

Proyecto Global Integrador: Control Coordinado de Grúa Pórtico

Alvaro Alonso, Maximiliano Badaloni, *Estudiantes, Ingeniería Mecatrónica*

Resumen—Se presentan los resultados obtenidos en el "Proyecto Global Integrador", de la cátedra Autómatas y Control Discreto. Este trabajo persigue como objetivos poder aplicar los diferentes conocimientos adquiridos en la materia así como integrar los conocimientos previos, a la tarea de realizar el control coordinado de una grúa portuaria. Dicho desarrollo se resolvió mediante dos grandes elementos: el control discreto de posición en dos dimensiones del sistema y por otro lado el control supervisor global, utilizando una máquina de estados. Se tuvieron en cuenta también los diferentes escenarios en los que el sistema pudiera encontrarse, y un sistema de parada para los casos de emergencia.

Keywords—Máquina de Estados, Controlador Discreto, Matlab-Simulink.

I. INTRODUCCIÓN

PODER trasladar grandes elementos de un lugar a otro es un gran problema de control. El desafío que implica realizar el trabajo de manera rápida y segura para los operarios y la carga, requiere de un gran esfuerzo por parte de los diseñadores para poder tener en cuenta todos los escenarios que se pueden presentar.

En este proyecto integrador el sistema a controlar debe ser capaz de mover una carga desde la base del muelle hasta su correcta ubicación dentro del barco. La operación del sistema debe ser híbrida (manual/automática) siendo el operario el encargado de las acciones de "tomar" y "dejar" la carga. Para poder realizar el movimiento se cuenta con accionamientos electro-mecánicos genéricos de cuatro cuadrantes.

Se decidió dividir el problema en dos grandes partes, por un lado un controlador global, resuelto como una máquina de estados finitos y por otro lado un controlador continuo para cada accionamiento. El objetivo de esta división es plantear diferentes soluciones a cada parte del problema global, así la complejidad de las mismas disminuye significativamente facilitando el análisis de los diferentes casos que se pueden presentar.

A continuación se presenta el esquema del informe:

- Análisis del sistema físico.
- Modelo del sistema físico.
- Controladores de tipo PID.
- Resultados del controlador
- Parada de emergencia.
- Análisis en tiempo discreto
- Adaptación del controlador en Matlab-Simulink
- Máquina de estados finitos.
- Conclusión.

Mendoza

Agosto 20, 2014

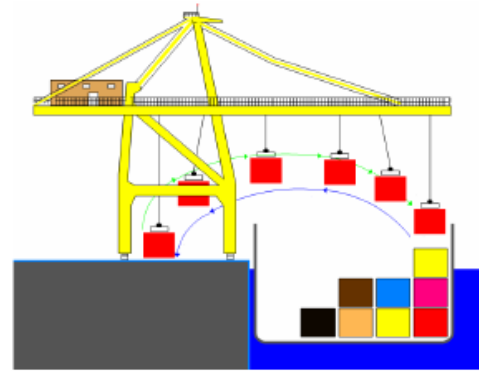


Fig. 1. Esquemático de una grúa portuaria

II. DESARROLLO

Las grúas porta-contenedores portuarias presentan una estructura como la que se muestra en la Fig.1. Este tipo de estructura puede ser modelada como un sistema bidimensional, plano, cuyos grados de libertad son:

- Traslación: Movimiento a lo largo del eje horizontal.
- Izaje: Movimiento a lo largo del eje vertical.

Mediante el control de ambos es posible llevar una carga desde el muelle a su ubicación dentro del barco.

A. Análisis del sistema físico

Para poder realizar el diseño de un controlador que haga posible dicha tarea se cuenta con un modelo matemático del sistema. Tal modelo se obtiene de la definición de un sistema de coordenadas y del análisis de los elementos actuantes.

Como se ve en la Fig.2 al designar un sistema de coordenadas se deben definir los valores máximos y mínimos para cada eje así como la ubicación del origen en el espacio. Además existen otros elementos que dificultan el movimiento de la carga como el caso de una viga testera a 15m. que define la altura mínima para la traslación en el muelle.

Se continua con el desarrollo del modelo analizando cada uno de los elementos que actúan en el sistema:

- Mecanismo de Traslación: dispositivo mecánico accionado por motores eléctricos que permite el desplazamiento de la carga en el eje horizontal.
 - Velocidad máx.: $\pm 4.0 \text{ m/s}$ (cargado o sin carga).
 - Aceleración máx.: $\pm 1.0 \text{ m/s}^2$ (cargado o sin carga).

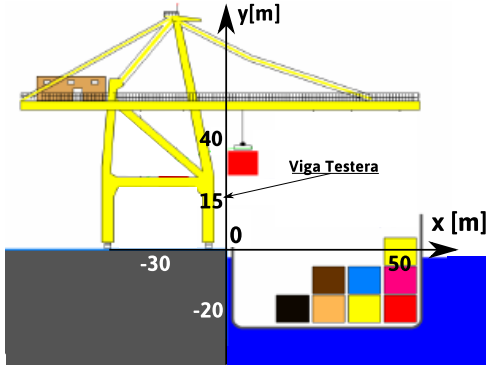


Fig. 2. Sistema de Coordenadas y valores característicos

- Carro (incluye sistema izaje):
 $m_c = 50000kg$;
- Radio primitivo de rueda:
 $R_w = 0.5m$;
- Momento de inercia de ruedas (eje lento):
 $J_w = 2.0kg.m^2$
- Caja reductora: relación
 $i = 15 : 1$;
- Momento de inercia de motor y freno (eje rápido):
 $J_m = 10kg.m^2$;
- Fricción mecánica equivalente (eje rápido):
 $b_{eqm} = b_m + \frac{b_w}{i^2} = 30 \frac{N.n}{rad.s}$.
- Mecanismo de Izaje: Tambor giratorio sobre el que se enrolla el cable de izaje.
 - Velocidad máx.: +/- 1.5 m/s (cargado) o +/- 3.0m/s (sin carga).
 - Aceleración max.: +/- 1.0 m/s² (cargado o sin carga).
 - Radio primitivo de tambor:
 $R_d = 0.75m$ (1 sola corrida de cable);
 - Momento de inercia de tambor (eje lento):
 $J_d = 8.0kg.m^2$.
 - Caja reductora: relación
 $i = 30.0 : 1$.
 - Momento de inercia de motor y freno (eje rápido):
 $J_m = 30.0kg.m^2$;
 - Fricción mecánica equivalente (eje rápido):
 $b_{eqm} = b_m + \frac{b_d}{i^2} = 18 \frac{N.n}{rad.s}$
- Cable de Izaje: Cable de acero del cual cuelga la carga. Se encuentra todo el tiempo tensado.
 - Cable elástico con rozamiento:
 $K_w = 1,80.10^5 \frac{N}{m}$
 $b_w = 3.10^3 \frac{N.s}{m}$
- Carga suspendida: Es la inercia que se encuentra al final del cable de izaje. Se compone de la masa del elemento de agarre y de la carga nominal a transportar.
 - Gancho vacío: $m_{l0} = 15000kg$ (sin carga)

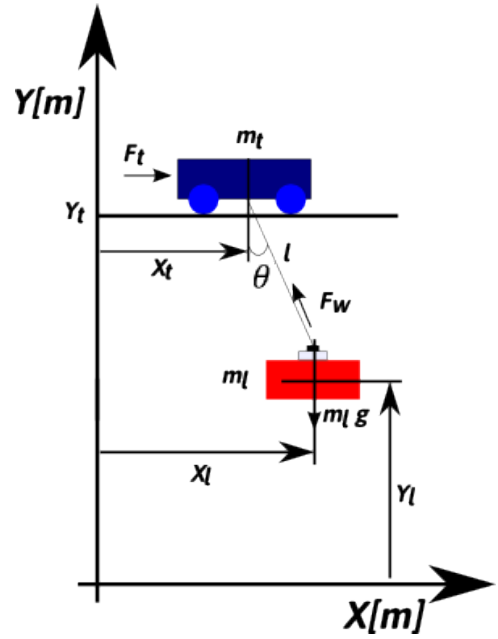


Fig. 3. Análisis de fuerzas actuantes sobre el sistema

- Gancho con Carga nominal: $m_l = 65000kg = (15000 + 50000kg)$

Debido a que nuestro modelo es plano, bidimensional resulta interesante poder referir los movimientos giratorios de los motores eléctricos y del tambor a coordenadas lineales.

B. Modelo del sistema físico

Para continuar en el desarrollo de un modelo matemático necesitamos de un análisis de las fuerzas actuantes sobre cada una de las partes antes descritas. Mediante esta información presente en el diagrama de la Fig.3 se procede al desarrollo del modelo matemático de cada una de las partes:

1) *Mecanismo de Traslación:* En el movimiento de traslación la masa en movimiento es la masa total del sistema más las masas rodantes y sobre la que actúa la fuerza F_t , correspondiente a la tracción del trolley, y F_w , la fuerza de tensión del cable. Todos los rozamientos se reducen en b_t , coeficiente viscoso del mecanismo de traslación.

$$M_t \ddot{x}_t(t) = F_t(t) - b_t \dot{x}_t(t) + F_w(t) \sin \theta(t) \quad (1)$$

Donde:

$$M_t = m_t + \frac{J_w + J_m i^2}{R_w^2} \quad (2)$$

$$F_t = \frac{T_m i}{R_w} \quad (3)$$

$$b_t = \frac{b_{eqm} i^2}{R_w^2} \quad (4)$$

Siendo T_m , el torque motor, nuestra variable controlada en el sistema.

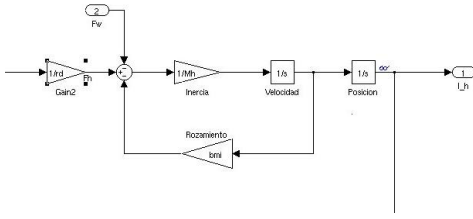


Fig. 4. Diagrama de Bloques del Mecanismo de Izaje

2) *Mecanismo de Izaje*: El mecanismo de izaje es rotatorio pero es mas conveniente expresarlo en términos lineales. Donde M_h es la inercia del mecanismo, l_h representa el largo de cable que se ha enrollado sobre el tambor, $F_h(t)$ la fuerza ejercida sobre el cable por el accionamiento. Todos los rozamientos se reducen en b_h coeficiente viscoso del mecanismo de izaje.

$$M_h \ddot{l}_h(t) = F_h(t) - b_h \dot{l}_h(t) - F_w(t) \quad (5)$$

Donde:

$$M_h = \frac{J_d + J_m i^2}{R_d^2} \quad (6)$$

$$F_h = \frac{T_m i}{R_d} \quad (7)$$

$$b_h = \frac{b_{eqm} i^2}{R_d^2} \quad (8)$$

Siendo T_m , el torque motor, nuestra variable controlada en el sistema. En la Fig.4 se muestra el modelo en diagrama de bloques en Simulink.

3) *Cable de Izaje*: Un cable de acero considerado equivalente elástico sin masa propia es el elemento de unión entre el trolley y la carga suspendida. Considerando la ley de Hooke y las perdidas por rozamientos viscosos la fuerza de tensión F_w por es igual a:

$$F_w(t) = K_w(l(t) - l_h(t)) + b_w(\dot{l}(t) - \dot{l}_h(t)) \quad (9)$$

Donde K_w es la constante elástica del cable y b_w es la constante que concentra los rozamientos internos del cable.

De manera geométrica se puede deducir el valor de l y θ mediante el análisis de la Fig.3:

$$x_l(t) = x_t + l \sin \phi \quad (10)$$

$$y_l(t) = y_t - l \cos \phi \quad (11)$$

Despejando l y θ :

$$l = \sqrt{(x_l - x_t)^2 + (y_t - y_l)^2} \quad (12)$$

$$\tan \theta = \frac{x_l - x_t}{y_t - y_l} \quad (13)$$

4) *Carga Suspendida*: Siendo m_l la masa de la carga suspendida del cable y sobre la que solo actúan la fuerza F_w y su peso, el modelo matemático es el siguiente:

$$m_l \ddot{x}_l(t) = -F_w(t) \sin \theta(t) \quad (14)$$

$$m_l \ddot{y}_l(t) = F_w(t) \cos \theta(t) - m_l g \quad (15)$$

C. Condiciones iniciales y parámetros del sistema

Para poder comenzar a realizar los controladores se debe conocer cuales serán las condiciones iniciales de nuestro modelo.

- **Profundidad del barco: $prof_barco$**
Se pensó en esta variable teniendo en cuenta de que los barcos que debemos cargar pueden presentar dimensiones diferentes.
- **Altura del container: $hContainer$**
Esta variable sirve para saber hasta donde hay que descender la carga, dependiendo del número de containers dejados.
- **Ancho del container: $wContainer$**
Esta variable sirve para saber hasta donde hay que trasladar la carga, dependiendo del número de columna de containers a la que hay que ir.
- **Posición inicial de la carga: $yl0 = hContainer + 1$**
La posición inicial de la carga se decidió fuera de la altura del container más un metro.
- **Altura máxima de la carga: yl_max**
Es la altura máxima a la que la carga puede subir.
- **Altura mínima de la carga: $yl_min = prof_barco - 1.3$**
Es la posición mínima que puede tener la carga, esta posición es dentro de la cubierta del barco
- **Altura de la columna: $yt0 = 45$**
La viga esta ubicada 45 metros sobre del nivel del puerto.
- **Número de columnas: $numColumna$**
Esta variable tiene como objetivo poder variar el número de columnas de contenedores posibles en el barco. El objetivo es poder aceptar diferentes barcos.
- **Número de containers por columna: $NumContainer = [00000]$**
El objetivo de este vector es guardar el número de container existente en cada columna. Esto nos permite saber hasta donde descender debido a que conocemos el alto de los contenedores evitando de esta manera colisiones.
- **Posición inicial del carro: xt_h**
El carro comienza quince metros dentro del puerto.
- **Longitud inicial de cable desenrollado:**
$$lh_h = yt0 - yl0 - \frac{mLg}{Kw}$$

Para asegurar una posición inicial de la carga el cable debe estar desenrollado una constante que tiene en cuenta cuanto el cable se necesita estirar para ejercer una fuerza tal que contraresta el peso de la carga. Esta expresión fue obtenida a partir de las expresiones presentadas en la sección II-B3. Esto nos asegura que el cable en el instante inicial ya esta precargado y no hay movimiento del cable en la dirección y .
- **Longitud mínima de cable desenrollado:**
$$lh_min = yt0 - yl_max - \frac{mLg}{Kw}$$

Para asegurar que la carga no va a superar su posición máxima definida en la variable yl_max , debemos tener en cuenta al momento de enrollar el cable cuanto necesito que este se estire para contrarrestar el peso de la carga.

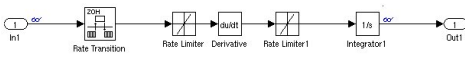


Fig. 5. Bloque Matlab-Simulink para la consigna de posición.

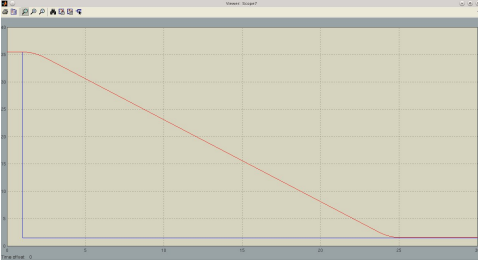


Fig. 6. Gráfico de la consigna de posición en función del tiempo

- Posición final del carro:
 $xt_g = (numColumna + 0.5) wContainer$
 La posición final del carro depende del número de columna a la que deba ir la carga.
- Longitud máxima de cable desenrollado:
 $lh_g = yt0 + yl_min - (hContainer numContainer (numColumna)) - \frac{mLg}{Kw}$
 Para dejar la carga cerca del lugar deseado en donde el operador toma el mando de la grúa para proceder con la descarga debemos tener en cuenta el número de containers que se encuentran depositados y cuanto se va a estirar el cable.
- Fuerza de precarga: $Fh0$
 Como se explicará en la sección II-F en el controlador se utilizó una fuerza de precarga para no sufrir un descenso de la carga cuando se comienza un recorrido.

D. Limitador de velocidad y aceleración

Una de las imposiciones del trabajo es un límite en la velocidad y la aceleración como se mencionó en el capítulo II-A.

Para poder asegurar no superar los límites de velocidad la consigna de posición no puede ser un salto en escalón y su razón de cambio no puede superar los valores dados como objetivo. Por otro lado para cumplir con los límites de velocidad impuestos la consigna de velocidad no puede ser un salto en escalón y su razón de cambio debe estar limitada.

En la fig. 5 se puede observar el bloque en Matlab-Simulink que nos entrega una consigna de posición con las características necesarias para no superar los límites de velocidad y aceleración.

La consigna de posición entregada al controlador, resultado del bloque de Matlab se observa en la fig. 6.

Por último en la fig.7 se muestran los resultados de la aceleración los que cumplen con las condiciones demandadas y en la fig. 8 se muestran los resultados para la velocidad. Esta pertenece al sistema de izaje.

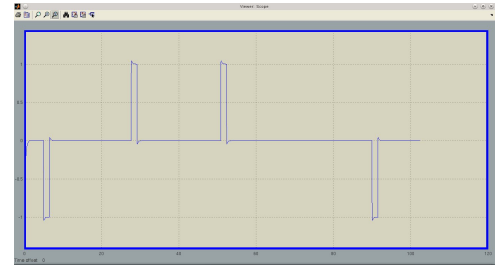


Fig. 7. Gráfico de la limitación de la aceleración

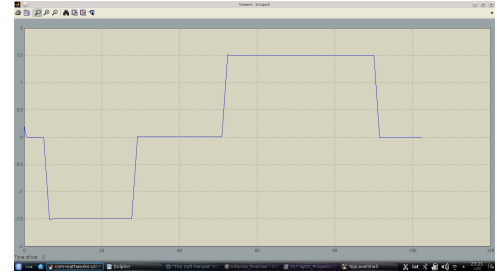


Fig. 8. Gráfico de la limitación de la velocidad

E. Controladores de tipo PID

Luego de analizar el modelo físico se procedió a realizar un controlador por cada motor. Debemos ser capaces de conducir la carga hasta una posición, si bien la acción de tomar la carga y dejar la misma es realizada de manera manual, es necesario que de manera automática la carga llegue a la posición deseada.

Como se explicará en las próximas secciones el controlador supervisor global enviará una consigna de posición a la cual debe llegar nuestro actuador.

En una primera versión del trabajo este controlador supervisor enviaba una consigna de velocidad, la cual era seguida de acuerdo a un bucle de control PID. Entre las ventajas que encontramos en esta solución se encontraba una parada de emergencia sencilla, debido a que era suficiente con enviar una consigna de velocidad cero. Sin embargo luego de analizar aquellos resultados se decidió enviar desde el supervisor consignas de posición, las cuales son alcanzadas a través de un controlador de tipo PID. Se decidió este tipo de controlador luego de analizar otros métodos.

La acción de control PID es el resultado de la suma de una ganancia proporcional multiplicada por el error, una ganancia integral multiplicada por la integral del error y una ganancia derivativa multiplicada por la derivada del mismo.

Se demostrará de manera general el camino seguido para obtener el valor de las ganancias para los controladores dado que la metodología es la misma en ambos casos. Para poder obtener este controlador se operó de la siguiente manera:

1) *Análisis del sistema:* A partir del modelo físico de un motor eléctrico de corriente continua:

$$J_m \omega(t) = T_m - T_l - b \omega(t) \quad (16)$$

$$\dot{\theta} = \omega(t) \quad (17)$$

Donde J_m es la inercia del motor, T_m es el torque del motor y b es el coeficiente de rozamiento dinámico. θ es el ángulo girado por el eje del motor.

Que en el dominio s :

$$J_m s \omega(s) = T_m(s) - T_l(s) - b \omega(s) \quad (18)$$

$$s \theta(s) = \omega(s) \quad (19)$$

Se desean obtener los valores correctos de las ganancias del controlador, tal que la salida del sistema siga a la consigna del controlador.

2) *Función de transferencia del sistema:* Para ello analizamos cuales son las entradas y salidas del sistema.

Entrada: θ^*

Salida: $\theta \rightarrow$ variable controlada

El error esta definido como la diferencia entre la entrada y la salida del sistema:

$$e_\theta(t) = \theta^*(t) - \theta(t) \quad (20)$$

Dado que el modulador de torque del motor eléctrico es modelado como una ganancia unitaria $G_T(s)$ por las condiciones del mismo (ancho de banda muy grande en comparación con el sistema controlado), el torque motor T_m es igual a

$$T_m(s) = G_T(s) \left[k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s \right] e_\theta(s) \quad (21)$$

$$= G_T(s) \left[k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s \right] [\theta^*(s) - \theta(s)] \quad (22)$$

Igualando y operando matemáticamente T_m , se obtienen las siguientes funciones de transferencia:

$$\frac{\theta(s)}{\theta^*(s)} = \frac{G_T(s) [k_d s^2 + k_p s + k_i]}{J_m s^3 + [b_m + G_T(s) k_d] s^2 + G_T(s) [k_p s + k_i]} \quad (23)$$

$$\frac{\theta}{T_l} = - \frac{s}{J_m s^3 + [b_m + G_T(s) k_d] s^2 + G_T(s) [k_p s + k_i]} \quad (24)$$

3) *Polos de la función:* En este punto somos capaces de elegir los polos de ambas funciones de transferencia de la siguiente manera:

- $P_1 < 0$
- P_2 y P_3 complejos conjugados.

Dicha ecuación en forma factorizada se escribe como:

$$= (s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) \quad (25)$$

$$= (s - P_1)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2) \quad (26)$$

Desarrollando, obtenemos la expresión

$$= s^3 + (2\xi\omega_n - P_1)s^2 + (\omega_n^2 - 2\xi\omega_n P_1)s - \omega_n^2 P_1 \quad (27)$$

4) *Ganancias K_p , K_i y K_d :* Para obtener las ganancias K_p , K_i y K_d se igualan termino a termino:

$$= J_m s^3 + (b_m + G_T(s) k_d) s^2 + G_T(s) (k_p s + k_i) \quad (28)$$

$$= s^3 + (2\xi\omega_n - P_1)s^2 + (\omega_n^2 - 2\xi\omega_n P_1)s - \omega_n^2 P_1 \quad (29)$$

Ganancia proporcional:

$$k_p = (\omega_n^2 - 2\xi\omega_n P_1) J_m \quad (30)$$

Ganancia integral:

$$k_i = (P_1 \omega_n^2) J_m \quad (31)$$

Ganancia derivativa:

$$k_d = (2\xi\omega_n - P_1) J_m - b_m \quad (32)$$

Aplicando estas expresiones a los modelos físicos de la sección II-B1 y II-B2 tenemos:

Mecanismo de traslación

$$k_p = (\omega_n^2 - 2\xi\omega_n P_1) M_t \quad (33)$$

$$k_i = (P_1 \omega_n^2) M_t \quad (34)$$

$$k_d = (2\xi\omega_n - P_1) M_t - b_t \quad (35)$$

Mecanismo de izaje

$$k_p = (\omega_n^2 - 2\xi\omega_n P_1) M_h \quad (36)$$

$$k_i = (P_1 \omega_n^2) M_h \quad (37)$$

$$k_d = (2\xi\omega_n - P_1) M_h - b_h \quad (38)$$

F. Resultados del Controlador

Sobre cada uno de los siguientes controladores se realizaron pruebas que entregaron los resultados que se muestran a continuación:

- Traslación del Trolley (Ver Fig.9). La respuesta de este controlador a un escalón unitario se puede observar en la Fig.10
- Izaje de la carga (Ver Fig.11). El controlador arroja los resultados que se observan en la Fig.12. Donde se puede ver un descenso de la carga en los primeros instantes debido a la acción del peso.
- Izaje de la carga con Compensación (Ver Fig.13). En la Fig.14 se presentan los resultados al agregar al controlador la compensación por el peso de la carga. Se pueden observar mejores resultados debidos a este cambio. Consiguiendo así que no haya un descenso de la carga cuando el sistema automático toma el control.

A continuación se mostrara la comparación de la consigna de posición en escalón con la consigna de posición cuya pendiente permite cumplir con las consignas de velocidad y aceleración máxima y con la posición de la carga. Se puede ver el estiramiento del cable en la gráfica.

- Traslación en el eje x fig. 15.
La consigna dada es equivalente a la que envía la máquina de estados. Se observa el movimiento de péndulo de la carga.
- Izaje en el eje y fig.16.
La consigna dada es equivalente a la que envía la máquina de estados. Se puede observar el estiramiento del cable.

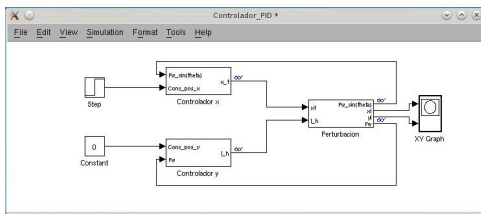


Fig. 9. Modelo Simulink del Controlador de traslación en el eje X



Fig. 10. Respuesta del sistema a un escalón en el eje X

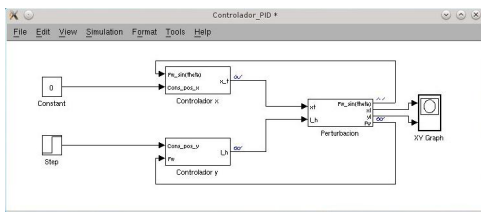


Fig. 11. Modelo Simulink del controlador de izaje en el eje Y

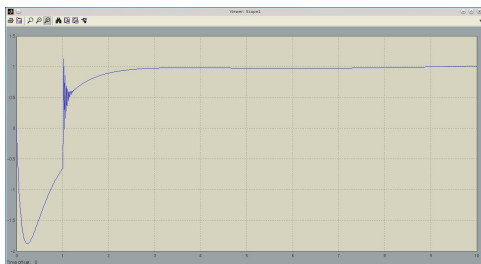


Fig. 12. Respuesta del sistema a un escalón en el eje Y

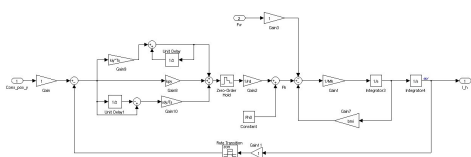


Fig. 13. Modelo Simulink del controlador de izaje en el eje Y con precarga

G. Parada de emergencia

Sistemas de gran envergadura presentan frenos mecánicos para no estar forzando el motor y tener una mayor seguridad. Se pensó en este trabajo que en una situación de riesgo es

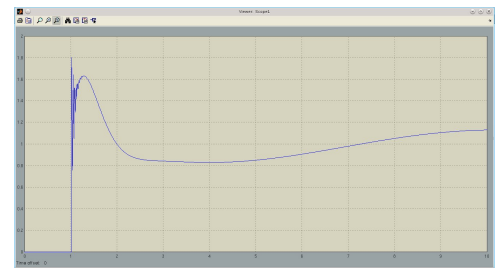


Fig. 14. Respuesta del sistema a un escalón en el eje Y con precarga

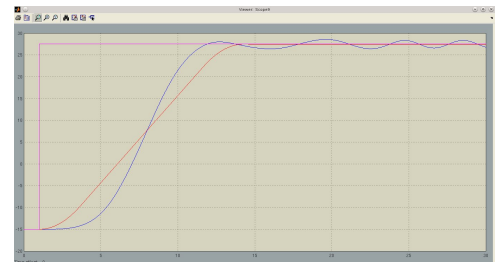


Fig. 15. Respuesta del sistema y la carga a una perturbación en escalón eje X

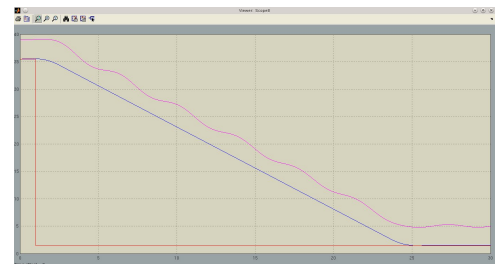


Fig. 16. Respuesta del sistema y la carga a una perturbación en escalón eje y

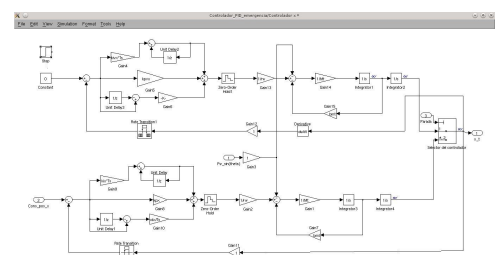


Fig. 17. Diagrama del controlador de posición y de velocidad(Emergencia)

necesario detener el sistema de forma segura antes de aplicar los frenos mecánicos.

Dado que el controlador que acabamos de describir solo controla posición, no nos daba la seguridad de detener los motores de manera sencilla y rápida. Decidimos realizar un controlador de tipo PID pero de velocidad. Este sistema actúa solamente en caso de emergencia. A continuación se detalla el esquema de Matlab-Simulink (Ver Fig.17).

Para poder obtener las ganancias se siguió el método de

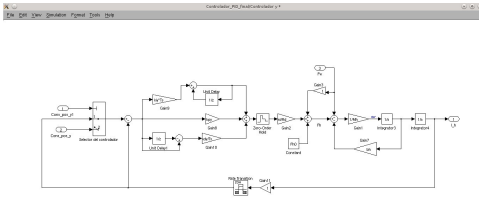


Fig. 18. Modelo Simulink del controlador de izaje en el eje Y con precarga y sistema de emergencia

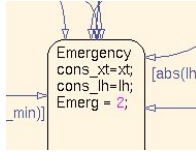


Fig. 19. Imagen del estado emergencia en la máquina de estados

Ziegler-Nichols en el que se realiza un análisis de la respuesta del sistema a una perturbación en escalón.

Como se explicara en la sección II-J, mediante la bandera "Emergencia" se tienen la capacidad de decir que controlador tiene el mando del sistema y su correspondiente consigna.

Analizando los resultados anteriores se busco otra solución en la cual se retroalimenta el estado actual del sistema como consigna del controlador. De esta manera el error es cero. Se debe tener en cuenta la perturbación F_w y es por ello que la consigna que llegue al modulador de torque G_t debe ser igual igual a esta. Ver Fig. 18

Observando las soluciones propuestas y los resultados obtenidos se descubrió que esta retroalimentación podía hacerse directamente en la máquina de estados. Para ello se debe enviar como consigna de posición la posición actual al momento de entrar al estado emergencia. Esto se explicará en el capítulo II-J. En la fig. 19 se muestra la consigna $cons_xt = xt$ donde xt es la retroalimentación de la posición y $cons_lh = lh$ donde lh es la retroalimentación de los metros desenrollados de cable.

H. Análisis en tiempo discreto

Hasta este momento hemos presentado nuestro trabajo en el controlador en tiempo continuo. El objetivo de este trabajo es presentar una solución digital y es por ello que se adaptó el modelo de Matlab de tiempo discreto a digital, cumpliendo con las necesidades del trabajo.

La adaptación que se realizo fue la siguiente:

- Debemos discretizar los valores de la entrada. En esta nueva situación del sistema vamos a dividir el tiempo continuo en pequeños intervalos, esto nos inhibe de conocer el estado del sistema en cada momento. Al diseñar un controlador digital asumimos este riesgo y se deben tomar los recaudos necesarios para cumplir con nuestros objetivos de seguridad brindando un sistema fiable. Esto se resume a realizar un sistema de control

lo suficientemente rápido en función de la variación de las variables del proceso.

El teorema de muestreo nos dice que el tiempo de muestreo debe ser:

$$f_s > 2 * BW_{controlador}$$

En la práctica esta relación es aún mayor.

- A su vez la salida de un sistema digital es discreta. Esto implica que nuestro sistema de control presenta una salida escalonada. Por ende, actuando, sobre el sistema de manera diferente a un sistema continuo. Otra vez es importante tener en cuenta el tiempo con el cual el controlador actualiza la señal de salida.

Se presenta a continuación el camino para transformar un PID continuo a uno discreto:

- Acción integral

$$u_i(t) = k_i \int_0^t e(t) dt + u_{i0} \quad (39)$$

Para un instante de muestreo:

$$u_i(t_k) = k_i \left[\int_0^{t_k} e(t) dt + I_0 \right] \quad (40)$$

$$= k_i \left[\int_{t_{k-1}}^{t_k} e(t) dt + \int_0^{t_{k-1}} e(t) dt + I_0 \right] \quad (41)$$

$$u_i(t_{k-1}) = k_i \int_0^{t_{k-1}} e(t) dt + I_0 \quad (42)$$

$$u_i(t_k) = k_i \int_{t_{k-1}}^{t_k} e(t) dt + u_i(t_{k-1}) \quad (43)$$

$$= k_i e(t) T_s + u_i(t_{k-1}) \quad (44)$$

- Acción derivativa

$$u_d(t_k) = k_d \frac{d e(t_k)}{dt} \quad (45)$$

$$= k_d \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{T_s} \quad (46)$$

Donde T_s es el tiempo de muestreo igual a $T_s = \frac{10}{\omega_n}$ En la Fig.20 se observa el diagrama de bloques de un controlador discreto.

I. Adaptación del programa en Matlab-Simulink

Se deben agregar dos bloques de función en el programa de Matlab para transformar nuestro controlador en tiempo continuo al discreto.

- Al ingreso del controlador: Rate Transition(Ver Fig.21) De acuerdo a la descripción de Matlab el bloque se encarga de transferir datos entre sistemas que trabajan a una frecuencia diferente. El trabajo del bloque es

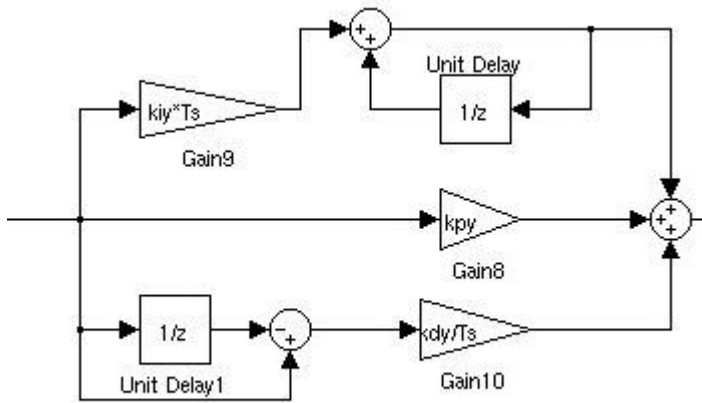


Fig. 20. Diagrama de bloques de un controlador discreto

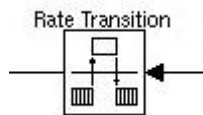


Fig. 21. Bloque Rate Transition

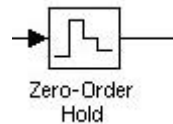


Fig. 22. Bloque Zero Order Hold

mantener a la salida un valor que se encontraba a la entrada en el momento del muestreo.

- A la salida del controlador: Zero-order hold (Ver Fig.22) Según Matlab el bloque retiene su entrada durante un período de tiempo especificado.

Con estos dos elementos además de la transformación de las acciones proporcionales, integrales y derivativas se realizó el controlador en tiempo discreto.

J. Máquina de estados finitos

Una máquina de estados puede describirse como el modelo de comportamiento de un sistema en que los sucesivos estados dependen al mismo tiempo de las entradas del sistema y del estado en el que se encuentra.

Para poder realizar la máquina se realizaron tres versiones hasta poder obtener el resultado final. A continuación se presenta una breve descripción de las mismas.

- En la primera versión se buscó que la máquina fuera capaz de cargar la carga en el barco. Lo que debía realizar luego de salir del estado manual (en el que el operario

toma la carga) es ir a una posición conocida y segura, para a partir de ese momento comenzar a avanzar, desde este punto hasta el punto más alto permitido. A partir de este momento se comienza a trasladar el carro en el eje x, hasta su posición final en el eje x, y por último comienza su descenso hasta la posición final en el eje y. El último estado era nuevamente manual, donde el operario debería dejar la carga.

- La segunda versión de la máquina de estados tomaba lo realizado en la primera versión pero además agregaba un grupo de estados que representaban el camino de regreso, ascenso en el eje y, traslación en el eje x y descenso hasta el muelle. El problema general se concibe de manera que la grúa siempre va a realizar un ciclo completo, ida hacia el barco y regreso al muelle.
- La tercera y última versión hasta el momento se le agregan las señales de emergencia en las que detienen el sistema y le avisan al operario que el sistema no está respondiendo de una manera esperada.

La máquina de estados realizada se describe en su forma de diagrama de estados finitos en la Fig.23. A continuación y haciendo referencia a los nombres de este diagrama se detalla el comportamiento en modo automático de nuestra grúa tipo pórtico:

Tomando como inicio el momento en el cual el operario, después de haber intervenido en el proceso de enganche y primera elevación de la carga, pone el sistema en modo automático, este responde de la siguiente manera:

- *Automatic Control*: Entrada en el Modo Automático. Nuestro sistema viene de haber estado controlado por el operario y por ello es necesario que el sistema se reoriente para cumplir con su tarea. Para esto evalúa si su posición actual es próxima a alguna de sus dos posiciones conocidas:
 - *Home*: Un punto ubicado sobre el muelle a una altura por encima del área de trabajo usual del operario.
 - *Goal*: El punto de destino sobre el barco para depositar la carga que se está transportando.

Si ninguna de las dos posiciones se encontraran cerca esto es considerado como un error del operario que ha accionado el modo automático y el autómatas entra el modo de *Emergency*.

- *Approach Home* y *Approach Goal*: Estando cerca de los puntos conocidos (*Near Home* y *Near Goal*) nos acercamos a estos.
- *Home Climb* y *End Climb*: A continuación, tras encontrarnos en un punto conocido y seguro *At Home* y *At Goal* procedemos a desplazarnos en el eje Y hasta la posición más alta *Highest*.
- *Go* y *Return*: Al alcanzar la coordenada de mayor altura de nuestra estructura *Highest* es seguro proceder a desplazarnos en el eje X hasta la posición del destino sobre este eje: *X Goal* y *X Home* respectivamente.
- *Descend Goal* y *Descend Home*: al encontrarnos por encima de nuestro destino podemos descender de manera segura hasta alcanzar la posición *At Goal* y *At Home* en cada caso.

- *Wait*: Luego de haber llegado al destino esperamos la señal del operador *Manual* para dar paso al control manual del sistema.
- *Emergency*: Como se describió una situación anormal del sistema lleva al mismo a un estado de emergencia el cual detiene los motores. Pero no solo una situación del sistema lleva a este estado, también el operario puede llevar al sistema al estado emergencia mediante la activación de un switch. Para salir de este estado el operario debe dar la señal de que se tiene conocimiento de que el sistema entro a un estado de emergencia y pasará de esta forma a un estado manual, siguiendo así con su funcionamiento normal.

K. Parámetros de la máquina de estados

A continuación se presentarán las constantes que se utilizan en la máquina de estados. Estas sirven para detectar si el sistema esta en una situación que no es normal y lo lleva a un estado de emergencia enviando una señal al operario y para saber en que estado debe ingresar.

- Margen de error de posición en la traslación:
 $marg_xt$
- Margen de error para situación de emergencia en la traslación:
 $marg_xt_g$
- Margen de error de posición en el cable desenrollado:
 $marg_lh$
- Margen de error para situación de emergencia en el cable desenrollado:
 $marg_lh_g$

L. Presentación de resultados

El trabajo se dividió de manera de ir trabajando en la máquina de estado y en el control de los motores de forma independiente. De esta forma pudimos avanzar en paralelo. A continuación se presentan los resultados completos, es importante marcar que las condiciones iniciales en estas demostraciones son las explicadas en la sección II-C.

- Para comenzar la presentación de resultados se muestra en la Fig. 24 la respuesta del sistema a un ciclo de ida hacia el barco. Se intenta mostrar con esta imagen el sistema de forma global. Se observan las señales enviadas desde la máquina de estados, la respuesta del sistema, así como también el gráfico descrito por la carga en su camino hacia el barco en la parte inferior izquierda. También se muestran los switch que representan las señas que puede enviarle el operario a la máquina.
- En la Fig. 25 Se puede observar la consigna en escalon enviada desde la máquina de estados, la respuesta de los controladores de los motores a la consigna de posición atenuada para estar dentro de los límites de velocidad y aceleración como se ve en la figura 7 para el izaje de la carga, mientras que en la Fig. 26 se muestra la respuesta en la traslación.
- En la Fig. 27 se muestra la respuesta del sistema al movimiento completo. Esto es tomar la carga, realizado

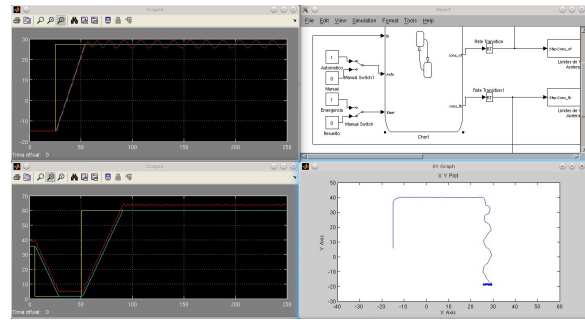


Fig. 24. Respuesta del sistema al ciclo de ida hacia el barco

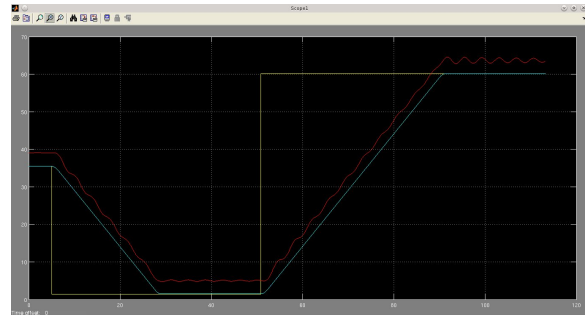


Fig. 25. Respuesta del sistema al ciclo de ida hacia el barco en el izaje

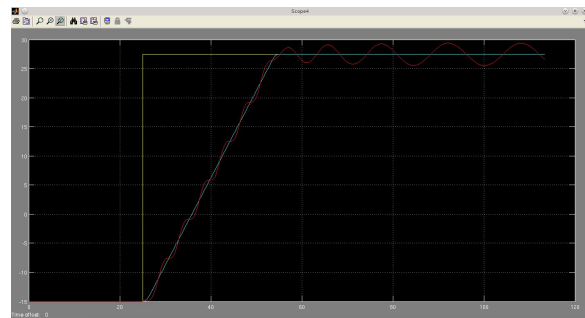


Fig. 26. Respuesta del sistema al ciclo de ida hacia el barco en traslación

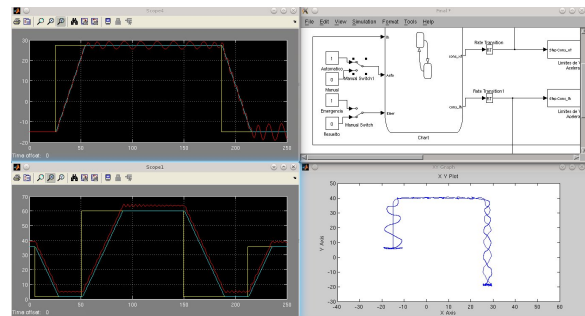


Fig. 27. Respuesta del sistema a un ciclo de carga completo

de manera manual por el operario, llevarla al barco de manera automática y esperar la señal del operario para poder volver al muelle.

M. Próximas versiones de la máquina de estados

Hasta ahora tenemos una versión de la máquina de estados que es capaz de esperar que el operario tome la carga y automáticamente la lleve al barco y volver desde el mismo. Se plantean tres mejoras a este modelo que se pueden sumar a nuestro desarrollo puesto que se han dejado las variables para ello.

- inteligencia al estado automático, esto es conocer la posición final de traslación teniendo en cuenta dos situaciones:
 - Carga secuencial en el eje x, cargar en la columna 1, luego la 2 y así sucesivamente.
 - Carga completamente la columna 1 y luego completamente la 2 y así sucesivamente.
- Realizar trayectorias curvas que le permitieran al operario que la carga y la descarga fuera más rápidamente.
- Detección de carga, discriminando si estamos cargando o descargando, siendo capaces de esta manera de avanzar más rápido si no hay carga.

III. CONCLUSIÓN

El trabajo tuvo como objetivo realizar un controlador aplicable a los requerimientos industriales, por ende se tuvieron en cuenta diferentes aspectos de seguridad y necesidades que en ese ámbito se requieren.

Es el proyecto integrador de la materia en el que se busco poner en práctica los diferentes aspectos vistos durante el año.

Hemos destacado dos grande bloques o partes del trabajo:

- Controlador en tiempo discreto.
Es un controlador de más bajo nivel, adaptado como se ha mencionado a las necesidades digitales.
- Máquina de estados finitos.
Como controlador global, notamos que al programar en este nivel de abstracción, indudablemente más alto, es mucho más fácil tener en cuenta diferentes situaciones que pueden suceder en el sistema.

Al trabajar de esta manera pudimos ser capaces de hacer crecer nuestro sistema de control agregándole estados que solucionaran situaciones que en un principio no habíamos tenido en cuenta.

Como resultado del trabajo podemos demostrar las ventajas que presenta realizar máquinas de estados finitos en problemas en los que pueden existir situaciones concurrentes y el camino a seguir depende del estado del sistema.

Finalmente, es importante destacar que la seguridad ha sido el factor sobre el que mas se ocupo en este trabajo, debido a las graves implicancias que tendría un accidente con este tipo de cargas y estructuras.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed.Editorial:Pearson.
- [2] Julián Gabriel, *Apuntes y Material de la Cátedra*, Automática y Maquinas Eléctricas, 2013.
- [3] Julián Gabriel, *Apuntes y Material de la Cátedra*, Autómatas y Control Discreto , 2013.
- [4] University of Michigan, *Control Tutorials for Matlab & Simulink*, <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS>.

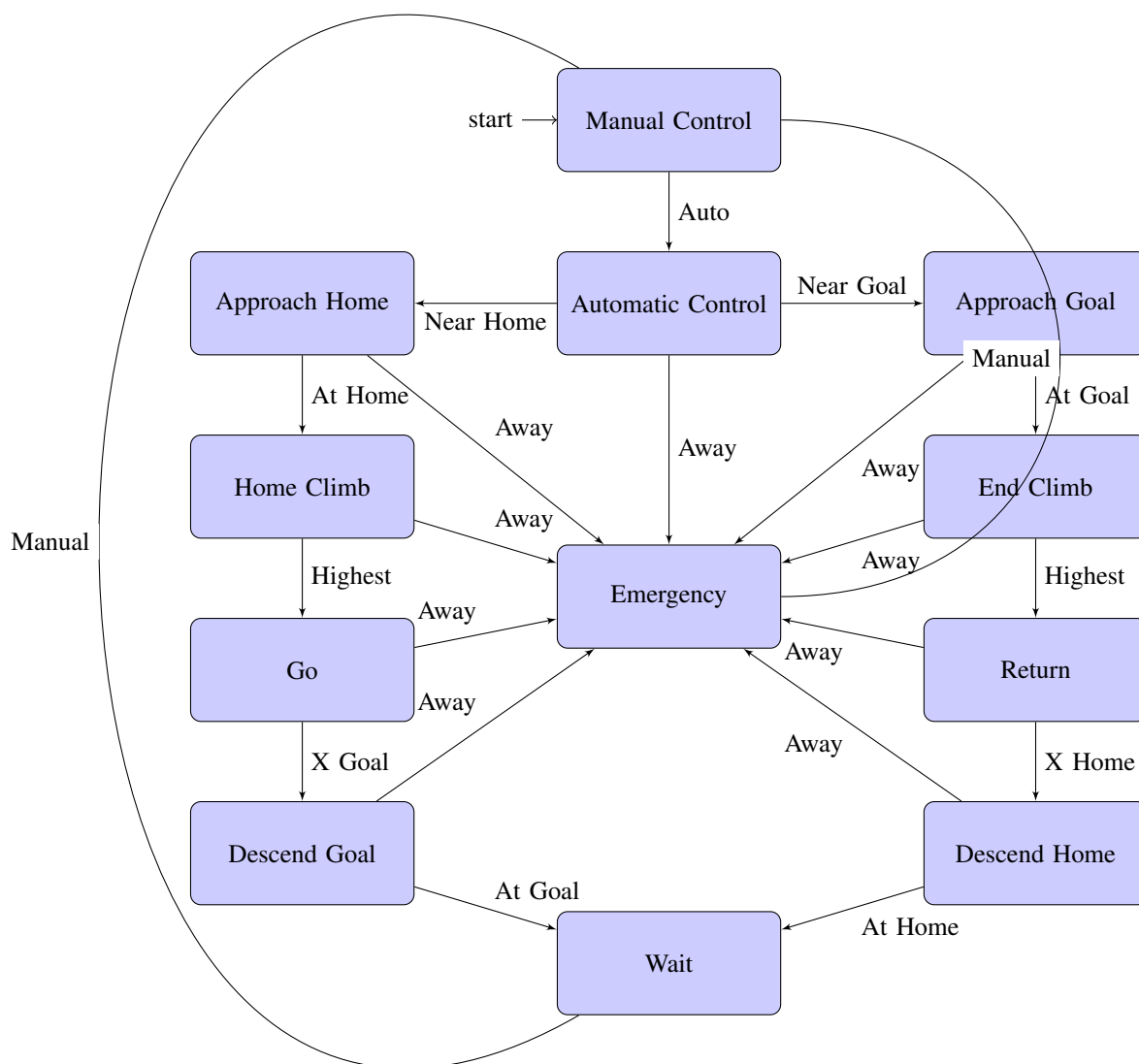


Fig. 23. Diagrama de flujo del controlador supervisor