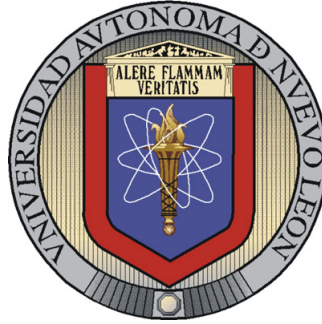


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CONTROL PREDICTIVO TOLERANTE A FALLAS.

POR

ING. NANCY EVANGELISTA CHARLES

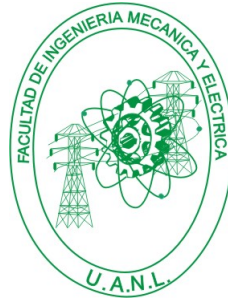
TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ORIENTACIÓN
EN CONTROL AUTOMÁTICO

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CONTROL PREDICTIVO TOLERANTE A FALLAS.

POR

ING. NANCY EVANGELISTA CHARLES

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ORIENTACIÓN
EN CONTROL AUTOMÁTICO

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “**Control Predictivo Tolerante a Fallas.**” realizada por el alumno **Ing. Nancy Evangelista Charles**, matrícula 1012476 sea aceptada por su defensa como opción al grado de **Maestro en Ciencias** de la Ingeniería Eléctrica con Orientación en Control Automático.

El Comité de Tesis

Asesor
Dr. Efraín Alcorta García

Coasesor:
Dr. Juan Antonio Rojas Estrada

Coasesor:
Dr. Jesus de León Morales

Vo. Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Posgrado

Cd. Universitaria, a Noviembre de 2007

Índice General

Índice General	iii
Índice de Figuras	v
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Antecedentes	4
2 Preliminares	6
2.1 Introducción	6
2.2 Control predictivo basado en modelo (CPBM)	7
2.2.1 Definiciones	7
2.2.2 Idea básica	9
2.2.3 Elementos	9
2.2.4 Estructura	12
2.3 Control tolerante a fallas	13
2.3.1 Modelo de fallas	13
2.3.2 Diagnóstico de fallas	15
2.3.3 Generación de residuos	16
2.3.4 Reconfiguración	21
3 Control predictivo activo tolerante a fallas	23
3.1 Introducción	23

3.2	Antecedentes	24
3.3	Concepto	25
3.3.1	Índice de desempeño	25
3.3.2	Propuesta	27
4	Aplicación	30
4.1	Introducción	30
4.2	Modelo de avión Cessna Citation 500 con control predictivo (sistema nominal) .	31
4.3	Aplicación del Control Predictivo Activo Tolerante a Fallas	34
4.4	Resultados	37
5	Conclusiones	40
5.1	Conclusiones	40
5.2	Contribuciones de la tesis	41
5.3	Trabajos futuros	42
	Bibliografía	42

Índice de Figuras

2.1	Esquema de los sistemas tolerantes a fallas	7
2.2	Idea básica del control predictivo	11
2.3	Estructura básica del control predictivo	12
2.4	Sistema nominal con falla aditiva	14
2.5	Sistema nominal con falla multiplicativa	15
2.6	Desacoplo del sistema	19
2.7	Esquema de Sistema-MPC con reconfiguración	22
3.1	Esquema de control predictivo activo tolerante a falla	24
3.2	Comportamiento general de los índices de desempeño	26
3.3	Metodología para el diseño de un control predictivo activo tolerante a fallas	27
3.4	Esquema de la propuesta	29
4.1	Sistema nominal con control predictivo	32
4.2	Respuesta al sistema nominal	33
4.3	Índice de desempeño del sistema nominal	34
4.4	Sistema nominal con falla aditiva y el control predictivo activo tolerante a falla	36
4.5	Simulación del sistema con falla aditiva aplicando el control predictivo activo tolerante a falla	37
4.6	Índice de desempeño del sistema nominal con falla aditiva y el algoritmo propuesto	38
4.7	Simulación del sistema con falla multiplicativa y el algoritmo propuesto	38
4.8	Índice de desempeño del sistema nominal con falla multiplicativa y el algoritmo propuesto	39

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

El objetivo de los sistemas de control consiste en actuar sobre las variables manipuladas de forma que puedan satisfacer criterios respecto a su correcto funcionamiento y desempeño. Sin embargo, los sistemas de control automático son susceptibles a fallas, entendiéndose por falla un cambio en el comportamiento de alguno de los componentes del sistema o proceso de manera que éste ya no pueda satisfacer el objetivo de control [1], provocando un mal funcionamiento así como degradación en el desempeño del mismo.

Estos desperfectos propician una creciente necesidad e interés en desarrollar sistemas de control que puedan operar en forma aceptable, incluso, después de la aparición de una falla. A este tipo de sistemas de control se les denomina tolerantes a fallas.

Cuando una posible falla es modelada como incertidumbre, ésta puede ser tratada convenientemente mediante control robusto. A este tipo de tolerancia a fallas se le denomina pasiva, pues la aparición de la falla no altera la estrategia de control. Por otro lado, existen estrategias de control, tales como lo es el control predictivo, que simplemente añadiendo restricciones al problema de optimización permiten fácilmente incorporar mecanismos de tolerancia a fallas, mostrando ser una técnica robusta de forma natural respecto a incertidumbres del modelo.

Dado que el control predictivo presenta una formulación abierta, este control muestra ser un buen candidato para la estrategia a desarrollar, aunque algunas fallas pueden llegar a degradar el desempeño aún y considerando la característica robusta del control predictivo.

La formulación básica del control predictivo, y la presencia de fallas que degradan el desempeño ha motivado esta tesis al desarrollo de una estrategia de control predictivo activo tolerante a fallas con la finalidad de reducir la degradación del desempeño que ocasionan las fallas en un sistema cuyo lazo es un control predictivo.

1.2 Planteamiento del problema

En este trabajo se considera un sistema lineal retroalimentado mediante un control predictivo, que cuando se encuentra libre de fallas tiene un desempeño dado por un índice ($I_o = \int_0^t e^2(t)dt$) representado por I_o . Suponer que al ocurrir una falla el desempeño del sistema se degrada de tal forma que ahora el índice tiene un valor de $I_1 > I_o$, entonces el problema puede plantearse como sigue:

Dado un sistema lineal (LTI) que se encuentra en lazo cerrado bajo la acción de un control predictivo tolerante a fallas cuyo índice de desempeño es I_T . Determinar a partir de las mediciones entrada–salida del proceso, cuándo una falla esta presente, y la acción correctiva necesaria para evitar una degradación del índice de desempeño al valor de $I_1(e)$, es decir, $I_o < I_T < I_1$.

Cabe hacer notar que el problema anterior deja abierta la posibilidad de cualquier falla. Hoy en día se sabe que el número y tipo de fallas que pueden ser detectadas en un sistema dado esta limitado [13]. Sin embargo, previamente no se ha considerado de forma conjunta la posibilidad de que se presente fallas aditivas y multiplicativas en lazos con control predictivo.

Por tal motivo, este trabajo esta enfocado a las fallas que pueden ser efectivamente detectadas, aisladas e identificadas. Debido a esta limitación se requiere un trabajo previo de modelado de fallas muy relevantes al proceso. El grado de importancia depende del efecto que tienen sobre el proceso ó bien con la frecuencia con la que pueden aparecer. La cualidad de tolerancia a fallas del controlador debe realizarse sobre fallas consideradas criticas solamente.

1.3 Objetivos

El objetivo principal del trabajo es el siguiente:

Desarrollar un algoritmo que permita determinar si una falla esta presente en el proceso así como una estrategia para compensar al proceso de tal forma que el indicador de desempeño se mantenga lo más cercano posible al nominal, es decir, I_0 .

Como objetivos particulares se tienen:

- Establecer la estrategia de detección de fallas requerida así como la información relevante para la reconfiguración.
- Proponer un esquema de reconfiguración adecuado para cada falla.
- Mostrar como el control tolerante a fallas activo tiene un mejor índice de desempeño que el pasivo.
- Establecer las limitaciones de la metodología propuesta.

El sistema sobre el cual se trabajará esta retroalimentado mediante un controlador predictivo, mismo que ya representa un sistema con un cierto grado de robustez frente a un cambio en los parámetros (fallas). Por lo que este puede ser considerado un sistema tolerante a fallas pasivo.

1.4 Antecedentes

Los primeros sistemas tolerantes a fallas aparecen en los años 80's del siglo XX en el contexto de redundancia analítica y reconfiguración [9] esto para sistemas de la industria aérea. En los 90's adquieren los temas de control de tolerancia a fallas una importancia tal que la comunidad científica reporta un sinnúmero de formas de realizarla así como análisis y comparación de diferentes métodos [7].

Entre las principales estrategias se pueden nombrar:

- Banco de observadores para fallas en sensores
- Paradigma de re-diseño de controladores
 - Model Matching
 - Método de la pseudo-inversa
 - Método de la pseudo-inversa modificada
 - Método de la pseudo-inversa admisible
 - Método de seguimiento perfecto del modelo
 - Ubicación de estructura propia
 - Otros (Ver,[4])

Las diferentes metodologías están basadas en un principio denominado reconfiguración. Este puede llevarse a cabo en dos niveles: Modificando los parámetros del controlador una vez que se presente una falla ó modificando por completo el controlador.

El estudio de control activo tolerante a fallas se mantiene con gran actividad debido a la cantidad de variantes y aspectos que requieren ser revisados. Es claro que el control activo tolerante a fallas es preferido sobre el pasivo en sistemas en donde el desempeño juega un papel crítico. Un ejemplo de esta clase de sistemas donde se requiere un gran desempeño se tiene en la industria aeronáutica.

Capítulo 2

Preliminares

2.1 Introducción

En este capítulo se describen dos bases fundamentales para la propuesta que se requiere realizar:

1. **Control predictivo basado en modelo.**

El control predictivo basado en modelo se puede definir como una estrategia de control que se basa en la utilización de forma explícita de un modelo matemático interno del proceso a controlar (modelo de predicción), el cual se utiliza para predecir la evolución de las variables a controlar a lo largo de un horizonte temporal. De este modo se pueden calcular las variables manipuladas futuras (señal de control futura) para lograr que en dicho horizonte las variables controladas converjan a sus respectivos valores de referencia.

2. **Control tolerante a fallas.**

Los procesos industriales gobernados mediante controladores automáticos, al igual que cualquier sistema físico, pueden presentar fallas. Una forma de aumentar su fiabilidad consiste en utilizar estrategias de control que puedan seguir operando aunque se presenten estos desperfectos. La tolerancia a fallas se puede obtener mediante el siguiente algoritmo: primero se realiza un diagnóstico en tiempo real del sistema y al ser detectada la ocurrencia de una falla, una señal es enviada junto con la información relevante de la falla (localización, tamaño, etc.). Después esta información es utilizada para modificar el controlador de tal forma que el desempeño se mantenga tan bien como sea posible. El

concepto de control tolerante a fallas se puede entender como la capacidad de un sistema de control para mantener los *objetivos de control* a pesar de la aparición de una falla. Entonces el camino a seguir para diseñar un sistema de control tolerante a fallas consiste de dos pasos: un diagnóstico de la falla y un rediseño del control (reconfiguración).

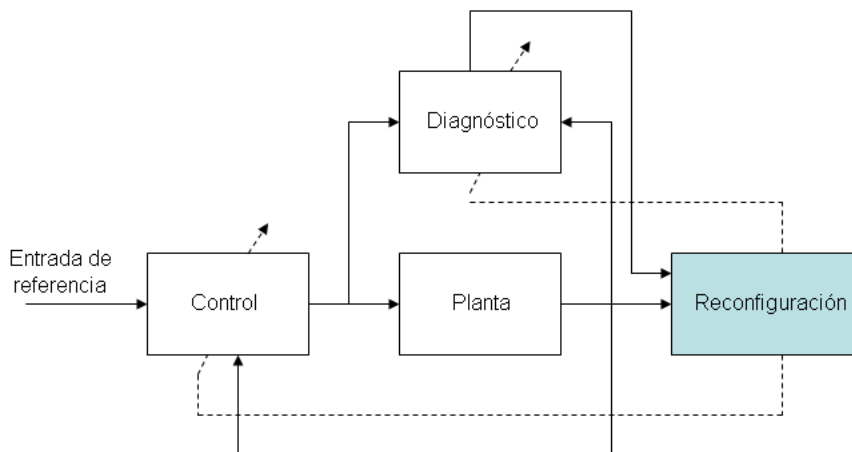


Figura 2.1: Esquema de los sistemas tolerantes a fallas

2.2 Control predictivo basado en modelo (CPBM)

2.2.1 Definiciones

El control predictivo, o el control predictivo basado en modelo como se conoce (MPC ó MBPC) se desarrolló en base a dos líneas básicas. Por un lado, a finales de los años setenta surgieron diversos algoritmos que usaban explícitamente un modelo dinámico del proceso para predecir el efecto de las acciones de control futuras en la salida del sistema, las cuales eran determinadas minimizando el error de predicción sujeto a restricciones de operación. La optimización se repetía en cada instante de muestreo con información actualizada del proceso. Estas formulaciones eran de naturaleza heurística y algorítmica e intentaban aprovechar el creciente potencial de los computadores digitales por aquella época.

Independientemente fue surgiendo otra línea de trabajo en torno a las ideas del control adaptativo, desarrollando estrategias esencialmente para procesos monovariantes formuladas

con modelos entrada–salida. En este contexto se extendieron las ideas del Controlador de Mínima Varianza y se desarrolló el Control Predictivo Generalizado (Generalized Predictive Control GPC) utilizando modelos del tipo CARIMA (*Controller Auto-Regresive Integrated Moving-Average*) de gran aceptación en los últimos 20 años para controlar procesos descritos por modelos entrada-salida.

El control predictivo es una estrategia de control en la cual se predicen en un horizonte finito, los estados del proceso gracias a la utilización de un modelo. La estrategia de control adecuada es seleccionada al minimizar una función de costo que pondera el error de desviación frente al punto de operación (referencia de entrada) y otros factores deseados [2]. Finalmente, solo se aplica el control calculado en el siguiente instante de tiempo, pues se repite el proceso para recalcular el control.

Entre las ventajas que presenta este método sobresalen:

- Las leyes se pueden extender de manera natural a sistemas multivariables
- Son aplicables a prácticamente cualquier tipo de proceso lineal.
- Las perturbaciones medibles pueden ser compensadas mediante prealimentación
- Permite considerar en el diseño, restricciones en las entradas y salidas del proceso.

La disponibilidad de un modelo apropiado del proceso y la limitada capacidad computacional de algunos procesadores para ejecutar el algoritmo están entre los aspectos que deben considerarse a la hora de implementar un control predictivo en un sistema o proceso.

2.2.2 Idea básica

El control predictivo constituye un campo muy amplio de métodos de control desarrollados en torno a ciertas ideas comunes e integra diversas disciplinas como control óptimo, control multivariable, y control con restricciones.

El control predictivo no es una estrategia de control específica, sino que trata más bien de un campo amplio de métodos de control desarrollados en torno a ciertas ideas comunes. Las ideas que aparecen en mayor o menor medida en controladores predictivos son básicamente:

- Uso explícito de un modelo para predecir la salida del proceso en instantes de tiempo (horizonte). Se considera un modelo en tiempo continuo para describir el comportamiento del sistema, y para el cálculo de la ley de control se utiliza un modelo en tiempo discreto (se realiza en instantes de muestreo)
- Cálculo de las señales de control minimizando una función objetivo (función de costo)
- Uso de ventana de tiempo, de forma que en cada instante el horizonte se vaya desplazando hacia el futuro, lo que implica aplicar la primer señal de control en cada instante y desechar el resto, repitiendo el cálculo en cada instante de muestreo.

2.2.3 Elementos

1. *Modelo de predicción*: es el modelo matemático que describe el comportamiento esperado del sistema. Puede ser lineal, en tiempo continuo o en tiempo discreto (más empleado), en variables de estado o en variables de salida. El espacio temporal en el que se considera la respuesta futura de la salida del proceso para el cálculo de la señal de control se denomina *horizonte de predicción*, y se denota por H_p . Las predicciones de la variable controlada en k instantes de muestreo en adelante con datos hasta el instante $k + H_p$ serán

$$\hat{y}(k + 1 | k), \dots, \hat{y}(k + H_p | k)$$

y se calculan con información de los valores pasados de las variables manipuladas y los

valores presentes y pasados de las variables controladas del proceso como se muestra en la figura 2.2.

2. *Función de costo*: es la función que indica el criterio que se pretende optimizar al calcular la señal de control. Usualmente se suele considerar un horizonte de control $H_u \leq H_p$, tal que a partir de dicho horizonte se considera que la señal de control será constante.

$$V(k) = \sum_{i=H_w}^{H_p} \|\hat{z}(k+i|k) - r(k+i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta\hat{u}(k+i|k)\|_{R(i)}^2$$

donde u es la secuencia de señales futuras y r es la secuencia correspondiente a la trayectoria de referencia futura (si se desconoce se supone igual a la referencia en el instante actual). El objetivo del control predictivo es obtener en cada instante de muestreo la secuencia de entradas óptimas de control \hat{u} admisibles que minimicen V .

Las matrices de ponderación del funcionamiento de la salida $Q_{(i)}$ y del incremento de control $R_{(i)}$ son dos parámetros muy importantes en el diseño. Estos juegan un papel importante en la determinación de la estabilidad y funcionamiento del sistema. La matriz $R_{(i)}$ contiene los incrementos de control y ayuda a mantener las acciones de las entradas de control sin acotaciones, haciendo que el resultado de las acciones de control sean suaves. La matriz $Q_{(i)}$ ayuda a que no sean violadas las restricciones de las salidas.

3. *Estrategia de horizonte deslizante*: consiste en aplicar sólo el primer valor de secuencia calculada \hat{u} , $\hat{u}(k|k)$, descartando el resto de la secuencia. En el instante siguiente $k+1$ se repite el cálculo y se aplica sólo el primer valor de la secuencia óptima resolviéndose un nuevo problema de optimización, así el horizonte de predicción se va deslizando a lo largo del tiempo. Esta técnica nos ayuda a incorporar una realimentación del sistema imponiendo cierta robustez.

En general el H_p y H_u y el parámetro de ventana (H_w), junto con los pesos de ponderación $Q_{(i)}$ y $R_{(i)}$, y la referencia de la trayectoria $r(k+i)$, todas estas afectan el comportamiento de la planta y el control predictivo en lazo cerrado.

En la figura 2.2 se muestra la forma en la que opera el control predictivo, tomando como tiempo actual k , y sustituyendo la trayectoria de referencia $r(t)$ en un horizonte de predicción H_p . Se puede visualizar el efecto del horizonte de control H_c en la acción de control \hat{u} .

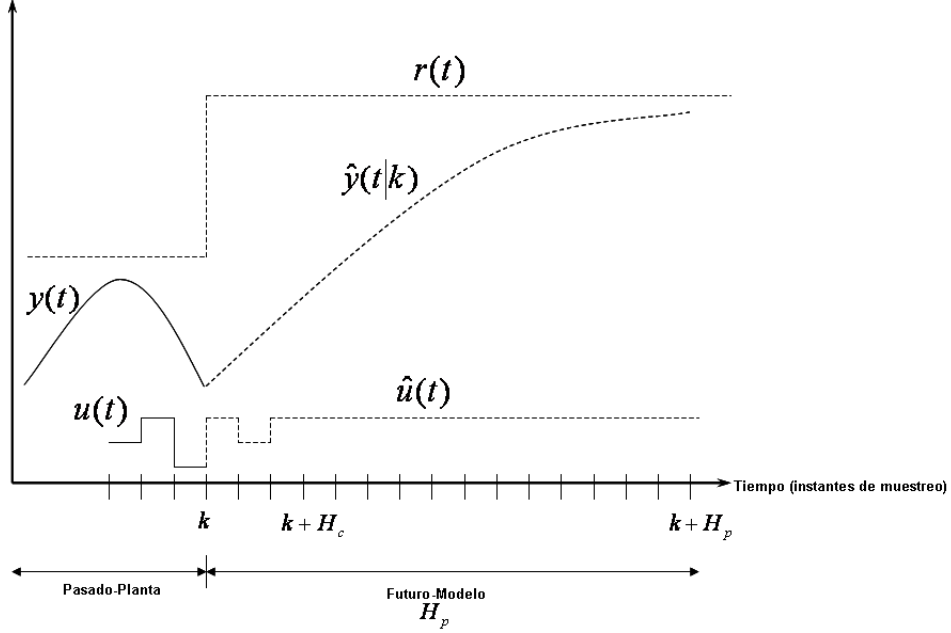


Figura 2.2: Idea básica del control predictivo

4. *Restricciones*: La definición de las restricciones nos da los límites sobre las entradas y salidas. Una de las habilidades, por así decirlo, del control predictivo es exactamente la de incluir dichas restricciones en la formulación del problema. Estas corresponden normalmente a las restricciones en la entrada, en la razón de cambio de la entrada y salidas medibles respectivamente.

Se supone que las restricciones sobre los horizontes de predicción y control tienen la siguiente forma :

$$Evec(\delta\hat{u}(k|k), \dots, \delta\hat{u}(k + H_u - 1|k), 1) \leq vec(0) \quad (2.2.1)$$

$$Fvec(\hat{u}(k|k), \dots, \hat{u}(k + H_u - 1|k), 1) \leq vec(0) \quad (2.2.2)$$

$$Gvec(\hat{z}(k + H_w|k), \dots, \hat{z}(k + H_p|k), 1) \leq vec(0) \quad (2.2.3)$$

E , F , G son matrices de dimensión conveniente. Podemos usar las restricciones para representar una posible velocidad de cambio en la señal de control(2.2.1), límites en la señal de control (2.2.2) y restricciones sobre las variables controladas (2.2.3)[2]

2.2.4 Estructura

Los principales componentes del control predictivo son el modelo de predicción y el optimizador. Se hace uso de un modelo para predecir las salidas futuras del proceso, basándose en las señales futuras de control propuestas. Estas señales son calculadas por el optimizador teniendo en cuenta la función de costo (donde aparece el error de seguimiento futuro) así como las restricciones. Por tanto, el modelo juega un papel decisivo en el controlador. El modelo a elegir debe de ser capaz de captar todos los aspectos para describir la dinámica del proceso y así poder predecir las salidas futuras. Al mismo tiempo, el modelo debe ser sencillo de usar y fácil de comprender.

El optimizador es otra parte fundamental de la estrategia pues proporciona las acciones de control futuras.

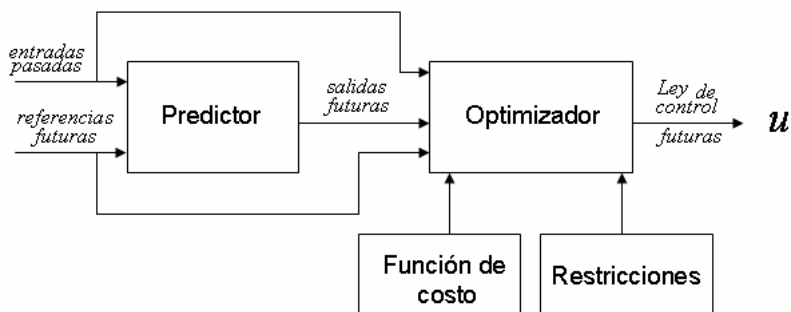


Figura 2.3: Estructura básica del control predictivo

2.3 Control tolerante a fallas

2.3.1 Modelo de fallas

El modelo de falla es importante, pues es en base a estos modelos como se desarrollan los algoritmos para el diagnóstico y la reconfiguración del sistema. Consideremos como una falla a cualquier cambio en el comportamiento de alguno de los componentes del sistema (desviación no permitida de alguna de sus propiedades o parámetros característicos) de manera que éste ya no pueda satisfacer la función, para la cual ha sido diseñado [13]. Esta definición de falla es muy general. De forma práctica hace falta aterrizar estas ideas de manera más específica. En general una falla puede ser catalogada como aditiva o como multiplicativa, dependiendo la forma en la que se hace presente en el modelo.

En este trabajo se consideran dos tipos de fallas que pueden actuar sobre el sistema:

1. Falla aditiva.

Partiendo de un sistema nominal de la siguiente forma:

$$\Sigma = \begin{cases} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{cases}$$

la falla aditiva se presenta a un determinado instante de tiempo, quedando el modelo del sistema con falla aditiva como:

$$\Sigma_a = \begin{cases} \dot{x}_a &= Ax_a + Bu + Ff \\ y_a &= Cx + Du \end{cases}$$

Este tipo de falla actúa como una entrada adicional al sistema como se ve en Σ_a , donde el vector falla aditiva, f , en general engloba el producto de cambios de parámetros multiplicado por la entrada y los estados. Sin embargo, esto no es discutido más.

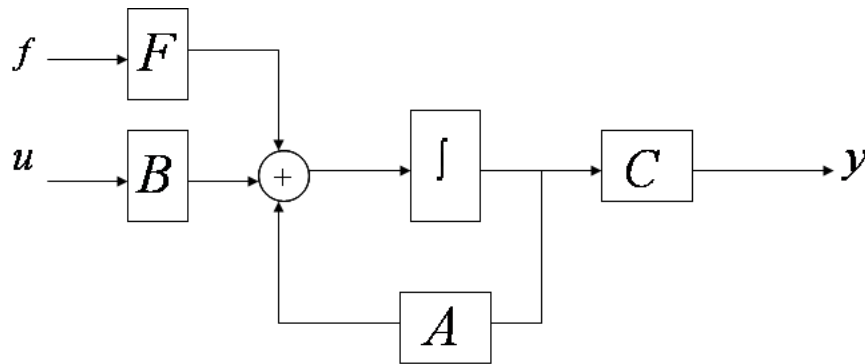


Figura 2.4: Sistema nominal con falla aditiva

En la Figura 2.4 se muestra el esquema de como se presenta y considera la falla aditiva, la cual actua a un instante determinado.

2. Falla Multiplicativa.

Considerando el sistema nominal Σ , fallas pueden manifestarse a un determinado instante de tiempo, como el caso de la falla multiplicativa, que se manifiesta como un cambio en el valor numérico de los parámetros de las matrices A , B y C , respectivamente del sistema nominal, cambiando del sistema nominal (Σ) a un sistema de la siguiente forma:

$$\Sigma_m = \begin{cases} \dot{x}_m &= (A_0 + \Delta A)x + (B_0 + \Delta B)u \\ y_m &= (C_0 + \Delta C)x \end{cases}$$

donde ΔA , ΔB y ΔC representan el cambio de las matrices.

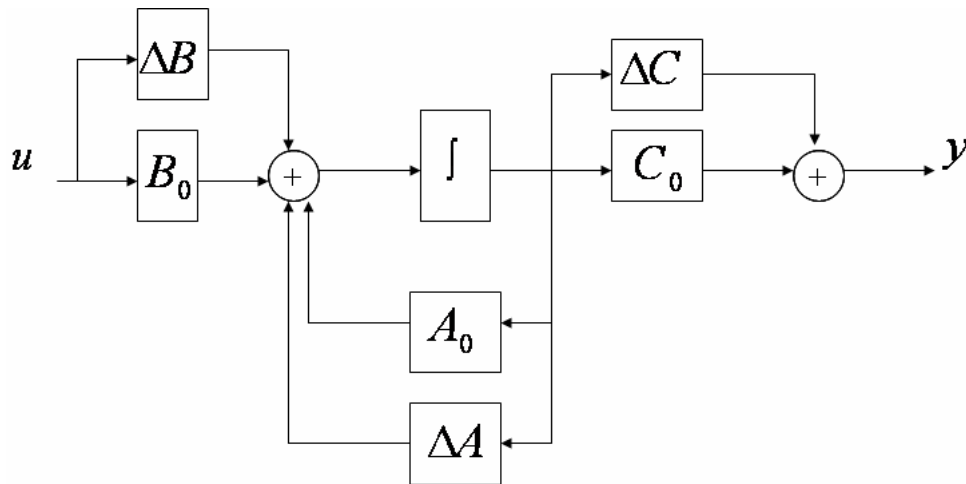


Figura 2.5: Sistema nominal con falla multiplicativa

El esquema de la figura 2.5 nos muestra como una falla multiplicativa se manifiesta sobre el sistema nominal. Al igual que en la aditiva esta se considera que actúa en un instante determinado.

2.3.2 Diagnóstico de fallas

En el apartado anterior se describieron los modelos de las fallas que se pueden manifestar en el sistema nominal. Por medio de un análisis y teniendo en cuenta las mediciones disponibles y las fallas que se deseen diagnosticar, lo importante ahora es obtener la información de éstas diseñando un sistema de diagnóstico, el cual, no solo deberá detectar y aislar las fallas sino también estimar su tamaño (cuantificación).

El método de detección de falla a utilizar esta basado en el uso de observadores. El diagnóstico de fallas consiste en tres pasos [14]:

- a) Generación de residuos
- b) Evaluación de residuos
- c) Identificación de la falla

La generación de residuos es el proceso de generar señales que sólo dependen de la falla, es decir, que no se ven afectados por la entrada. Idealmente los residuos son cero si no hay fallas y diferentes de cero cuando hay fallas. Sin embargo en la práctica, el residuo puede no ser cero debido al efecto de condiciones iniciales o de incertidumbre por lo que para evitar una falsa alarma se utiliza un valor de umbral. El segundo paso es la evaluación, es decir, la extracción de la información sobre las fallas. Generalmente se utiliza una norma como función de evaluación.

Los métodos de diagnóstico basados en observadores se refieren a la generación de residuos. Cabe mencionar que la posibilidad de localizar una falla, así como la facilidad para evaluarla queda determinada en buena medida por el proceso de generación de residuos, por lo que es importante considerar esta parte con seriedad.

2.3.3 Generación de residuos

Como se mencionó, la generación de residuos será realizada mediante observadores. Los tipos de observadores a utilizar son:

- Observador con entradas desconocidas (UIO por sus siglas en inglés)
- Observador de Luenberger con estado extendido

Observador con entrada desconocida

Este tipo de observador fue desarrollado para poder estimar el estado a pesar de que la información sobre las entradas no este disponible. En el contexto de detección de fallas la propiedad de estimación es utilizada para lograr que los residuos obtenidos sean insensibles a ciertas fallas y así lograr que con la detección también se alcance la localización.

A diferencia del concepto UIO utilizado para estimación de estado, para diagnóstico, es decir, para generación de residuos se requiere hacer una estimación de la salida. Esto da pie a

relajar las condiciones de existencia.

La idea básica detrás del UIO es la siguiente: se obtiene una representación de estado en la cual las entradas desconocidas estén asociadas a un estado solamente (cada entrada desconocida asociada a un estado). Las ecuaciones de los estados que están directamente conectados con las entradas desconocidas son descartadas. Los estados eliminados requeridos en el resto de las ecuaciones de estado tienen que ser obtenidas de las salidas del sistema, y agregados a las ecuaciones. El subsistema resultante se encuentra libre de entradas desconocidas. El generador de residuos correspondiente se logra mediante el diseño de un observador de la nueva salida para este subsistema [3].

Aún y cuando la versión original fue propuesta en el contexto de fallas aditivas, el UIO para diagnóstico de fallas puede ser utilizado para obtener generadores de residuos insensibles a cualquier entrada desconocida, incluyendo fallas multiplicativas. El éxito depende de la forma en que se modelen las fallas y de las condiciones de existencia del UIO.

A continuación se presentará de forma breve el desarrollo para diseño de UIO para detección de fallas.

Considerar un sistema lineal

$$\dot{x} = Ax + Bu + E_1 f_1 + E_2 f_2 \quad (2.3.1)$$

$$y = Cx \quad (2.3.2)$$

donde f_1 y f_2 corresponde al vector de falla aditiva y multiplicativa respectivamente.

Primero se transforma el sistema original (2.3.1) para separar el efecto de la falla. Obtenemos una descomposición de valores singulares (SVD) de E_1 , es decir, $E_1 = USV^T$ y definiendo

$T = u^T$, con $u^T u = I$. Aplicando la transformación del estado $z = Tx$ para el sistema (2.3.1) resulta:

$$\begin{aligned} z &= T_1 A_a T_1^{-1} z + T_1 B_a u + T_1 E_1 f_1 + T_1 E_2 f_2 \\ y &= C_a T_1^{-1} z \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Considerando ahora las siguientes particiones:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}; \quad T_1 A_a T_1^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$T_1 B_a = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}; \quad C_a T_1^{-1} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \end{bmatrix}$$

$$T_1 E_1 = \begin{bmatrix} E_{11} \\ 0 \end{bmatrix} \quad T_1 E_2 = \begin{bmatrix} E_{21} \\ E_{22} \end{bmatrix}$$

Como resultado de la transformación, se tiene dos subsistemas: uno con la conexión directa a las fallas indeseables y otro libre de estas, como puede ser apreciado en la siguiente ecuación:

$$z_1 = A_{11} z_1 + A_{12} z_2 + B_1 u + E_{11} f_1 + E_{21} f_2 \quad (2.3.4)$$

$$z_2 = A_{21} z_1 + A_{22} z_2 + B_2 u + E_{22} f_2 \quad (2.3.5)$$

$$y = C_1 z_1 + C_2 z_2 \quad (2.3.6)$$

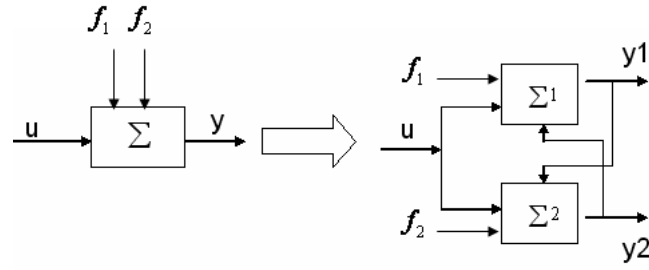


Figura 2.6: Desacoplo del sistema

Con la finalidad de obtener los estados z_1 de la salida y así poder tener un sistema completamente desacoplado de f_1 , se considera una nueva transformación aplicada a la salida:

$$u_2^T y = \Sigma_2 V_2^T z_1 + u_2^T C_2 z_2 \quad (2.3.7)$$

donde $C_1 = u_2 \Sigma_2 V_2^T$. Tomando en cuenta que

$$\Sigma_2 V_2^T = \begin{bmatrix} \bar{C}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

se puede proponer una partición de la ecuación de salida como sigue:

$$\begin{bmatrix} y_1^* \\ y_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_1 \\ 0 \end{bmatrix} z_1 + \begin{bmatrix} \bar{C}_2 1 \\ \bar{C}_2 2 \end{bmatrix} z_2$$

Ahora, obteniendo z_1 de la partición de la ecuación de salida, y sustituyendo en (2.3.4), el subsistema 2 deseado viene dado de la forma:

$$\begin{aligned} z_2 &= (A_{22} - A_{21}(\Sigma_2 V_2^T)^{-1} C_{21}) z_2 + B_2 u + A_{21}(\Sigma_2^T)^{-1} y_1^* \\ y_2^* &= C_{22} z_2 \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

Finalmente, con la ayuda de un observador Luenberger, se puede escribir un generador de residuo como sigue:

$$\hat{z}_2 = (\bar{A}_{22} \hat{z}_2 + B_2 u + A_{21}(\Sigma_2 V_2^T) y_1^* + L(y_2^* - C_{22} \hat{z}_2)) \quad (2.3.9)$$

$$r = y_2^* - C_{22} \hat{z}_2 \quad (2.3.10)$$

donde $\bar{A}_{22} = A_{22} - A_{21}(\Sigma_2 V_2^T) C_{21}$.

Observador con estado extendido

Esta idea de proponer un estado extendido fue utilizado con éxito en [15]. Básicamente cuando se tienen fallas aditivas y estas fallas son constantes o varían muy lentamente de tal forma que su dinámica puede ser despreciada, entonces se puede hacer el siguiente supuesto de trabajo

$$\dot{f} = 0$$

y con esto proponer un estado extendido como sigue:

partiendo del siguiente sistema con fallas aditivas

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ff \quad (2.3.11)$$

$$y = Cx \quad (2.3.12)$$

y bajo el supuesto de que $\dot{f} = 0$, considerar el estado

$$\mathbf{z} \triangleq \begin{bmatrix} x \\ f \end{bmatrix}$$

con

$$\dot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} A & F \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} z$$

Note que si (A, C) es observable, entonces

$$\begin{bmatrix} A & F \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}$$

también lo será.

El aspecto importante es que la última parte de z son justamente las fallas, obteniéndose de manera directa no solo la detección, localización sino la identificación de estas.

2.3.4 Reconfiguración

La reconfiguración es un concepto en donde una vez detectada e identificada una falla, se procede a cambiar al control con la finalidad de que el desempeño no se vea afectado. La reconfiguración corresponde al grupo de estrategias activas donde el control y sus variables medibles y manipuladas pueden cambiar. La reconfiguración permite que la estructura de la ley de control sea cambiada al manifestarse una falla. Esto va más allá de cambios dentro de la estructura del control que incluye un re-ordenamiento dinámico de la señal de entradas y salidas, es decir, se hace un rediseño automático de un nuevo control con un escenario de fallas

que reemplaza a el control nominal (el cual es descartado) [4].

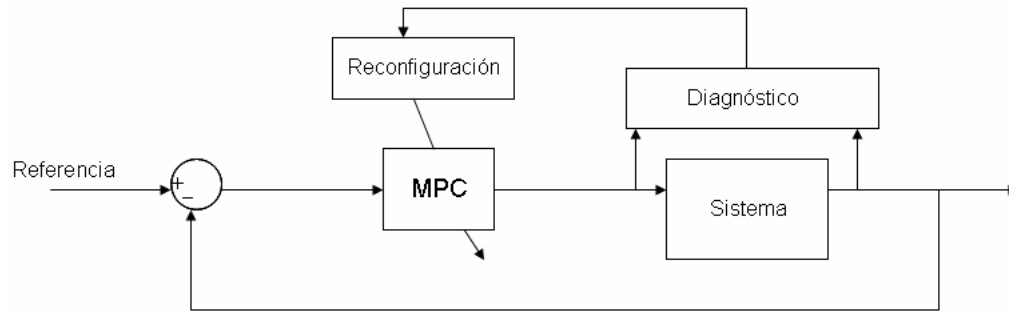


Figura 2.7: Esquema de Sistema-MPC con reconfiguración

El control predictivo presenta algunas ventajas para resolver el problema de reconfiguración con un poco de esfuerzo extra en comparación con su uso exclusivo de control [16], [17], [18]. Para el alcance de la reconfiguración del control después del diagnóstico de la falla es necesario modificar el modelo interno de la planta del controlador para reflejar la falla de la planta.

Capítulo 3

Control predictivo activo tolerante a fallas

3.1 Introducción

El control tolerante trata del diseño e implementación de sistemas de control de procesos en los que están expuestos a que se produzca un funcionamiento incorrecto, ya sea en sensores, actuadores, controladores, o componentes del proceso durante su operación. Para ello se trata de tener en cuenta a la hora de diseñar e implementar el sistema de control una situación en la que se manifiesten fallas. En este trabajo se propone un control activo, que consiste en el diagnóstico en línea de la falla, es decir, en determinar la falla, el tipo de falla, tamaño e instante de aparición y, a partir de la información obtenida, activar algún mecanismo de acomodación o reconfiguración del control, que en este caso nos enfocamos en la reconfiguración del control. Existen estrategias de control como el control predictivo como se ha mencionado, que simplemente añadiendo nuevas restricciones al problema de optimización, permite fácilmente incorporar mecanismos de tolerancia a falla [5].

Las leyes de control predictivo permiten incluir de forma fácil estrategias de control tolerante, puesto que la acción de control se determina a cada instante resolviendo un problema de optimización en un horizonte temporal (H_p) utilizando como restricción el modelo del sistema. Si dicho modelo se actualiza a partir de la información proporcionada por el sistema de diagnóstico de falla, las nuevas acciones de control se calcularán teniendo en cuenta el efecto de la falla sobre el sistema [5], [6].

Considerando el esquema del sistema con el control predictivo, modelo de las fallas, el diagnóstico de falla, así como la reconfiguración de la ley control se tiene un esquema general de un control predictivo tolerante a falla de la siguiente forma:

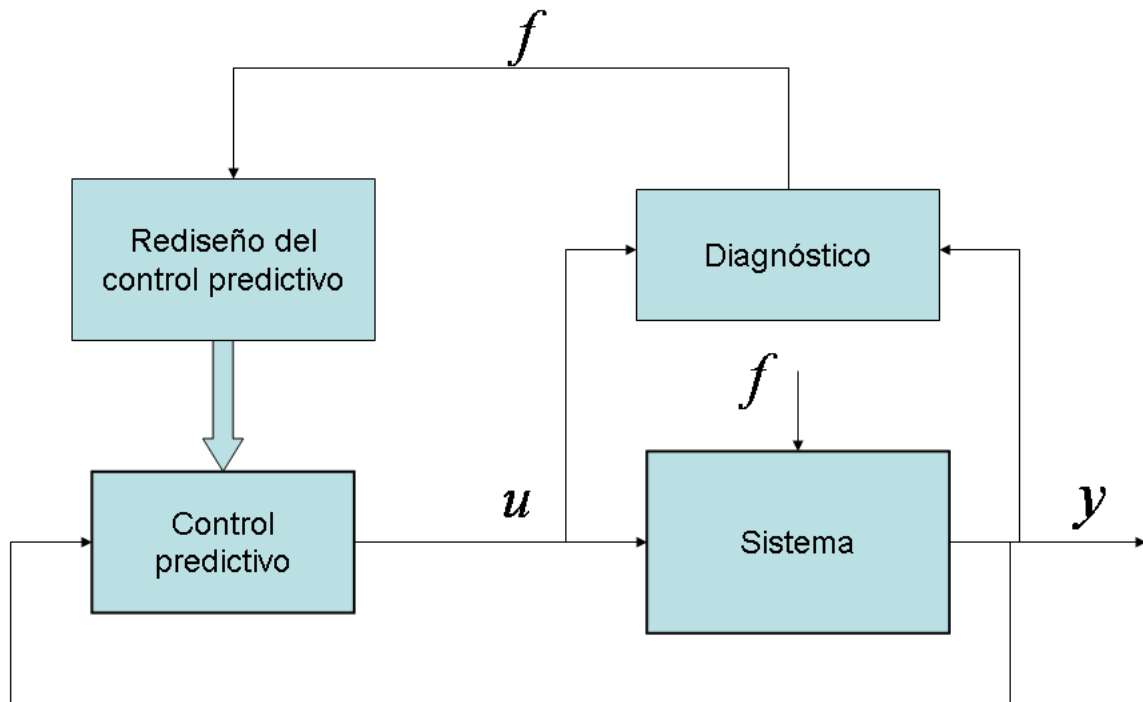


Figura 3.1: Esquema de control predictivo activo tolerante a falla

3.2 Antecedentes

Hace 20 años el control tolerante se reflejó en trabajos relacionados con el control tolerante a fallas de aviones, que en aquel tiempo se le llamaba "restructurable or self-reparing flighth control" [7], después aparece como un objetivo básico en el primer congreso de IFAC SAFE-PROCESS de 1991 y teniendo un gran desarrollo en el siglo XXI.

Entre los trabajos relacionados con el control tolerante, se tiene el control tolerante pasivo que consiste de un diseño robusto del sistema de control retroalimentado para hacerlo inmune a determinadas fallas [8]. Considerando el esquema de diagnóstico, esta el control tolerante activo, ya que con este se permite un diagnóstico en línea de la falla, es decir, se puede obtener información, usándola para hacer una acomodación de la falla o una reconfiguración según se cambie la ley o la estructura de control, respectivamente [9]. La incorporación de mecanismos de control tolerantes en el lazo de control depende fuertemente del tipo de control utilizado [10],[11].

3.3 Concepto

El concepto propuesto pretende mejorar el desempeño, lo que implica realizar una medición de desempeño para poder revisar esta posible mejora.

3.3.1 Índice de desempeño

Como el interés está en mejorar el funcionamiento del sistema, se propone que por medio de índices de desempeño podamos obtener una medición de que tanto se degrada el sistema ante la falla, comparando valores con respecto al sistema reconfigurado. Así aseguramos la efectividad del algoritmo propuesto.

Considerar el índice de desempeño definido por la integral del error al cuadrado.

$$I_1 = \int_0^t (e)^2 \quad (3.3.1)$$

Este índice nos proporciona la información del error acumulado, lo cual es justamente lo que se quiere medir. La idea es poder reducir la cantidad total de error acumulado por efecto de una falla.

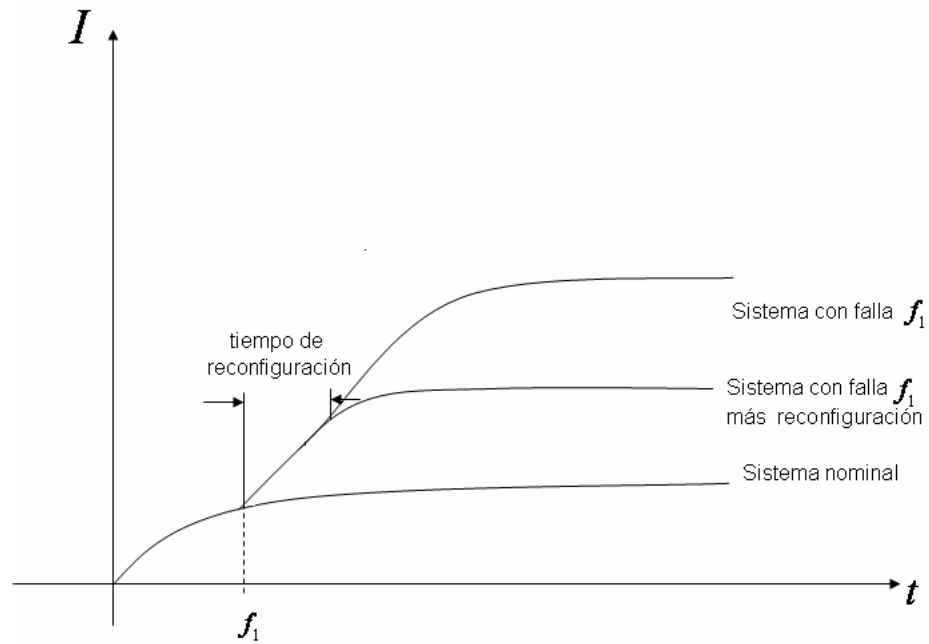


Figura 3.2: Comportamiento general de los índices de desempeño

Así obtenemos una comparación entre estos índices de desempeño, donde se trata de mejorarlo hasta donde sea posible, es decir, que el índice del sistema con control tolerante a falla tienda hacia el valor del índice nominal.

3.3.2 Propuesta

Básicamente la propuesta se basa en una reconfiguración del control predictivo. En la figura siguiente se muestra el esquema de la metodología que se considera en este trabajo de tesis para el desarrollo de la estrategia de control predictivo activo tolerante a falla.

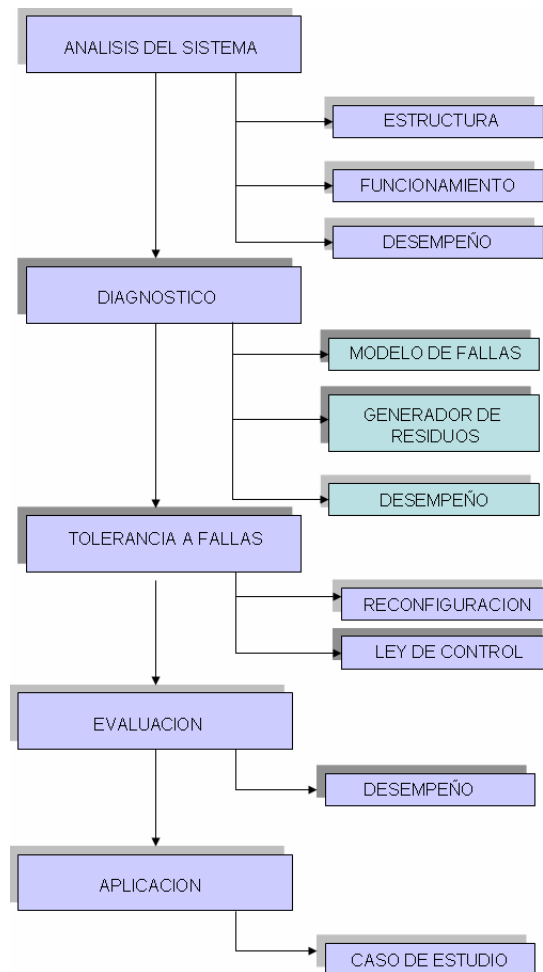


Figura 3.3: Metodología para el diseño de un control predictivo activo tolerante a fallas

Es necesario hacer un análisis del sistema, esto para conocer parámetros, estructura y como es el funcionamiento nominal del sistema (sistema con control predictivo). Sabiendo que el sistema opera adecuadamente obtenemos el índice de desempeño del sistema nominal. Después

de transcurrir cierto tiempo la falla se manifiesta, por lo que, hacemos un diagnóstico de la falla, así también obtener el índice de desempeño del sistema ante la falla. La técnica de control tolerante a fallas involucra una reconfiguración de la ley de control basándose en el uso del diagnosticador (observadores) que proveen información necesaria para realizar automáticamente los ajustes necesarios con el fin de cumplir los objetivos de control. Utilizando simulación, también el índice del sistema reconfigurado es obtenido, el sistema que llamamos tolerante a fallas. Al final tendremos mediante tres simulaciones de cada escenario los tres diferentes índices de los cuales podemos verificar la efectividad del control predictivo activo tolerante a fallas propuesto.

La información acerca de la falla se puede incluir mediante:

- Para el caso de la falla aditiva se considera a dicha falla como una entrada de perturbación medible, haciendo que el control considere el efecto de esta. Con una retroalimentación al sistema y del control predictivo se logra tener un control predictivo activo tolerante a falla aditiva.
- En el caso de la falla multiplicativa, se considera un cambio del modelo de la dinámica del sistema o proceso para reflejar cambios en la planta real al manifestarse la falla. Así el control predictivo considerará el efecto de la falla haciendo al sistema tolerante a dicha falla.

En este trabajo de tesis la propuesta queda representada por el siguiente esquema, considerando diagnóstico de la falla, modelo de la falla y reconfiguración del control predictivo.

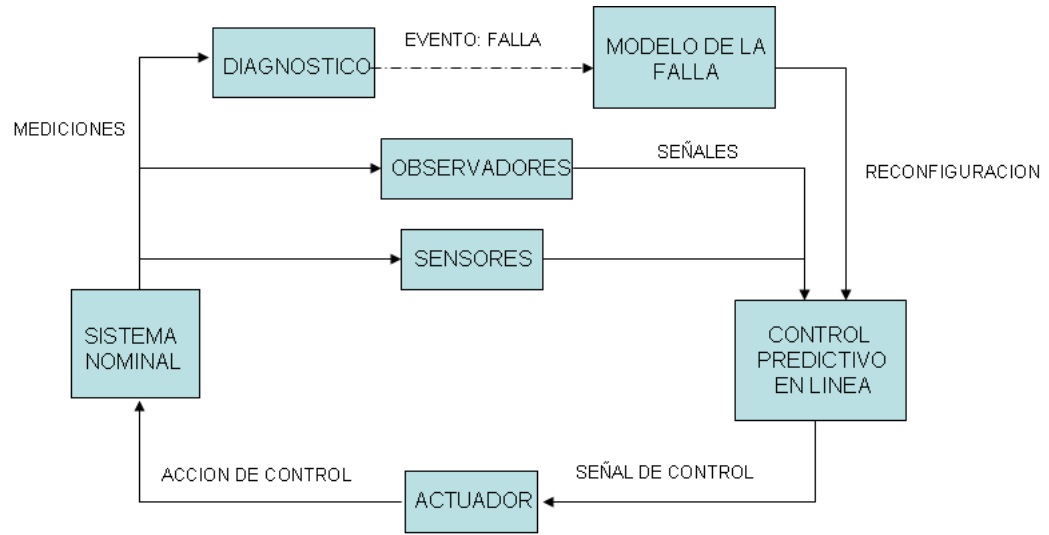


Figura 3.4: Esquema de la propuesta

Capítulo 4

Aplicación

4.1 Introducción

Recientemente se ha visto como el control predictivo puede adaptarse a la aparición de fallas. En este apartado se describe como el control predictivo tiene una implementación eficiente como un control tolerante a fallas, considerando como característica la reconfiguración del control y el uso de los observadores como se ha mencionado anteriormente; como aplicación de la propuesta se verá un caso de estudio que consiste de un modelo de avión Cessna Citation 500 [2] donde se puede aplicar y evaluar el control tolerante a falla propuesto. En esta aplicación se concluye que el control predictivo muestra ser un buen candidato para la aplicación de un control tolerante a falla para el sistema del avión, así también con los índices de desempeño se verifica la efectividad del algoritmo propuesto mediante resultados de simulaciones.

4.2 Modelo de avión Cessna Citation 500 con control predictivo (sistema nominal)

El modelo a utilizar es el Cessna Citation 500 linealizado sobre una altitud de 5000 m y una velocidad de 128.2m/seg. La entrada del sistema es el ángulo de elevación (grados) y las salidas son el ángulo de cabeceo (grados), la altitud (m) y la velocidad de cambio de altitud (m/s).

Partiendo de

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \tag{4.2.1}$$

se tiene la representación en variables de estado del sistema:

$$A = \begin{bmatrix} -1.2822 & 0 & 0.98 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -5.4293 & 0 & -1.8366 & 0 \\ -128.2 & 128.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0.3 \\ 0 \\ -17 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -128.2 & 128.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Existen una serie de restricciones impuestas por el diseño del equipamiento y que no pueden ser excedidas, como son el ángulo de elevación que permanezca entre ± 15 grados y su velocidad de cambio entre ± 30 grados. Otras restricciones menos críticas son las relacionadas con el confort de los pasajeros, donde para ello el ángulo de cabeceo debe encontrarse entre ± 20 grados. Las referencias a seguir por las distintas salidas del sistema son de 0 grados, 400m y 0m/s respectivamente para el ángulo de cabeceo, la altitud y su velocidad de cambio. El

período de muestreo del sistema se ha escogido de 0.5 segundos y los parámetros de control se han establecido como sigue: $H_p = 10$ (5seg), $H_u = 3$ (15seg), $H_w = 1$, $r = [0 \ 400 \ 0]$, $Q = I_3$, $R = 1$.

Con la utilización del ambiente Matlab/Simulink, haciendo uso del toolbox del Control Predictivo (Model Predictive Control Toolbox) ([12]) podemos hacer fácil la implementación de un control predictivo, con tan solo conocer el modelo del sistema, restricciones y parámetros del control. Donde la representación del sistema nominal (sistema con control predictivo) queda de la siguiente manera:

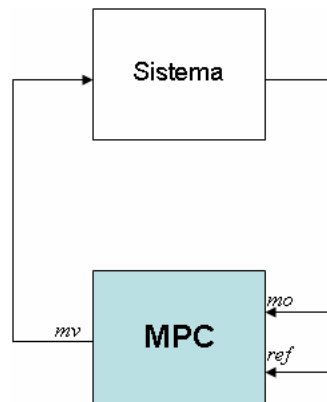


Figura 4.1: Sistema nominal con control predictivo

En la figura se muestra el bloque del control predictivo utilizado gracias a la herramienta del toolbox de matlab, en el cual a la entrada del control se tienen las salidas medibles del sistema nominal y la referencia respectivamente. En la salida se encuentran las variables medibles, que van a la entrada del sistema (planta), dicha entrada es predicha por el control, requerida para que lleve al sistema a una referencia deseada, y se cumpla el objetivo de control.

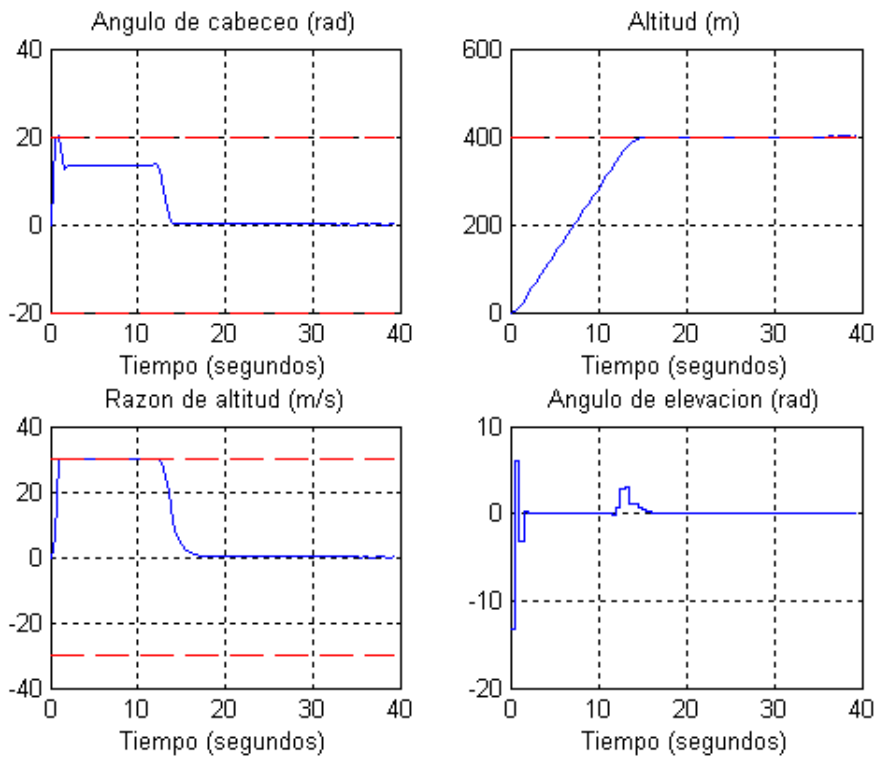


Figura 4.2: Respuesta al sistema nominal

En la figura 4.1 se puede ver cómo la variable dominante es la altitud, de manera que durante el estado transitorio tanto el ángulo de cabeceo como la velocidad de cambio de altitud se alejan de sus correspondientes referencias hasta que la altitud alcanza los 400m. Una vez que la altitud ha alcanzado su consigna, el resto de las variables hacen lo correspondiente.

Se puede observar cómo la restricción del ángulo de cabeceo solamente se activa durante un pequeño instante del tiempo transitorio, y sin embargo la restricción impuesta a la velocidad de cambio de altitud permanece activa hasta que la altitud alcanza los 400m. El comportamiento observado es semejante al realizado por un piloto automático convencional. Cuando se produce un cambio de altitud se realiza un cambio en el ángulo de cabeceo, y éste se mantiene constante hasta que la altitud alcanza su valor de referencia. Así es como tenemos un sistema con control

predictivo funcionando adecuadamente cumpliendo su objetivo de control.

Debemos de considerar el índice de desempeño del sistema nominal, ya que este será la referencia para los otros índices que se verán más adelante, correspondientes al sistema con el algoritmo propuesta al manifestarse una falla.

Índice desempeño	Sistema nominal
ln(y1)	.3778
ln(y2)	407210
ln(y3)	5747.1

Figura 4.3: Índice de desempeño del sistema nominal

4.3 Aplicación del Control Predictivo Activo Tolerante a Fallas

Para la aplicación del algoritmo propuesto se requiere conocer el comportamiento del sistema nominal, es decir, que este opere de forma adecuada antes de manifestarse una falla, así como se mostro en la Figura. Ahora bien, para la implementación de las fallas, como se dijo anteriormente serán dos las fallas a manifestarse, estas presentándose una a la vez. Al igual que en el sistema nominal, nos ayudaremos del toolbox de Matlab para la implementación.

Primero veremos el caso en el que se manifiesta la falla aditiva a un tiempo determinado (*20seg*), considerando un factor $\alpha = 0.5$ como la falla. Para conocer información acerca de la falla, nos ayudaremos del observador de entradas desconocidas. Del cual el sistema aumentado a utilizar queda de la siguiente manera:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} E_2 \\ 0 \end{bmatrix} f_2$$

donde

$$E_1 = \begin{bmatrix} -0.3 \\ 0 \\ -17 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 128.2 \end{bmatrix}$$

Este sistema debe ser observable, para poder implementar el generador de residuos basado en UIO. E_1 y E_2 corresponden a la falla aditiva y multiplicativa respectivamente, donde E_1 corresponde a los valores afectados por la falla aditiva. Como se puede ver en el caso de E_2 se considera el mismo valor de parámetro, donde éste corresponde a el valor afectado cuando se manifiesta la falla multiplicativa, afectando $A(4,1)$, $A(4,2)$ y $C(3,1)$, $C(3,2)$ del sistema nominal.

Ahora bien, basados en la información anterior podemos diseñar nuestro generador de residuos basado en UIO para posteriormente implementarlo haciendo un esquema completo de lo que es el control predictivo activo tolerante a fallas. La información obtenida nos ayuda a saber cual es el factor α que esta afectando al sistema.

A continuación se verá como queda el esquema del sistema con el algoritmo propuesto.

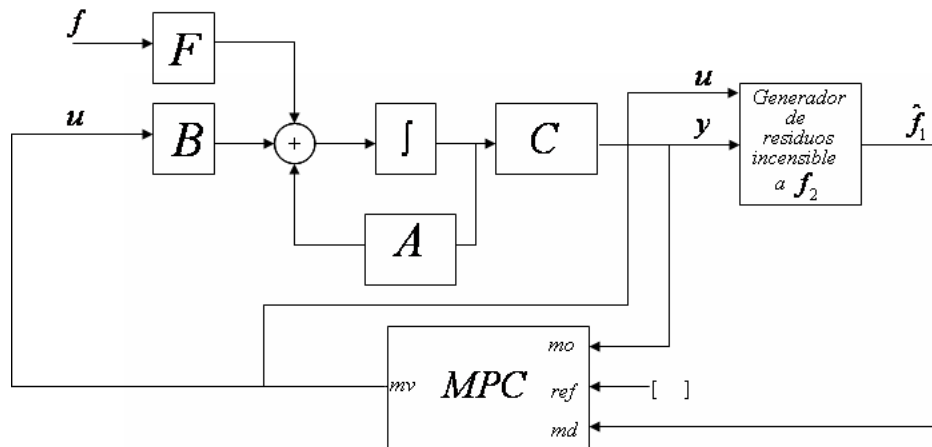


Figura 4.4: Sistema nominal con falla aditiva y el control predictivo activo tolerante a falla

Como se puede ver es sencillo al manifestarse dicha falla hacer un control tolerante a falla, poniendo la falla como una perturbación medible a la entrada del bloque de control predictivo, retroalimentándola a la entrada del sistema, es para que el control predictivo considere el efecto de la falla, haciendo que el sistema recobre su desempeño.

Ahora, bien para el caso de la aparición de la falla multiplicativa, sabiendo que ésta es un cambio en los parámetros del sistema, se hará un nuevo sistema con falla multiplicativa el cual el control predictivo tomará como modelo interno, es decir, que se estará considerando el efecto de dicha falla. Considerando para la falla un 10 por ciento menos de su valor nominal (afectando los parámetros de $A(4,1)$, $A(4,2)$ y $C(3,1)$, $C(3,2)$ del sistema nominal).

4.4 Resultados

Como resultado obtenemos los diferentes índices de desempeño, correspondientes al sistema nominal, sistema con falla aditiva y multiplicativa, así como los índices del sistema con el control predictivo activo tolerante a falla. Así podemos observar como el algoritmo propuesto, efectivamente hace que el sistema ante falla recobre hasta donde sea posible el desempeño del sistema.

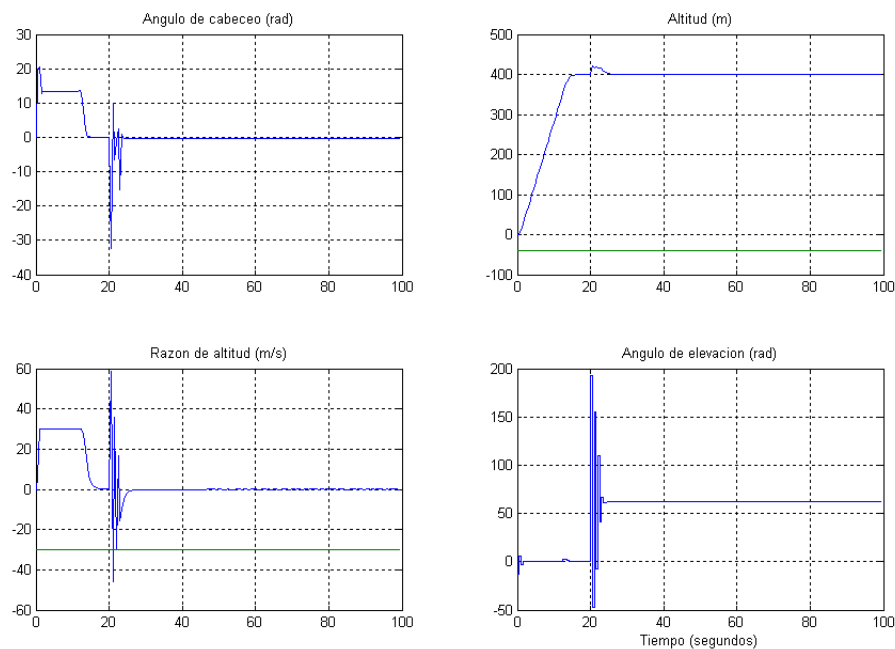


Figura 4.5: Simulación del sistema con falla aditiva aplicando el control predictivo activo tolerante a falla

Indice de desempeño	Falla Aditiva	Reconf. F.A.	Sistema Nominal
$I(y_1)$	2,915	0,9348	0,3778
$I(y_2)$	4,711,800	409,060	407,210
$I(y_3)$	42,443	16,777	5,747.1

Figura 4.6: Índice de desempeño del sistema nominal con falla aditiva y el algoritmo propuesto

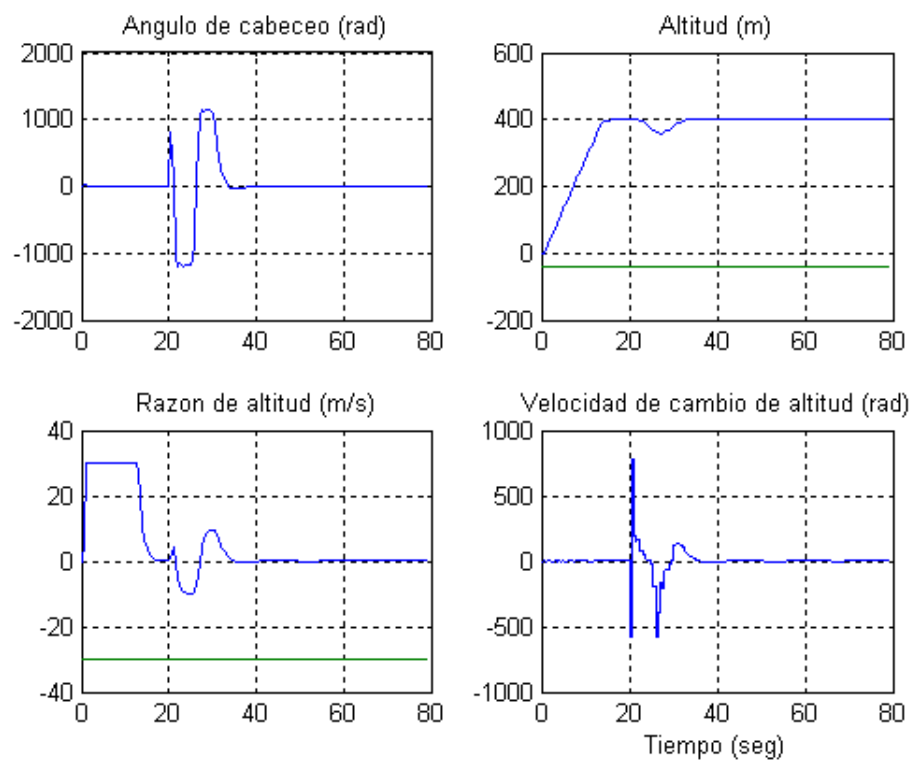


Figura 4.7: Simulación del sistema con falla multiplicativa y el algoritmo propuesto

Índice de desempeño	Falla Multiplicativa	Reconf. F.M.	Sistema Nominal
$I(y_1)$	104,140	0.5003	0.3778
$I(y_2)$	1.7554×10^8	410,280	407,210
$I(y_3)$	7.3252×10^{11}	6,008.7	5,747.1

Figura 4.8: Índice de desempeño del sistema nominal con falla multiplicativa y el algoritmo propuesto

Como se puede ver el algoritmo propuesto muestra ser efectivo, al recobrar el desempeño del sistema hasta donde sea posible. Gracias a los índices de desempeño obtenidos en cada caso, se puede ver con valores el resultado eficaz del algoritmo propuesto.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones

Se puede concluir que el control predictivo es un buen candidato para la aplicación de un control tolerante a falla, ya que tiene la característica de ser robusto en forma natural. Esto es por que el control predictivo utiliza la técnica de horizonte deslizante que consiste en aplicar las acciones obtenidas durante un período de tiempo en el cual se muestra el estado del sistema y se resuelve un nuevo problema de optimización.

Aún y considerando las características del control predictivo, se pueden presentar algunas fallas provocando que el objetivo de control no se recupere oportunamente o que se pierda exponiendo al proceso en una situación de alto riesgo. Para evitar este tipo de acontecimientos se propone un algoritmo en esta tesis que es el control predictivo activo tolerante a fallas. Donde éste mostró tener un resultado eficaz mejorando hasta donde se pudo el desempeño de dicho sistema. Con la obtención de los diferentes índices de desempeño podemos ver en forma sencilla como los valores del sistema con el control predictivo activo tolerante a fallas tienden hacia los valores de desempeño del sistema nominal, es decir, mejorando el desempeño ante la presencia de una falla.

5.2 Contribuciones de la tesis

En este apartado se van a exponer, a modo de conclusión, las contribuciones de la tesis.

En esta tesis:

1. Se propone un concepto nuevo para hacer el control predictivo tolerante a fallas. El nuevo concepto reúne diferentes herramientas y las presenta de forma armoniosa.
2. La consideración en la aplicación de fallas aditivas y de fallas multiplicativas de forma simultánea es también una situación casi no discutida en la literatura. En este trabajo se discute mediante simulaciones.
3. La consideración del MPC para realizar control activo tolerante a fallas no es una novedad como concepto, pero la forma en la que se realizó aquí sí lo es. En este caso no se utilizó identificación explícitamente.
4. Se propone el uso de indicadores de desempeño para medir la calidad del control tolerante a fallas. Se mostró vía este medio, como la propuesta resulta viable, al menos para los casos simulados.
5. Los resultados obtenidos de las simulaciones mostraron que a ciertas fallas el control propuesto no cumple con el objetivo. Esto debido a que la magnitud de la falla fue muy severa.

5.3 Trabajos futuros

Como futuros desarrollos se proponen las siguientes ideas. En primer lugar se plantea la extensión de los análisis realizados con un tipo de falla diferente a las propuestas. Una línea abierta es el análisis de la estabilidad del sistema considerando la estrategia propuesta. También queda la implementación en algún otro sistema como caso de estudio.

Bibliografía

- [1] Vicenç Puig, Joseba Quevedo, Teresa Escobet, Bernardo Morcego y Carlos Ocampo. "Control tolerante a fallos: Fundamentos y diagnóstico de fallos". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, Vol. 1, Núm. 1, Abril 2004
- [2] J.M. Maciejowski, " Predictive Control with Constraints," *Prentice Hall*, 2001.
- [3] M. Hou, and Muller, "Fault detection and isolation observers," *International Journal of Control,P.C.*, Vol. 60, No. 5, 827-846,1994
- [4] Jan Lunze, Jan Richter, "Control Reconfiguration: Survey of Methods and Open Problems," *Institute of Automation and Computer Control, Bochum,Ruhr University,Germany*,Junio 27, 2006
- [5] J. M. Maciejowski, "Predictive methods in fault-tolerant control," *Control of Complex Systems(K.J Astrom et al., Ed.)*.Springer-Verlag, 2001
- [6] J. M. Maciejowski y Ramirez, "Controlling systems in the face of faults," *IEEE Colloquium on Fault Diagnosis and Control System Reconfiguration*, 1993
- [7] Y. Zhang y J. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems," *Proceedings IFAC SAFEPROCESS*,pp. 265-276, 2003
- [8] R. J. Patton, "Fault-tolerant control:the 1997 situation," *Proceedings of IFAC Symposium on SAFEPROCESS*, pp. 1033-1055,1993
- [9] M. Blanke, M. Lunze J. Kinnaert y M. Staroswiecki, "Diagnosis and fault-tolerant control," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2003
- [10] V. Puig y J. Quevedo, "Fault-tolerant pid controllers using a passive robust fault-detection approach," *Control Engineering Practice* 9(11), 1221-1234
- [11] J. M. Maciejowski, "Predictive methods in fault-tolerant control," *Control of Complex Systems(K. J. Astrom et al., Ed.)*, Springer-Verlag
- [12] "<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/mpc/mpccontrollerblock.html>"

- [13] J. Chen and R. J. Patton, "Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems", *Kluwer Academic Publishers, Norwell, MS, 1999*.
- [14] P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy (a survey and some new results)". *Automatica*, 26(3):459-474, 1990.
- [15] Alcorta-Garcia Efrain, de Leon-Canton Plinio, Sotomayor Oscar A. Z., Odloak Darci, "Actuator and Component Fault Isolation in a Fluid Catalytic Cracking Unit" *IFAC World Congress, 2005*
- [16] Kerrigan, E.C., A. Bemporad, D. Mignone, M. Morari and J.M. Maciejowski, "Multiobjective prioritisation and reconfiguration for the control of constrained hybrid systems." *In: Proceedings of the 2000 American Control Conference (ACC00). Vol. 3. pp. 1694-1698, 2000*
- [17] Tsuda, K., D. Mignone, G. Ferrari-Trecate and M. Morari, "Reconfiguration strategies for hybrid systems." *In: Proceedings of the 2001 American Control Conference (ACC01). Arlington, VA, USA., 2001*
- [18] Maciejowski, J.M. and C.N. Jones, "MPC fault-tolerant flight control case study: Flight 1862." *In: Proceedings of the SAFEPROCESS 2003: 5th Symposium on Fault Detection and Safety for Technical Processes. number M1-C1. IFAC. Washington D.C., USA. pp. 121-126, 2003*