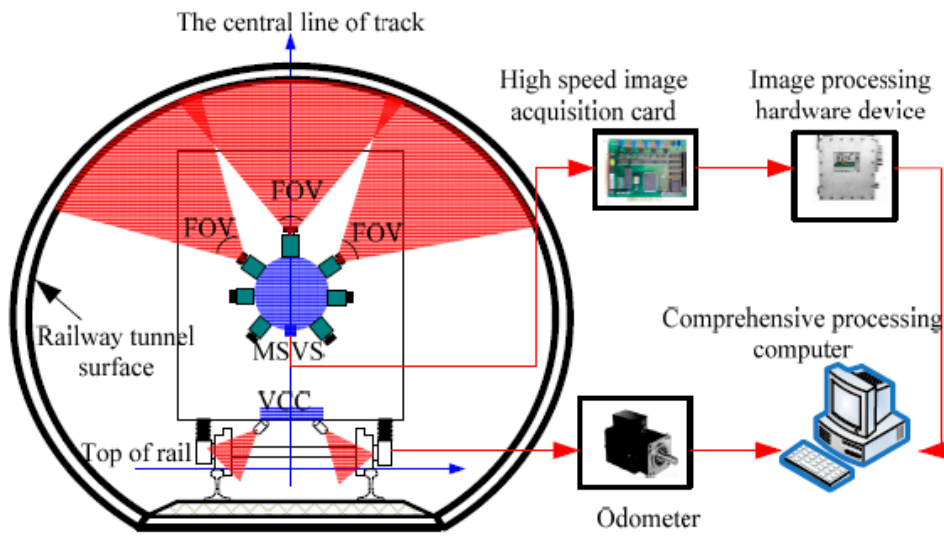


**Figura 49.** Diagrama de bloque del sistema de corrección de vibraciones [45].

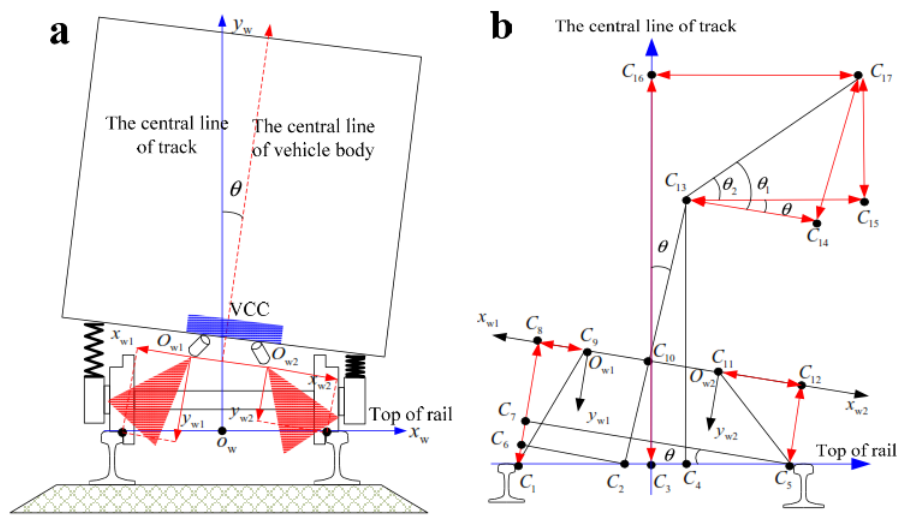


**Figura 50.** Derecha: Imagen del riel con las líneas láser. Izquierda: Imagen del principio de rectificación [45].

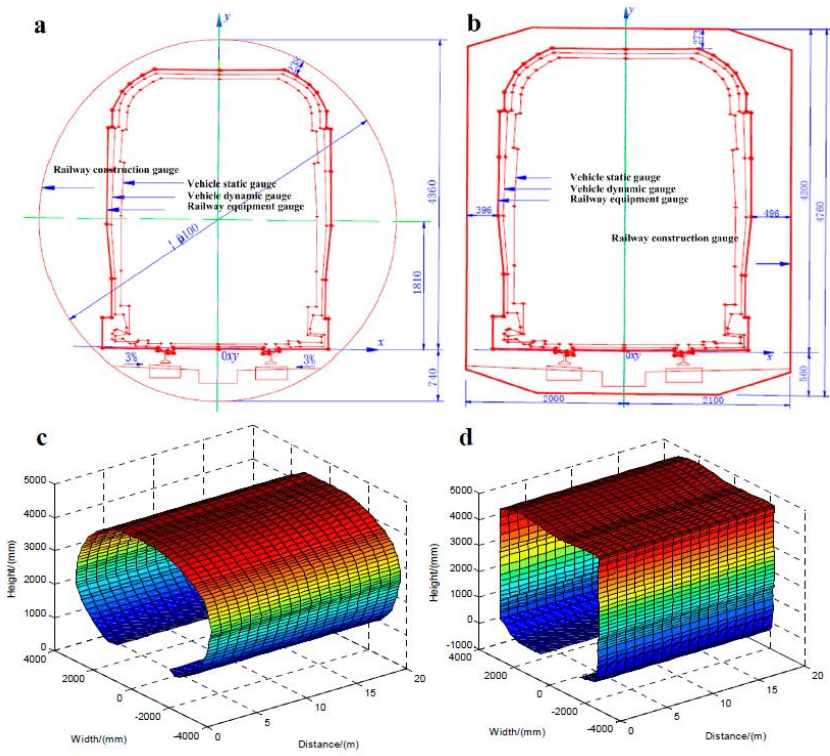
El segundo enfoque aplicado a la inspección de túneles mediante el uso de varias cámaras y varios generadores de planos láseres (MSVS de la figura 51), plantea un componente de compensación de vibración (VCC de la figura 51), que no es otra cosa que un dispositivo adicional de triangulación mediante láseres y cámaras. Cuando el vehículo de inspección viaja sobre las vías, la vibración de balanceo, la vibración de cabeceo y la vibración de serpenteo se crean simultáneamente (ver figura 22) desde los muelles de amortiguación del vehículo. Dado que estos tres tipos de vibraciones son ortogonales entre sí y los planos de luz estructurada emitidos por los proyectores son perpendiculares a la dirección de marcha del vehículo, sólo la vibración de balanceo tiene un impacto significativo en los resultados de las mediciones dinámicas. El componente de compensación de vibración identifica puntos invariantes en la geometría de la vía y los considera como referencia (ver figura 52), analizando el apartamiento de estos puntos mediante trigonometría elemental determina los errores de medición en la inspección del túnel que se generan por la vibración de balanceo. La figura 53 muestra los resultados de las mediciones de túneles corrigiendo los errores por vibración [46].



**Figura 51.** Sistema de escaneo multicámara con luz estructurada MSVS. Componente de compensación de vibraciones (VCC) [46]



**Figura 52.** a: Principio de compensación de vibraciones. b: diagrama detallado del cálculo [46] .



**Figura 53.** a: Plano de diseño de túnel circular. b: Plano de diseño de túnel rectangular. c: Medición dinámica del túnel circular. d: Medición dinámica del túnel rectangular [46].

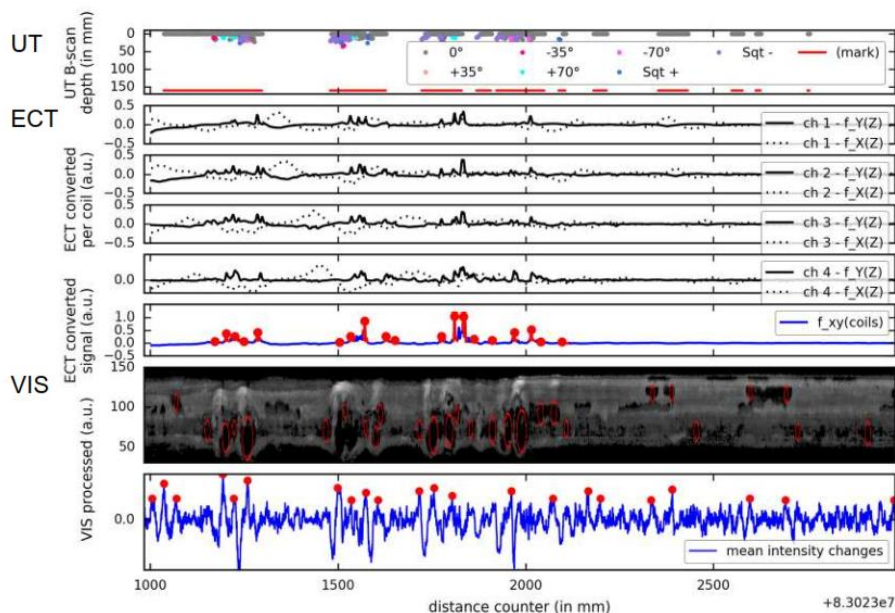


## CONCLUSIONES

Se ha presentado una gran variedad de aplicaciones de los sistemas ópticos para inspección de rieles, detallando los distintos métodos con sus características, ventajas y facilidades que prestan las distintas configuraciones. Los sistemas ópticos para inspecciones de rieles, como hemos visto a lo largo de este informe, son una herramienta de amplio uso para el control de estos componentes. La mejor elección entre cada uno de los distintos métodos dependerá de muchos factores como la disponibilidad económica, velocidades de operación, condiciones de operatividad y otras más. Una característica importante es la gran cantidad de datos que aportan y que explotados de manera adecuada pueden significar ahorros en los costos de mantenimiento, este factor se puede considerar como un contrapeso frente a los costos en este tipo de inversiones.

Dada la robustez de los equipamientos y a la facilidad para adaptarse a las distintas problemática de los diversos tipos de elementos de la vía, estas herramientas automatizadas se han expandido y en la actualidad cubren una gran cantidad de problemáticas en todo el sector ferroviario en países en el extranjero. Sería interesante promover, a base de convenios entre universidades y los distintos actores del sector ferroviario, actividades de investigación en el país para desarrollar estos sistemas.

Si bien los sistemas ópticos aportan numerosas soluciones, es importante recalcar que no deben considerarse como una tecnología exclusiva. Al ser una herramienta más dentro de los métodos de ensayos no destructivos deben siempre funcionar a la par de las otras tecnologías como son el ultrasonido, corrientes inducidas, termografía, radiografía, etc. Un ejemplo de este tipo se encontró en la bibliografía y consiste en la combinación de sistemas de visión (VIS) junto con ensayos de ultrasonidos (UT) y corrientes inducidas (ECT), ver figura 54 [47]. A criterio del autor es notable poder combinar estas tecnologías y observar en una imagen la ubicación de los distintos defectos, tanto internos como externos.



**Figura 54.** Ejemplo del procesamiento de señales que se obtienen mediante los métodos de ultrasonidos (UT), corrientes inducidas (ECT) y sistema de visión (VIS) para caracterizar defectos fatiga por contacto (RCF) [47].

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Romero, R., Fava, J. "Defectos en rieles, sus características, causas y métodos de ensayos no destructivos para su control". Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo. Octubre 2016.
- [2] ACEM – RAIL. "Automated and Cost Effective Maintenance for Railway - D1.1 Report on the state of practice of railway infrastructure maintenance". ACEM-Rail 265954. 2011-02-25.
- [3] Dong Zhan, Long Yu, Jian Xiao y Tanglong Chen. "Multi-Camera and Structured-Light Vision System (MSVS) for Dynamic High-Accuracy 3D Measurements of Railway Tunnels." Sensors 2015, 15, 8664-8684; doi:10.3390/s15040866.
- [4] Nuevo Central Argentino S. A. – NCA, "Manual Integral de Vías", 2014.
- [5] Aharoni, R., Glikman, E., Krug, G. "A Novel high-speed rail inspection system". NDT.net, Octubre 2002, Vol. 7 No.10. Disponible en: <http://www.ndt.net/artide/ecndt02/156/156.htm>. Accedido en Mayo de 2017.
- [6] Australian Rail Track Corporation LTD. "Manual for Non-Destructive Testing – ETN-01-04". 2009.
- [7] Rainer Pohl, A. Erhard, H.-J. Montag, H.-M. Thomas, H. Wustenberg. "NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection." NDT&E International 37 (2004) 89–94
- [8] Song, Z., Yamada, T., Shitara, H., Takemura, Y., "Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing". Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2011, 3, 546-550.
- [9] Hocking, "Rail Inspection – The Eddy Current Solution".
- [10] POPOVIĆ, Z., RADOVIĆ, V., LAZAREVIĆ, L., VUKADINOVIĆ, V., TEPIĆ, G., "Rail Inspection of RCF defects". METALURGIJA 52 (2013) 4, 537-540.
- [11] DEY, A., THOMAS, H. - M., POHL, R., "The important role of eddy current testing in railway track maintenance". 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.
- [12] Transportation Technology Center, Inc. "Review MNR's Established Practices for Automated Inspection." P-14-005, Julio 2014. Estados Unidos.
- [13] John Laurent, Richard Fox-Ivey, Fernando Sanchez Dominguez, José Antonio Ramos Garcia "Use of 3D Scanning Technology for Automated Inspection of Tunnels". Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Use of 3D Scanning Technology for Automated Inspection of Tunnels. Foz do Iguaçu, Brazil.

- [14] Yu. Chugui, A. Verkhoglyad, A. Poleshchuk, V. Korolkov, E. Sysoev y P. Zavyalov. "3D Optical Measuring Systems and Laser Technologies for Scientific and Industrial Applications". MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 13, No. 6, 2013.
- [15] Yu.V. Chugui. "Optical Measuring Systems and Laser Technologies for Scientific and Industrial Applications". MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 7, Section 3, No. 1, 2007.
- [16] Yuri Chugui, Alexander Verkhogliad, Vadim Kalikin, Peter Zav'yalov. "3D optical measuring technologies for industrial applications". Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering May 2011.
- [17] Markus-Christian Amann, Thierry Bosch, Marc Lescure, Risto Myllyla, Marc Rioux. "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement". Opt. Eng. 40(1) 10–19 (January 2001).
- [18] Búsqueda en internet: Sensores de tiempo de vuelo. Disponible en: <http://tecnitop.com/es/tiempo-vuelo/> <http://tecnitop.com/es/tiempo-vuelo/>. Accedido en Mayo de 2017.
- [19] R. Romero, G. Cosarinsky; J. Brizuela. "Triangulación láser aplicada a la inspección sin contacto de componentes ferroviarios". REVISTA ALAF – Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles. N° 97 MARZO 2015.
- [20] Búsqueda en internet: Sistemas de visión artificial. Disponible en: <http://www.etitudela.com/celula/downloads/visionartificial.pdf>. Accedido en Mayo de 2017.
- [21] Búsqueda en internet: Sensores de visión artificial. Disponible en: [http://www.globalspec.com/learnmore/video\\_imaging\\_equipment/machine\\_vision\\_inspection\\_equipment/vision\\_sensors](http://www.globalspec.com/learnmore/video_imaging_equipment/machine_vision_inspection_equipment/vision_sensors). Accedido en Mayo de 2017.
- [22] Búsqueda en internet: Cámaras lineales. Disponible en: <http://www.infaimon.com/es/camaras-lineales>. Accedido en Mayo de 2017.
- [23] Búsqueda en internet: geometría de la vía férrea. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Track\\_geometry#Crosslevel](https://en.wikipedia.org/wiki/Track_geometry#Crosslevel). Accedido en Mayo de 2017.
- [24] Comisión Nacional de Regulación de Transporte – CNRT. "RECTIFICACION DEL TRAZADO DE LAS CURVAS POR EL METODO DE LAS FLECHAS". NTVO N° 4 Diciembre de 1972. Disponible en: [https://www.cnrt.gob.ar/sites/default/files/normativa\\_ferroviaria/NORMAS%20VIA%20Y%20OBRAS/VO\\_4.pdf](https://www.cnrt.gob.ar/sites/default/files/normativa_ferroviaria/NORMAS%20VIA%20Y%20OBRAS/VO_4.pdf). Accedido en Mayo de 2017.
- [25] Comisión Nacional de Regulación de Transporte – CNRT. "COLOCACION DE LA VIA – PERALTE CURVAS DE TRANSICIÓN Y ENLACE". NTVO N° 3 Diciembre de 1972. Disponible en:

[https://www.cnrt.gob.ar/sites/default/files/normativa\\_ferroviaria/NORMAS%20VIA%20Y%20OBRAS/VO\\_3.pdf](https://www.cnrt.gob.ar/sites/default/files/normativa_ferroviaria/NORMAS%20VIA%20Y%20OBRAS/VO_3.pdf). Accedido en Mayo de 2017.

- [26] Jan Zywił, Gunther Oberlechner, "Innovative Measuring System Unveiled September 2001, International Railway Journal.
- [27] Rainer Wenty. "Plasser & Theurer machines and technologies applied for track maintenance of high-speed railway lines: a selection". Rail Engineering International Edition 2007 Number 1.
- [28] Rudolf Becker, "Innovations and proven equipment at the iaf 2013". RTR 2/2013.
- [29] Búsqueda en internet: escáner portátil de rieles. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/riftek/product-56620-1689482.html>. Accedido en Mayo de 2017.
- [30] Búsqueda en internet: escáner portátil de rieles. Disponible en: <http://www.graw.com/en/track-measurement/trolley-for-track-geometry-with-laser-cameras-tep.html>. Accedido en Mayo de 2017.
- [31] Búsqueda en internet: vehículos hi rail inspección de vías. Disponible en: <https://georgetownrail.com/Track-Inspection/Aurora>. Accedido en Mayo de 2017.
- [32] Búsqueda en internet: vehículos hi rail inspección de vías. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/riftek/product-56620-1689482.html>. Accedido en Mayo de 2017.
- [33] Búsqueda en internet: trenes para inspección de vías. Disponible en: <http://ensco.com/rail/track-measurement-systems>. Accedido en Mayo de 2017.
- [34] Búsqueda en internet: sistemas de inspección de geometría de vías. Disponible en: <http://www.mermeccgroup.com/en/01/inspect/track-measurement/185/track-geometry.php>. Accedido en Mayo de 2017.
- [35] Búsqueda en internet: sistemas de inspección de geometría de vías. Disponible en: <https://georgetownrail.com/Track-Inspection/Aurora>. Accedido en Mayo de 2017.
- [36] Xavier Gibert, Vishal M. Patel, y Rama Chellappa, "Deep Multi-task Learning for Railway Track Inspection". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems arXiv:1509.05267. September 2015.
- [37] Gérard Presle, "The EM 250 high-speed track recording coach and the EM-SAT 120 track survey car, as networked track geometry diagnosis and therapy systems". Rail Engineering International Edition 2000 Number 3.
- [38] The EM-SAT 120 Track Survey Car, an integrated part of the track geometry data base of the Austrian Federal Railways OBB. RTR 2 (2004).

- [39] Pierre Assali, Flavien Viguier, Nicolas Pollet. "Contribution of Terrestrial Laser Scanning for monitoring and inspection of railway infrastructure". Noviembre 2013. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/306517446>. Accedido en Mayo de 2017.
- [40] Búsqueda en internet: sistemas de inspección de gálibos. Disponible en: <http://www.abtus.com/en/products/rail/clearance/ABT4650>. Accedido en Mayo de 2017
- [41] Florian Auer, "Multi-function track recording cars". RTR 3+4/2013
- [42] Ilhan Aydin. "A new approach based on firefly algorithm for vision-based railway overhead inspection system". Measurement 74 (2015) 43–55.
- [43] Búsqueda en internet: algoritmo firefly Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo\\_firefly](https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_firefly). Accedido en Mayo de 2017.
- [44] Búsqueda en internet: escáner láser portátil de ruedas. Disponible en: <https://riftek.com/eng/products/~show/instruments/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp>. Accedido en Mayo de 2017.
- [45] Junhua Sun, Zhen Liu, Yuntao Zhao, Qianzhe Liu, Guangjun Zhang. "Motion deviation rectifying method of dynamically measuring rail wear based on multi-line structured-light vision". Optics & Laser Technology 50 (2013) 25–32.
- [46] Dong Zhan \*, Long Yu, Jian Xiao and Tanglong Chen. "Multi-Camera and Structured-Light Vision System (MSVS) for Dynamic High-Accuracy 3D Measurements of Railway Tunnels". Sensors 2015, 15, 8664-8684; doi:10.3390/s150408664.
- [47] Thorsten SZUGS, Alexander KRÜGER, Gert JANSEN, Bas BELTMAN, Shulin GAO, Heike MÜHMEL, Ralf AHLBRINK. "Combination of Ultrasonic and Eddy Current Testing with Imaging for Characterization of Rolling Contact Fatigue". 19<sup>th</sup> World Conference on Non-Destructive Testing 2016.