

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 628 861**

51 Int. Cl.:

**B66C 13/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.05.2010 E 10005289 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.03.2017 EP 2272784**

54 Título: **Grúa para sostener una carga suspendida en un cable de carga**

30 Prioridad:

**08.07.2009 DE 102009032267**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**04.08.2017**

73 Titular/es:

**LIEBHERR-WERK NENZING GMBH (100.0%)  
Dr.-Hans-Liebherr-Strasse 1  
6710 Nenzing, AT**

72 Inventor/es:

**SCHNEIDER, KLAUS;  
SAWODNY, OLIVER;  
NEUPERT, JÖRG;  
ARNOLD, ECKHARD y  
KNIERIM, KARL LUKAS**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

**ES 2 628 861 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Grúa para sostener una carga suspendida en un cable de carga

5 La presente invención se refiere a una grúa para sostener una carga suspendida en un cable de carga con un mecanismo de giro para girar la grúa, un mecanismo de basculación para bascular la pluma y un mecanismo de elevación para hacer descender o elevar la carga suspendida en el cable de carga. A este respecto, la grúa presenta una unidad de control para el cálculo del accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación. Además, la unidad de control comprende a este respecto una amortiguación de péndulo de carga, que amortigua mediante el accionamiento adecuado del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación un movimiento de péndulo de la carga durante un movimiento de la grúa.

10 Una grúa de este tipo se conoce por ejemplo por el documento DE 100 64 182. A este respecto, la introducción de las instrucciones de control, la generación de las trayectorias teóricas así como el cálculo del accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y el mecanismo de elevación tienen lugar en coordenadas cilíndricas. A este respecto, el cálculo del accionamiento adecuado del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación para la amortiguación de péndulo de carga es costoso y relativamente impreciso.

15 Por el documento WO 02/00543 A2 se conoce además una grúa según el preámbulo de la reivindicación 1, en la que el cálculo de las instrucciones de accionamiento para el accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación tiene lugar basándose en un movimiento teórico de la carga indicado en coordenadas cartesianas. A este respecto, la amortiguación de péndulo de carga de la grúa tiene lugar a través de un filtro y a través de términos de amortiguación.

20 El objetivo de la presente invención es poner a disposición una grúa para sostener una carga suspendida en un cable de carga con un control de grúa mejorado.

25 Este objetivo se alcanza según la invención mediante una grúa según la reivindicación 1. A este respecto, la grúa según la invención comprende un mecanismo de giro para girar la grúa, un mecanismo de basculación para bascular la pluma y un mecanismo de elevación para hacer descender o elevar la carga suspendida en el cable de carga. A este respecto, la grúa presenta un control de grúa con una unidad de control para el cálculo del accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación. Ventajosamente, la unidad de control comprende a este respecto una amortiguación de péndulo de carga. Según la invención, la unidad de control está realizada de modo que el cálculo de las instrucciones de accionamiento para el accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación tiene lugar basándose en un movimiento teórico de la carga indicado en coordenadas cartesianas. Esto tiene la ventaja de que el cálculo se simplifica y se mejora considerablemente basándose en el movimiento teórico en coordenadas cartesianas. En particular, basándose en el movimiento teórico de la carga en coordenadas cartesianas puede implementarse una amortiguación de péndulo de carga más sencilla o más efectiva.

35 A este respecto, la amortiguación de péndulo de carga de la unidad de control se basa en la inversión de un modelo físico de la carga suspendida en el cable de carga y de la grúa, convirtiendo el modelo físico invertido un movimiento predeterminado de la carga suspendida en el cable de carga en coordenadas cartesianas en señales de accionamiento para el mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación. A este respecto, el modelo físico comprende la dinámica de la carga suspendida en el cable de carga, en particular la dinámica de oscilación de péndulo, de modo que a través de la inversión del modelo puede implementarse una amortiguación de péndulo de carga extremadamente efectiva. A este respecto, el cálculo en coordenadas cartesianas posibilita un desacoplamiento casi estático del movimiento de elevación en la dirección z de los movimientos en las horizontales, es decir en la dirección x e y. Esto permite una inversión más sencilla del modelo.

45 La grúa según la invención comprende ventajosamente uno o varios sensores para la determinación de una o varias mediciones para la posición y/o el movimiento de la carga y/o de la grúa, en particular para la determinación de una o varias de las variables de ángulo de cable radial, ángulo de cable tangencial, ángulo de basculación, ángulo de giro, longitud de cable así como sus derivaciones, entrando la medición o las mediciones en la inversión del modelo físico. En particular, varias de estas variables, ventajosamente todas estas variables, entran a este respecto en la inversión del modelo físico. El retorno de las variables de estado medidas permite una inversión del modelo físico, que de otro modo solo se invertiría con un gasto inmediato o en absoluto.

50 La grúa según la invención comprende además ventajosamente uno o varios sensores para la determinación de una o varias mediciones para la posición y/o el movimiento de la carga y/o de la grúa, en particular para la determinación de una o varias de las variables de ángulo de cable radial, ángulo de cable tangencial, ángulo de basculación, ángulo de giro, longitud de cable así como sus derivaciones, retornándose la medición o las mediciones a la unidad de control. A este respecto, es muy ventajoso el retorno de las variables de estado medidas depende también de la

inversión del modelo, para estabilizar el accionamiento.

5 A este respecto, está prevista ventajosamente una primera unidad de transformación, que calcula basándose en la medición o las mediciones la posición real y/o el movimiento real de la carga en coordenadas cartesianas, en particular una o varias de las variables posición en x, y y z, velocidad en x, y y z, aceleración en x e y, sacudida en x e y. La primera unidad de transformación posibilita así una comparación de la posición real y/o el movimiento real de la carga con la posición teórica y/o el movimiento teórico presente en coordenadas cartesianas de la carga. A este respecto, además de la posición real de la carga, se calculan ventajosamente la velocidad real de la carga así como dado el caso mayores derivadas en coordenadas cartesianas.

10 A este respecto, las señales de detección corresponden a valores de medición en coordenadas de grúa o en coordenadas de cable como por ejemplo las variables de ángulo de cable radial, ángulo de cable tangencial, ángulo de basculación, ángulo de giro y longitud de cable así como sus derivaciones, a partir de los cuales se calcula mediante la primera unidad de transformación la posición real y/o el movimiento real de la carga en coordenadas cartesianas. A este respecto, el ángulo de basculación y el ángulo de giro están presentes como mediciones en coordenadas de grúa. Por el contrario, el ángulo de cable está presente en coordenadas de cable, que se miden con respecto a un eje dirigido hacia abajo verticalmente con respecto a la cabeza de pluma. La primera unidad de transformación requiere una transformación de estos sistemas de coordenadas en coordenadas cartesianas de la carga.

15 A este respecto, la grúa según la presente invención comprende ventajosamente uno o varios sensores de ángulo de cable, retornándose los valores de medición del o de los sensor(es) de ángulo de cable a la unidad de control. A este respecto, los sensores de ángulo de cable permiten un retorno del movimiento de péndulo a la unidad de control y en particular a la amortiguación de péndulo. En este sentido, se obtiene un circuito de regulación cerrado, mediante el cual se estabiliza la unidad de control según la invención y en particular la amortiguación de péndulo de carga.

20 En particular, la primera unidad de transformación calcula a este respecto, basándose en los valores de medición medidos basándose en el o en los sensor(es) de ángulo de cable, la posición real y/o el movimiento real de la carga en coordenadas cartesianas. A este respecto, además de la posición real de la carga, pueden calcularse también la derivada de la posición real y dado el caso derivadas adicionales. A este respecto, pueden entrar mediciones adicionales en el cálculo de la posición real y/o el movimiento real de la carga. A este respecto, puede tenerse en cuenta en particular como mediciones el ángulo de basculación, el ángulo de giro y/o la longitud de cable así como dado el caso sus derivaciones.

25 Ventajosamente, el accionamiento de grúa comprende además una unidad de entrada para la introducción de instrucciones de control por un operario y/o por un sistema de automatización, estando prevista entre la unidad de entrada y la unidad de control una segunda unidad de transformación, que calcula basándose en las instrucciones de control el movimiento teórico de la carga en coordenadas cartesianas. Con ello, la introducción de las instrucciones de control tiene lugar además en coordenadas de grúa. A este respecto, las coordenadas de grúa comprenden ventajosamente el ángulo de giro de la grúa, el ángulo de basculación de la pluma o el alcance de pluma así como la altura de elevación. Estas coordenadas representan el sistema de coordenadas natural de la grúa según la invención, de modo que es posible de manera intuitiva una introducción de las instrucciones de control en estas coordenadas. Por tanto, la segunda unidad de transformación transforma un movimiento teórico de la carga en coordenadas de grúa en un movimiento teórico de la carga en coordenadas cartesianas.

30 Sin embargo, alternativamente también es posible una introducción del movimiento teórico de la carga en coordenadas cartesianas. En particular, cuando la grúa se acciona a través de un control remoto, puede simplificarse en mayor medida una introducción en coordenadas cartesianas para un operario, en particular cuando permanece por ejemplo en el lugar de elevación. Así puede omitirse la segunda unidad de transformación.

35 Ventajosamente, la grúa según la invención presenta además uno o varios sensores para la determinación de mediciones con respecto a la posición y/o el movimiento de una grúa, en particular para la determinación del ángulo de basculación y/o del ángulo de giro, inicializándose la segunda unidad de transformación mediante la medición o las mediciones. En este sentido, se garantiza que tiene lugar una transformación correcta de las coordenadas de grúa en coordenadas cartesianas. A este respecto, la inicialización de la segunda unidad de transformación mediante la medición o las mediciones puede tener lugar por ejemplo en cada caso encendiendo el control de grúa.

40 El accionamiento de grúa de la grúa según la invención comprende además ventajosamente un módulo de planificación de recorrido, que genera a partir de las instrucciones de control de la unidad de entrada trayectorias, que sirve como variables de entrada para la unidad de control. Por tanto, el módulo de planificación de recorrido calcula a partir de las instrucciones de control, que se introducen por un operario, un movimiento teórico de la carga.

55 A este respecto, las trayectorias se generan ventajosamente en coordenadas de grúa, de modo que la segunda

5 unidad de transformación está dispuesta entre el módulo de planificación de recorrido y la unidad de control. A este respecto, las coordenadas de grúa son ventajosamente las coordenadas cilíndricas de la grúa, es decir el ángulo de giro, el ángulo de basculación o el alcance de pluma así como la altura de elevación. En estas coordenadas, la generación de las trayectorias es especialmente sencilla, dado que las restricciones del sistema también están presentes en estas coordenadas.

A este respecto, las trayectorias se generan ventajosamente de manera óptima en el módulo de planificación de recorrido teniendo en cuenta las restricciones del sistema a partir de las instrucciones de control.

10 Ventajosamente, la unidad de control tiene en cuenta además la dinámica de la carga suspendida en el cable de carga para amortiguar las oscilaciones de la carga. Esto puede tener lugar en particular en la amortiguación de péndulo de carga de la unidad de control para amortiguar oscilaciones de péndulo de la carga. Adicionalmente pueden tenerse en cuenta y amortiguarse dado el caso también oscilaciones de la carga en la dirección de elevación.

15 Ventajosamente, la unidad de control se basa en la inversión de un modelo físico de la carga en el cable de carga y de la grúa. A este respecto, el modelo físico describe ventajosamente el movimiento de la carga en función del accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación. Mediante la inversión del modelo se obtiene entonces el accionamiento de los respectivos mecanismos basándose en una trayectoria teórica de la carga.

20 A este respecto, el modelo tiene en cuenta ventajosamente la dinámica de oscilación de la carga suspendida en el cable de carga. En este sentido, se obtiene una amortiguación efectiva de oscilaciones de la carga, en particular una amortiguación efectiva de péndulo de carga. Además, la unidad de control puede adaptarse de manera sencilla a diferentes grúas.

A este respecto, el modelo físico es ventajosamente no lineal. Esto es importante, dado que muchos de los efectos determinantes en la amortiguación de péndulo de carga tienen una naturaleza no lineal.

25 A este respecto, el modelo posibilita ventajosamente en coordenadas cartesianas un desacoplamiento casi estático del movimiento vertical de la carga. Mediante este desacoplamiento casi estático del movimiento vertical de la carga en la dirección de elevación con respecto al movimiento de la carga en direcciones horizontales se hace posible un cálculo simplificado y mejorado del accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación. En particular, esto posibilita una amortiguación de péndulo de carga más sencilla.

30 El desacoplamiento casi estático del movimiento vertical de la carga permite además accionar directamente el movimiento vertical de la carga, mientras que el movimiento horizontal se acciona a través de la amortiguación de péndulo de carga.

35 Por tanto, en el caso de la grúa según la invención puede estar previsto que la unidad de control accione el mecanismo de elevación directamente mediante instrucciones de control de un operario y/o de un sistema de automatización, mientras que el accionamiento del mecanismo de giro y del mecanismo de basculación tiene lugar a través de la amortiguación de péndulo de carga. En este sentido, el sistema de control según la invención puede implementarse de manera más sencilla y más económica. Además, se cumplen mayores estándares de seguridad, dado que al movimiento de elevación están yuxtapuestos otros requisitos con respecto a la seguridad que al movimiento de la carga en la dirección horizontal. Por tanto, el operario y/o el sistema de automatización puede controlar directamente según la invención la velocidad del mecanismo de elevación, mientras que para el accionamiento del mecanismo de giro y del mecanismo de basculación se genera, a partir de las entradas del usuario y/o del sistema de automatización, en primer lugar un movimiento teórico de la carga, a partir del cual la amortiguación de péndulo de carga calcula un accionamiento del mecanismo de elevación y del mecanismo de basculación, que evita o amortigua oscilaciones de péndulo de carga.

45 En el caso de los accionamientos de la grúa según la invención puede tratarse por ejemplo de accionamientos hidráulicos. Del mismo modo, es posible el empleo de accionamientos eléctricos. El mecanismo de basculación puede implementarse por ejemplo a través de un cilindro hidráulico, o a través de un mecanismo de plegado, que mueve la pluma a través de un cableado.

50 La presente invención comprende adicionalmente a la grúa además un control de grúa para el accionamiento del mecanismo de giro, del mecanismo de basculación y/o del mecanismo de elevación de una grúa. A este respecto, el accionamiento de grúa presenta una unidad de control para el cálculo del accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación. Además, la unidad de control presenta ventajosamente una amortiguación de péndulo de carga. Según la invención, la unidad de control está realizada a este respecto de modo que el cálculo de las instrucciones de accionamiento para el accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación tiene lugar basándose en un movimiento de carga teórico

indicado en coordenadas cartesianas.

A este respecto, el accionamiento de grúa está realizado ventajosamente tal como ya se ha explicado anteriormente con respecto a la grúa. A este respecto, en el caso del control de grúa se trata ventajosamente de un control de grúa implementado por ordenador.

5 La presente invención comprende además un procedimiento correspondiente para el accionamiento de una grúa.

En particular, la presente invención comprende a este respecto un procedimiento para el accionamiento de una grúa para sostener una carga suspendida en un cable de carga con un mecanismo de giro para girar la grúa, un mecanismo de basculación para bascular la pluma y un mecanismo de elevación para hacer descender o elevar la carga suspendida en el cable, teniendo lugar el cálculo de las instrucciones de accionamiento para el accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación basándose en un movimiento de carga teórico indicado en coordenadas cartesianas. Como ya se representa con respecto a la grúa, el cálculo de las instrucciones de accionamiento permite, basándose en un movimiento de carga teórico indicado en coordenadas cartesianas, un accionamiento simplificado y mejorado. En particular, puede realizarse a este respecto, durante un cálculo de las instrucciones de accionamiento para el accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación una amortiguación de péndulo de carga, mediante la que se amortiguan movimientos de péndulo de la carga. A este respecto, la amortiguación de péndulo de carga tiene lugar ventajosamente teniendo en cuenta la dinámica de la carga suspendida en el cable de carga, en particular teniendo en cuenta la dinámica de péndulo de la carga suspendida en el cable de carga, para amortiguar oscilaciones de péndulo esféricas de la carga mediante un accionamiento adecuado del mecanismo de giro y el mecanismo de basculación.

A este respecto, el procedimiento tiene lugar ventajosamente del mismo modo que se ha explicado en detalle anteriormente con respecto a la grúa o el control de grúa. En particular, en el caso del procedimiento según la invención se trata a este respecto de un procedimiento para el accionamiento de una grúa, tal como se ha explicado anteriormente.

25 La presente invención se expone más en detalle ahora mediante un ejemplo de realización así como dibujos. A este respecto muestran:

- la figura 1: la estructura del modelo físico al que se recurre para el accionamiento,
- la figura 2: un diagrama esquemático de la grúa así como la carga suspendida en el cable de carga indicando las coordenadas relevantes,
- la figura 3: un diagrama esquemático de la estructura de control de un control de grúa según la invención,
- la figura 4: un fragmento de la estructura de control según la invención, que representa en detalle el retorno de los valores de medición mediante una segunda unidad de transformación,
- la figura 5: la velocidad máxima de la cabeza de pluma en la dirección radial en función del alcance de pluma de la pluma,
- la figura 6: la posición radial de la carga durante un movimiento de basculación de la pluma,
- la figura 7: la posición correspondiente de la carga en la dirección x o y durante el movimiento de basculación,
- la figura 8: la posición, la velocidad y la aceleración de la carga en el sentido de giro durante un movimiento de giro de la grúa,
- la figura 9: la posición de la carga en la dirección radial durante el movimiento de giro de la grúa y
- la figura 10: la posición correspondiente de la carga en la dirección x e y durante el movimiento de giro de la grúa.

Un ejemplo de realización de una grúa según la invención, de un procedimiento para controlar la grúa y de un control de grúa correspondiente, en el que está implementado este procedimiento, se representa en detalle ahora a continuación.

30 Las tareas de control esenciales en la automatización del funcionamiento de grúa según el procedimiento según la

invencción para controlar una grúa son la amortiguación de péndulo de carga y la regulación de seguimiento de velocidad de carga. Para ello, se emplea un modelo de grúa dinámico no lineal, que combina las ecuaciones de movimiento de la carga guiada por cable y la dinámica de accionamiento simplificada. Basándose en la propiedad de superficialidad del modelo de grúa, se obtiene una ley de control que se linealiza mediante un retorno de estado. La generación de trayectorias de referencia planas y que pueden implementarse se formula como problema de control de optimización. El sistema de regulación se integra en el software de una grúa, en particular de una grúa móvil portuaria.

A este respecto, los objetivos esenciales de la automatización de grúa según la presente invencción son el aumento de la eficacia y la seguridad en los procesos de carga. El funcionamiento de grúa así como perturbaciones externas provocan movimientos de péndulo de carga mal amortiguados. Un problema adicional en el caso del control de grúas giratorias en comparación con las grúas pórtico es el acoplamiento no lineal de los movimientos de giro y basculación. Una amortiguación de péndulo de carga activa y un seguimiento preciso de las velocidades de carga deseadas, que se predeterminan mediante las señales de palanca de mano del operario, son los objetivos de regulación esenciales para la grúa móvil portuaria.

El problema del seguimiento de trayectoria se resuelve deduciendo leyes de control, que linealizan el sistema de grúa no lineal basándose en la información de estado (linealización mediante retorno de estado). Durante el dimensionamiento de la regulación se comprueba y se usa la propiedad de superficialidad del sistema de MIMO. El sistema linealizado que se obtiene se estabiliza adicionalmente mediante regulaciones de salida asintóticas. Debido al dimensionamiento de regulador basado en modelo, todos los parámetros se devuelven de manera analítica, y el concepto de regulación puede adaptarse sin problema a diferentes configuraciones y tipos de grúa.

La aplicación del procedimiento de diseño no lineal basado en modelo requiere trayectorias de referencia suficientemente planas, que pueden implementarse con respecto a las restricciones de entrada y estado del sistema. Por tanto, se formula el problema posterior como problema de control de optimización, que se soluciona en línea, para generar las trayectorias de referencia que pueden implementarse para el sistema linealizado de manera exacta. La generación de trayectorias puede contemplarse como regulación predictiva de modelo (MPC, abreviatura del inglés *Model Predictive Control*). La formulación del problema del control óptimo en las coordenadas planas reduce el gasto en la solución numérica.

En la siguiente fase, un modelo dinámico de la grúa se deriva de las ecuaciones de movimiento de la carga suspendida en un cable y de las aproximaciones a la dinámica de accionamiento. A continuación, se muestra la superficialidad diferencial del modelo de grúa y se deriva una ley de control basada en superficialidad no lineal. La formulación y la solución numérica del problema de la generación de trayectorias se muestran como problema de control de optimización. Los resultados de las mediciones de la conversión de la estrategia de regulación en una grúa móvil portuaria se representan en la última fase.

#### Modelo de grúa dinámico

La presente invencción se emplea en una grúa con una pluma 1, que está articulada de manera basculante alrededor de un eje de basculación horizontal en la torre 2 de la grúa. A este respecto, para bascular la pluma 1 está dispuesto un cilindro de pluma entre la torre y la pluma. La torre puede girar alrededor de un eje de giro vertical. Para ello, la torre está dispuesta sobre una superestructura giratoria, que puede girarse a través de un mecanismo de giro con respecto a un carro alrededor del eje de giro vertical. Además, en la superestructura giratoria está dispuesto el mecanismo de elevación para levantar la carga. A este respecto, el cable de elevación está guiado desde el gato dispuesto en la superestructura giratoria a través de rodillos de desviación en la punta de torre y en la punta 3 de pluma hasta la carga. El carro presenta en el ejemplo de realización un mecanismo de traslación, de modo que la grúa puede desplazarse. A este respecto, en el caso del ejemplo de realización se trata de una grúa móvil portuaria. Esta tiene por ejemplo una capacidad de carga de hasta 200 t, un alcance de pluma máximo de 60 m y una longitud de cable de hasta 80 m.

El modelo dinámico de la grúa de pluma se deriva mediante subdivisiones del sistema completo en dos subsistemas, véase la figura 1. El primer subsistema es la estructura 5 de grúa rígida, que está compuesta por la torre 2 de grúa y la pluma 1. Este submodelo presenta dos grados de libertad. El ángulo de giro  $\varphi_s$  y el ángulo de levantamiento  $\varphi$ . El segundo subsistema 6 representa la carga suspendida en el cable. El punto de suspensión es la punta de la pluma. Como se muestra en la figura 1, la estructura de grúa actúa en la carga guiada por cable mediante movimientos de la punta de pluma, lo que conduce a movimientos de péndulo de carga esféricos. A este respecto, el modelo físico de la estructura de grúa describe mediante las señales 7 de entrada para los accionamientos el movimiento 8 de la punta de pluma, el modelo físico de la carga suspendida en el cable de grúa describe mediante el movimiento 8 de la punta de pluma el movimiento de la carga 9, teniendo en cuenta así el modelo movimientos de péndulo de la carga.

#### Dinámica de la estructura de grúa

La estructura de grúa se mueve mediante motores hidráulicos para el movimiento de giro y un cilindro hidráulico para la basculación de la pluma. Suponiendo que la bomba hidráulica presenta un comportamiento retardado de un primer orden y la velocidad de giro  $\dot{\varphi}_s$  es proporcional al flujo de aceite suministrado por la bomba, se obtiene la ecuación de movimiento para el giro

$$\ddot{\varphi} + \frac{1}{T_s} \dot{\varphi}_s = \frac{2\pi K_s}{\underbrace{i_s V T_s}_d} u_s \quad (1)$$

5 Los parámetros de la ecuación (1) son la constante de tiempo  $T_s$ , la constante de proporcionalidad  $K_s$  entre la señal de entrada  $u_s$  y el caudal de aceite, la relación de transmisión  $i_s$  y el volumen de motor  $V$ . La derivación del modelo dinámico del movimiento de basculación se basa de nuevo en la suposición del comportamiento de retardo de un primer orden entre la señal de entrada  $u_i$  y el caudal de la bomba. La dinámica del cilindro hidráulico puede despreciarse, aunque tiene que tenerse en cuenta la cinemática de actuador. La ecuación de movimiento que se obtiene l:

$$\ddot{\varphi}_l + \frac{1}{T_l} \dot{\varphi}_l - \frac{C_2}{\underbrace{C_1^2}_e} \dot{\varphi}_l^2 = \frac{K_l C_1}{\underbrace{T_l A}_k} u_l \quad (2)$$

con la constante de tiempo  $T_l$ , la constante de proporcionalidad  $K_l$ , la superficie en sección transversal  $A$  y las constantes geométricas  $C_1$  y  $C_2$ .

15 Dinámica de la carga suspendida en el cable

El segundo subsistema representa un péndulo esférico colocado en la punta de pluma. Pueden desencadenarse movimientos de péndulo o bien mediante movimientos de la estructura de grúa (primer subsistema) o mediante fuerzas externas. Como se muestra en la figura 2, la posición de carga en relación con la punta de pluma depende de los ángulos de cable de Cardano  $\varphi_l$  y  $\varphi_r$  así como de la longitud de cable  $l_R$ . Para derivar las ecuaciones de movimiento para la carga suspendida en el cable, se usa el formalismo de Euler/Lagrange. Si las coordenadas generalizadas están definidas como

$$\mathbf{q} = [\varphi_l \quad \varphi_r \quad l_R]^T \quad (3)$$

se obtienen las siguientes ecuaciones de movimiento:

$$a_0 + a_1 \ddot{\varphi}_l + a_2 \ddot{\varphi}_s + a_3 \ddot{\varphi}_r + a_4 \dot{\varphi}_s^2 + a_5 \dot{\varphi}_l^2 + a_6 \dot{\varphi}_s \dot{\varphi}_l + a_7 \dot{\varphi}_r \dot{\varphi}_s + a_8 \dot{\varphi}_l \dot{\varphi}_l + a_9 \dot{\varphi}_l \dot{l}_R + a_{10} \dot{\varphi}_s \dot{l}_R + a_{11} \dot{\varphi}_r \dot{\varphi}_l = 0 \quad (4)$$

$$b_0 + b_1 \ddot{\varphi}_r + b_2 \ddot{\varphi}_s + b_3 \ddot{\varphi}_l + b_4 \dot{\varphi}_s^2 + b_5 \dot{\varphi}_l^2 + b_6 \dot{\varphi}_s \dot{\varphi}_l + b_7 \dot{\varphi}_l \dot{\varphi}_s + b_8 \dot{\varphi}_r \dot{\varphi}_l + b_9 \dot{\varphi}_r \dot{l}_R + b_{10} \dot{\varphi}_s \dot{l}_R + b_{11} \dot{\varphi}_l^2 = 0 \quad (5)$$

$$\ddot{l} + c_1 \ddot{\varphi}_s + c_2 \ddot{\varphi}_l + c_3 \dot{\varphi}_s^2 + c_4 \dot{\varphi}_l^2 + c_5 \dot{\varphi}_s \dot{\varphi}_l + c_6 \dot{\varphi}_l \dot{\varphi}_s + c_7 \dot{\varphi}_r \dot{\varphi}_s + c_8 \dot{\varphi}_l^2 + c_9 \dot{\varphi}_r^2 - c_0 = \left( \frac{F_R}{m_L} \right) \quad (6)$$

Los coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$  y  $c_j$  ( $0 \leq i \leq 11$ ,  $0 \leq j \leq 9$ ) son expresiones complejas, que dependen de los parámetros de sistema, del ángulo de levantamiento  $\varphi_l$  y de las coordenadas generalizadas (3). Sin embargo, las ecuaciones (4) - (6) muestran la complejidad del submodelo dinámico con términos de acoplamiento como aceleraciones centrífuga y de Coriolis. En la ecuación (6) se tiene en cuenta una tercera entrada  $F_R$ , que es la fuerza del torno de cable. Con el torno de cable pueden cambiarse la longitud de cable y por consiguiente la cuantía de la carga con la masa  $m_L$ .

Representación de sistema afín de entrada

Los dos subsistemas se combinan ahora para conseguir un sistema no lineal afín de entrada de la siguiente forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0) \quad (7)$$

con el vector de entrada  $\mathbf{u} = [u_s \ u_l \ F_R]^T$  y el siguiente vector de estado:

$$\mathbf{x} = [\varphi_s \ \dot{\varphi}_s \ \varphi_l \ \dot{\varphi}_l \ \varphi_r \ \dot{\varphi}_r \ \varphi_R \ \dot{\varphi}_R \ l_R \ \dot{l}_R]^T \quad (8)$$

5

con las ecuaciones de movimiento (1), (2) y (4) - (6) se obtiene los campos vectoriales  $\mathbf{f}$  y  $\mathbf{g}$ :

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{1}{T_s}x_2 \\ x_4 \\ -\frac{1}{T_l}x_4 + ex_4^2 \\ x_6 \\ f_6(\mathbf{x}) \\ x_8 \\ f_8(\mathbf{x}) \\ x_{10} \\ f_{10}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{a_2}{a_1}d - \frac{a_3}{a_1}k & 0 & 0 \\ -\frac{b_2}{b_1}d - \frac{b_3}{b_1}k & 0 & 0 \\ -c_1d - c_2k & \frac{1}{m_L} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

siendo

$$\begin{aligned} f_6(\mathbf{x}) &= \frac{1}{a_1} \left( \frac{a_2}{T_s} x_2 + a_3 \left( \frac{1}{T_l} x_4 - ex_4^2 \right) - a_4 x_2^2 - a_5 x_4^2 \right. \\ &\quad \left. - a_6 x_2 x_4 - a_7 x_8 x_2 - a_8 x_6 x_4 - a_9 x_6 x_{10} - a_{10} x_2 x_{10} - a_{11} x_8 x_6 + a_0 \right) \\ f_8(\mathbf{x}) &= \frac{1}{b_1} \left( \frac{b_2}{T_s} x_2 + b_3 \left( \frac{1}{T_l} x_4 - ex_4^2 \right) - b_4 x_2^2 - b_5 x_4^2 \right. \\ &\quad \left. - b_6 x_2 x_4 - b_7 x_6 x_2 - b_8 x_8 x_4 - b_9 x_8 x_{10} - b_{10} x_2 x_{10} - b_{11} x_6^2 + b_0 \right) \\ f_{10}(\mathbf{x}) &= \frac{c_1}{T_s} x_2 + c_2 \left( \frac{1}{T_l} x_4 - ex_4^2 \right) - c_3 x_2^2 - c_4 x_4^2 \\ &\quad - (c_5 x_4 + c_6 x_6 + c_7 x_8) x_2 - c_8 x_6^2 - c_9 x_8^2 - c_0 \end{aligned} \quad (10)$$

Las salidas del sistema no lineal son los tres elementos de la posición de carga en coordenadas cartesianas. Por consiguiente, el vector de salida está definido como:

$$\begin{aligned}
 y = r_L &= [y_x, y_y, y_z]^T = h(x) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_s (\sin \varphi_r l_p + \cos \varphi_l l_B) - \sin \varphi_s \sin \varphi_l \cos \varphi_r l_p \\ -\sin \varphi_s (\sin \varphi_r l_p + \cos \varphi_l l_B) - \cos \varphi_s \sin \varphi_l \cos \varphi_r l_p \\ -\cos \varphi_l \cos \varphi_r l_p + \sin \varphi_l l_B + l_T \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{11}$$

5 siendo  $l_B$  la longitud de la pluma,  $l_T$  la altura del punto de sujeción de la pluma e  $l_p$  la longitud del péndulo esférico. En el caso del sistema de grúa contemplado, la longitud de péndulo  $l_p$  depende de la longitud de cable  $l_R$  y del ángulo de levantamiento  $\varphi_l$ .

$$l_p = l_R + l_B \sin \varphi_l \tag{12}$$

#### Concepto de regulación

10 En esta fase se representa la realización de un concepto de amortiguación de péndulo y de seguimiento de trayectorias para grúas de pluma. Como se muestra en la figura 3, está prevista una unidad 10 de entrada, mediante la cual un operario puede introducir instrucciones de control, por ejemplo a través de palancas de mano. Alternativamente, las instrucciones de control pueden generarse también por un sistema de automatización de orden superior, que acciona de manera autónoma la grúa. A partir de las instrucciones de control, se generan en un módulo 11 de planificación de recorrido trayectorias de referencia.  $\omega_x$  y  $\omega_r$  son las velocidades teóricas de la carga, 15 que están interconectadas con el movimiento de giro y basculación de la grúa.  $\omega_z$  designa la velocidad de elevación teórica de la carga. Las trayectorias de referencia  $y_{l,ref}$  e  $y_{r,ref}$  se generan basándose en una regulación 12 predictiva de modelo (MPC).

20 Debido al hecho de que la ley de control se deriva basándose en el modelo no lineal (7), que está presente en coordenadas cartesianas, estas trayectorias de referencia tienen que transformarse de la representación polar a la representación cartesiana. La transformación P, que se implementa mediante una segunda unidad 14 de transformación según la presente invención, tiene en cuenta no sólo la posición, sino también las derivadas de orden superior. La trayectoria de referencia para la cuantía de la carga  $y_{z,ref}$  se genera a partir de la señal de palanca de mano  $\omega_z$  mediante un filtro 13 integrante de un orden suficiente. La ley de control, que está compuesta por una parte 25 que se linealiza y una que se estabiliza, calcula las señales de entrada de la grúa de pluma. El cálculo tiene lugar en una unidad 15 de cálculo de la unidad de control. El dimensionamiento de la ley de control se basa en una aproximación basada en superficialidad.

A este respecto, la unidad de control activa los accionamientos de la grúa 20. Sensores dispuestos en la grúa miden un estado  $x$  del sistema de grúa y carga, retornándose las señales de medición a través de una primera unidad 16 de transformación al control.

#### 30 Diseño de regulación

En primer lugar, se determina el grado relativo del sistema (7), para examinar su superficialidad diferencial. Un sistema de MIMO con  $m$  entradas y salidas presenta el grado relativo vectorial  $r = \{r_1, \dots, r_m\}$  para todo  $x$  en la proximidad de  $x_0$ , cuando:

(i)

$$\begin{aligned}
 (i) \quad L_{g_j} L_f^k h_i(x_0) &= 0 \quad \forall 1 \leq j \leq m \\
 &\quad \forall 1 \leq i \leq m \\
 &\quad \forall k < r_i - 2
 \end{aligned} \tag{13}$$

35

(ii)

$$(ii) L_{g_i} L_f^{i-1} h_i(x_0) \neq 0 \quad \forall 1 \leq i \leq m \quad (14)$$

para al menos un  $j \in \{1, \dots, m\}$

y (iii) la matriz  $m \times m$

$$R(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{i_1-1} h_1(x) & L_{g_2} L_f^{i_1-1} h_1(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{i_1-1} h_1(x) \\ L_{g_1} L_f^{i_2-1} h_2(x) & L_{g_2} L_f^{i_2-1} h_2(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{i_2-1} h_2(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{i_m-1} h_m(x) & L_{g_2} L_f^{i_m-1} h_m(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{i_m-1} h_m(x) \end{bmatrix} \quad (15)$$

es regular, es decir  $\text{rango } R(x_0) = m$ , [5]. Con el sistema (7) y  $m = 3$  se obtiene la matriz (15) como:

$$R(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\cos \varphi_s \sin \varphi_r - \sin \varphi_s \sin \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} \\ 0 & 0 & -\frac{\sin \varphi_s \sin \varphi_r + \cos \varphi_s \sin \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} \\ 0 & 0 & -\frac{\cos \varphi_{St} \cos \varphi_{Sr}}{m_L} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dado que la matriz (16) no es regular, el grado relativo vectorial  $r$  no está completamente definido y no es posible un desacoplamiento estático. Sin embargo, para las tres salidas aparece solo la tercera entrada  $F_R$  en la segunda derivada. Por consiguiente, puede conseguirse un desacoplamiento casi estático. Por tanto, las segundas derivadas de las salidas se determinan como:

$$\ddot{y}_x = \frac{\cos \varphi_s \sin \varphi_r - \sin \varphi_s \sin \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} F_R \quad (17)$$

$$\ddot{y}_y = \frac{\sin \varphi_s \sin \varphi_r + \cos \varphi_s \sin \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} F_R \quad (18)$$

$$\ddot{y}_z = -g - \frac{\cos \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} F_R \quad (19)$$

Con la igualdad (19) se proporciona la ley de control para el gato como:

$$F_R(x, \ddot{y}_z) = \frac{-m_L}{\cos \varphi_t \cos \varphi_r} (\ddot{y}_z + g) \quad (20)$$

15 Sustituyendo la fuerza del gato  $F_R$  en la ecuación (17) y (18), mediante la relación en la ecuación (20), las dos derivadas de las salidas  $y_x$  e  $y_y$  son independientes de  $u$ , pero dependen de  $\ddot{y}_z$ . Una diferenciación adicional de las salidas hasta la cuarta derivada obtiene:

$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_x \\ \ddot{y}_y \end{bmatrix} = F(x, u_s, u_l, \ddot{y}_z, \ddot{y}_z, \ddot{y}_z) \quad (21)$$

Dado que las dos primeras entradas  $u_s$  y  $u_l$  aparecen en la cuarta derivada de las salidas, el grado relativo vectorial del sistema (7) es:

$$r = \{r_x = 4, r_y = 4, r_z = 2\} \quad (22)$$

- 5 La suma de los elementos del grado relativo vectorial es 10, que es igual que el orden del sistema. Esto significa que el sistema (7) es diferencialmente plano. La descomposición de la ecuación (21) tras las entradas y la sustitución de las salidas por las nuevas entradas de la cadena de integración que se obtiene dan como resultado la siguiente ley de control:

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_l \end{bmatrix} = F^{-1}(x, v_x, v_y, v_z, \ddot{y}_{z,ref}, \ddot{y}_{z,ref}) \quad (23)$$

10 con

$$v_i = y_{i,ref}^{(ri)} - v_{i,estab} \quad i \in \{x, y, z\} \quad (24)$$

En la ecuación (20)  $\ddot{y}_z$  se sustituye igualmente por la nueva entrada  $v_z$ . Aunque el grado relativo de la salida  $y_z$  es dos, la trayectoria de referencia  $y_{z,ref}$  tiene que contener la tercera y cuarta derivada de la posición de referencia. Por tanto, el filtro, que se usa para generar esta trayectoria, es de cuatro orden.

- 15 La parte que se linealiza del regulador se determina ahora mediante las igualdades (20) y (23). A pesar de inseguridades de modelo y parámetros e influencias externas se construye una curva de retorno que se estabiliza. Como se muestra en la figura 4, se retornan las diferencias entre las trayectorias de referencia

$$\tilde{y}_{i,ref} = \begin{bmatrix} y_{i,ref} & \dots & y_{i,ref}^{(r_i-1)} \end{bmatrix}$$

y los estados correspondientes de las cadenas de integración desacopladas resultantes  $\tilde{y}_i = \begin{bmatrix} y_i & \dots & y_i^{(r_i-1)} \end{bmatrix}$  por medio de las matrices de retorno  $K_j$  ( $i \in \{x, y, z\}$ ) a la estabilización 17. Por

- 20 consiguiente, las partes que se estabilizan de las nuevas entradas se proporcionan mediante:

$$v_{i,estab} = K_i (\tilde{y}_{i,ref} - \tilde{y}_i) \quad i \in \{x, y, z\} \quad (25)$$

Los elementos de las matrices de retorno se determinan mediante especificación de polos. Los polos se adaptan mediante tablas de consulta, que dependen de la longitud de cable, a la dinámica de sistema. Los vectores de salida

- 25  $\tilde{y}_i$  se determinan mediante la transformación  $T(x)$ . Esta transformación  $T(x)$  se implementa mediante la primera unidad 16 de transformación según la presente invención. A este respecto, la transformación se basa en la representación de forma normal de Byrnes/Isidori.

#### Generación de trayectoria

- 30 La idea básica es la formulación del problema de la generación de trayectorias como problema de control de optimización restringido con un horizonte finito (curva abierta) para las cadenas de integración. Las entradas de estas cadenas de integración forman las variables de regulación formales para el problema de control de optimización. Dado que las restricciones del sistema se proporcionan como límites sencillos en coordenadas polares

$(y_t, y_r)$ , el problema de control de optimización se formula en las variables  $\tilde{y}_{t,ref}, \tilde{y}_{r,ref}$ . La transformación P mediante la segunda unidad de transformación se realiza a continuación, para convertir las trayectorias de referencia óptimas en coordenadas cartesianas  $\tilde{y}_{t,ref}, \tilde{y}_{r,ref}$ .

5 El problema del control óptimo se resuelve numéricamente. En el sentido de una regulación predictiva de modelo, el procedimiento de solución se repite en la siguiente etapa de muestreo con un horizonte desplazado, para tener en cuenta especificaciones cambiantes (velocidades teóricas de la carga  $\omega_t, \omega_r$ ).

10 El algoritmo de generación de trayectorias predictivo de modelo trata restricciones de variables del sistema como restricciones del problema de control de optimización. Las restricciones se obtienen del espacio de trabajo restringido de la grúa, que está previsto mediante el alcance de pluma mínimo y máximo. Además, se obtienen restricciones de la velocidad/aceleración radial y la velocidad/aceleración angular para la punta de pluma a partir de restricciones de los actuadores hidráulicos. La velocidad radial máxima de la punta de pluma depende, como se muestra en la figura 5, debido a la cinemática de cilindro y por motivos de seguridad, del alcance de pluma. Las restricciones para la punta de pluma se diseñan en el caso del problema de control de optimización como restricciones del movimiento de la carga en la respectiva dirección.

$$\begin{bmatrix} y_{r,ref,min} \\ -\dot{y}_{r,ref,max}(y_r) \\ -\ddot{y}_{r,ref,max} \\ -\dot{y}_{t,ref,max} \\ -\ddot{y}_{t,ref,max} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y_{r,ref} \\ \dot{y}_{r,ref} \\ \ddot{y}_{r,ref} \\ \dot{y}_{t,ref} \\ \ddot{y}_{t,ref} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y_{r,ref,max} \\ \dot{y}_{r,ref,max}(y_r) \\ \ddot{y}_{r,ref,max} \\ \dot{y}_{t,ref,max} \\ \ddot{y}_{t,ref,max} \end{bmatrix} \quad (26)$$

15

La velocidad radial máxima, que depende, como se muestra en la figura 5, del alcance de pluma, se aproxima mediante funciones lineales a trozos. Además se usa una modificación de entrada limitada como restricción para (4) (4)

$y_{r,ref}$  e  $\dot{y}_{r,ref}$ , para evitar excitaciones a alta frecuencia del sistema

20 Una función objetivo cuadrática estandarizada califica la desviación cuadrática de la posición y velocidad angular y radial a partir de sus previsiones de referencia así como la tasa de cambio de las variables de entrada a lo largo del horizonte de tiempo finito  $[t_0, t_f]$ . El horizonte de optimización es un parámetro de ajuste y debería cubrir la dinámica esencial del sistema, que se fija mediante la duración del péndulo de carga. Las previsiones de referencia se generan a partir de las señales de palanca de mano del conductor de grúa para la velocidad de carga teórica en la dirección tangencial y radial ( $\omega_t, \omega_r$ ).

25 El problema de control de optimización cuadrático lineal restringido continuo se discretiza con  $K$  fases de tiempo y se aproxima mediante un programa cuadrático (QP) en las variables de control y estado, que pueden resolverse mediante un algoritmo de punto interior estandarizado. Con este algoritmo, la estructura de las ecuaciones de modelo se utiliza en un modo de proceder de tipo Riccati, para obtener una solución de la ecuación de fase de Newton con  $O(K)$  operaciones, es decir el gasto de cálculo crece de manera lineal con el horizonte de previsión.

30 Resultados de medición

35 El concepto de regulación representado se ha implementado en una grúa móvil portuaria. Como se muestra en la figura 6, el primer escenario es un mero movimiento de basculación. La carga se conmuta mediante la basculación de la pluma desde un radio de 31 m hasta un radio de 17 m. Resulta evidente que la posición radial de la carga  $y_r$ , que es la distancia entre el mástil de grúa y la carga en la dirección de la pluma, que sigue de manera muy precisa a la trayectoria de referencia  $y_{r,ref}$ . El comportamiento posterior de la grúa regulada en coordenadas cartesianas se representa en la figura 7.

40 Para la realización práctica solo tiene interés en el ejemplo de realización la dirección x e y. Debido por motivos de seguridad, no está previsto influir en la posición z de la carga automáticamente con la ley de control (20). Por tanto, solo se implementan las leyes de control (23) en la LHM 280. Como se muestra en la figura 7, una trayectoria de referencia con la transformación P conduce a trayectorias de referencia en la dirección x e y, cuando el ángulo de giro  $\phi_s$  no es cero.

La segunda maniobra es un movimiento de giro de cero a  $400^\circ$ . La figura 8 muestra dos comportamientos de seguimiento de trayectorias para la posición, velocidad y aceleración angulares. La trayectoria de referencia se genera mediante el algoritmo MPC teniendo en cuenta las siguientes restricciones:

$$|\dot{y}_{t,ref}| \leq \dot{y}_{t,ref,max} = 8,0^\circ/s, \quad |\ddot{y}_{t,ref}| \leq \ddot{y}_{t,ref,max} = 0,9^\circ/s^2$$

- 5 El regulador que se linealiza y que se estabiliza puede seguir la carga de manera muy precisa sin una sobreoscilación esencial de esta trayectoria de referencia. El péndulo de carga restante es del mismo modo suficientemente pequeño. Es de una importancia específica el desplazamiento radial de la carga, al que se conduce debido a fuerzas centrífugas durante un movimiento de giro. Para dejar la carga durante los movimientos de giro en un radio constante, se compensa el desplazamiento radial mediante la ley de control de basculación  $u_i$ . De este modo, la posición de carga radial es prácticamente constante con errores entre la trayectoria de referencia y la posición de carga medida de menos de  $\pm 0,5$  m, véase la figura 9.

- 15 Dado que el concepto regulador se diseña basándose en la propiedad de superficialidad del sistema no lineal con respecto al vector de salida en coordenadas cartesianas, la figura 10 muestra la posición de carga medida en la dirección x e y y sus trayectorias de referencia durante el movimiento de giro. La calidad de regulación es tan buena como la calidad en el sentido de giro y basculación, dado que la representación cartesiana  $(y_x, y_y)$  es equivalente a la representación polar  $(y_t, y_r)$ , siendo  $y_t$  el ángulo de giro e  $y_r$  el radio de la carga.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Grúa para sostener una carga suspendida en un cable de carga con un mecanismo de giro para girar la grúa, un mecanismo de basculación para la pluma y un mecanismo de elevación para hacer descender o elevar la carga suspendida en el cable de carga, con una unidad de control para el cálculo del accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación, presentando la unidad de control una amortiguación de péndulo de carga y teniendo lugar el cálculo de las instrucciones de accionamiento para el accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación basándose en un movimiento teórico de la carga indicado en coordenadas cartesianas, caracterizada porque la amortiguación de péndulo de carga de la unidad de control se basa en la inversión de un modelo físico de la carga en el cable de carga y de la grúa, convirtiendo el modelo físico invertido un movimiento predeterminado de la carga suspendida en el cable de carga en coordenadas cartesianas en señales de accionamiento para el mecanismo de giro, mecanismo de basculación y/o mecanismo de elevación, posibilitando el cálculo en coordenadas cartesianas un desacoplamiento casi estático del movimiento de elevación en la dirección z de los movimientos en la dirección x e y.
- 15 2. Grúa según la reivindicación 1, con uno o varios sensores para la determinación de una o varias mediciones para la posición y/o el movimiento de la carga y/o de la grúa, en particular para la determinación de una o varias de las variables de ángulo de cable radial, ángulo de cable tangencial, ángulo de basculación, ángulo de giro, longitud de cable así como sus derivaciones, entrando la medición o las mediciones en la inversión del modelo físico.
- 20 3. Grúa según una de las reivindicaciones anteriores, con uno o varios sensores para la determinación de una o varias mediciones para la posición y/o el movimiento de la carga y/o de la grúa, en particular para la determinación de una o varias de las variables de ángulo de cable radial, ángulo de cable tangencial, ángulo de basculación, ángulo de giro, longitud de cable así como sus derivaciones, retornándose la medición o las mediciones a la unidad de control.
- 25 4. Grúa según la reivindicación 3, en la que está prevista una primera unidad de transformación, que calcula basándose en la medición o las mediciones la posición real y/o el movimiento real de la carga en coordenadas cartesianas, en particular una o varias de las variables posición en x, y y z, velocidad en x, y y z, aceleración en x e y, sacudida en x e y.
- 30 5. Grúa según una de las reivindicaciones anteriores, con uno o varios sensores de ángulo de cable, retornándose los valores de medición del o de los sensor(es) de ángulo de cable a la unidad de control.
- 35 6. Grúa según una de las reivindicaciones anteriores, con una unidad de entrada para la introducción de instrucciones de control por un operario, estando prevista entre la unidad de entrada y la unidad de control una segunda unidad de transformación, que calcula basándose en instrucciones de control el movimiento teórico de la carga en coordenadas cartesianas.
- 40 7. Grúa según la reivindicación 6, con uno o varios sensores para la determinación de mediciones con respecto a la posición y/o el movimiento de la grúa, en particular para la determinación del ángulo de basculación y/o del ángulo de giro, inicializándose la segunda unidad de transformación mediante la medición o las mediciones.
- 45 8. Grúa según una de las reivindicaciones anteriores, con un módulo de planificación de recorrido, que genera a partir de instrucciones de control de un operario y/o de un sistema de automatización trayectorias que sirven como variables de entrada para la unidad de control.
- 50 9. Grúa según la reivindicación 8, en la que se generan las trayectorias en coordenadas de grúa y la segunda unidad de transformación está dispuesta entre el módulo de planificación de recorrido y la unidad de control.
10. Grúa según la reivindicación 8 ó 9, en la que se generan las trayectorias en el módulo de planificación de recorrido teniendo en cuenta las restricciones del sistema de manera óptima a partir de las instrucciones de control.
11. Grúa según una de las reivindicaciones anteriores, en la que la unidad de control acciona el mecanismo de elevación directamente mediante instrucciones de control de un operario y/o de un sistema de automatización, mientras que el accionamiento del mecanismo de giro y del mecanismo de basculación tiene lugar a través de la amortiguación de péndulo de carga.
12. Procedimiento para el accionamiento de una grúa según una de las reivindicaciones 1 a 11, en el que el cálculo de las instrucciones de accionamiento para el accionamiento del mecanismo de giro, el mecanismo de basculación y/o el mecanismo de elevación tiene lugar basándose en un movimiento de carga teórico indicado en coordenadas cartesianas.

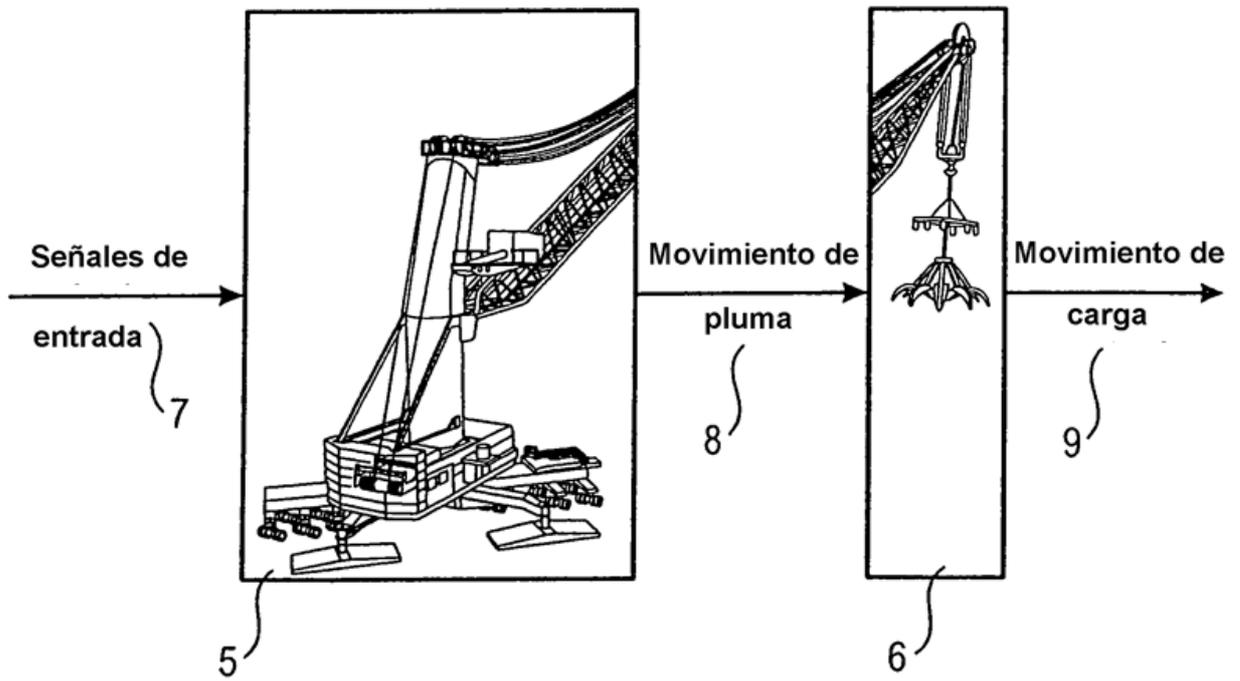


Figura 1:

Figura 2

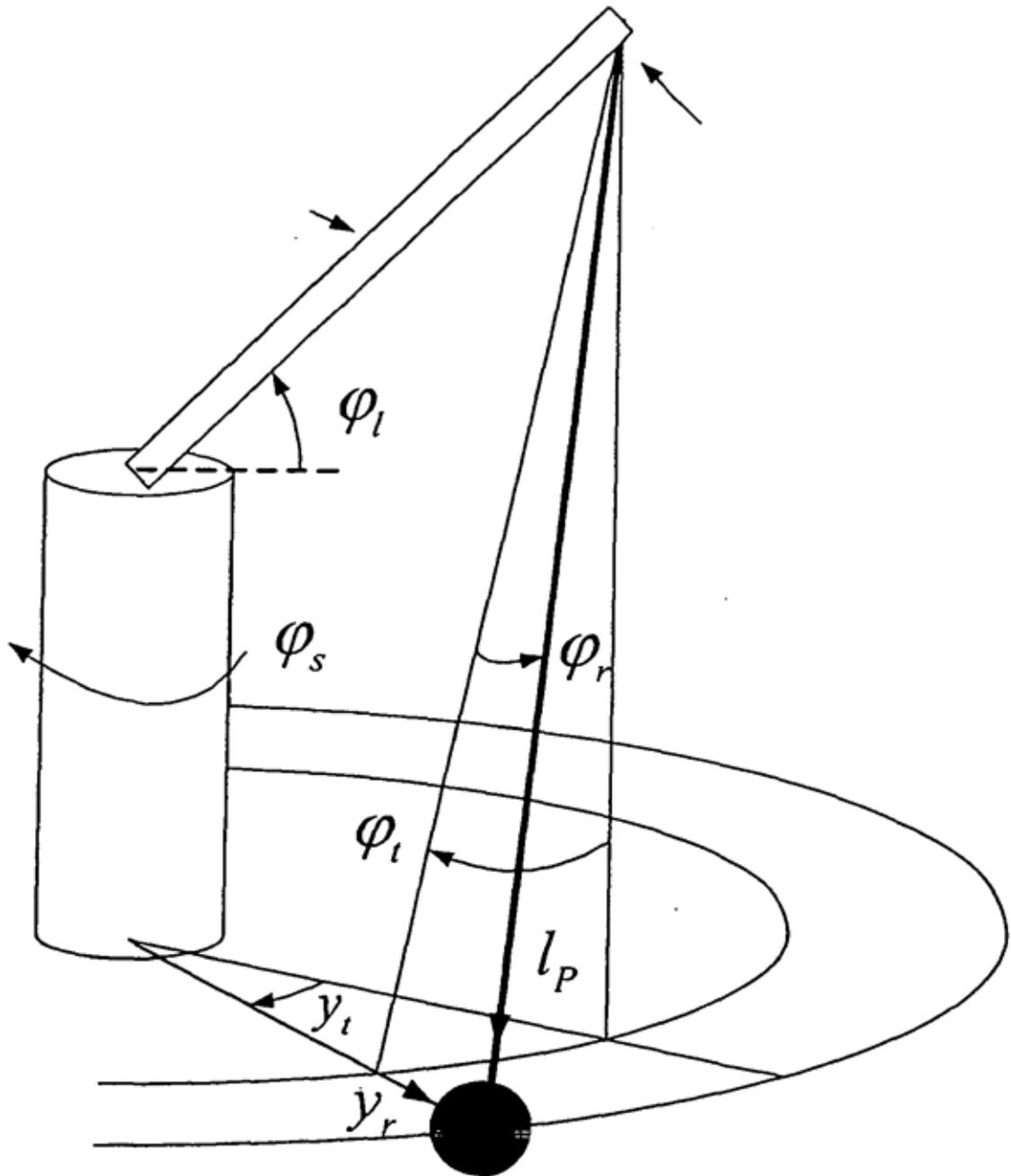


Figura 3

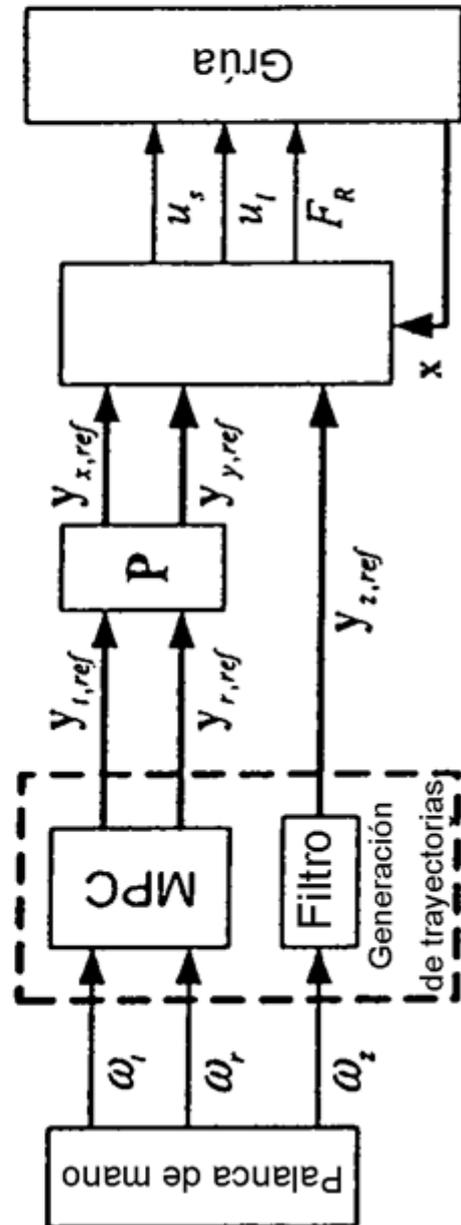


Figura 4

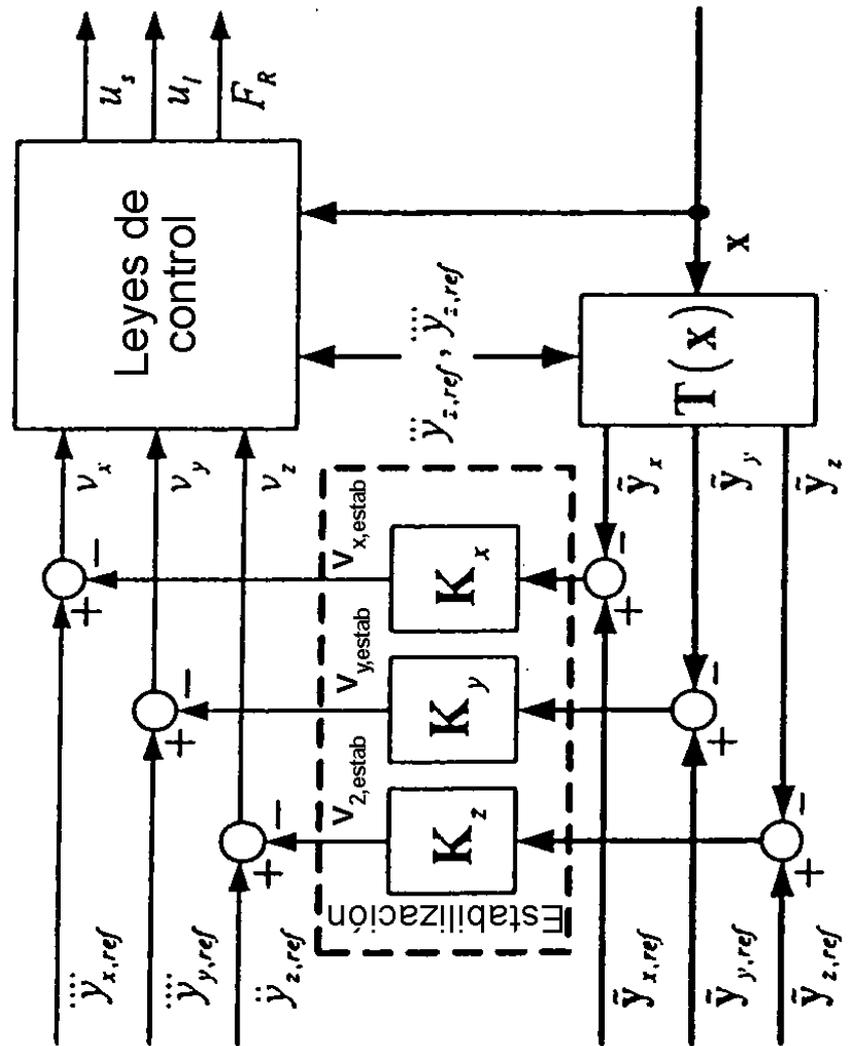


Figura 5:

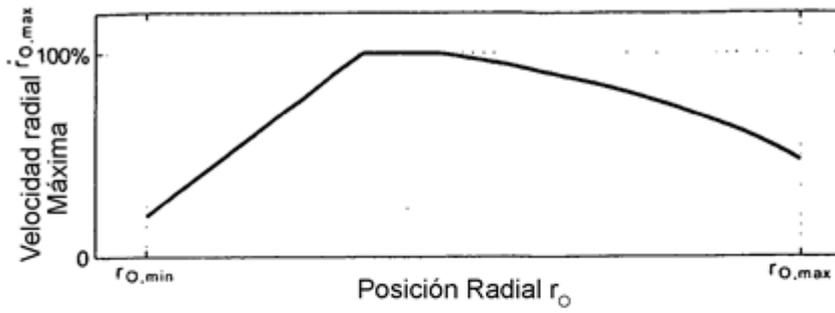


Figura 6:

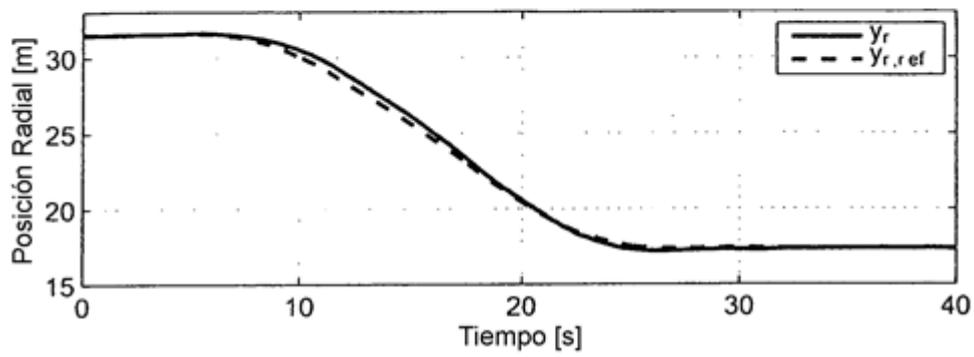


Figura 7:

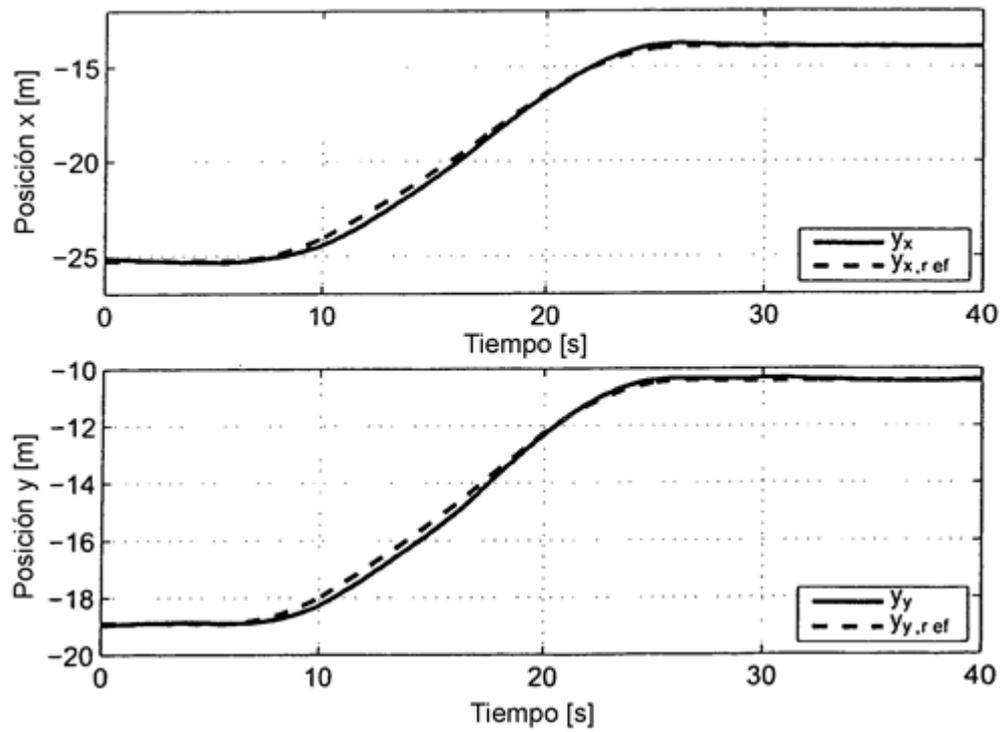


Figura 8:

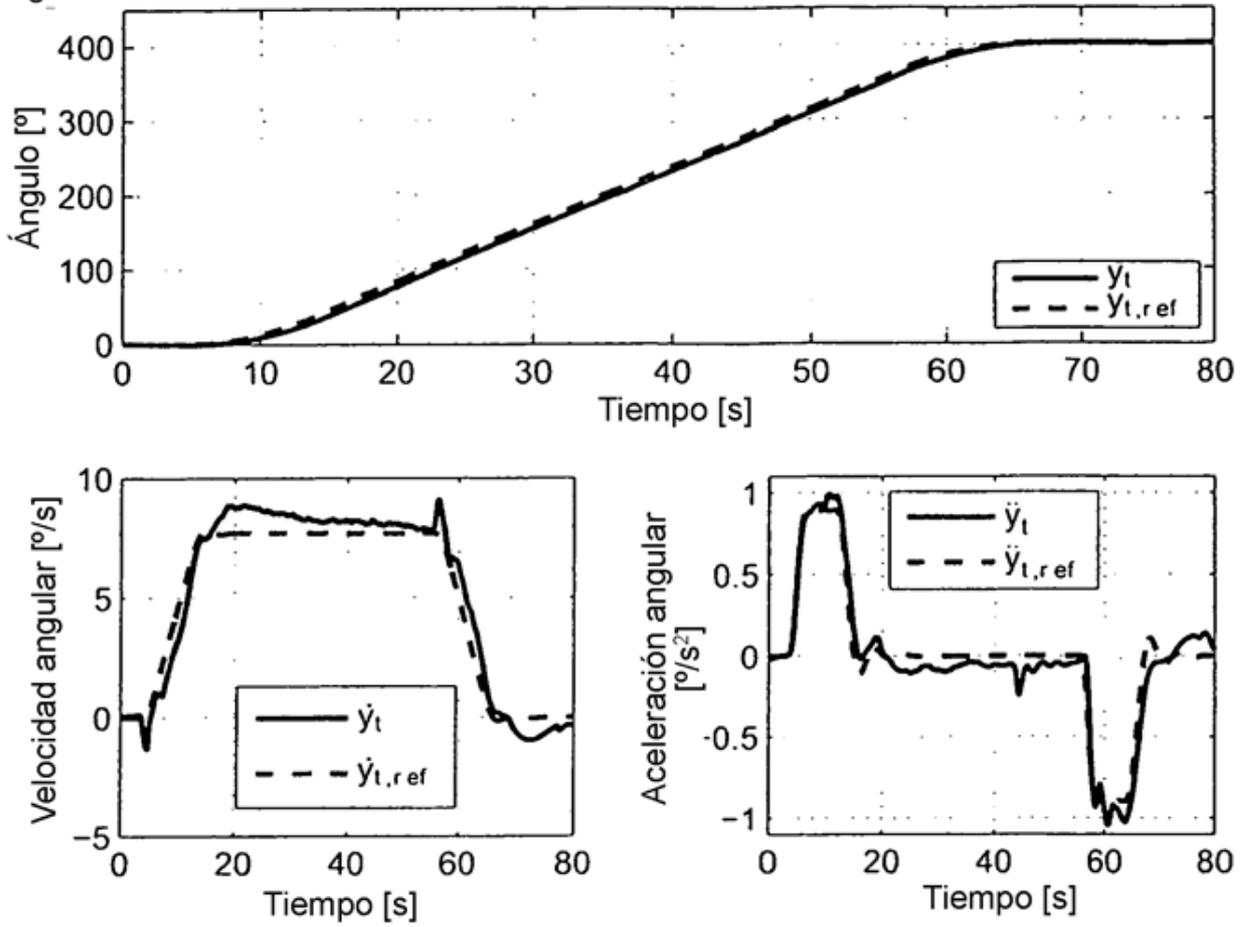


Figura 9:

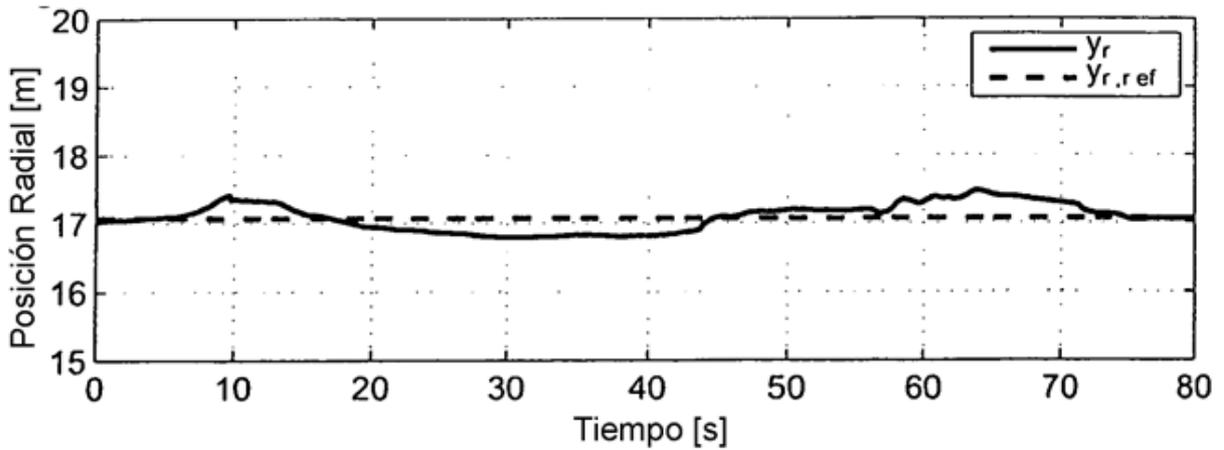


Figura 10:

