



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº BR 102017002219-6

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: BR 102017002219-6

(22) Data do Depósito: 02/02/2017

(43) Data da Publicação Nacional: 21/08/2018

(51) Classificação Internacional: B61K 9/12; G01B 5/08; H04N 7/00.

(54) Título: SISTEMA E MÉTODO PARA O MONITORAMENTO DE RODAS FERROVIÁRIAS

(73) Titular: VALE S/A, Pessoa Jurídica. CGC/CPF: 33592510000154. Endereço: Torre Oscar Niemeyer, Praia de Botafogo, 186, sala 701 a sala 1901, Botafogo, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL(BR), Brasileira

(72) Inventor: ANA CLAUDIA DA SILVA GOMES; CLEIDSON RONALD BOTELHO DE SOUZA; ADAN SALAZAR GARIBAY; ANDRES HERNANDEZ GUTIERREZ.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 02/02/2017, observadas as condições legais

Expedida em: 07/01/2020

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

Diretora de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados



“SISTEMA E MÉTODO PARA O MONITORAMENTO DE RODAS FERROVIÁRIAS”

Campo da Invenção

[001] A presente invenção consiste em um sistema e um método para realizar o monitoramento de rodas ferroviárias.

Antecedentes da Invenção

[002] As rodas ferroviárias consistem em rodas empregadas em veículos que realizam a sua movimentação por meio de trilhos. Tais veículos são utilizados, por exemplo, para o transporte de materiais e pessoas.

[003] O veículo mais comum a fazer uso desse tipo de roda é um trem ferroviário, sendo este interligado a diversos vagões classificados de acordo com o que está sendo transportado. Quando o trem transporta passageiros, ele é denominado trem de passageiros; quando transporta materiais, é denominado trem de carga.

[004] Entre os aspectos que são estudados e analisados em um sistema de transporte ferroviário, os mais importantes, e de interesse, são: descarrilamento de trem; custos de manutenção; e estratégias logísticas eficientes.

[005] O descarrilamento de trem é geralmente causado devido à perda de atrito entre as rodas ferroviárias e os trilhos, fazendo com que o trem perca o contato com esses elementos.

[006] Essa perda de atrito faz com que o trem saia dos trilhos, causando acidentes e danos gravíssimos em virtude das grandes dimensões e elevada massa do trem.

[007] Em referência aos custos de manutenção, a interação roda ferroviária/trilho desempenha um papel fundamental não só na manutenção dos trens, mas também no consumo de combustível, segurança, e na qualidade do passeio para trens de passageiros. Por último, um descarrilamento potencialmente afeta o contrato logístico, que pode ter implicações financeiras devido à perda de cargas ou até mesmo pela perda de vidas humanas decorrente de acidentes ferroviários.

[008] As principais causas de descarrilamentos de trens são: interação roda/trilho, trilhos quebrados, falhas nas soldas, imperfeições na geometria do trilho, falha na bitola do trilho e rodas quebradas.

[009] Todos os fatores citados após “interação roda/trilho” também são decorrentes desse mesmo fenômeno. Em outras palavras, trilhos quebrados, falhas na bitola, geometria do trilho e falhas nas soldas podem ter decorrência direta ou indireta da “interação roda/trilho”. Para citar um exemplo, um perfil de roda ferroviária danificado pode causar falhas na geometria do trilho e imperfeições superficiais, que por sua vez leva a um desgaste excessivo da roda.

[010] Portanto, é de grande interesse e importância a elaboração e utilização de um sistema e um método de monitoramento para rodas ferroviárias que evite acidentes decorrentes de má condição de rodas ou de falhas na interação roda/trilho.

[011] No estado da técnica, tal monitoramento é realizado periodicamente, sendo necessário realizar uma paralisação do trem e de seus vagões para efetuar uma verificação de todas as suas rodas ferroviárias.

[012] Tal verificação é realizada manualmente por um ou mais operários, que passam pelo trem verificando as suas rodas, e constatando quais delas apresentam desgaste excessivo e necessitam ser substituídas.

[013] Entretanto, tal método demanda um tempo de execução muito grande e está sujeito a falhas humanas, pois a verificação é realizada manualmente pelos operários. Além disso, pelo fato da verificação ser periódica, há um grande risco de uma roda sofrer um desgaste excessivo ou apresentar deformações no período compreendido no intervalo entre as verificações.

[014] O estado da técnica também compreende alguns documentos que revelam um monitoramento de rodas ferroviárias, sendo eles descritos a seguir.

[015] Um documento compreendido pelo estado da técnica é a patente US8925873, que revela um dispositivo e um método para realizar a medição e verificação de dimensões relacionadas ao desgaste de rodas sobre trilhos. Tal dispositivo consiste em

câmeras de disparo rápido associadas a medidores a *laser*, configurados para construir um modelo da roda e verificar assim dimensões como ângulo de ataque, desalinhamento da roda, e outras dimensões que estão relacionadas ao desgaste prematuro deste elemento.

[016] A aplicação do dispositivo e do método de US8925873 é capaz de verificar o desgaste prematuro das rodas e diminuir o número de manutenções necessárias, evitando acidentes provocados pelo desgaste prematuro destes elementos.

[017] Em US8925873 o dispositivo é instalado em ambos os lados de cada trilho para realizar uma modelagem parcial da roda ou do truck (combinação de duas rodas com um eixo) do equipamento. As imagens capturadas pela câmera e pelos sensores a *laser* são obtidas durante a passagem do trem, não sendo necessário realizar sua parada para que seja realizada uma medição.

[018] As imagens obtidas pelas câmeras são então submetidas a uma triangulação com os *lasers* para gerar uma imagem precisa da roda, e assim realizar a leitura de suas dimensões.

[019] Entretanto, o referido método só permite realizar uma medição das rodas por meio das imagens obtidas pelo dispositivo, não sendo possível compará-las com outras rodas em perfeito estado ou com um modelo de roda ideal para determinação do desgaste efetivo da roda.

[020] O método descrito no documento americano também não permite checar dimensões não captadas pelas câmeras ou sensores, como por exemplo, a superfície das rodas que está em contato com os trilhos, impossibilitando a checagem de anomalias nesta parte da roda e a verificação da interação roda/trilho.

[021] Além disso, o dispositivo não permite a utilização apenas de câmeras, sendo necessária a aplicação de sensores a *laser* para realizar a modelagem da roda que está sendo monitorada, aumentando assim o custo do dispositivo.

[022] Outro documento do estado da técnica é o pedido de patente US20140285658, que revela um método e um dispositivo para realizar a medição de rodas sobre trilhos

sem o contato com a mesma. O dispositivo consiste em câmeras e sensores a *laser*, instalados próximos ao trilho ou manipulados por um operador, configurados para capturar imagens da roda. O dispositivo também pode ser combinado com um sensor de posição para maior precisão na montagem de cada imagem.

[023] Com o uso do dispositivo de US20140285658, é possível capturar a roda por inteiro ou só uma parte de interesse da roda. Quando é realizada uma captura da roda por inteiro é efetuado um modelo tridimensional da roda por um sistema computacional, configurado para processar as imagens obtidas pelas câmeras e pelos *lasers*.

[024] No sistema computacional descrito em US20140285658 é possível realizar diversos tipos de medição da roda, permitindo assim verificar a dimensão de grande parte de seus componentes. Além disso, o sistema também compreende uma opção de comparar um primeiro modelo tridimensional adquirido com outros modelos adquiridos pelo mesmo dispositivo, para verificar possíveis anomalias e deformações nas rodas.

[025] Entretanto, tal dispositivo e método não permite uma medição da superfície da roda ferroviária, realizando apenas uma medição do perfil da roda, impedindo que deformações na superfície da roda, tais como: calos, irregularidades na superfície e outros tipos de problemas sejam detectados. Por não permitir a medição da superfície da roda, o método descrito também impede uma verificação da interação roda/trilho, podendo gerar gastos diretos como acidentes e gastos indiretos como o consumo excessivo de combustível e o desconforto dos passageiros.

[026] Além disso, o método revelado em US20140285658 só permite realizar a comparação dos modelos de roda medidos pelo dispositivo com outros modelos de rodas também adquiridos por meio do dispositivo, não sendo possível introduzir um modelo de roda ideal para assim medir o desgaste efetivo da roda.

[027] Assim, conclui-se que, tanto a técnica periódica do monitoramento de rodas ferroviárias, quanto os dispositivos e sistemas revelados no estado da técnica não são

capazes de verificar efetivamente a superfície da roda, impedindo assim uma verificação da interação roda/trilho.

[028] Além disso, nenhum dos dispositivos, sistemas e métodos compreendidos pelo estado da técnica é capaz de mensurar o desgaste efetivo da superfície e do perfil da roda, comparando-a com um modelo de roda ideal.

Objetivos da Invenção

[029] A presente invenção tem por objetivo um sistema para realizar o monitoramento de rodas ferroviárias que permite mensurar e analisar tanto seu perfil quanto a sua superfície.

[030] A presente invenção também tem por objetivo um método para realizar uma medição do desgaste efetivo sofrido por uma roda ferroviária monitorada por meio de uma comparação com um modelo ideal de roda ferroviária.

Breve Descrição dos Desenhos

A presente invenção é mais detalhadamente descrita com base nas respectivas figuras:

A figura 1 é uma vista em perspectiva da configuração preferencial do sistema de monitoramento da presente invenção.

A figura 2 retrata um diagrama de blocos das etapas envolvidas no monitoramento da roda ferroviária na configuração preferencial da presente invenção.

A figura 3 retrata um diagrama de blocos do processo de calibração da câmera estérea.

A figura 4 retrata as etapas no processo de segmentação da imagem estérea.

A figura 5 retrata um fluxograma das etapas envolvidas na medição do perfil da roda ferroviária.

A figura 6 retrata um fluxograma das etapas envolvidas na análise do perfil da roda ferroviária.

A figura 7 retrata um exemplo de distorção radial provocada pela lente de uma câmera

convencional.

A figura 8 retrata um exemplo de distorção tangencial provocada pela lente de uma câmera convencional.

Descrição Detalhada da Invenção

[031] A presente invenção descreve um sistema e um método para o monitoramento de rodas ferroviárias 5. Tal monitoramento permite realizar uma visualização e uma análise tanto do perfil da roda 5 quanto de sua superfície 3.

[032] Além disso, o monitoramento também permite realizar uma análise de todo o perfil e superfície 3 da roda ferroviária 5, comparando-a com um modelo ideal de roda para medir o seu desgaste efetivo.

[033] O monitoramento pode ser dividido em três etapas fundamentais, sendo estas: medição do perfil 17 da roda 5; análise do perfil 18 da roda 5; e análise de superfície 19 da roda 5.

[034] O primeiro aspecto refere-se ao fornecimento de medições relativas à geometria da roda 5. Quanto à análise do perfil 18 da roda 5, nesta etapa é realizada a análise de sua geometria ao longo de todo seu perfil, sendo este perfil gerado apenas com duas dimensões (2D).

[035] A análise da superfície 19 da roda 5 implica em estender esse processo ao longo do perfil da roda 5 (2D) para uma pequena região da superfície 3 da roda ferroviária 5, realizando assim um modelo com três dimensões (3D) da roda 5, que é submetido à análise.

[036] Esta extensão de 2D para 3D é de significativa importância, pois isso permite compreender a interação roda 5/trilho 4 e a dinâmica das rodas 5 durante a viagem ao longo de uma ferrovia. Cada uma destas etapas do monitoramento é explicada separadamente a seguir.

[037] **Medição do perfil da roda (17)**

[038] O sistema de monitoramento faz uso de duas câmeras estéreas sincronizadas, distribuídas preferencialmente do seguinte modo: uma em cada lateral do trilho 4, sendo a primeira câmera estérea 8 e a segunda câmera estérea 9 (vide figura 1).

[039] Cada câmera estérea 8,9 é composta por duas lentes, sendo a primeira câmera estérea 8 composta pela primeira lente esquerda 6 e a primeira lente direita 7, e a segunda câmera estérea 9 composta pela segunda lente esquerda 6' e a segunda lente direita 7'.

[040] Esta distribuição é utilizada para capturar uma imagem estérea tanto do lado externo 2 quanto interno 1 da roda ferroviária 5, vide figura 1. Desse modo, a primeira câmera estérea 8 captura imagens do lado interno 1 da roda 5, enquanto a segunda câmera estérea 9 captura imagens do lado externo 2 da roda 5.

[041] Estas imagens estéreas, juntamente com cada um dos parâmetros de calibração de câmera 8,9, possibilitam uma reconstrução 3D de ambos os lados 1,2 da roda ferroviária 5.

[042] Tal reconstrução 3D é possível através da aplicação das seguintes etapas de pré-processamento: correção de distorção de imagem; retificação da imagem; mapeamento; e cálculo da disparidade da imagem.

[043] A correção de distorção de imagem utiliza os parâmetros de calibração 11 de cada câmera estérea 8,9 (vide figura 2), para compensar distorções 20,21 da lente, de modo que as linhas retas no mundo real sejam apresentadas como linhas retas na imagem mapeada.

[044] A retificação da imagem assegura que um componente de imagem detectado em uma dada linha da imagem estérea se encontra na mesma linha da imagem mapeada.

[045] O mapeamento e cálculo da disparidade da imagem mapeia a distância entre pontos de *pixels* correspondentes nas imagens retificadas a uma profundidade métrica, a fim de calcular a distância tridimensional da lente esquerda em relação ao objeto fotografado.

[046] O sistema calcula o mapa de disparidades utilizando o algoritmo de correspondência estéreo de blocos (BlockMatching) ou o algoritmo de correspondência estéreo semi-global de blocos (Semi-Global Matching). Ambos algoritmos têm como objetivo determinar os pontos correspondentes entre as imagens estéreas. Essa determinação é realizada através da comparação dos valores de intensidade de pixels das duas imagens onde a menor diferença absoluta é escolhida determinando o ponto da correspondência. O último passo necessário para a reconstrução 3D é a triangulação. Esse método combina o mapa de disparidades e a distância entre as duas lentes para estimar a posição tridimensional de um objeto medido com relação à lente esquerda da câmera estérea.

[047] Em outras palavras, como a distância entre as duas lentes de uma câmera estérea se mantém a mesma para qualquer objeto capturado, o valor atribuído a esta distância é precisamente conhecido pelo seu desenvolvedor, basta comparar as diferenças dessas imagens obtidas pelas duas lentes e considerar no cálculo a distância entre as duas lentes para que seja determinada a distância entre uma das lentes e o objeto capturado.

[048] Após a aplicação destas etapas de pré-processamento para ambas as imagens estéreas do lado interno 1 e externo 2 da roda ferroviária 5, o sistema é capaz de realizar a reconstrução tridimensional (3D) 13,13' de cada lado 1,2 correspondente da roda ferroviária 5.

[049] Este processo é seguido pelo passo de registo de pontos na nuvem tridimensional. Este passo combina as duas reconstruções 3D, a fim de produzir um único modelo tridimensional da roda de ferroviária 5, denominado de modelo observado, utilizando o algoritmo iterativo de ponto mais próximo (ICP) e os parâmetros de calibração extrínsecos das duas câmeras estéreas 8,9. O ICP é um algoritmo de registro de nuvens de pontos que através de um processo iterativo busca uma transformação que minimiza a diferença entre duas nuvens de pontos. Durante a sua execução uma nuvem de pontos chamada de referência é mantida fixa, enquanto

a outra nuvem de pontos é transformada iterativamente até encontrar o ponto correspondente mais próximo da nuvem de referência.

[050] O objetivo da medição do perfil 17 de roda é que, com base na utilização de um modelo teórico 2D B de uma roda ferroviária 5, seja possível realizar a medição de parâmetros particulares da geometria da roda 5 tais como: a largura da flange l , altura da flange h , ângulo da flange θ , largura da roda L . (vide figura 5)

[051] Isto é possibilitado por meio da comparação do modelo teórico 2D B da roda ferroviária 5, denominado "modelo verdadeiro", com um perfil do modelo observado 2D que é extraído da reconstrução tridimensional da roda ferroviária 5 utilizando as câmeras estéreas, o chamado "modelo observado".

[052] Esta comparação baseia-se no cálculo da distância de pontos de função, localizados em coordenadas fixas ao longo destes dois perfis das rodas.

[053] Com o fornecimento de um modelo teórico 2D B da roda ferroviária 5, que pode ser obtido a partir do fabricante da roda 5, esta abordagem pode ser adaptada para qualquer tipo de roda ferroviária 5.

[054] **Análise do Perfil da Roda (18)**

[055] Ao contrário da etapa de medição do perfil 17 da roda 5, que mede características particulares da geometria de uma roda ferroviária 5, a análise do perfil 18 da roda visa proporcionar uma sólida compreensão de como a roda 5 tem sido utilizada ao longo de seu perfil.

[056] Para fazer isso, todos os pontos situados ao longo do modelo verdadeiro são comparados com os seus pontos correspondentes no modelo observado. Após a realização desta comparação, a estimativa de desgaste efetivo da roda ao longo do seu perfil é calculada através do cálculo da distância Euclidiana entre cada ponto no modelo teórico ou verdadeiro 2D B e o seu ponto correspondente localizado no modelo observado 2D A. A distância Euclidiana é uma medida de dissimilaridade entre dois pontos, quanto maior for essa medida, menor será a semelhança entre os pontos.

Dessa maneira, é possível determinar o quão próximo os pontos do modelo observado estão dos pontos do modelo teórico.

[057] Uma vez que esta análise é realizada ao longo do perfil da roda, o sistema de monitoramento produz uma curva 50 da distância Euclidiana fornecida pelos modelos verdadeiro e observado.

[058] Por meio desta curva 50 é possível realizar uma estimativa do desgaste efetivo do perfil da roda ferroviária 5, vide figura 6. A resolução da curva 50 resultante depende da resolução do modelo observado 2D A, que basicamente depende da resolução combinada das duas câmeras estéreas 8,9. Ou seja, quanto melhor for a resolução das câmeras 8,9 mais precisa será a estimativa do desgaste no perfil da roda ferroviária 5.

[059] **Análise de Superfície da Roda (19)**

[060] Uma capacidade adicional e fundamental do sistema de monitoramento é a de estimar o desgaste da região da superfície 3 da roda 5, que corresponde à área de contato com o trilho 4.

[061] Tal área da superfície 3 é definida pela referida região da roda ferroviária 5 que aparece no campo combinado de vista das duas câmeras estéreas 8,9, ou seja, a região que não é integralmente capturada por estas.

[062] Neste caso, o sistema calcula a distância Euclidiana entre os pontos pertencentes ao modelo verdadeiro e os pontos referentes no modelo observado para a região especificada na área de superfície 3 da roda 5.

[063] Este método 19 e o método de análise de perfil 18 permitem compreender a interação roda 5/trilho 4, realizando assim uma análise mais aprofundada da roda 5 utilizando alguns dos parâmetros da roda 5 medidos na primeira etapa 17. Este procedimento é de grande importância para a prevenção de descarrilamento de trem e redução no consumo de combustível.

[064] Detalhes a respeito dos três principais aspectos revelados acima (medição de perfil 17; análise de perfil 18; e análise de superfície 19) e o processo completo da

medição e análise das características geométricas do perfil das rodas 5 são revelados em um diagrama de blocos na figura 2, onde são esquematizadas as seguintes etapas: aquisição da imagem estérea 10; correção da distorção da imagem ou calibração das câmeras estéreas 11; segmentação da roda ferroviária 12; reconstrução 3D do lado interno 1 da roda 13; reconstrução do lado externo 2 da roda 13'; filtragem dos dados 3D 14; fusão dos dados 3D 15; mapeamento do modelo tridimensional 16; medições do perfil da roda ferroviária 17; análise do perfil da roda ferroviária 18; e análise do perfil da roda ferroviária 19.

[065] Tendo sido descritos os três principais aspectos que compõem o sistema de monitoramento de rodas ferroviárias 5, são evidenciados a seguir as configurações e a ordem de realização de cada etapa que compõe o método de monitoramento de rodas ferroviárias 5.

[066] A primeira etapa 10 consiste na aquisição da imagem estérea da roda ferroviária 5, sendo utilizadas, preferencialmente, duas câmeras estéreas 8,9. Cada câmera estérea sendo colocada em cada lado do trilho 4, tal como ilustrado na Figura 1. As câmeras no presente invento são denominadas de primeira câmera estérea 8 e segunda câmera estérea 9 respectivamente. Cada câmera compreende um par de lentes paralelamente dispostas com campos de visão concorrentes, sendo na primeira câmera 8 a primeira lente esquerda 6 e primeira lente direita 7, e na segunda câmera 9 a segunda lente esquerda 6' e a segunda lente direita 7'.

[067] Alternativamente podem ser utilizados sensores a *laser*, ou luzes projetadas para auxiliar na aquisição da imagem das rodas, sendo estes integrados às câmeras estéreas 8,9.

[068] A taxa de quadros de aquisição de imagem estérea pode ser configurada anteriormente para que se tenha certeza que cada roda 5 pertence a um determinado vagão que se enquadra no campo de visão das câmeras estéreas 8,9. Deste modo, quando um trem ou vagão se deslocar pelo local onde as câmeras 8,9 estão instaladas,

estas realizam a captura de imagem estérea 10 de todas as rodas 5 que compõem o veículo, sendo possível analisar separadamente cada roda 5.

[069] A distância, a geometria e a orientação de cada câmera estérea 8,9 em relação ao trilho 4 deve ser definida de acordo com as especificações técnicas das câmeras 8,9, bem como as condições de iluminação e vibrações produzidas pela passagem do veículo e ao longo do trilho 4.

[070] A segunda etapa 11 consiste na calibração das câmeras estéreas 8,9 para compensar as distorções que ocorrem nas lentes 6,6',7,7' destes elementos. Existem dois tipos distintos de distorção que ocorrem na maioria das câmeras, sendo estas a distorção radial 20 e a distorção tangencial 21 (vide figuras 7 e 8). Ambas as distorções 20,21 são decorrentes do processo de fabricação e instalação das lentes.

[071] A distorção radial 20 é gerada pelo fato de que, para o fabricante de lentes, é sempre mais fácil e barato fabricar uma lente esférica do que uma lente ideal parabólica. Essa característica presente no processo de fabricação da lente faz com que a lente esférica gere esta distorção 20, (vide figura 7). Na figura 7 é possível ver uma imagem distorcida 20 no plano de imagem 22, provocada pela lente 24 quando esta se interpõe ao objeto 23.

[072] A distorção tangencial 21 é relacionada principalmente ao fato de que é de grande dificuldade alinhar perfeitamente a lente da câmera 24 com o sensor da câmera 25, vide figura 8 que representa a lente da câmera 24 desalinhada com o sensor da câmera 25 e a imagem distorcida 26.

[073] Para realizar uma medição 2D ou 3D de um objeto, o efeito destas distorções 20,21 nas imagens estéreas capturadas devem ser corrigidos. Tal correção é feita através de um processo chamado calibração da câmera 11. Esse processo visa estimar duas espécies de parâmetro, sendo estes os parâmetros intrínsecos e os parâmetros extrínsecos.

[074] Os parâmetros intrínsecos se referem à direção dos raios a serem espalhados por um objeto 3D através do centro óptico de coordenadas no plano de imagem. Os

principais parâmetros intrínsecos a serem estimados para cada lente são: a distância focal, ponto principal, coeficientes de inclinação, e distorções radiais 20 e tangenciais 21.

[075] No que diz respeito aos parâmetros extrínsecos, os mesmos encapsulam a posição e orientação das lentes de cada câmera estérea 8,9 que compõe o sistema de monitoramento. A Figura 3 ilustra um diagrama de blocos do processo de calibração, relatando as seguintes etapas: aquisição da imagem esquerda 30; aquisição da imagem direita 30'; calibração monocular 31, realizada por meio dos parâmetros intrínsecos; e calibração estérea 32, realizada por meio dos parâmetros extrínsecos.

[076] A terceira etapa 12 consiste na segmentação da roda ferroviária, sendo essa etapa configurada para auxiliar e agilizar a quarta etapa, que realiza a reconstrução da roda ferroviária em um modelo tridimensional 13,13'.

[077] Este cálculo de segmentação pode utilizar os *pixels* que pertencem à roda ferroviária 5 fotografada. O processo de dividir *pixels* de uma imagem em suas regiões ou objetos constituintes é chamado de segmentação de imagens. Existem diversas técnicas para a segmentação de imagens, na presente invenção a técnica de segmentação adotada é com base na distância transformada.

[078] Os resultados obtidos utilizando esta técnica são revelados na Figura 4, sendo exibido na figura 4A a imagem de entrada, na figura 4B os cantos equilibrados, na figura 4C a segmentação com base na distância transformada e na figura 4D a roda 5 enfim segmentada.

[079] Para a reconstrução 3D de uma seção da roda ferroviária 5, gerado por qualquer uma das câmeras estéreas 8,9, apenas os *pixels* que se encontram no interior do retângulo pontilhado na superfície da roda 5 (representado na figura 4D) são considerados pelo algoritmo de reconstrução 3D.

[080] A quarta etapa 13,13' do fluxograma na figura 2 consiste na reconstrução de um modelo tridimensional da roda 5 submetida ao sistema de monitoramento. A

reconstrução do modelo tridimensional é alcançada utilizando um processo de triangulação.

[081] Este processo baseia-se na utilização de pontos correspondentes que são detectados tanto nas imagens obtidas pelas lentes esquerdas 6,6' quanto pelas lentes direitas 7,7' das câmeras estéreas 8,9 respectivamente. Isto é, para um elemento presente na região segmentada na imagem da esquerda, o *pixel* correspondente deve ser detectado na região segmentada da imagem da direita. Esse procedimento é chamado de recurso correspondente.

[082] Uma vez que cada *pixel* está localizado a uma dada coordenada x e y, as coordenadas x do elemento nas referidas imagens esquerda e direita são obtidos, e a diferença entre estes dois *pixels*, chamado de disparidade, é utilizado para calcular a localização tridimensional do *pixel* em relação à lente esquerda 6 por meio do processo de triangulação. Este processo é repetido para cada *pixel* presente na área segmentada da roda ferroviária 5, permitindo assim uma reconstrução completa desta.

[083] As etapas 1 e 2, ou seja, a aquisição de imagens 10 e a calibração das câmeras estéreas 11, são necessárias para cada câmera estérea 8,9 tal como ilustrado no diagrama de blocos da Figura 2. Portanto, cada câmera estérea 8,9 produz uma reconstrução parcial da roda ferroviária 5.

[084] A primeira câmera estérea 8 reconstrói o lado interno 1 da roda enquanto a reconstrução lado externo 2 da roda é gerado pela segunda câmera estérea 9. Estas duas reconstruções tridimensionais 13, 13' podem conter grupos esparsos de pontos (o ruído) que devem ser removidos antes da aplicação do algoritmo de fusão de dados em 3D, que é explicado na sexta etapa, a fim de obter a completa reconstrução da superfície 3 da roda ferroviária 5. Esse procedimento de remoção de ruído é descrito a seguir na quinta etapa.

[085] A quinta etapa 14 consiste na remoção dos pontos tridimensionais distorcidos, em outras palavras, na remoção de ruído ou filtragem dos dados 3D, gerando assim uma maior precisão no modelo 3D reconstruído.

[086] Nesta etapa, tendo em conta as reconstruções tridimensionais 13, 13' de cada lado 1,2 da roda ferroviária 5, os pontos esparsos e distorcidos são removidos por meio de um modelo tridimensional teórico da superfície 3 da roda ferroviária 5.

[087] A distância de cada ponto tridimensional para a superfície 3 da roda ferroviária 5 é utilizada para classificar um ponto de reconstrução 3D como potencialmente pertencente à superfície 3 da roda 5, ou seja, são considerados apenas pontos em distâncias plausíveis para a reconstrução do modelo tridimensional da roda 5.

[088] Uma análise estatística também é realizada neste processo, a fim de realizar uma forma robusta para o processo de filtragem de dados 3D 14. Abordagens para a realização desta análise estatística incluem: regressão linear, ajuste de curva em 2D e 3D, ou agrupamento. A vantagem desta etapa 14 é uma reconstrução 3D livre e isenta de pontos 3D ruidosos, facilitando a medição das características da roda 5 nas próximas etapas.

[089] A sexta etapa 15 consiste na fusão destes pontos tridimensionais obtidos pelas etapas anteriores. Fornecidos os dois conjuntos de pontos 3D que representam a reconstrução tridimensional 13,13' de cada lado 1,2 da roda ferroviária 5 livre de pontos ruidosos, uma técnica de fusão de dados 3D 15 é então aplicada.

[090] Para realizar a fusão de dados 3D 15 o método utiliza um algoritmo de fusão de dados tridimensionais. Este algoritmo leva em consideração as informações da calibração 11 da etapa 2, gerada pela computação dos parâmetros extrínsecos entre a lente esquerda 6 da primeira câmera 8 e a lente direita 7' da segunda câmera 9.

[091] Estes parâmetros têm como função encapsular a translação relativa e orientação entre essas duas lentes 6,7'. Em seguida, os pontos 3D são submetidos a uma transformação rígida que permite que o sistema combine a nuvem de pontos 3D

obtida pela segunda câmera 9 com a nuvem de pontos 3D obtida pela lente esquerda 6 da primeira câmera 8.

[092] Tal combinação permite que o sistema reprojete estas nuvens de pontos 3D em um sistema de coordenadas 3D. Este reprojeto é realizado por meio de um algoritmo do ponto iterativo mais próximo (ICP, explicado mais acima, no item Medição do Perfil da Roda).

[093] Nesta etapa, ambas as reconstruções 13,13' são fundidas em uma única representação, de modo que um modelo tridimensional da roda ferroviária 5 seja gerado. Este modelo tridimensional único da roda ferroviária 5, denominado de modelo observado 3D, é então utilizado para a análise de estimativa de desgaste da roda e perfil da roda, conforme descrito nas próximas etapas.

[094] A sétima etapa 16 consiste no mapeamento do modelo tridimensional gerado pela sexta etapa para um modelo observado 2D A. Para gerar o modelo observado 2D A para a análise do perfil da roda, as coordenadas 3D projetadas (X, Y, Z) são associadas com as coordenadas geradas pelo modelo teórico 2D B.

[095] Essa associação é realizada pela sobreposição do modelo teórico 2D B com o modelo observado 3D (modelo reconstruído na sexta etapa) para alinhar ambos os modelos e, em seguida, executar uma associação de dados para os pontos 3D que estão mais próximos dos pontos do modelo teórico 2D B.

[096] Deste modo, a sétima etapa é capaz de formular o perfil do modelo observado, gerando assim um modelo observado 2D A.

[097] A oitava etapa 17 consiste na medição do perfil da roda ferroviária 5, que recebe como entrada um modelo teórico 2D B de uma roda ferroviária 5 nova e o modelo observado 2D A obtido por meio da sétima etapa.

[098] A Figura 5 exhibe os componentes e procedimentos presentes nesta etapa, sendo estes o modelo observado 2D A, o modelo teórico 2D B, o conjunto de pontos

de trajeto C, a computação de vetores normais D, a associação de dados E e a estimativa das características da roda F.

[099] O conjunto de pontos de trajeto C define os pontos característicos que facilitam na medição dos parâmetros da geometria do perfil da roda, como a altura da flange h , a largura da flange l , ângulo da flange θ , largura da roda L , e outras dimensões de interesse. A localização desses pontos de trajeto ao longo do perfil da roda é padronizada e a coordenada de cada ponto é realizada com base na localização do ponto mais alto da flange P da roda ferroviária 5.

[0100] A computação de vetores normais D calcula o vetor normal interno dos pontos de referencia localizados ao longo do perfil do modelo observado 2D A. Tal computação é feita considerando dois pontos consecutivos ao longo do perfil da roda, e encontrando a equação da linha reta que une estes dois pontos considerados. Em seguida, a inclinação desta equação é invertida e utilizada para determinar o vetor normal. A curva demonstrada na porção esquerda da computação de vetores normais D na figura 5 exemplifica o resultado desta operação.

[0101] A associação de dados E compara pontos (do trajeto de pontos) do modelo observado 2D A com os pontos correspondentes ao longo do modelo teórico 2D B. Tendo os dois modelos 2D alinhados, conforme mostrado abaixo da associação de dados E na Figura 5.

[0102] Para um dado ponto ao longo do modelo observado 2D A, este procedimento calcula a sua distância perpendicular em relação ao encontro de dois vetores normais mais próximos, comparando esta distância obtida no modelo observado 2D A e no modelo teórico 2D B para verificar qual distância perpendicular é menor.

[0103] Este processo de associação de dados E é repetido para cada ponto ao longo do modelo observado 2D A, a fim de conduzir a associação de dados para todos os pontos situados ao longo do perfil da roda 5.

[0104] A estimativa das características da roda F usa os pontos correspondentes obtidos a partir da associação de dados E gerando um novo perfil 40 que exhibe o novo

ângulo da flange θ' , a nova altura da flange h' , a nova largura da roda L' , a nova largura da flange l' e todas as características da roda ferroviária 5 submetidas à medição.

[0105] A nona etapa 18 consiste na análise do perfil 2D da roda ferroviária 5, tal etapa utiliza parâmetros mensurados na oitava etapa 17 para auxiliar na análise. Além disso, a nona etapa 18 é bastante similar à oitava etapa 17, tendo como as duas únicas diferenças o conjunto de pontos de trajeto C' e a estimativa das características da roda F' , vide figura 6.

[0106] O conjunto de pontos de trajeto C' agora é definido para todos os pontos indicados no modelo teórico 2D B, de modo que seja possível realizar a análise de cada ponto ao longo do perfil da roda 5.

[0107] Em relação à estimativa das características da roda F' , o seu resultado é uma curva 50 que mostra o desgaste efetivo do perfil da roda 5. A análise do perfil 18 da roda 5 permite descobrir onde, do perfil da roda, esta deteriorou-se em comparação com uma nova roda ferroviária 5.

[0108] Além disso, esta estimativa permite compreender a interação roda 5/trilho 4, que por sua vez permite a concepção de novos perfis de rodas, trilhos e conjuntos de parâmetros do trem, como velocidade e aceleração que podem ser utilizados não só para aumentar a vida útil de uma roda ferroviária 5, mas também para reduzir os custos de consumo de combustível.

[0109] A décima e última etapa 19 consiste na análise da superfície 3 da roda ferroviária 5, além de estimar a degradação da roda 5 ao longo do seu perfil, o sistema também pode realizar uma análise da superfície 19 em 3D. Para realização desta análise 19, o sistema leva em consideração o modelo observado gerado na sexta etapa 15 e algumas características mensuradas na sétima etapa 17.

[0110] Duas abordagens diferentes podem ser adotadas para realização da análise de superfície 19, sendo estas explicadas a seguir.

[0111] A primeira abordagem consiste em dividir o modelo observado 3D obtido na sexta etapa 15 em várias fatias e aplicar o módulo de análise do perfil 2D da roda ferroviária 5, conforme descrito na sétima etapa 16.

[0112] A segunda abordagem consiste em realizar uma correspondência de pares de pontos tridimensionais entre os pontos do modelo observado 3D e do modelo teórico 3D. Este modelo teórico 3D pode ser uma superfície de revolução do modelo teórico 2D B, que, basicamente, pode ser obtido alinhando um modelo teórico 2D B com o modelo observado 3D e girá-lo em relação ao centro da roda ferroviária 5.

[0113] Uma vez que estes dois modelos 3D estão alinhados, os pares de pontos associados em 3D a partir do modelo observado podem ser associados com os do modelo teórico 3D, utilizando o algoritmo de vizinho mais próximo.

[0114] O parâmetro utilizado para medir a distância entre os dois pontos pode ser a distância Euclidiana ou a distância de Mahalanobis. No primeiro caso, a incerteza na posição de ponto 3D não é levada em consideração, tornando esta segunda abordagem mais robusta para dados ruidosos.

[0115] Deste modo, é possível realizar uma análise da superfície 19 da roda ferroviária 5 e verificar se a mesma possui deformações, calos ou irregularidades. Tal análise 19 evita possíveis acidentes devido ao desgaste da superfície 3 da roda 5 e garante também uma maior compreensão entre a interação roda 5/trilho 4.

[0116] Tendo sido descrito o sistema e o método em suas configurações preferenciais e alternativas, conclui-se que a invenção alcança seus objetos por um sistema de monitoramento de rodas ferroviárias 5 capaz de realizar a medição do desgaste efetivo ocorrido em todas as partes da roda 5.

[0117] Além disso, o método de monitoramento de rodas ferroviárias 5 permite realizar uma comparação entre um modelo teórico de uma roda ferroviária 5 nova com o modelo observado da roda 5 monitorada, possibilitando a verificação de seu desgaste efetivo.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5) dotadas de dois lados paralelamente dispostos sendo estes o lado interno (1) e o lado externo (2) e uma superfície (3) disposta perpendicularmente no espaço definido entre os lados (1,2) da roda ferroviária (5), caracterizado pelo fato de que compreende: um sistema de medição de perfil (17) de roda ferroviária (5) composto por duas câmeras estéreas (8,9), sendo estas a primeira câmera estérea (8) e a segunda câmera estérea (9); um sistema de análise de perfil (18) de roda ferroviária (5) realizado por métodos computacionais que compreende um modelo teórico bidimensional (B) de uma roda ferroviária (5) em perfeito estado; e um sistema de análise de superfície (19) de roda ferroviária (5) também realizado por meio de métodos computacionais que compreende um modelo teórico tridimensional de uma roda ferroviária (5) em perfeito estado.

2. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que as câmeras estéreas (8,9) do sistema de medição de perfil (17) de roda ferroviária (5) são configurados para capturar imagens dos lados (1,2) da roda ferroviária (5), sendo que a primeira câmera estérea (8) captura imagens do lado interno (1) da roda ferroviária (5), e a segunda câmera estérea (9) captura imagens do lado externo (2).

3. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que as imagens capturadas pelas câmeras estéreas (8,9) são submetidas a processamentos computacionais configurados para gerar uma reconstrução tridimensional (13,13') de cada lado (1,2) da roda ferroviária (5).

4. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que estas reconstruções tridimensionais (13,13') do lado interno (1) e externo (2) da roda ferroviária (5) são

submetidos a uma fusão (15) por meio de um processo computacional formando um modelo observado tridimensional da roda ferroviária (5).

5. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que o sistema de análise de perfil (18) de roda ferroviária (5) realiza um mapeamento (16) do modelo observado tridimensional para transformá-lo em um modelo observado bidimensional (A).

6. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que o sistema de análise de perfil (18) da roda ferroviária (5) realiza uma análise do desgaste efetivo sofrido pelo perfil da roda ferroviária (5) por meio de uma curva (50) gerada pela comparação computacional do perfil do modelo observado bidimensional (A) com o perfil do modelo teórico bidimensional (B).

7. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que o sistema de análise de superfície (19) de roda ferroviária (5) realiza uma análise do desgaste efetivo sofrido pela superfície (3) da roda ferroviária (5) por meio de uma comparação computacional da superfície (3) do modelo observado tridimensional com o modelo teórico tridimensional.

8. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de as câmeras estéreas (8,9) são compostas por duas lentes, sendo as lentes da primeira câmera estérea (8) a primeira lente esquerda (6) e a primeira lente direita (7) e as lentes da segunda câmera estérea (9) a segunda lente esquerda (6') e a segunda lente direita (7').

9. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que as câmeras estéreas (8,9) compreendem sensores a *laser* e projetores de luzes.

10. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que os processamentos

computacionais são: aquisição da imagem estérea (10) por meio das câmeras estéreas (8,9); calibração das câmeras estéreas (11); retificação da imagem estérea; segmentação da roda ferroviária (12); mapeamento e cálculo da disparidade da imagem; e triangulação.

11. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que o processamento computacional consiste no registro de pontos na nuvem tridimensional.

12. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que o sistema de medição de perfil (17) da roda ferroviária (5) produz um gráfico (40) da distância Euclidiana fornecida pela comparação computacional do perfil do modelo teórico bidimensional (B) com o perfil do modelo observado bidimensional (A), sendo o gráfico (40) configurado para estimar as características geométricas do perfil da roda ferroviária (5).

13. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de que a comparação computacional calcula a distância Euclidiana entre os pontos pertencentes ao modelo teórico tridimensional, e os pontos referentes no modelo observado tridimensional para a região especificada na área de superfície (3) da roda ferroviária (5).

14. Sistema de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com as reivindicações 1 a 13, caracterizado pelo fato de que o sistema de análise de perfil (18) de roda ferroviária (5) e o sistema de análise de superfície (19) de roda ferroviária (5) são configurados para compreender a interação roda (5)/trilho (4) e permitir a diminuição do consumo de combustível de um veículo ferroviário, o aumento do conforto de passageiros transportado por este veículo ferroviário e a diminuição no risco de descarrilamento deste veículo.

15. Método de monitoramento para rodas ferroviárias (5), caracterizado pelo fato de que compreende as seguintes etapas:

- i. captura da imagem estérea (10) de ambos os lados (1,2) da roda ferroviária (5) obtida por meio das câmeras estéreas (8,9);
- ii. calibração (11) das câmeras estéreas (8,9) por conta das distorções (20,21) que ocorrem nas lentes (6,6',7,7') destes elementos;
- iii. segmentação da roda ferroviária (12);
- iv. reconstrução de um modelo tridimensional (13,13') de ambos os lados (1,2) da roda ferroviária (5);
- v. remoção dos pontos tridimensionais distorcidos (14), gerando maior precisão no modelo tridimensional reconstruído;
- vi. fusão dos pontos tridimensionais (15) obtidos pelas etapas anteriores, gerando um modelo observado tridimensional da roda ferroviária (5);
- vii. mapeamento do modelo observado tridimensional (16) gerado pela sexta etapa para um modelo observado bidimensional (A);
- viii. medição do perfil (17) da roda ferroviária (5);
- ix. análise do perfil (18) do modelo observado bidimensional (A) da roda ferroviária (5); e
- x. análise da superfície (19) do modelo observado tridimensional da roda ferroviária (5).

16. Método de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que a etapa viii compreende os seguintes processamentos: conjunto de pontos de trajeto (C); computação de vetores normais (D); associação de dados (E) comparando os pontos do conjunto de pontos de trajeto (C) do modelo observado bidimensional (A) com os pontos correspondentes ao longo do modelo teórico bidimensional (B); e estimativa das características da roda (F), configurada para utilizar os pontos correspondentes obtidos a partir da associação de dados (E) para calcular as características geométricas (40) da roda ferroviária (5).

17. Método de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que as características geométricas (40) calculadas pela estimativa das características da roda (F) são: nova altura da flange (h'), nova largura da flange (l'), nova largura da roda (L') e novo ângulo da flange (θ').

18. Método de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que a etapa ix compreende os seguintes processamentos: conjunto de pontos de trajeto (C'), configurado para definir todos os pontos indicados no modelo teórico bidimensional (B); associação de dados (E) para comparar os pontos do conjunto de pontos de trajeto (C') do modelo observado bidimensional (A) com os pontos correspondentes ao longo do modelo teórico bidimensional (B); e estimativa das características da roda (F') resultando em uma curva (50) que mostra o desgaste efetivo do perfil da roda ferroviária (5).

19. Método de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que a etapa x é realizada por meio de uma divisão modelo observado tridimensional em várias fatias, aplicando o módulo de análise do perfil teórico bidimensional (B) e comparando estes dois modelos para cada fatia selecionada, estimando por meio da diferença entre estes dois modelos o desgaste efetivo sofrido pela superfície (3) da roda ferroviária (5).

20. Método de monitoramento para rodas ferroviárias (5), de acordo com a reivindicação 15, caracterizado pelo fato de que a etapa x é realizada por meio de uma correspondência de pares de pontos tridimensionais entre os pontos do modelo observado tridimensional e do modelo teórico tridimensional, comparando a distância destes pontos por meio de algoritmos.

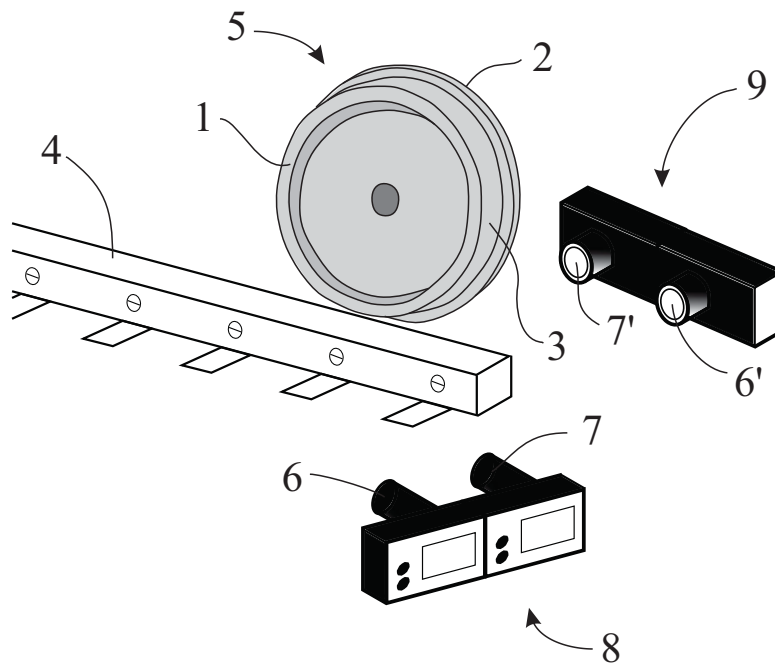


Figura 1

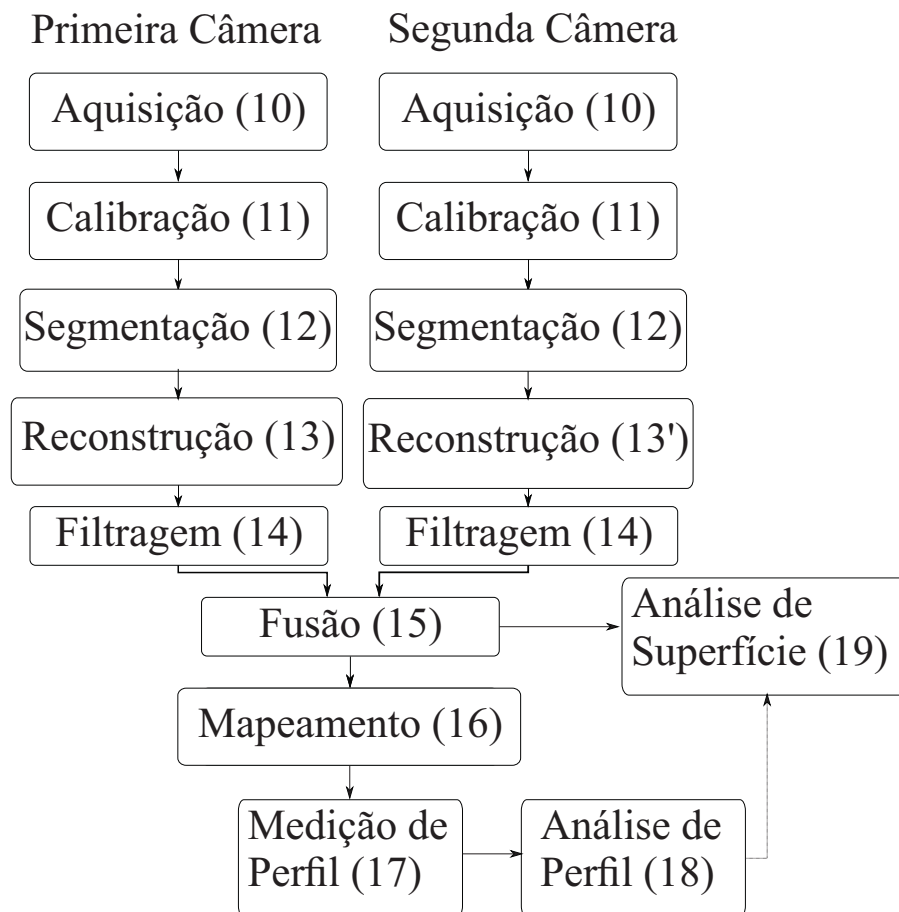


Figura 2

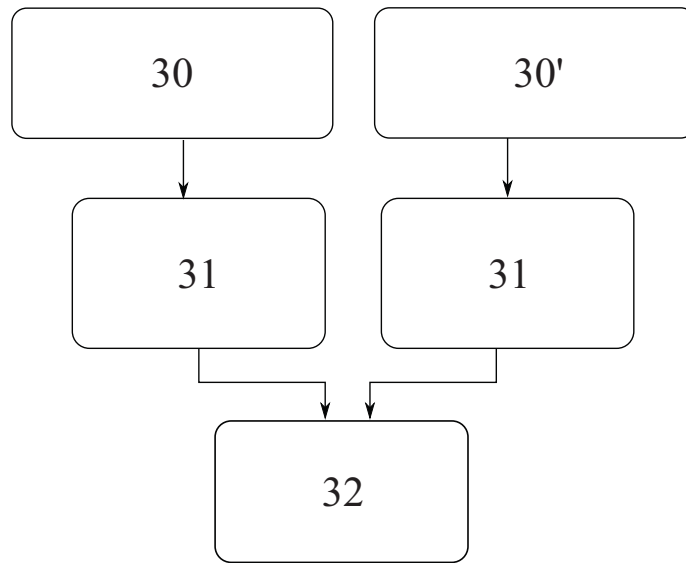


Figura 3



Figura 4A

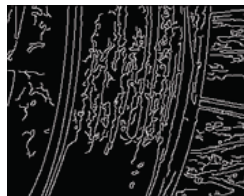


Figura 4B



Figura 4C



Figura 4D

Figura 4

Etapa 17

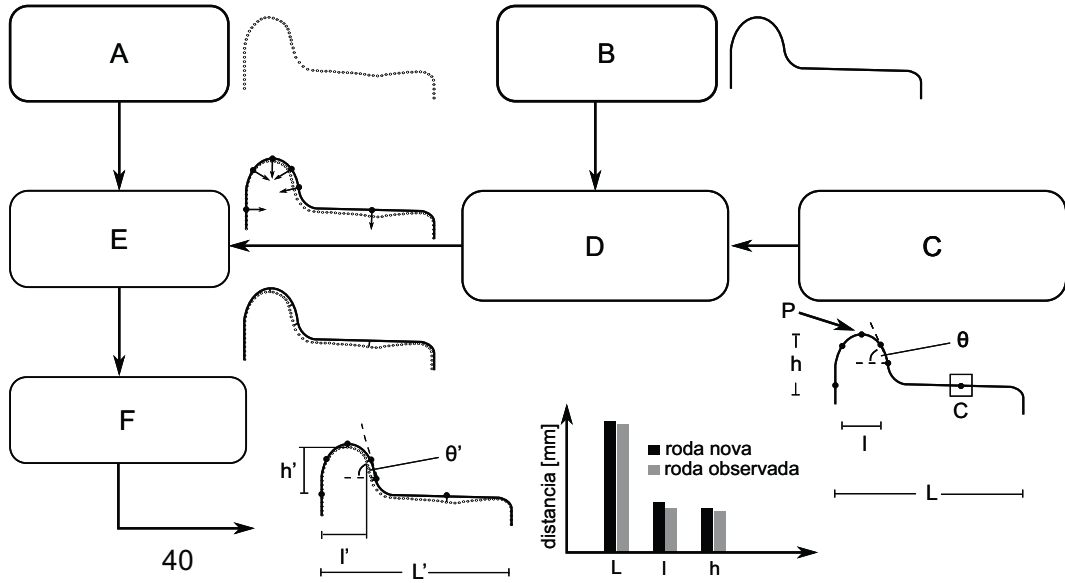


Figura 5

Etapa 18

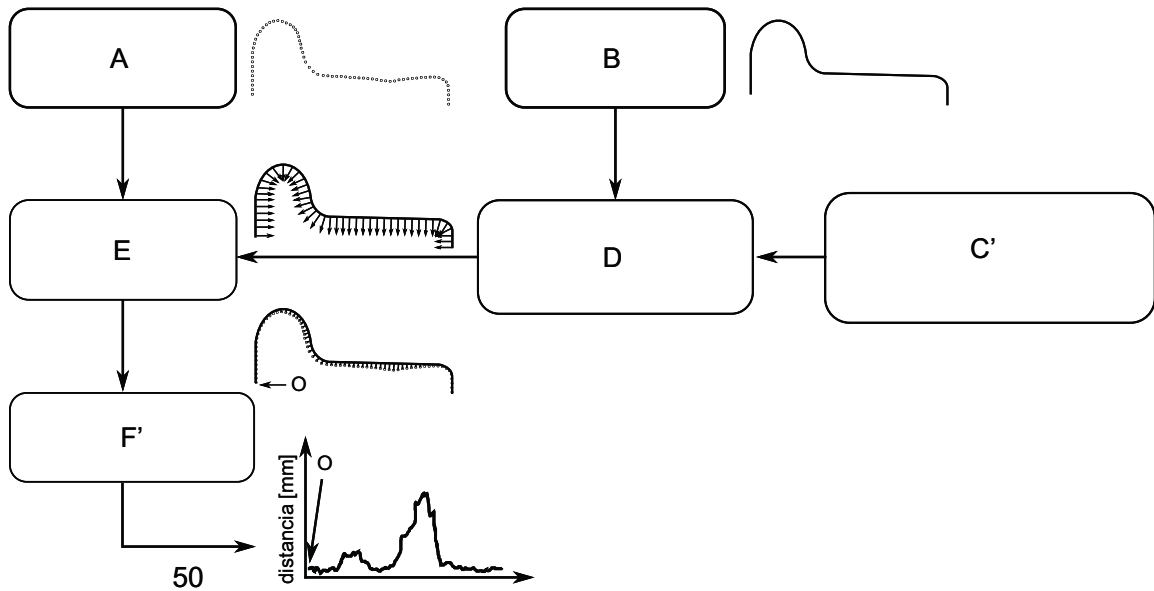


Figura 6

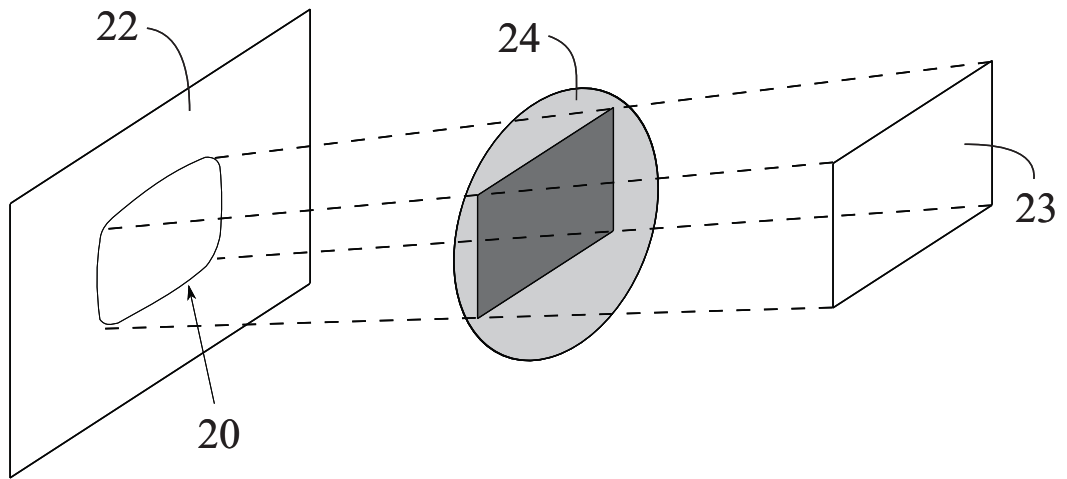


Figura 7

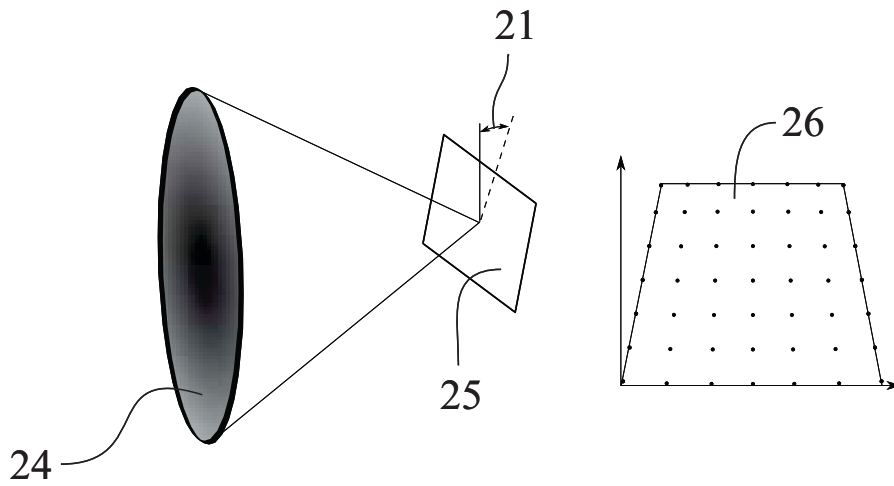


Figura 8