



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO DE UN CONTROL COORDINADO PARA UN CICLO COMBINADO HÍBRIDO

AUTOR: Alejandro Torres Solano

TUTOR: Jesús Andrés Picó Marco

Curso Académico: 2015-16

Agradecimientos

A mi tutor Jesús Picó, que sin él no habría podido realizar este trabajo
A mis padres, que siempre han estado predispuestos, incluso en los momentos más difíciles
A mis compañeros, que me han ayudado hasta el final

Gracias

Resumen

Recientemente, las centrales de ciclo combinado están cogiendo fuerza en el mercado de la producción de electricidad, ya que mejoran las antiguas y poco eficientes centrales térmicas, añadiendo un ciclo de vapor a continuación del de gas. No obstante, no ocurre lo mismo con aquellas centrales híbridas que integran un ciclo solar con almacenamiento al ciclo combinado. Estas son conocidas con el nombre de ciclo combinado híbrido, y ofrecen una posibilidad de producción eléctrica mucho más flexible y sostenible que las anteriores. Su único gran inconveniente es su complejidad, ya que en ellas intervienen tres sistemas que deben ser controlados de forma coordinada: el ciclo combinado, el ciclo solar y el almacenamiento. Por lo tanto, resulta necesario implementar un control coordinado que logre un funcionamiento acoplado entre las distintas partes de estas centrales.

En este trabajo se desarrollarán dos tipos de controles coordinados a partir del modelo dinámico de una central del tipo ciclo combinado híbrido: un control predictivo y un control H_∞ . Por un lado, el control predictivo se abordará como un problema de optimización, ya que buscará la mejor solución al mismo en cada instante de tiempo, para lograr las respuestas deseadas. Por otro lado, el control H_∞ se planteará como un problema de regulación clásico de la automática, con el que se buscará poder ajustar libremente las respuestas frecuenciales de cada función de transferencia que compone el sistema multivariable.

Palabras clave Ciclo Combinado Híbrido (HCC), Turbina de Gas (TG), Turbina de Vapor (TV), Sistema, Subsistema, Coordinador, Acomplamiento, Control MPC, Control H_∞ , Simulación, Representación de estado, Función de transferencia, Modelo lineal/no lineal.

Abstract

Recently, the combined cycle power plants are getting stronger in the market of electricity production, as they enhance the ancient and inefficiently thermal power plants, by adding a steam cycle following the gas one. Nevertheless, this is not the case with those hybrid power plants that integrate a solar cycle with storage to the combined cycle. These are known as hybrid combined cycles, and they offer the possibility of electricity production much more flexible and sustainable than others. Their only major drawback is its complexity, since they include three systems that must be controlled coordinately: the combined cycle, the solar cycle and the storage. Therefore, it is necessary to implement a coordinated control that achieves coupled performances between different parts of these plants.

In this study two type of coordinated controls will be developed, from the dynamic model of a hybrid combined cycle plant: a model predictive control and a H_∞ control. On the one hand, the predictive control will be dealt as a optimization problem, as it seek the best solution of it at each instant of time, to achieve the desired responses. On the other hand, the H_∞ control will be set out as a classic regulation problem of automatics, in order to shape freely the frequency responses of every transfer function that makes up the multivariable system. compone el sistema multivariable.

Keywords Hybrid Combined Cycle (HCC), Gas Turbine (TG), Steam Turbine (TV), System, Subsystem, Coordinator, Coupling, MPC Control, H_∞ Control, Simulation, State representation, Transfer function, Linear/nonlinear model.

Índice del trabajo

- Memoria
- Presupuesto

MEMORIA

Índice de la memoria

- 1. Contexto y objetivos** **21**

- 2. Ciclo Combinado Híbrido** **23**
 - 2.1. Principio de funcionamiento 23
 - 2.1.1. Subsistema CCG 23
 - 2.1.2. Subsistema solar 24
 - 2.1.3. Acomplamiento CCG/solar 24
 - 2.1.4. Subsistema de almacenamiento 25
 - 2.1.5. Acoplamiento solar/almacenamiento 25
 - 2.1.6. Sistema HCC 25
 - 2.2. Modelización 27
 - 2.2.1. Subsistemas 27
 - 2.2.2. Sistema HCC 27
 - 2.3. Objetivo del control 28
 - 2.3.1. Subsistema CCG 28
 - 2.3.2. Subsistema solar 29
 - 2.3.3. Subsistema de almacenamiento 29
 - 2.3.4. Sistema HCC 29
 - 2.4. Conclusión 30

3. Control coordinado MPC	31
3.1. Principio de funcionamiento	31
3.2. Definición del problema sobre el modelo lineal	33
3.2.1. Notaciones	33
3.2.2. Sistema extendido	34
3.2.3. Función de coste	35
3.2.4. Restricciones	37
3.3. Aplicación sobre el modelo no lineal	40
3.4. Conclusión	41
4. Control coordinado H_∞	43
4.1. Principio de funcionamiento	43
4.1.1. Modelo estándar	43
4.1.2. Problema estándar	45
4.1.3. Síntesis H_∞	45
4.2. Definición del problema sobre el modelo lineal	46
4.2.1. Modelo estándar	47
4.2.2. Problema estándar	49
4.2.3. Síntesis H_∞	53
4.3. Aplicación sobre el modelo no lineal	54
4.4. Conclusión	54
5. Resultados	57
5.1. Escenarios y criterios de evaluación	57
5.2. Resultados de simulación	59
5.2.1. Modelo lineal	59

5.2.2. Modelo no lineal	65
6. Conclusión	69
A. Definición de las entradas y salidas	71
B. Notaciones	75
B.1. Para el sistema HCC	75
B.2. Para el coordinador MPC	76
B.3. Para el coordinador H_∞	77
C. Valores numéricos	79
C.1. Sistema HCC	79
C.2. Coordinador MPC	81
C.3. Coordinador H_∞	84
D. Valores singulares y norma H_∞	85
D.1. Valores singulares	85
D.2. Norma H_∞	86
D.2.1. Definición	86
D.2.2. Propiedades	86
E. Criterios de un sistema controlado	89
E.1. Error estático	89
E.2. Rapidez	89
E.3. Estabilidad	90
Bibliografía	90

Índice de figuras

2.1. Esquema de funcionamiento del subsistema CCG	23
2.2. Esquema del funcionamiento del subsistema solar	24
2.3. P_{TG} y P_{TV} para el CCG y el ISCC	24
2.4. Esquema de funcionamiento del subsistema de almacenamiento	25
2.5. Esquema de funcionamiento del sistema HCC	26
2.6. P_{TG} y P_{TV} para el ISCC y el HCC	26
2.7. Control coordinado	29
3.1. Esquema del funcionamiento del control MPC	32
3.2. Esquema del control MPC sobre el modelo no lineal del HCC	41
4.1. Modelo H_∞ estándar	44
4.2. Esquema del sistema controlado	47
4.3. Sistema controlado en la forma estándar	47
4.4. Aproximación de S por H_{BO}	50
4.5. Ejemplo de la respuesta frecuencial de las principales funciones de transferencia para un sistema monovariable	51
4.6. Esquema del control H_∞ sobre el modelo no lineal del HCC	54
5.1. Escenario 1	57

5.2. Escenario 2	58
5.3. Escenario 3	58
5.4. Potencia total en el modelo lineal (Escenario 1)	59
5.5. Potencias TG y TV en el modelo lineal (Escenario 1)	60
5.6. Gasto másico a la salida del subsistema solar en el modelo lineal (Escenario 1)	61
5.7. Nivel del depósito de almacenamiento caliente en el modelo lineal (Escenario 1)	61
5.8. Potencia total en el modelo lineal (Escenario 2)	62
5.9. Potencias TC y TV en el modelo lineal (Escenario 2)	63
5.10. Potencias TG y TV en el modelo lineal, zoom (Escenario 2)	63
5.11. Nivel del depósito de almacenamiento caliente en el modelo lineal (Escenario 2)	64
5.12. Nivel del depósito de almacenamiento caliente en el modelo lineal (Escenario 3)	65
5.13. Potencia total en el modelo no lineal (Escenario 1)	66
5.14. Potencias TG y TV en el modelo no lineal (Escenario 1)	66
5.15. Control sobre la potencia y potencia en el modelo no lineal (Escenario 1, coordinador MPC)	67
5.16. Potencia en el modelo no lineal (Escenario 1, coordinador H_∞)	67
A.1. Esquema del sistema HCC	71
D.1. Valores singulares y norma H_∞ para un sistema multivariable	86

Lista de Tablas

4.1. Definición de las variables del modelo estándar	48
5.1. Criterios de evaluación	58
5.2. Criterios de evaluación en el modelo lineal (Escenario 1)	62
5.3. Criterios de evaluación en el modelo lineal (Escenario 2)	64
5.4. Criterios de evaluación en el modelo lineal (Escenario 3)	65
5.5. Ajustes del coordinador H_∞ para el modelo no lineal	68
5.6. Criterio de evaluación en el modelo no lineal (Escenario 1)	68
A.1. Entradas y salidas del sistema HCC	72
B.1. Dimensión de las variables del HCC	75
B.2. Nomenclatura de las variables del HCC utilizadas por los coordinadores	76
B.3. Nomenclatura y dimensión de las variables del coordinador MPC	76
B.4. Dimensión de las variables del coordinador H_∞	77
C.1. Punto de equilibrio de las entradas del HCC	79
C.2. Punto de equilibrio de las salidas del HCC	80
C.3. Parámetros de tiempo del coordinador MPC	81
C.4. Ponderaciones de la función de coste del coordinador MPC	81
C.5. Restricciones sobre las salidas del coordinador MPC	82

C.6. Restricciones sobre los controles del coordinador MPC 83

C.7. Reglajes de los filtros del coordinador H_∞ 84

Capítulo 1

Contexto y objetivos

«*La materia ni se crea ni se destruye, sólo se transforma*» citó Antoine Lavoisier para enunciar la ley de *conservación de la masa* en su *Tratado elemental de química*. A su vez, el primer principio de la termodinámica afirma que la energía total de un sistema aislado permanece constante con el tiempo, formulando la famosa ley de *conservación de la energía*, que complementa la anterior. Por lo tanto, la energía de un sistema podría transformarse infinitamente y jamás terminarse. Es con el segundo principio con el que surgen los problemas, ya que introduce los conceptos de *entropía* e *irreversibilidad*. Según él, no todas estas transformaciones son reversibles. A partir de estos dos enunciados deducimos que la energía de un sistema aislado de toda fuente energética tiende a cero.

Desde hace millones de años, el hombre ha abusado irreversiblemente de la energía de la Tierra, explotando sus recursos y contaminando su medio ambiente. Según la termodinámica, nuestro planeta parece acercarse cada vez más rápido a su fin. Sin embargo, todavía existe una esperanza: el sol. La Tierra es un sistema no aislado energéticamente, ya que recibe la energía del sol. Una producción energética eficaz y renovable toma, por lo tanto, un papel clave en esta carrera contra reloj. Las inquietudes mundiales giran entorno a encontrar mejores alternativas de producción flexible y menos contaminantes, encontrando soluciones como:

- centrales de alto rendimiento y con elevada flexibilidad que produzcan de manera eficaz con los recursos disponibles,
- centrales de emisiones reducidas que buscan minimizar los problemas medio ambientales.

Los Ciclos Combinados de Gas (CCG) son soluciones que responden a la vez a exigencias de producción y emisión. Este tipo de central produce energía con un alto rendimiento gracias a la combinación de dos ciclos termodinámicos, un ciclo de Brayton y uno de Rankine, cuyos circuitos se acomplan en una caldera. Además, es posible aumentar las prestaciones de los CCG

gracias a su hibridación con fuentes de energía renovables y medios de almacenamiento. Los Ciclos Combinados Solares (ISCC, *Integrated Solar Combined Cycle*) se desarrollan incorporando una fuente de producción solar, con el objetivo de reducir el consumo de gas en el CCG, combustible fósil contaminante y de disponibilidad limitada. Por último, los Ciclos Combinados Híbridos (HCC, *Hybrid Combined Cycle*) aseguran una producción más flexible y sostenible, ya que combinan una central ISCC con un medio de almacenamiento ([4]). Desafortunadamente, este último tipo de centrales está poco expandido en el mundo, por su complejidad y elevado coste.

De hecho, aún resultando esta combinación una solución atractiva e interesante, pueden aparecer dificultades técnicas en su implementación y puesta en funcionamiento, sobre todo como consecuencia del acoplamiento físico entre los distintos subsistemas y su correspondiente regulación. Por lo tanto, un control coordinado resulta imprescindible para adaptar el comportamiento de cada subsistema y poder tratarlo como un conjunto, cumpliendo asimismo el objetivo global de la central HCC. La síntesis de este control coordinado es un paso clave para mejorar las prestaciones globales de una central en la que intervienen diferentes subsistemas de naturaleza distinta. Este control debe actuar en el nivel superior del sistema, y considerar cada subsistema, junto con su regulación local, como una caja negra. Sin embargo, las dificultades de implementación de un control de este tipo en tiempo real son múltiples. La diversidad de restricciones y/o saturaciones (aportando un carácter fuertemente no lineal a los equipos), el aspecto multicriterio de los objetivos de desempeño, las incertidumbres de modelización o la medición de la influencia de las perturbaciones sobre el sistema son algunos ejemplos. En el presente proyecto se ha estudiado una coordinación para un sistema HCC, con el fin de hacer frente a las dificultades mencionadas.

Para estudiar este control coordinado, se ha desarrollado el modelo de un ciclo combinado híbrido, mediante el acoplamiento de los tres subsistemas:

- el subsistema CCG
- el subsistema solar
- el subsistema de almacenamiento

El funcionamiento de estos subsistemas y del sistema global HCC se ha tratado de forma separada. Se ha obtenido primero un modelo dinámico de cada subsistema, el cual nos permite construir, por acoplamiento, un modelo dinámico del sistema HCC. Este modelo se presenta en el capítulo 2. El coordinador se desarrolla a continuación sobre este modelo global, para satisfacer una serie de objetivos. Un primer control coordinado predictivo se obtiene sobre el modelo linealizado del HCC y se detalla en el capítulo 3. Un segundo control coordinado H_∞ se sintetiza sobre el mismo modelo del HCC y se analiza en el capítulo 4. Finalmente, el capítulo 5 incluye los resultados obtenidos de simulación de los coordinadores aplicados tanto sobre el modelo lineal como sobre el no lineal del sistema.

Capítulo 2

Ciclo Combinado Híbrido

Nuestro estudio se realiza sobre una configuración particular del ciclo combinado híbrido (HCC), presentado en el presente capítulo. En este, detallamos el principio de funcionamiento y la modelización de cada subsistema por separado y del sistema global en su conjunto.

2.1. Principio de funcionamiento

2.1.1. Subsistema CCG

Un ciclo combinado de gas (CCG) ([9]) es una combinación de una turbina de gas (TG) y una turbina de vapor (TV) mediante de una caldera. El gas (generalmente gas natural) se mezcla con aire y se quema en una cámara de combustión, produciendo electricidad al expandirse en la turbina de gas. A continuación, los gases de combustión se usan para evaporar el agua que circula por el ciclo de vapor, dentro de la caldera, la cual producirá energía eléctrica al expandirse en la turbina de vapor. Estos dos ciclos termodinámicos se denominan respectivamente ciclo de Brayton y de Rankine. La figura 2.1 muestra el esquema del subsistema CCG:

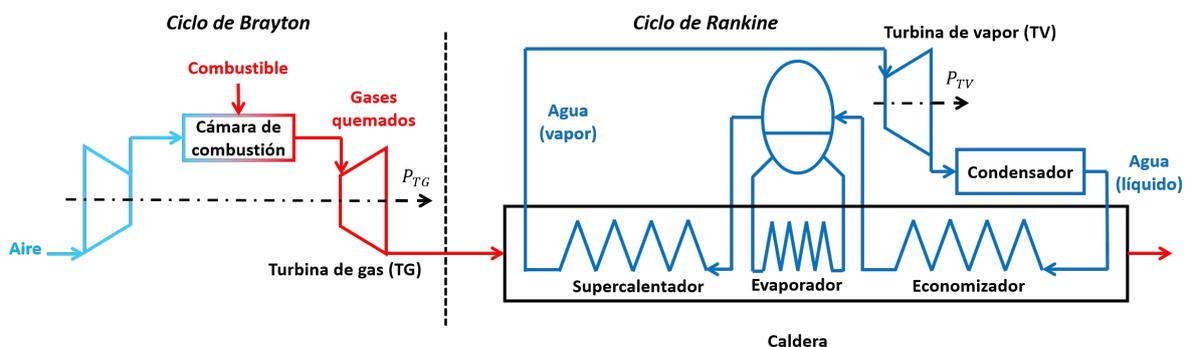


Figura 2.1: Esquema de funcionamiento del subsistema CCG

2.1.2. Subsistema solar

El subsistema solar ([5]) está constituido por colectores cilindro-parabólicos (PT, *Parabolic Trough*) los cuales por reflexión concentran la radiación solar a lo largo de tubos receptores, calentando un fluido térmico (HTF, *Heat Transfer Fluid*), en nuestro caso aceite. El aceite caliente a la salida de los colectores posee la energía térmica necesaria para evaporar el agua que atraviesa un intercambiador de calor. El esquema del subsistema solar es presentado en la figura 2.2:

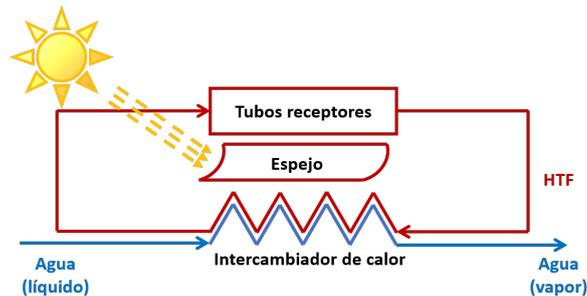


Figura 2.2: Esquema del funcionamiento del subsistema solar

2.1.3. Acomplamiento CCG/solar

Un ciclo combinado solar (ISCC) ([8]) es una central consistente en la combinación de un CCG con un medio de producción solar. El acoplamiento entre estos dos subsistemas es el siguiente: parte del agua líquida se extrae del ciclo de vapor del CCG a la entrada del economizador, se evapora gracias al subsistema solar (en paralelo a la evaporación que se produce en la caldera del CCG) y finalmente el vapor de agua se reinyecta a la salida del supercalentador. Por lo tanto, para una misma demanda de potencia, el CCG y el ISCC no tendrán el mismo comportamiento. La figura 2.3 muestra que la utilización de la potencia de la TV es más importante en el caso del ISCC, para una misma demanda de potencia igual a 300 MW. En todo momento, la TG es menos utilizada en el ISCC, gracias a la parte solar, lo que implica menos utilización de combustible y en consecuencia menos emisión de gases.

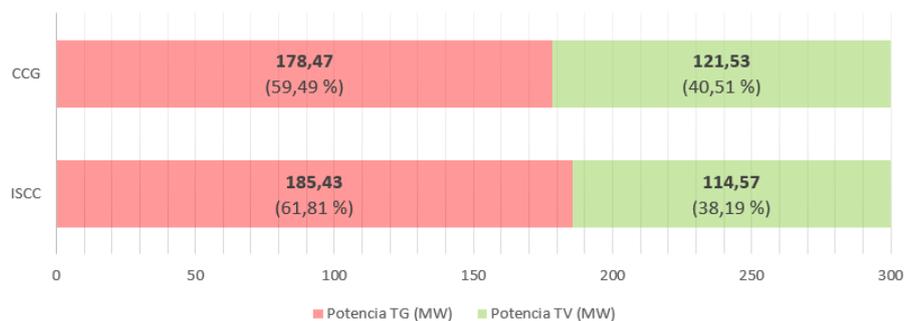


Figura 2.3: P_{TG} y P_{TV} para el CCG y el ISCC

2.1.4. Subsistema de almacenamiento

El almacenamiento de energía consiste en la conservación, en la medida de lo posible, de una cierta cantidad de energía en cualquier forma, para liberarla cuando se requiera. El ser humano ha buscado desde la prehistoria, métodos cada vez más eficientes para este fin, adquiriendo mayor atención recientemente gracias a los avances tecnológicos y las necesidades de producción intermitente. En nuestro caso, el método de almacenamiento utilizado es el de energía térmica, mediante sal fundida ([7]), que se calienta o enfría por el fluido térmico, en función de si estamos cargando (almacenando) o descargando (liberando) energía, respectivamente. Dos depósitos sirven para acumular las sales fundidas caliente y fría, como muestra la figura 2.4:



Figura 2.4: Esquema de funcionamiento del subsistema de almacenamiento

2.1.5. Acoplamiento solar/almacenamiento

Gracias a las válvulas de tres vías, el almacenamiento de sal fundida es acoplado a los colectores cilindro-parabólicos para almacenar el exceso de producción solar o liberar calor si la parte solar no permite la producción del vapor de agua deseado ([2]). Los intercambios de calor se realizan por lo tanto entre la sal fundida y el aceite (HTC). La incorporación del subsistema de almacenamiento al subsistema solar aporta una cierta independencia energética. En particular, permite valorizar las fuentes de energía renovables que son de naturaleza intermitente, en nuestro caso la solar termodinámica.

2.1.6. Sistema HCC

El sistema HCC global está compuesto por un CCG al cual se le añade una fuente de producción solar que interviene en el proceso de evaporación de agua para el ciclo de vapor. Además, un almacenamiento de sal fundida conectado con los colectores cilindro-parabólicos garantiza un suministro flexible, gracias a la carga o descarga energética. La figura 2.5 presenta el esquema completo del sistema.

Si consideramos un día sin radiación solar, el comportamiento de un HCC es mejorado con respecto a un ISCC (figura 2.6). El HCC alcanza la demanda solicitada con menos dificultad, es decir, empleando menos la TG. Estos resultados muestran la flexibilidad que puede aportar un subsistema de almacenamiento en las centrales de producción de energía del tipo ISCC.

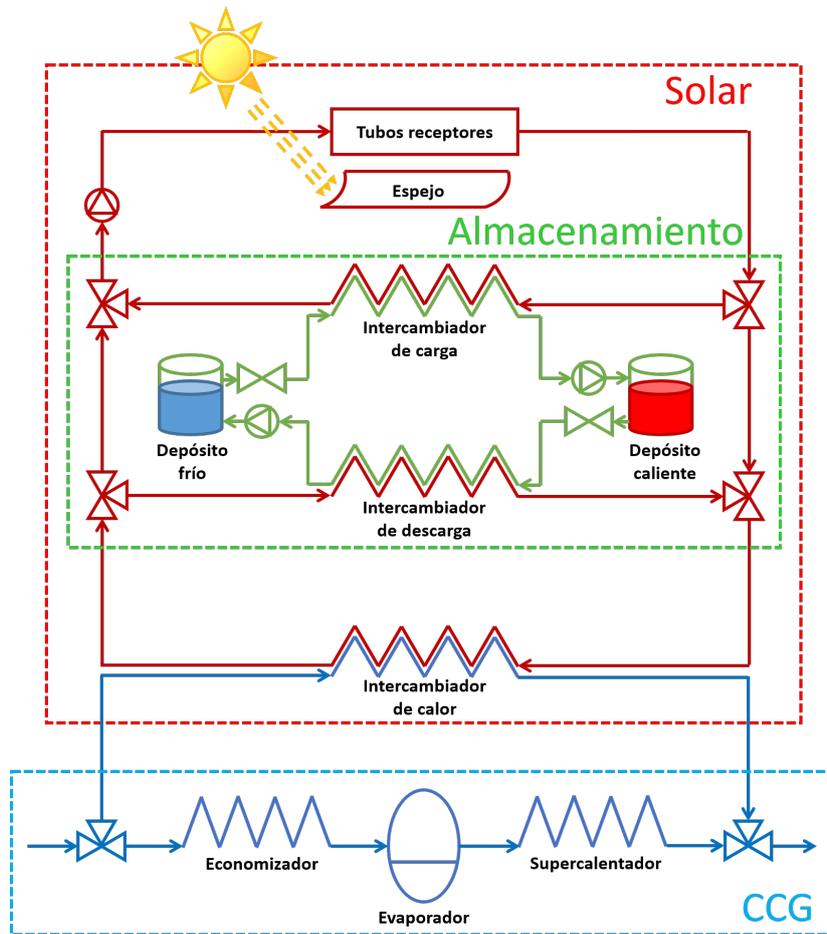


Figura 2.5: Esquema de funcionamiento del sistema HCC

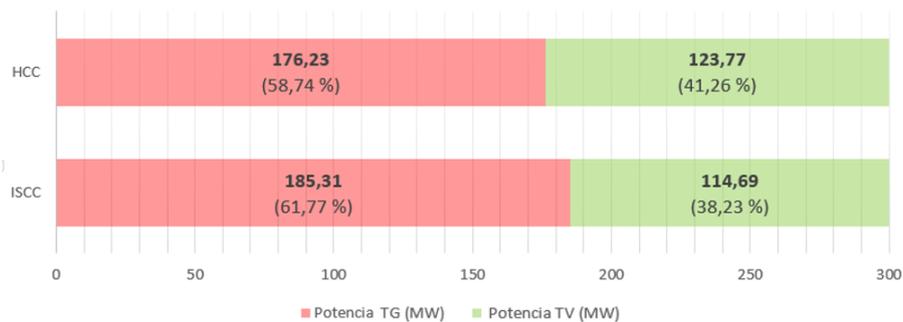


Figura 2.6: P_{TG} y P_{TV} para el ISCC y el HCC

2.2. Modelización

2.2.1. Subsistemas

El funcionamiento del modelo físico no lineal de cada subsistema es regulado por un controlador local. La naturaleza local de estos controladores obliga a considerar las variables de acoplamiento como perturbaciones desconocidas. Los tres subsistemas son modelizados por representaciones de estado clásicas no lineales, incluyendo el modelo físico y el regulador local:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) &= f_i(x_i(t), u_i(t), p_i(t), d_{ji}(t)) \\ d_{ij}(t) &= h_{ij}^d(x_i(t)) \\ y_i(t) &= h_i(x_i(t)) \end{cases} \quad (2.1)$$

con:

- $x_i(t)$ el vector de estados del subsistema i ,
- $u_i(t)$ el vector de controles del subsistema i ,
- $d_{ij}(t)$ las variables de acoplamiento del subsistema i al subsistema j ,
- $d_{ji}(t)$ las variables de acoplamiento del subsistema j al subsistema i ,
- $y_i(t)$ el vector de salidas del subsistema i .

En nuestro estudio, nos interesamos por un sistema (HCC), compuesto por tres subsistemas que interactúan entre ellos gracias a las variables de acoplamiento. Los subsistemas mencionados son:

- El subsistema CCG
- El subsistema solar
- El subsistema de almacenamiento

Para cada subsistema, el modelo (2.1) es linealizado en torno a su punto de funcionamiento (detallado en las tablas C.1 y C.2 del anexo C) para construir el modelo lineal del sistema HCC.

2.2.2. Sistema HCC

El modelo lineal del sistema global se puede expresar bajo la forma de una representación de estado estándar:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ep(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

con:

- $x(t) = \begin{pmatrix} x_{ccg}(t) \\ x_{sol}(t) \\ x_{sto}(t) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_x}$, el vector de estado
- $u(t) = \begin{pmatrix} u_{ccg}(t) \\ u_{sol}(t) \\ u_{sto}(t) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_u}$, el vector de entradas (controles de los subsistemas)
- $p(t) = \begin{pmatrix} p_{ccg}(t) \\ p_{sol}(t) \\ p_{sto}(t) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_p}$, el vector de perturbaciones
- $y(t) = \begin{pmatrix} y_{ccg}(t) \\ y_{sol}(t) \\ y_{sto}(t) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_y}$, el vector de salidas

Para simplificar la nomenclatura, consideramos que cada componente de esos vectores representa realmente las variaciones respecto de su punto de equilibrio (alrededor del cual, el modelo se ha linealizado). Las componentes del vector de salidas, entradas y perturbaciones son resumidas en el anexo A, así como sus dimensiones en la tabla B.1 del anexo B y sus valores numéricos en las tablas C.1 y C.2 del anexo C.

Asimismo, el modelo no lineal del HCC se obtiene por simple acoplamiento de los modelos de los diferentes subsistemas.

2.3. Objetivo del control

2.3.1. Subsistema CCG

El objetivo del controlador local del subsistema CCG es el de regular la potencia producida P , así como los niveles de los acumuladores de las calderas de baja presión (N_{LP}), media presión (N_{MP}) y alta presión (N_{HP}). El control de estas variables se realiza mediante el siguiente vector:

$$u_{ccg} = \begin{bmatrix} C_P & C_{N_{LP}} & C_{N_{MP}} & C_{N_{HP}} \end{bmatrix}^T \quad (2.3)$$

2.3.2. Subsistema solar

El controlador local del subsistema solar se encarga de regular las propiedades del vapor de agua inyectado en la caldera del CCG, concretamente su entalpía (h^{sol}) y su gasto másico (\dot{m}^{sol}). Su vector de controles se expresa por:

$$u_{sol} = \left[C_{h^{sol}} \quad C_{\dot{m}^{sol}} \right]^T \quad (2.4)$$

2.3.3. Subsistema de almacenamiento

El regulador local del subsistema de almacenamiento es el responsable del control de la entalpía del aceite de la rama de carga (h_h^{ch}) y descarga (h_h^{dch}), y también del nivel de sal fundida en el depósito frío (N_{clid}) (cabe señalar que, por conservación de la masa en el circuito de almacenamiento, el nivel del depósito caliente queda fácilmente determinado). Su vector de controles se expresa como:

$$u_{sto} = \left[C_{h_h^{ch}} \quad C_{h_h^{dch}} \quad C_{N_{clid}} \right]^T \quad (2.5)$$

2.3.4. Sistema HCC

El objetivo de este estudio consiste en desarrollar un sistema de control inteligente coordinado que permita actuar sobre los reguladores locales de cada subsistema. Los parámetros de estos reguladores locales han sido ya determinados y no se modificarán a lo largo del presente trabajo. Sin embargo, el sistema de control coordinado mencionado se encargará de establecer las referencias de cada regulador local y de recibir información del estado del subsistema al que regula. La estrategia descrita es ilustrada en la figura 2.7:

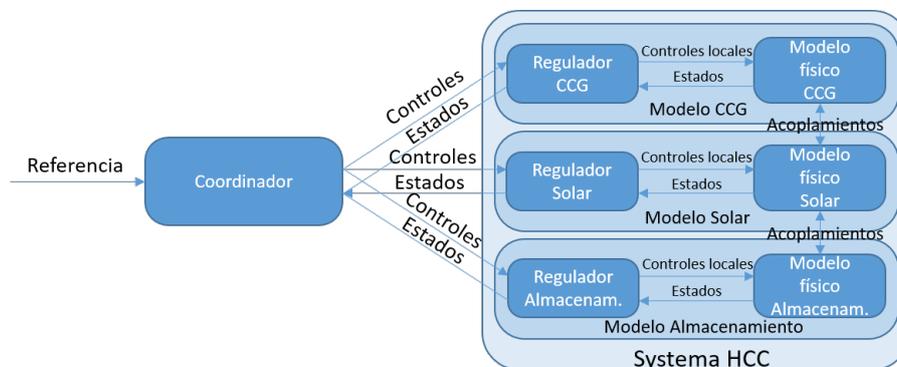


Figura 2.7: Control coordinado

Las salidas del control coordinado (o simplemente coordinador) son recogidas en el vector u (cuyas componentes se han detallado en los tres subapartados anteriores) y corresponden a las referencias de cada uno de los reguladores locales de cada subsistema. Los criterios que nos permitirán definir el buen funcionamiento del coordinador son establecidos a través de los siguientes objetivos de control:

1. La potencia total (P) debe regularse por una referencia externa definida por la demanda energética (r_P). Esta referencia de potencia es el objetivo final del sistema global.
2. La entalpía del vapor de agua a la salida del módulo solar (h^{sol}) debe regularse por la entalpía del vapor de agua en el CCG en el punto de inyección (h^{ccg}). Esta restricción evitará la aparición de un choque térmico en el momento de la inyección, al mismo tiempo que se asegura que la entalpía del aceite está por encima a la de saturación, es decir, que se encuentra en estado gaseoso.
3. El gasto másico del vapor de agua a la salida del módulo solar (\dot{m}^{sol}) debe regularse por el caudal másico de agua líquida que entra al mismo sistema (\dot{m}_{in}^{sol}). El objetivo es el de evitar la acumulación de fluido en la parte solar.
4. Todas las variaciones de los controles alrededor de su punto de equilibrio son reguladas, lo cual nos añadirá un nuevo grado de libertad, a la vez que una gran flexibilidad.

Además, resulta evidente que el objetivo fundamental que buscamos es el de utilizar lo más eficientemente posible la energía solar y el almacenamiento para producir una gran cantidad de potencia proveniente de la TV, con el fin de reducir al máximo el consumo de combustible ligado a la utilización de la TG.

2.4. Conclusión

De este modo, disponemos de un modelo de ciclo combinado híbrido compuesto tres subsistemas acoplados, cada uno compuesto por un modelo físico y un regulador local.

Las entradas a los subsistemas son al mismo tiempo las referencias de los reguladores locales, y se agrupan en el vector u . Estas se calculan gracias a un coordinador que busca satisfacer un gran número de exigencias a la vez. Las notaciones utilizadas se detallan en el anexo A.

Las restricciones físicas de las diferentes variables nos incitan a realizar un primer estudio de un coordinador MPC. Así, el controlador propuesto para coordinar el sistema HCC es un regulador predictivo MPC. Por consiguiente, el capítulo 3 se centrará en la implementación de este sistema de control en nuestro sistema completo acoplado. A continuación, para efectuar tests de robustez, un coordinador H_∞ será estudiado en el capítulo 4.

Capítulo 3

Control coordinado MPC

El Control Predictivo por Modelo (MPC, *Model Predictive Control*) es una técnica de control avanzada de la automática ([3]). Tiene como objetivo regular sistemas industriales complejos. Su principio se basa en utilizar un modelo dinámico del proceso en el interior de un controlador en tiempo real para anticipar el futuro comportamiento del sistema y actuar en consecuencia.

El control predictivo puede usarse para controlar sistemas complejos con varias entradas y salidas. Esta técnica es particularmente interesante cuando los sistemas poseen retrasos importantes, respuestas inversas y/o numerosas perturbaciones. Los principales usos del control predictivo se encuentran en las refinerías de petróleo, la industria química y agroalimentaria, la metalurgia y el ámbito aeroespacial. Las ventajas del control MPC son las siguientes:

- La idea general es intuitiva y fácil de comprender.
- La implantación de un control MPC permite generalmente, una ganancia real financiera.
- En caso de que existan perturbaciones medibles, el sistema se adapta automáticamente.
- Permite respetar una serie de restricciones sobre las variables controladas y manipuladas.
- Se pueden lograr controles suaves que no solicitan variaciones excesivas de las variables manipuladas. Esto permite un uso más eficiente de los accionadores (cilindros hidráulicos, válvulas, motores) y su tiempo de vida aumenta en consecuencia.

3.1. Principio de funcionamiento

El control predictivo (MPC, *Model Predictive Control*) se basa en la optimización de un modelo sobre su horizonte de predicción finito ([6]). En el instante k , el modelo se muestrea

y se aplica una estrategia de control basada en la minimización de una función de coste para un horizonte de predicción N_p . Un procesador se utiliza para estudiar las trayectorias de los estados que, partiendo del inicial, minimizan la función de coste hasta el instante de tiempo $k + N_p$. Únicamente se implementa el primer periodo del control predictivo óptimo, alcanzando un nuevo estado en el instante $k + 1$. A continuación, el modelo se muestrea de nuevo y los cálculos se repiten, utilizando el nuevo estado actual. Es el principio del *horizonte errante*. Un esquema de la estrategia se presenta en la figura 3.1:

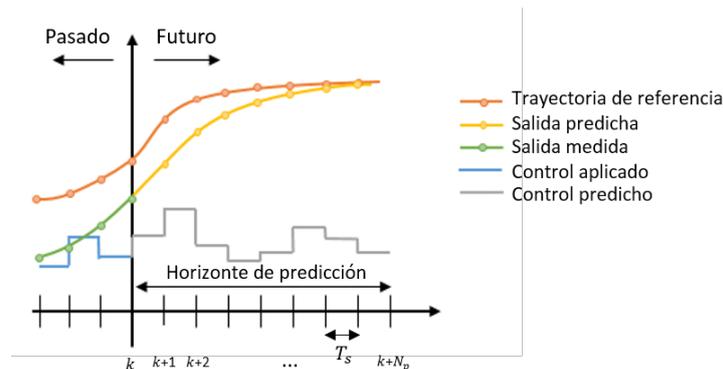


Figura 3.1: Esquema del funcionamiento del control MPC

Para calcular el control óptimo, el algoritmo de control predictivo utiliza:

- un modelo dinámico del proceso,
- un historial de los controles pasados,
- un problema a optimizar, definido por:
 - una función de coste a minimizar sobre un horizonte de predicción N_p . Para asegurar la optimalidad global de la solución del problema, buscamos problemas convexos con una función de coste expresada en forma cuadrática:

$$J[k] = \sum_{i=1}^{N_p} \|r[k+i] - y[k+i]\|_{\omega_y}^2 + \|u[k+i-1]\|_{\omega_u}^2 \quad (3.1)$$

con:

- $y[k]$, variaciones de la salida controlada en el instante k ,
- $r[k]$, variaciones de la referencia en el instante k ,
- $u[k]$, variaciones del control en el instante k ,
- ω_y , coeficiente de ponderación sobre el error de la referencia,
- ω_u , coeficiente de ponderación sobre el tamaño del control.
- una serie de restricciones a tener en cuenta, que pueden ser de tres tipos:
 - *Restricciones de trayectoria* sobre la salida (y_{min} , y_{max}) o sobre la entrada (u_{min} , u_{max})

$$\begin{cases} y_{min} \leq y_{traj}[k+i] \leq y_{max} \\ u_{min} \leq u[k+i-1] \leq u_{max} \end{cases} \quad \forall i \in \{1, \dots, N_p\} \quad (3.2)$$

con $y_{traj}[k]$, variaciones de las salidas susceptibles de verse afectadas por las restricciones de trayectoria (de dimensión menor o igual que y)

- *Restricciones de variación* sobre la entrada ($\delta_{min}, \delta_{max}$)

$$\delta_{min} \leq u[k+i-1] - u[k+i-2] \leq \delta_{max} \quad \forall i \in \{1, \dots, N_p\} \quad (3.3)$$

- *Restricciones finales* sobre la salida (y_{eq}) o sobre la entrada (u_{eq})

$$\begin{cases} y_{final}[k+N_p] = y_{eq} \\ u[k+N_p-1] = u_{eq} \end{cases} \quad (3.4)$$

con $y_{final}[k]$, variaciones de las salidas susceptibles de verse afectadas por las restricciones finales (de dimensión menor o igual que y)

3.2. Definición del problema sobre el modelo lineal

3.2.1. Notaciones

Para este trabajo, se usarán las notaciones siguientes, donde el escalar N_p representa el horizonte de predicción:

- Para una matriz $A \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}$, definimos:

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} A & O_{n_1 \times n_2} & \cdots & O_{n_1 \times n_2} \\ O_{n_1 \times n_2} & A & \cdots & O_{n_1 \times n_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O_{n_1 \times n_2} & O_{n_1 \times n_2} & \cdots & A \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_1 N_p \times n_2 N_p} \quad (3.5)$$

- Para un vector $v \in \mathbb{R}^{n_v}$, definimos:

$$\bar{v} = \begin{pmatrix} v \\ v \\ \vdots \\ v \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_v N_p \times 1} \quad (3.6)$$

3.2.2. Sistema extendido

Para poder aplicar el algoritmo MPC a nuestro sistema HCC, es imprescindible definir un modelo extendido lineal. Para ello, discretizamos nuestro modelo (2.2) con un periodo de muestreo T_e , para obtener un sistema lineal invariante (LTI, *Linear Time Invariant*) bajo la forma discreta estándar siguiente:

$$\begin{cases} x[k+1] = A_d x[k] + B_d u[k] \\ y[k] = C_d x[k] \end{cases} \quad (3.7)$$

con A_d , B_d et C_d las matrices de estado obtenidas de la discretización del modelo, y $x[k]$ las variaciones del estado en el instante k .

Cabe destacar que, en este nuevo modelo del sistema no tenemos en cuenta las perturbaciones, ya que ellas no intervienen en el algoritmo de optimización. Expresando el estado x en un instante cualquiera $i > 0$, podemos escribir:

$$\begin{cases} x[k+i] = A_d^i x[k] + [A_d^{i-1} B_d \ \cdots \ A_d B_d \ B_d] \begin{pmatrix} u[k] \\ \vdots \\ u[k+i-2] \\ u[k+i-1] \end{pmatrix} \\ y[k] = C_d x[k] \end{cases}$$

Para un horizonte de predicción N_p , definimos los siguientes vectores extendidos:

$$\begin{aligned} X[k] &= \begin{pmatrix} x[k+1] \\ \vdots \\ x[k+N_p] \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_x N_p} & Y[k] &= \begin{pmatrix} y[k+1] \\ \vdots \\ y[k+N_p] \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_y N_p} \\ U[k] &= \begin{pmatrix} u[k] \\ \vdots \\ u[k+N_p-1] \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_u N_p} & R_{ext}[k] &= \begin{pmatrix} r_{ext}[k+1] \\ \vdots \\ r_{ext}[k+N_p] \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_{ext} N_p} \end{aligned}$$

donde cada componente se expresa en forma de variaciones alrededor del estado de equilibrio.

Podemos, por lo tanto, escribir la representación de estado del sistema extendido:

$$\begin{cases} X[k] = \Psi_X[k] + \Omega U[k] \\ Y[k] = \tilde{C} X[k] \end{cases} \quad (3.8)$$

con:

$$\Psi = \begin{pmatrix} A_d \\ A_d^2 \\ \vdots \\ A_d^{N_p} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_x N_p \times n_x}$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} B_d & O_{n_x \times n_u} & \cdots & O_{n_x \times n_u} \\ A_d B_d & B_d & \cdots & O_{n_x \times n_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_d^{N_p-1} B_d & A_d^{N_p-2} B_d & \cdots & B_d \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n_x N_p \times n_u N_p}$$

Notamos que, mientras que el vector $U[k]$ comienza en el instante k y termina en el $N_p - 1$, los vectores $X[k]$ y $Y[k]$ están retrasados un periodo. Esto resulta obvio, ya que al aplicar el control correspondiente al instante k , obtenemos el estado (así como la salida) al instante $k + 1$, hasta llegar al control aplicado en $N_p - 1$ el cual nos permite obtener el estado en el instante N_p .

3.2.3. Función de coste

La función de coste sirve como criterio para determinar la mejor solución de un problema de optimización (en nuestro caso, el algoritmo MPC) El hecho de que sea cuadrática, nos asegura que la solución encontrada será global y no únicamente local.

Buscamos expresar la función de coste cuadrática de nuestro problema de optimización (3.1) de una forma genérica, gracias a la expresión extendida del sistema (3.8). El objetivo es escribirla de la siguiente forma:

$$J[k] = \frac{1}{2} U[k]^T \mathcal{H} U[k] + \mathcal{F}[k]^T U[k] \quad (3.9)$$

Con el fin de poder asegurar al mismo tiempo los cuatro objetivos definidos en la sección 2.3.4, dividimos el primer término de la función de coste (3.1) (nomenclatura detallada en la tabla B.2 del anexo B) para obtener:

$$J[k] = \sum_{i=1}^{N_p} \|r_{ext}[k+i] - y_{ext}[k+i]\|_Q^2 + \|r_{int}[k+i] - y_{int}[k+i]\|_R^2 + \|u[k+i-1]\|_S^2 \quad (3.10)$$

con:

- $y_{ext}[k] = C_{y_{ext}} Y[k]$, salidas a controlar por las referencias exteriores, con $C_{y_{ext}} \in \mathbb{R}^{n_{ext} \times n_y}$,

- $y_{int} [k] = C_{y_{int}} y [k]$, salidas a controlar por las referencias interiores, con $C_{y_{int}} \in \mathbb{R}^{n_{int} \times n_y}$,
- $r_{ext} [k]$, referencias exteriores,
- $r_{int} [k] = C_{r_{int}} y [k]$, referencias interiores, con $C_{r_{int}} \in \mathbb{R}^{n_{int} \times n_y}$,

y:

- $Q \in \mathbb{R}^{n_{ext} \times n_{ext}}$, coeficiente de ponderación sobre el error de la referencia exterior ϵ_{ext} ,
- $R \in \mathbb{R}^{n_{int} \times n_{int}}$, coeficiente de ponderación sobre el error de la referencia interna ϵ_{int} ,
- $S \in \mathbb{R}^{n_u \times n_u}$, coeficiente de ponderación sobre el tamaño de la variable de control u .

Para facilitar los cálculos, hacemos aparecer los vectores extendidos en la expresión de la función de coste (3.10):

$$J[k] = \{R_{ext} [k] - Y_{ext} [k]\}^T \tilde{Q} \{R_{ext} [k] - Y_{ext} [k]\} + \{Y_{int} [k] - R_{int} [k]\}^T \tilde{R} \{Y_{int} [k] - R_{int} [k]\} + U[k]^T \tilde{S} U[k] \quad (3.11)$$

con:

$$\begin{aligned} Y_{ext} [k] &= \tilde{C}_{y_{ext}} Y [k] \\ Y_{int} [k] &= \tilde{C}_{y_{int}} Y [k] \\ R_{int} [k] &= \tilde{C}_{r_{int}} Y [k] \end{aligned}$$

Finalmente, reemplazamos (3.8) en (3.11) para obtener:

$$J[x[k], U[k]] = \left\{ R_{ext} [k] - \tilde{C}_{y_{ext}} \tilde{C} (\Psi_X [k] + \Omega U [k]) \right\}^T \tilde{Q} \left\{ R_{ext} [k] - \tilde{C}_{y_{ext}} \tilde{C} (\Psi_X [k] + \Omega U [k]) \right\} + \left\{ (\tilde{C}_{r_{int}} - \tilde{C}_{y_{int}}) \tilde{C} (\Psi_X [k] + \Omega U [k]) \right\}^T \tilde{R} \left\{ (\tilde{C}_{r_{int}} - \tilde{C}_{y_{int}}) \tilde{C} (\Psi_X [k] + \Omega U [k]) \right\} + U[k]^T \tilde{S} U[k] \quad (3.12)$$

La función de coste puede escribirse de la forma deseada (3.9) con:

$$\mathcal{H} = 2 \left(\left\{ \tilde{C}_{y_{ext}} \tilde{C} \Omega \right\}^T \tilde{Q} \left\{ \tilde{C}_{y_{ext}} \tilde{C} \Omega \right\} + \left\{ (\tilde{C}_{r_{int}} - \tilde{C}_{y_{int}}) \tilde{C} \Omega \right\}^T \tilde{R} \left\{ (\tilde{C}_{r_{int}} - \tilde{C}_{y_{int}}) \tilde{C} \Omega \right\} + \tilde{S} \right)$$

$$\mathcal{F}[k] = \{x[k] \mathcal{F}_x + R_{ext}[k] \mathcal{F}_R\}^T$$

$$\begin{cases} \mathcal{F}_x &= 2 \left(\left\{ \tilde{C}_{y_{ext}} \tilde{C} \Psi \right\}^T \tilde{Q} \left\{ \tilde{C}_{y_{ext}} \tilde{C} \Omega \right\} + \left\{ (\tilde{C}_{r_{int}} - \tilde{C}_{y_{int}}) \tilde{C} \Psi \right\}^T \tilde{R} \left\{ (\tilde{C}_{r_{int}} - \tilde{C}_{y_{int}}) \tilde{C} \Omega \right\} \right) \\ \mathcal{F}_R &= -2 \tilde{Q} \left\{ \tilde{C}_{y_{ext}} \tilde{C} \Omega \right\} \end{cases}$$

3.2.4. Restricciones

Las restricciones sirven para definir el conjunto de soluciones admisibles de un problema de optimización. Normalmente, se expresan en forma de desigualdades e igualdades, y permiten asegurar que el conjunto admisible no sea vacío.

Buscamos una expresión genérica de las restricciones de nuestro problema de optimización (3.2), (3.3) y (3.4), gracias a la expresión del sistema extendido (3.8). El objetivo es, por lo tanto, expresar las restricciones de la forma clásica:

$$\begin{cases} \mathcal{A}_{ineq} U[k] \leq \mathcal{B}_{ineq}[k] \\ \mathcal{A}_{eq} U[k] = \mathcal{B}_{eq}[k] \end{cases} \quad (3.13)$$

Restricciones de desigualdad

Nuestras restricciones de desigualdad se definen sobre todo el horizonte de predicción N_p . Por consiguiente, tienen que ser respetadas en cada instante de tiempo, comprendido entre el instante actual y los N_p siguientes. Se construyen del siguiente modo:

$$\mathcal{A}_{ineq} = \begin{pmatrix} \mathcal{A}_{traj} \\ \mathcal{A}_{rate} \end{pmatrix} \quad \mathcal{B}_{ineq}[k] = \begin{pmatrix} \mathcal{B}_{traj}[k] \\ \mathcal{B}_{rate}[k] \end{pmatrix}$$

donde \mathcal{A}_{traj} y \mathcal{B}_{traj} traducen las restricciones de trayectoria y \mathcal{A}_{rate} y \mathcal{B}_{rate} las restricciones de variación.

Las **restricciones de trayectoria** permiten delimitar las zonas de valores admisibles para las entradas y salidas. Utilizando la expresión de las restricciones de trayectoria (3.2) con $y_{traj}[k] = C_{traj} y[k]$ y $C_{traj} \in \mathbb{R}^{n_{traj} \times n_y}$ (dimensiones detalladas en la tabla B.3 del anexo B), es posible obtener la siguiente expresión, extendida sobre el horizonte de predicción:

$$\begin{cases} Y_{traj}[k] \leq \bar{y}_{max} \\ -Y_{traj}[k] \leq -\bar{y}_{min} \\ U[k] \leq \bar{u}_{max} \\ -U[k] \leq -\bar{u}_{min} \end{cases} \quad (3.14)$$

con $Y_{traj}[k] = \tilde{C}_{traj}Y[k]$.

Combinando la expresión del sistema extendido (3.8) con la ecuación (3.14) para obtener:

$$\begin{cases} \tilde{C}_{traj}\tilde{C}\Omega U[k] \leq \bar{y}_{max} - \tilde{C}_{traj}\tilde{C}\Psi x[k] \\ -\tilde{C}_{traj}\tilde{C}\Omega U[k] \leq -\bar{y}_{min} + \tilde{C}_{traj}\tilde{C}\Psi x[k] \\ U[k] \leq \bar{u}_{max} \\ -U[k] \leq -\bar{u}_{min} \end{cases} \quad (3.15)$$

Finalmente:

$$\mathcal{A}_{traj}U[k] \leq \mathcal{B}_{traj}[k] \quad (3.16)$$

con:

$$\mathcal{A}_{traj} = \begin{pmatrix} \tilde{C}_{traj}\tilde{C}\Omega \\ -\tilde{C}_{traj}\tilde{C}\Omega \\ I_{n_u N_p} \\ -I_{n_u N_p} \end{pmatrix} \quad \mathcal{B}_{traj}[k] = \begin{pmatrix} \bar{y}_{max} - \tilde{C}_{traj}\tilde{C}\Psi x[k] \\ \bar{y}_{min} - \tilde{C}_{traj}\tilde{C}\Psi x[k] \\ \bar{u}_{max} \\ \bar{u}_{min} \end{pmatrix}$$

Las **restricciones de variación** permiten limitar las variaciones de las entradas. Utilizando la expresión de las restricciones de variación (3.3), podemos escribir la expresión extendida siguiente:

$$\begin{cases} A_{rate}^u U[k] \leq \bar{\delta}_{max} + B_{rate}^u U[k-1] \\ -A_{rate}^u U[k] \leq -\bar{\delta}_{min} - B_{rate}^u U[k-1] \end{cases} \quad (3.17)$$

con:

$$A_{rate}^u = \begin{pmatrix} I_{n_u} & O_{n_u \times n_u} & \cdots & O_{n_u \times n_u} & O_{n_u \times n_u} \\ -I_{n_u} & I_{n_u} & \cdots & O_{n_u \times n_u} & O_{n_u \times n_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ O_{n_u \times n_u} & O_{n_u \times n_u} & \cdots & -I_{n_u} & I_{n_u} \end{pmatrix} \quad B_{rate}^u = \begin{pmatrix} I_{n_u} \\ O_{n_u \times n_u} \\ \vdots \\ O_{n_u \times n_u} \end{pmatrix}$$

Finalmente:

$$\mathcal{A}_{rate}U[k] \leq \mathcal{B}_{rate}[k] \quad (3.18)$$

con:

$$\mathcal{A}_{rate} = \begin{pmatrix} A_{rate}^u \\ -A_{rate}^u \end{pmatrix} \quad \mathcal{B}_{rate}[k] = \begin{pmatrix} \bar{\delta}_{max} + B_{rate}^u u[k-1] \\ -\bar{\delta}_{min} - B_{rate}^u u[k-1] \end{pmatrix}$$

Restricciones de igualdad

Nuestras restricciones de igualdad solo son definidas al final del horizonte de predicción N_p . Se construyen del siguiente modo:

$$\mathcal{A}_{eq} = \mathcal{A}_{final} \quad \mathcal{B}_{eq}[k] = \mathcal{B}_{final}[k]$$

donde \mathcal{A}_{final} y \mathcal{B}_{final} traducen las restricciones finales.

Las **restricciones finales** imponen un valor final para la salida y la entrada, después de haber aplicado todas los N_p controles calculados en el instante k . Resulta evidente que, estas restricciones tienen una mayor influencia sobre nuestro control cuanto más pequeño es el horizonte de predicción N_p .

Utilizando la expresión de las restricciones finales (3.4) con $y_{final}[k] = C_{final}y[k]$ y $C_{final} \in \mathbb{R}^{n_{final} \times n_y}$ (dimensiones detalladas en la tabla B.3 del anexo B), es posible obtener la siguiente expresión, extendida sobre el horizonte de predicción:

$$\begin{cases} Y_{final}[k + N_p] = y_{eq} \\ U[k + N_p] = u_{eq} \end{cases} \quad (3.19)$$

con:

$$Y_{final}[k + N_p] = \Gamma_{y_{final}} \tilde{C}_{final} Y[k] \quad \Gamma_{y_{final}} = \begin{bmatrix} O_{n_{final} \times n_{final}} & \cdots & O_{n_{final} \times n_{final}} & I_{n_{final}} \end{bmatrix}$$

$$U[k + N_p] = \Gamma_u U[k] \quad \Gamma_u = \begin{bmatrix} O_{n_u \times n_u} & \cdots & O_{n_u \times n_u} & I_{n_u} \end{bmatrix}$$

La expresión del sistema extendido (3.8) se utiliza para obtener:

$$\begin{cases} \Gamma_{y_{final}} \tilde{C}_{final} \tilde{C} \Omega U[k] = y_{eq} - \Gamma_{y_{final}} \tilde{C}_{final} \tilde{C} \Psi x[k] \\ \Gamma_u U[k] = u_{eq} \end{cases} \quad (3.20)$$

Finalmente:

$$\mathcal{A}_{final}U[k] = \mathcal{B}_{final}[k] \quad (3.21)$$

con:

$$\mathcal{A}_{final} = \begin{pmatrix} \Gamma_{y_{final}} \tilde{C}_{final} \tilde{C}\Omega \\ \Gamma_u \end{pmatrix} \quad \mathcal{B}_{final}[k] = \begin{pmatrix} y_{eq} - \Gamma_{y_{final}} \tilde{C}_{final} \tilde{C}\Psi_X[k] \\ u_{eq} \end{pmatrix}$$

3.3. Aplicación sobre el modelo no lineal

El algoritmo MPC ha sido obtenido con la ayuda del modelo lineal del sistema HCC (sección 3.2). A continuación, procedemos a implantarlo sobre el modelo no lineal, para verificar su adecuado funcionamiento.

El procedimiento consiste en:

- obtener el control óptimo de un periodo a partir del modelo lineal,
- aplicar este control al modelo no lineal,
- obtener el estado final del sistema para poder calcular el siguiente control.

La obtención del estado mencionado resulta evidente para el modelo lineal, pero no lo es en el no lineal. Para ello, construimos un *observador* continuo, definido por:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + Ep(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (3.22)$$

Para obtener una estimación de la evolución del estado \hat{x} entre dos intervalos de tiempo k y $k + 1$ (o análogamente, en el dominio temporal, kT_e y $(k + 1)T_e$), el observador hace uso del control u constante, la perturbación p y el error entre la salida medida y y la salida estimada $C\hat{x}$. Solamente utilizamos el valor final del estado estimado para calcular el control en el instante $k + 1$, y repetir de nuevo el ciclo del algoritmo MPC. La ganancia L del observador se elige con el fin de obtener una dinámica de estimación de estado más rápida que la del modelo no lineal, lo que permite realizar la observación del estado en tiempo real.

La figura 3.2 muestra el esquema de control usado. Destacamos que el algoritmo MPC trabaja con señales discretas, mientras que el modelo (no lineal) y el observador necesitan señales continuas para su funcionamiento. Para adaptar estas señales, usamos Conversores Analógico Digital (CAD) a una tasa de muestreo T_e , y Conversores Digital Analógico (CDA) del tipo *Zero-order hold*.

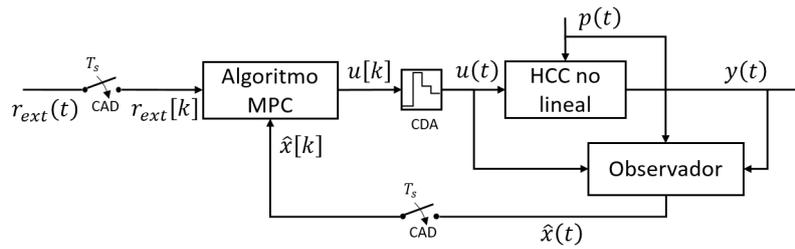


Figura 3.2: Esquema del control MPC sobre el modelo no lineal del HCC

3.4. Conclusión

En resumen, el algoritmo de control predictivo para nuestro coordinador se basa en dos grandes etapas, que se aplican en cada periodo de muestreo: la *optimización* y la *simulación*.

La etapa de *optimización* consiste en buscar el control óptimo para aplicarla en el periodo inmediatamente posterior al k considerado. Esta etapa utiliza la representación de estado extendida como modelo lineal:

$$\begin{cases} X[k] = \Psi X[k] + \Omega U[k] \\ Y[k] = \Phi X[k] \end{cases}$$

con un problema de optimización definido por la función de coste cuadrática:

$$J[k] = \frac{1}{2} U[k]^T \mathcal{H} U[k] + \mathcal{F}[k]^T U[k]$$

y sujeto a las restricciones:

$$\begin{cases} \mathcal{A}_{ineq} U[k] \leq \mathcal{B}_{ineq}[k] \\ \mathcal{A}_{eq} U[k] = \mathcal{B}_{eq}[k] \end{cases}$$

Los parámetros numéricos obtenidos para la síntesis del coordinador MPC se detallan en la parte C.2 del anexo C.

La etapa de *simulación* consiste en aplicar el control óptimo calculado sobre el modelo lineal de nuestro sistema, expresado en la forma de una representación de estado lineal.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ep(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

El capítulo 5 se centra en el análisis de los resultados obtenidos como consecuencia de la implementación de este coordinador óptimo predictivo sobre el sistema HCC.

Capítulo 4

Control coordinado H_∞

El control H_∞ es un método para la síntesis de controladores que aseguran la estabilidad y desempeño de un sistema mediante la resolución de un problema de optimización ([1]). Este método permite modelar las respuestas frecuenciales del sistema, basándose en la teoría de la norma H_∞ (resumida en el anexo D). El controlador solución permite estabilizar los sistemas caracterizados por ser de grandes dimensiones, con acoplamientos entre variables y elevadas incertitudes de modelización. Además, garantiza cierta robusteza frente a la estabilidad del sistema (a través del margen de ganancia), asegurando al mismo tiempo buenos rendimientos respecto a la reducción del efecto de las perturbaciones. Sin embargo, existen restricciones no lineales, como las saturaciones, que no son fáciles de tratar con este tipo de control.

La síntesis del control H_∞ es a menudo utilizada en el marco del control de estructuras flexibles de sistemas espaciales, como los satélites o las lanzaderas.

4.1. Principio de funcionamiento

Para desarrollar un corrector H_∞ , el modelo debe establecerse en la forma estándar (apartado 4.1.1). Una vez definido el modelo, se define el problema estándar (apartado 4.1.2) que nos permitirá encontrar un corrector solución que corresponde a la síntesis H_∞ (apartado 4.1.3).

4.1.1. Modelo estándar

La síntesis de un corrector H_∞ requiere la definición un modelo estándar, representado en la figura 4.1:

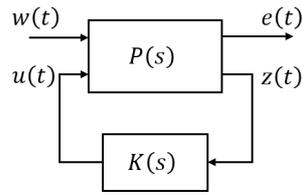


Figura 4.1: Modelo H_∞ estándar

con:

- $w(t) \in \mathbb{R}^{n_w}$ vector de las entradas exteriores, tales como las señales de referencia, perturbaciones y/o ruidos de medida,
- $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ vector de los controles que el corrector envía al sistema,
- $e(t) \in \mathbb{R}^{n_e}$ vector de las señales de supervisión que permiten caracterizar el buen funcionamiento del bucle de control, como los errores, los cuales deben permanecer reducidos,
- $z(t) \in \mathbb{R}^{n_z}$ vector de las medidas disponibles con las que el sistema retroalimenta al corrector.

La matriz de transferencia $P(s)$ representa el funcionamiento dinámico del sistema considerado y es estabilizado por un corrector cuyo comportamiento es modelizado por la matriz $K(s)$:

$$\begin{pmatrix} E(s) \\ Z(s) \end{pmatrix} = P(s) \begin{pmatrix} W(s) \\ U(s) \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$U(s) = K(s) Z(s) \quad (4.2)$$

Como la matriz $P(s)$ posee dos vectores de entrada (w y u) y dos vectores de salida (e y z), puede descomponerse de la siguiente forma:

$$P(s) = \begin{pmatrix} P_{ew}(s) & P_{eu}(s) \\ P_{zw}(s) & P_{zu}(s) \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Utilizando las ecuaciones (4.1), (4.2) y (4.3), la matriz de transferencia entre w y e del sistema en bucle cerrado se expresa:

$$E(s) W(s)^{-1} = P_{ew}(s) + P_{eu}(s) K(s) (I - P_{zu}(s) K(s))^{-1} P_{zw}(s) = \mathcal{F}_I(P(s), K(s)) \quad (4.4)$$

Esta matriz de transferencia $\mathcal{F}_l(P(s), K(s))$ se conoce con el nombre de *Transformación Fraccional Lineal* (LFT, *Linear Fractional Transformation*). El subíndice *l* (para *lower*) indica que el corrector $K(s)$ se aplica a la parte inferior de los vectores de entradas y salidas de $P(s)$, es decir, a u y z .

4.1.2. Problema estándar

El problema que deseamos resolver se expresa como sigue:

Dadas $P(s)$ y $\gamma > 0$, determinar $K(s)$ que estabiliza internamente el sistema cerrado de la figura 4.1, y asegura:

$$\|\mathcal{F}_l(P(s), K(s))\|_\infty < \gamma \quad (4.5)$$

Por propiedad de la norma H_∞ (apartado D.2.2 del anexo D), la función de transferencia entre cada componente del vector w y cada componente del vector e tendrá una norma una norma H_∞ inferior a γ .

4.1.3. Síntesis H_∞

La resolución del problema estándar se aborda con las *ecuaciones de Riccati*. Para la utilización de este método, se requiere que la matriz de transferencia $P(s)$ del problema estándar se encuentre en forma de representación de estado, con $x_P(t) \in \mathbb{R}^{n_{xP}}$ el nuevo vector de estado:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_P(t) \\ e(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B_w & B_u \\ C_e & D_{ew} & D_{eu} \\ C_z & D_{zw} & D_{zu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_P(t) \\ w(t) \\ u(t) \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Para poder resolver nuestro problema H_∞ , se realizan las siguientes hipótesis:

1. (A, B_u) es estabilizable y (C_z, A) es detectable
2. $\text{rang}(D_{eu}) = n_u$ et $\text{rang}(D_{zw}) = n_z$
3. $\forall \omega \in \mathbb{R}, \text{rang} \begin{pmatrix} A - j\omega I_{n_{xP}} & B_u \\ C_e & D_{eu} \end{pmatrix} = n_{xP} + n_u$
4. $\forall \omega \in \mathbb{R}, \text{rang} \begin{pmatrix} A - j\omega I_{n_{xP}} & B_w \\ C_z & D_{zw} \end{pmatrix} = n_{xP} + n_z$

Una vez estas hipótesis son satisfechas, la factibilidad del problema puede probarse con el siguiente teorema:

Teorema 1. *Bajo las hipótesis (1 a 4), el problema H_∞ estándar tiene una solución si y solamente si:*

$$(I) H_\infty = \begin{pmatrix} A & \gamma^{-2}B_w B_w^T - B_u B_u^T \\ -C_e^T C_e & -A^T \end{pmatrix} \text{ no tiene ningún valor propio imaginario puro}$$

(II) *existe una matriz $X_\infty \geq 0$ solución de la ecuación de Riccati:*

$$X_\infty A + A^T X_\infty + X_\infty (\gamma^{-2}B_w B_w^T - B_u B_u^T) X_\infty + C_e^T C_e = 0$$

$$(III) J_\infty = \begin{pmatrix} A^T & \gamma^{-2}C_e^T C_e - C_z^T C_z \\ -B_w B_w^T & -A \end{pmatrix} \text{ no tiene ningún valor propio imaginario puro}$$

(IV) *existe una matriz $Y_\infty \geq 0$ solución de la ecuación de Riccati:*

$$X_\infty A + A^T X_\infty + X_\infty (\gamma^{-2}C_e^T C_e - C_z^T C_z) X_\infty + B_w B_w^T = 0$$

(V) *el módulo del mayor valor propio de $X_\infty Y_\infty$ es menor que γ^2*

Finalmente, la solución del problema estándar viene dado por el siguiente teorema:

Teorema 2. *Bajo las condiciones del teorema 1, los correctores racionales $K(s)$ que estabilizan el sistema y satisfacen $\|\mathcal{F}_l(P(s), K(s))\|_\infty < \gamma$ son definidos por la representación de estado:*

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_c(t) \\ u(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{A}_\infty & | & Z_\infty Y_\infty C_z^T \\ -B_u^T X_\infty & | & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c(t) \\ z(t) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

con:

$$\begin{aligned} \hat{A}_\infty &= A + \gamma^{-2}B_w B_w^T X_\infty - B_u B_u^T X_\infty - Z_\infty Y_\infty C_z^T C_z \\ Z_\infty &= (I_{n_x} - \gamma^{-2}Y_\infty X_\infty)^{-1} \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.2. Definición del problema sobre el modelo lineal

Para obtener el coordinador H_∞ que regule el modelo del HCC (desarrollado en el capítulo 2), aplicamos el mismo procedimiento que el expuesto en la sección 4.1.

4.2.1. Modelo estándar

Representación de estado

La figura 4.2 ilustra el esquema general del sistema controlado, utilizando la nomenclatura de la tabla B.2 del anexo B:

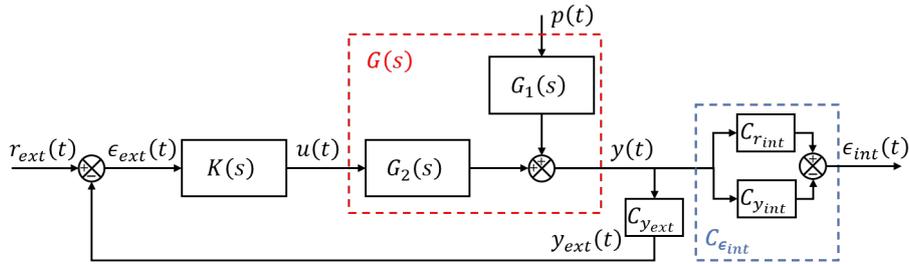


Figura 4.2: Esquema del sistema controlado

La matriz de transferencia $G(s)$ modeliza el comportamiento del sistema que deseamos controlar:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_1(s) & G_2(s) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Mientras que, la matriz de transferencia $K(s)$ modeliza el corrector que deseamos obtener con la síntesis H_∞ .

Implementación de filtros

Para lograr los objetivos definidos en el apartado 2.3, introducimos una serie de ponderaciones sobre las diferentes señales, con la ayuda de filtros. Estos filtros permiten remodelar el comportamiento frecuencial de las funciones de transferencia. Además, se implementan de modo que se pueda identificar claramente el modelo estudiado en la forma estándar, como puede observarse en la figura 4.3.

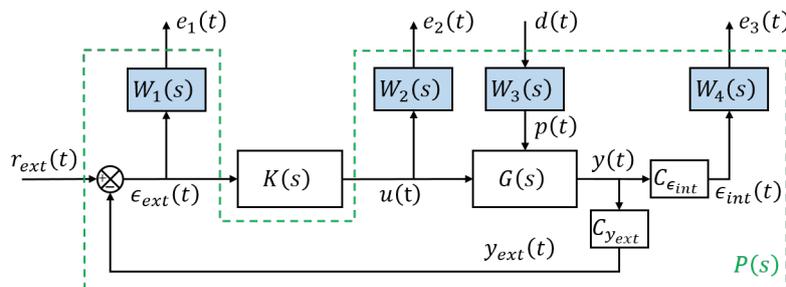


Figura 4.3: Sistema controlado en la forma estándar

La estructura de control elegida permite actuar sobre los objetivos del problema:

1. El filtro $W_1(s)$ controla el error externo ϵ_{ext} entre la potencia total y_{ext} y la demanda energética r_{ext} (apartado 2.3.4, objetivo 1)
2. El filtro $W_2(s)$ pondera los controles obtenidos u (apartado 2.3.4, objetivo 4)
3. El filtro $W_3(s)$ modeliza el efecto de las perturbaciones p sobre el sistema
4. El filtro $W_4(s)$ actúa sobre el error interno ϵ_{int} entre la entalpía del agua a la salida del módulo solar h^{sol} y en el punto de inyección h^{CCG} (apartado 2.3.4, objetivo 2) y el gasto másico de agua a la salida \dot{m}^{sol} y entrada \dot{m}_{in}^{sol} del mismo (apartado 2.3.4, objetivo 3)

Para implantar el modelo en la forma estándar, la tabla 4.1 resume los diferentes tipos de variables definidas para el sistema.

Variable	Problema estándar	HCC
Entradas externas	w	r_{ext} d
Salidas a controlar	e	e_1 e_2 e_3
Controles	u	u
Medidas disponibles	z	ϵ_{ext}

Tabla 4.1: Definición de las variables del modelo estándar

Asimismo, la matriz de transferencia del sistema en bucle cerrado entre las entradas (r_{ext} y d) y las salidas (e_1 , e_2 y e_3) resulta:

$$\begin{pmatrix} E_1(s) \\ E_2(s) \\ E_3(s) \end{pmatrix} = M(s) \begin{pmatrix} R_{ext}(s) \\ D(s) \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

con:

$$M(s) = \begin{pmatrix} W_1(s) S(s) & -W_1(s) S(s) C_{y_{ext}} G_1(s) W_3(s) \\ W_2(s) K(s) S(s) & -W_2(s) K(s) S(s) C_{y_{ext}} G_1(s) W_3(s) \\ W_4(s) C_{\epsilon_{int}} T(s) G_2(s) K(s) & W_4(s) C_{\epsilon_{int}} T(s) G_1(s) W_3(s) \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

donde $S(s) = (I_{n_{ext}} + C_{y_{ext}} G_2(s) K(s))^{-1} \in \mathbb{C}^{n_{ext} \times n_{ext}}$ y $T(s) = (I_{n_y} + G_2(s) K(s) C_{y_{ext}})^{-1} \in \mathbb{C}^{n_y \times n_y}$ corresponden a las funciones de sensibilidad.

Finalmente, obtenemos:

$$M(s) = \mathcal{F}_l(P(s), K(s)) \quad (4.12)$$

4.2.2. Problema estándar

Definición

Para nuestro sistema HCC, el problema H_∞ que buscamos a resolver corresponde a:

Dadas $G(s)$, $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$, $W_4(s)$ y $\gamma > 0$, determinar $K(s)$ que estabiliza internamente el sistema cerrado de la figura 4.3, y asegura:

$$\left\| \begin{pmatrix} W_1(s) S_1(s) & -W_1(s) S_1(s) C_{y_{ext}} G_1(s) W_3(s) \\ W_2(s) K(s) S_1(s) & -W_2(s) K(s) S_1(s) C_{y_{ext}} G_1(s) W_3(s) \\ W_4(s) C_{\epsilon_{int}} S_2(s) G_2(s) K(s) & W_4(s) C_{\epsilon_{int}} S_2(s) G_1(s) W_3(s) \end{pmatrix} \right\|_\infty < \gamma \quad (4.13)$$

Elección de los filtros

Las propiedades (D.6b y D.6c) de la norma H_∞ (sección D.2.2 del anexo D) aseguran que si se verifica la condición (4.13), entonces todas las matrices de transferencia verifican la misma condición:

$$\|W_1(s) S(s)\|_\infty < \gamma \quad (4.14a)$$

$$\|W_2(s) K(s) S(s)\|_\infty < \gamma \quad (4.14b)$$

$$\|W_4(s) C_{\epsilon_{int}} T(s) G_2(s) K(s)\|_\infty < \gamma \quad (4.14c)$$

$$\|W_1(s) S(s) C_{y_{ext}} G_1(s) W_3(s)\|_\infty < \gamma \quad (4.14d)$$

$$\|W_2(s) K(s) S(s) C_{y_{ext}} G_1(s) W_3(s)\|_\infty < \gamma \quad (4.14e)$$

$$\|W_4(s) C_{\epsilon_{int}} T(s) G_1(s) W_3(s)\|_\infty < \gamma \quad (4.14f)$$

Por extensión, el módulo de cada componente de las matrices de transferencia (4.14a) a (4.14f) es menor que γ . Asimismo, podemos limitar la respuesta frecuencial de las funciones de transferencia por un umbral que depende de los filtros elegidos.

Para el desarrollo que sigue, haremos la aproximación asintótica típica en bucle abierto, con la función de transferencia en bucle abierto expresada por $H_{BO}(s) = C_{y_{ext}} G_2(s) K(s)$. Recordando la expresión de la función de sensibilidad S de la sección 4.2.1, para un sistema monovariante cualquiera, esta aproximación se define como:

$$\begin{aligned} \omega < \omega_0, \quad |H_{BO}(j\omega)| \gg 1, \quad |S(j\omega)| \approx |H_{BO}(j\omega)|^{-1} \\ \omega > \omega_0, \quad |H_{BO}(j\omega)| \ll 1, \quad |S(j\omega)| \approx 1 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Para bajas frecuencias ($\omega < \omega_0$), la función de sensibilidad S se puede aproximar por la inversa de la función de transferencia en bucle abierto, y para frecuencias elevadas ($\omega > \omega_0$), esta función S corresponde a la función unidad (figura 4.4).

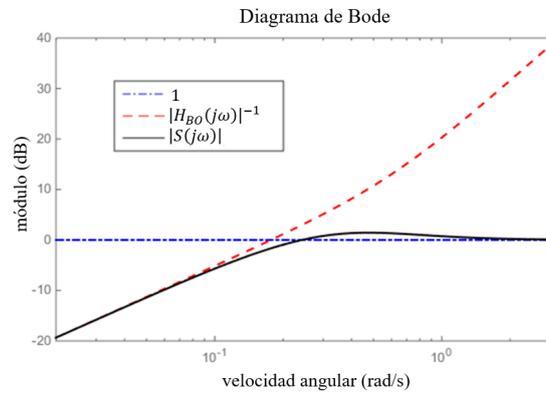


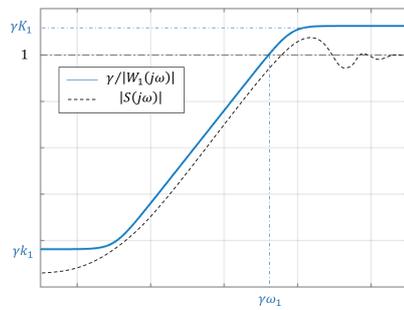
Figura 4.4: Aproximación de S por H_{BO}

La figura 4.5 muestra las respuestas frecuenciales típicas de las seis funciones de transferencia de la matriz $M(s)$, ponderadas por los filtros, en el caso de un sistema monovariante. Observamos que efectivamente, para representación frecuencial el módulo de las funciones de transferencia permanece siempre inferior al módulo de los filtros ponderado por γ . De esta manera, la energía total del sistema queda acotada y fácilmente ajustable.

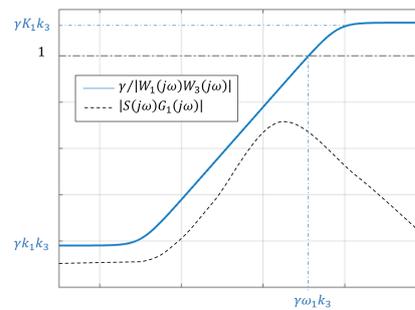
Por extensión, a continuación se detalla la influencia de los filtros para el caso general de un sistema multivariable, aplicable a nuestro modelo HCC. La elección de los filtros para el HCC se expone en el apartado C.3 del anexo C.

- (a) el **filtro** $W_1(s) \in \mathbb{C}^{n_{ext} \times n_{ext}}$ permite imponer la forma de la función de transferencia S entre la referencia r_{ext} y el error ϵ_{ext} (figura 4.5a). Cada componente de W_1 es un filtro de primer orden de tipo *paso alto*:

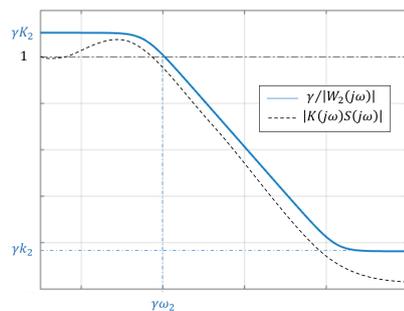
$$W_1(s)^{-1} = \begin{pmatrix} K_{1,1} \frac{s+k_{1,1}\omega_{1,1}}{s+K_{1,1}\omega_{1,1}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{1,2} \frac{s+k_{1,2}\omega_{1,2}}{s+K_{1,2}\omega_{1,2}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{1,ny} \frac{s+k_{1,ny}\omega_{1,ny}}{s+K_{1,ny}\omega_{1,ny}} \end{pmatrix} \quad (4.16)$$



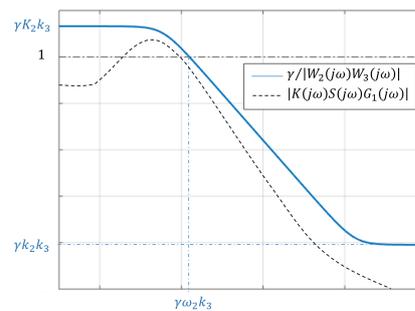
(a) Umbral sobre S



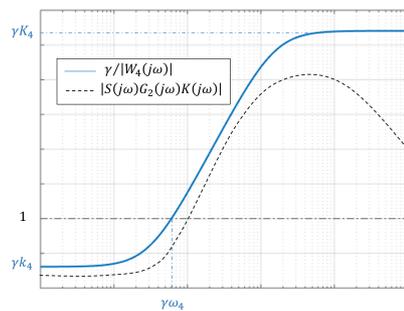
(b) Umbral sobre SG_1



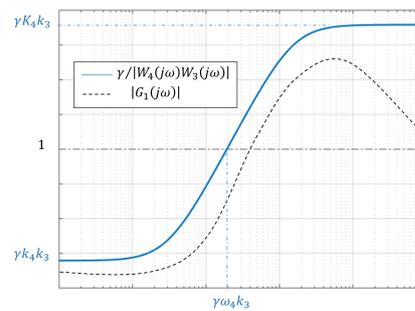
(c) Umbral sobre KS



(d) Umbral sobre KSG_1



(e) Umbral sobre TG_2K



(f) Umbral sobre TG_1

Figura 4.5: Ejemplo de la respuesta frecuencial de las principales funciones de transferencia para un sistema monovariable

cuyos parámetros permiten lograr nuestros objetivos de control:

- la *ganancia a bajas frecuencias* k_1 : delimita el error estático (apartado E.1 del anexo E) para una entrada de referencia constante:

$$\forall \omega \in \mathbb{R}, |S(j\omega)| < |W_1(j\omega)|^{-1} \gamma \xrightarrow{\omega \rightarrow 0} \epsilon_0 < k_1 \gamma \quad (4.17)$$

- la *pulsación de corte* ω_1 : determina el ancho de banda (apartado E.2 del anexo E) mínimo deseado, y por lo tanto, acota el tiempo de respuesta:

$$\left. \begin{array}{l} \forall \omega \in \mathbb{R}, |S(j\omega)| < |W_1(j\omega)|^{-1} \gamma \\ \forall \omega < \omega_1 \gamma, |W_1(j\omega)|^{-1} \gamma < I_{n_{ext}} \\ \forall \omega < \omega_0, |S_1(j\omega)| < I_{n_{ext}} \end{array} \right\} \rightarrow \omega_0 > \omega_1 \gamma \quad (4.18)$$

- la *ganancia a altas frecuencias* K_1 : impone un límite para el margen de ganancia (apartado E.3 del anexo E) de nuestro sistema corregido:

$$\max_{\omega} |S(j\omega)| < \max_{\omega} |W_1(j\omega)|^{-1} \gamma \rightarrow \frac{1}{\Delta M} < K_1 \gamma \quad (4.19)$$

- (b) el **filtro** $W_2(s) \in \mathbb{C}^{n_u \times n_u}$ permite modificar el comportamiento de la función de transferencia KS entre la referencia r_{ext} y el control u (figura 4.5c). Cada componente de W_2 es un filtro de primer orden de tipo *paso bajo*:

$$W_2(s)^{-1} = \begin{pmatrix} k_{2,1} \frac{s+K_{2,1}\omega_{2,1}}{s+k_{2,1}\omega_{2,1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_{2,2} \frac{s+K_{2,2}\omega_{2,2}}{s+k_{2,2}\omega_{2,2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_{2,n_u} \frac{s+K_{2,n_u}\omega_{2,n_u}}{s+k_{2,n_u}\omega_{2,n_u}} \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

con los siguientes parámetros a ajustar:

- la *ganancia a bajas frecuencias* K_2 : debe de ser generalmente superior a la unidad, lo que permite un control lo suficientemente robusto como para alcanzar la referencia.
- la *pulsación de corte* ω_2 : pondera la importancia del control y debe fijarse superior a la pulsación de corte (ω_1).
- la *ganancia a altas frecuencias* k_2 : permite reducir el efecto del ruido sobre el control.

- (c) el **filtro** $W_3(s) \in \mathbb{C}^{n_p \times n_p}$ influye sobre las funciones de transferencia $SC_{y_{ext}}G_1$, $KSC_{y_{ext}}G_1$ y $C_{\epsilon_{int}}TG_1$ que tienen la perturbación p como entrada (figuras 4.5b, 4.5d y 4.5f). Con el objetivo de reducir el efecto de las perturbaciones, la elección de un filtro con componentes constantes será suficiente en nuestro caso:

$$W_3(s)^{-1} = \begin{pmatrix} k_{3,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_{3,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_{3,n_p} \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Disminuyendo la *ganancia* k_3 se consigue que las perturbaciones tengan menor efecto sobre nuestro sistema, lo que permite reducir el error estático y limitar la importancia del control para perturbaciones constantes.

(d) el **filtro** $W_4(s) \in \mathbb{C}^{n_{int} \times n_{int}}$ actúa sobre la función de transferencia $C_{\epsilon_{int}} T G_2 K$ entre la referencia r_{ext} y el error interno ϵ_{int} (figura 4.5e). Como en el caso del filtro W_1 , cada componente de W_4 se toma como un filtro de primer orden de tipo *paso alto*.

$$W_4(s)^{-1} = \begin{pmatrix} K_{4,1} \frac{s+k_{4,1}\omega_{4,1}}{s+K_{4,1}\omega_{4,1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_{4,2} \frac{s+k_{4,2}\omega_{4,2}}{s+K_{4,2}\omega_{4,2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & K_{4,ny} \frac{s+k_{4,ny}\omega_{4,ny}}{s+K_{4,ny}\omega_{4,ny}} \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

cuyos parámetros son análogos al filtro W_1 :

- la *ganancia a bajas frecuencias* k_4 : restringe el error interno en régimen permanente.
- la *pulsación de corte* ω_4 : acota el tiempo necesario para que el error interno se estabilice.
- la *ganancia a altas frecuencias* K_4 : limita el error interno dinámico (es decir, cuando la referencia oscila).

Las dimensiones de los filtros W_1 a W_4 se detallan en el apartado B.4 del anexo B. El reglaje tomado para los mismos se detalla igualmente en la tabla C.7 del anexo B.

4.2.3. Síntesis H_∞

La síntesis del coordinador H_∞ necesita:

- el modelo lineal del HCC, representado por G en la figura 4.2
- los filtros calculados W_1 a W_4
- el esquema de control adoptado (figura 4.3)

Estos datos permiten construir el modelo en la forma estándar P , el cual se usa a continuación para verificar la factibilidad del problema con el teorema 1 y calcular el corrector buscado gracias al teorema 2. La aplicación de estos teoremas para la obtención del corrector H_∞ de nuestro problema se realiza gracias a la función *hinfsyn* de la *Robust Control Toolbox* del programa de cálculo numérico MATLAB.

Destacamos que, el número de estados del corrector solución del problema estándar definido, n_{xc} , es igual a la suma de los estados del modelo HCC, n_x , más los estados de los filtros. Definiendo los estados de los filtros como $x_1 \in \mathbb{R}^{n_{x1}}$ a $x_4 \in \mathbb{R}^{n_{x4}}$, se cumple que:

$$n_{x_c} = n_x + \sum_{i=1}^4 n_{x_i} \quad (4.23)$$

Por otro lado, el gran tamaño del sistema nos obliga a realizar una posterior reducción del orden del corrector obtenido $x_{C_{red}}$, eliminando los modos más rápidos. Las dimensiones de estos estados se detallan en la tabla B.4 del anexo B.

4.3. Aplicación sobre el modelo no lineal

Una vez obtenido el coordinador H_∞ a partir del modelo lineal del HCC, lo aplicamos sobre el modelo no lineal. La figura 4.6 muestra el esquema de control implantado para este fin:

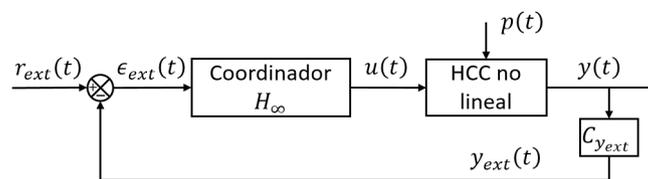


Figura 4.6: Esquema del control H_∞ sobre el modelo no lineal del HCC

4.4. Conclusión

Como hemos visto, el procedimiento para desarrollar un corrector H_∞ consiste en varias etapas:

1. Expresión del modelo en forma estándar
2. Definición del problema estándar
3. Síntesis del corrector H_∞

Este proceso tiene dos grandes etapas específicas para cada sistema, que nos permiten adoptar un gran número de grados de libertad:

1. La *estructura de control* permite controlar todas las variables del sistema. En particular, la elección de las salidas del modelo estándar P es de gran importancia. Estas salidas son de dos tipos:
 - las señales de supervisión e que son aquellas que deseamos controlar, como controles o errores.

- las señales de medida z que son aquellas que aportan información sobre el sistema al corrector.
2. La elección de los *filtros* es decisivo para el correcto funcionamiento de la estructura de control establecida. Conviene situar estos filtros a la salida de las señales de supervisión e para regular la influencia de las entradas sobre estas señales. Además, la colocación de filtros en la entrada de las señales exteriores w , permite evaluar la acción de las perturbaciones y de las referencias sobre las señales de supervisión e .

Finalmente, el capítulo 5 analiza los resultados obtenidos con la implementación de este coordinador H_∞ sobre el sistema HCC.

Capítulo 5

Resultados

En el presente capítulo, los modelos lineal y no lineal del ciclo combinado híbrido (capítulo 2) se simulan con los dos correctores estudiados: los coordinadores MPC (capítulo 3) y H_∞ (capítulo 4). Los resultados obtenidos son analizados y comparados con aquellos obtenidos de simular el sistema sin coordinador (regulación descentralizada) y con un coordinador Lineal Cuadrático (LQ, *Linear Quadratic*). La síntesis del coordinador LQ ha sido realizada en otros estudios, no siendo objeto del presente trabajo.

5.1. Escenarios y criterios de evaluación

Para evaluar el funcionamiento de los controles desarrollados, definimos tres escenarios de simulación:

Escenario 1 Escalón de 20 MW de amplitud sobre la demanda de potencia (r_p) a los 20 s y perturbación solar constante, con un tiempo de simulación de 100 s

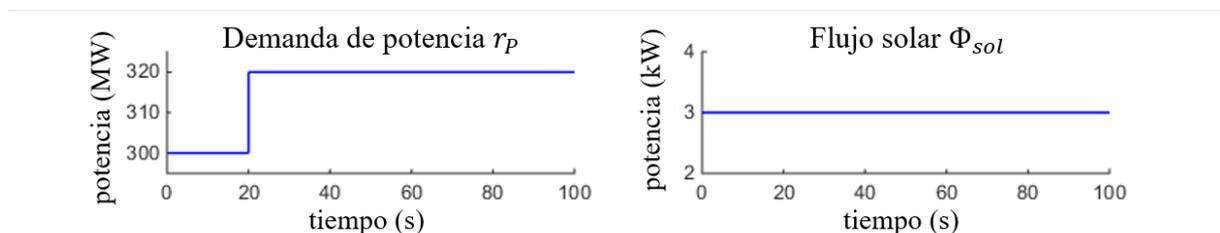


Figura 5.1: Escenario 1

Escenario 2 Gaussiana sobre la demanda de potencia, con pequeñas fluctuaciones rápidas y perturbación solar constante, con un tiempo de simulación de 10 000 s

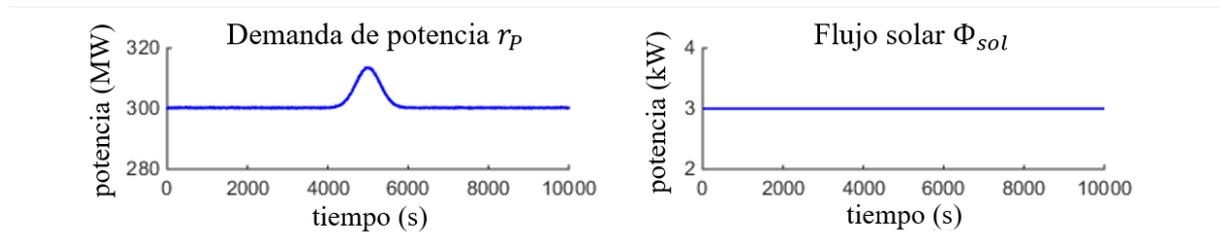


Figura 5.2: Escenario 2

Escenario 3 Onda cuadrada de -2 kW de amplitud sobre la perturbación solar (Φ_{sol}) entre 100 s y 5000 s y una demanda de potencia constante, con un tiempo de simulación de 10 000 s

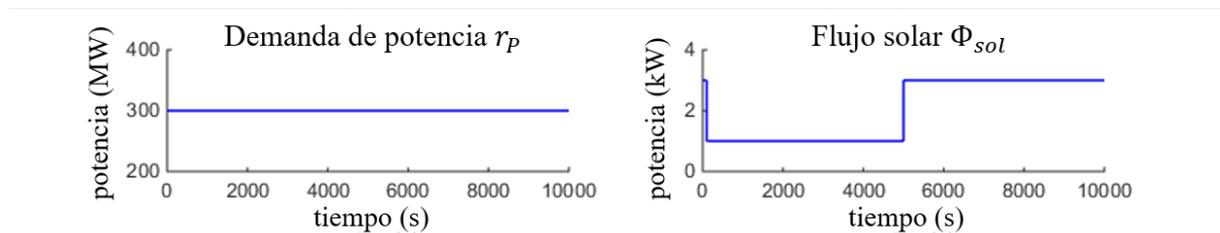


Figura 5.3: Escenario 3

La tabla 5.1 describe una serie de criterios de evaluación, mostrando al mismo tiempo los escenarios en los que se usará cada uno de ellos:

Subsist.	Variable(s)	Criterio	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	
CCG	P	t_{90P}	Tiempo de respuesta al 90 %	✓	✗	✗
		t_{mP}	Tiempo del primer máximo	✓	✗	✗
		D_P	Sobreoscilación	✓	✗	✗
		ϵ_P	Error estático relativo	✓	✗	✗
		E_P	Error total acumulado	✓	✓	✗
	P_{TG}/P_{TV}	$\%_{TG}/\%_{TV}$	Porcentaje de utilización	✓	✓	✗
Solar	\dot{m}^{sol}	l_{TG}	Longitud recorrida	✗	✓	✗
		$max_{\dot{m}}$	Valor máxima	✓	✗	✗
Almac.	N_{hot}	$\sigma_{\dot{m}}$	Media	✓	✗	✗
		$min_{N_{hot}}$	Valor mínima	✗	✓	✓
		$m_{N_{hot}}$	Media	✗	✓	✓
		$\sigma_{N_{hot}}$	Desviación típica	✗	✓	✓

Tabla 5.1: Criterios de evaluación

5.2. Resultados de simulación

5.2.1. Modelo lineal

Escenario 1

El primer escenario, simulado sobre el modelo lineal del HCC, tiene como objetivo demostrar que en el caso de un control coordinado, el subsistema solar se utiliza para reemplazar una parte de la producción de la TG.

Los resultados expuestos en la primera figura 5.4 permiten evaluar el seguimiento de la potencia total sobre su referencia, para los casos descentralizado y coordinados. En todos los

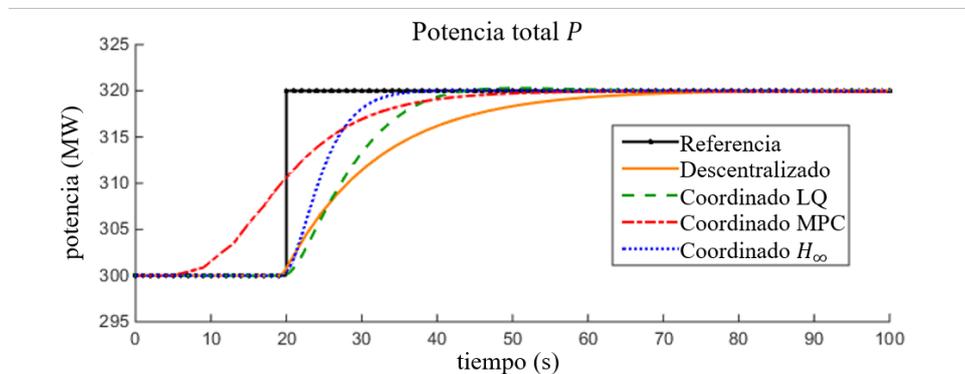


Figura 5.4: Potencia total en el modelo lineal (Escenario 1)

casos, la referencia de la potencia es alcanzada con diferencias fácilmente observables en el régimen dinámico, pero también en el estático.

Respecto al *régimen dinámico*, para alcanzar el 90 % de la demanda de potencia, el caso descentralizado tarda 27.82 s, mientras que los sistemas coordinados tienen un menor tiempo de respuesta, siendo de 16.22 s para el coordinador LQ, de 13.56 s para el coordinador MPC y de 9.88 s para el coordinador H_∞ . El coordinador H_∞ permite pues, responder más rápidamente a la demanda de potencia. Constatamos también el efecto anticipativo del control MPC, con 12 s de predicción en este caso (como indica la tabla C.3 del anexo C). De hecho, este efecto anticipativo puede escogerse con libertad, pero en este estudio hemos considerado que podemos tener una previsión bastante precisa de la demanda real, tan solo con unos segundos de anticipación. Por otro lado, el porcentaje de sobreoscilación de la potencia respecto de su referencia es de $1.56 \times 10^{-2} \%$ para el sistema descentralizado, de $9.04 \times 10^{-2} \%$ para el coordinado LQ, nula para el coordinado MPC y de $1.05 \times 10^{-2} \%$ para el coordinado H_∞ . Para las simulaciones del modelo lineal, este porcentaje es muy reducido en todos los casos y por lo tanto despreciable, no siendo el caso con el modelo no lineal, como veremos. Determinamos también el tiempo del primer máximo, siendo de 80.63 s para el descentralizado, de 30.10 s para el coordinado LQ, de 53 s para el MPC y de 26.01 s para el H_∞ .

Por lo que concierne al *régimen estático*, el error relativo entre la respuesta y su referencia es de $2.49 \times 10^{-1} \%$ en el caso descentralizado, de $8.06 \times 10^{-3} \%$ en el caso coordinado LQ, de $5.19 \times 10^{-1} \%$ en el caso coordinado MPC y de $1.07 \times 10^{-2} \%$ en el caso coordinado H_∞ . Los controles coordinados LQ y H_∞ permiten una respuesta mucho más precisa, respecto a la referencia impuesta.

Finalmente, un último parámetro que podemos analizar es el error total acumulado a lo largo de toda la simulación. Este error es del 15.22 % para el sistema descentralizado, superior al de los casos coordinados (11.15 % para el LQ, 8.7 % para el MPC y 6.83 % para el H_∞). Los dos coordinadores con menor error total son el H_∞ y el MPC. El H_∞ posee una gran rapidez y precisión, siendo dos parámetros cruciales para la evaluación de este error, mientras que el MPC es beneficiado por su efecto anticipativo. Esta anticipación produce un pequeño error de potencia respecto a su demanda antes de la aparición del escalón, para finalmente minimizar la diferencia total.

La figura 5.5 muestra la utilización de la TG y de la TV para los casos descentralizado y coordinados. Los resultados analizados anteriormente eran claramente más satisfactorios en

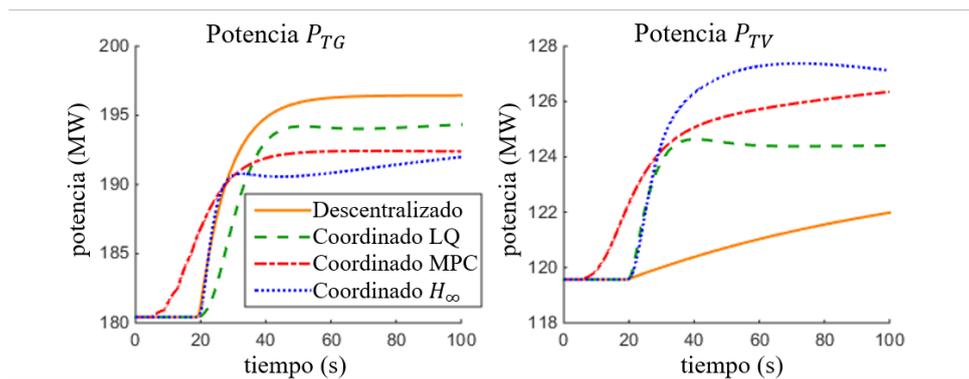


Figura 5.5: Potencias TG y TV en el modelo lineal (Escenario 1)

los casos coordinados que en el caso descentralizado. Esto se justifica con una utilización más eficiente del módulo solar (potencia TV) en los casos coordinados, permitiendo la producción de un importante porcentaje de la potencia demandada. Efectivamente, el porcentaje de potencia TV es del 38.65 % en el caso descentralizado, mientras que para los casos coordinados es del 39.39 % en el LQ, del 39.63 % en el MPC y del 39.9 % en el H_∞ . El incremento de la potencia TV en los casos coordinados permite reducir la producción de potencia TG, gracias al módulo solar.

Esta potencia solar suplementaria que aporta la TV es producida por el gasto másico de vapor de agua que el subsistema solar suministra al CCG, como puede apreciarse mejor en la figura 5.6. En el momento en el que se produce el escalón, los controles coordinados liberan vapor de agua en el CCG. Este caudal inyectado, llega a un máximo de 77.98 kg/s con el coordinador LQ, de 39.63 kg/s con el coordinador MPC y de 78.26 kg/s con el coordinador H_∞ . Los controles coordinados LQ y H_∞ solicitan más el módulo solar, mientras que el control

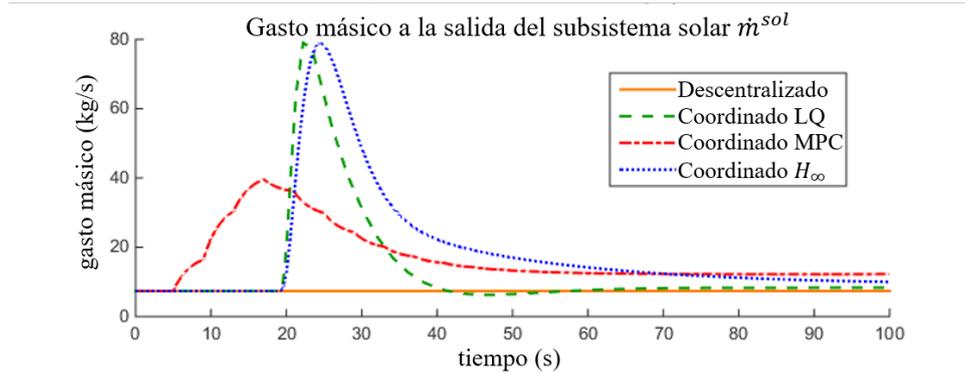


Figura 5.6: Gasto másico a la salida del subsistema solar en el modelo lineal (Escenario 1)

descentralizado produce una potencia solar constante. Analizamos también el valor medio de este caudal, que es de 13.39 kg/s con el control LQ, de 16.94 kg/s con el MPC y de 18.88 kg/s con el H_{∞} . Concluimos que el control H_{∞} utiliza más, de media, el caudal solar, pero en cambio, implica un mayor caudal de salida que de entrada, lo que producirá una importante despresurización en el colector solar.

Por otro lado, la figura 5.7 muestra que este incremento de potencia se alcanza de un modo más satisfactorio cuando el almacenamiento se usa eficientemente. Una parte de la energía

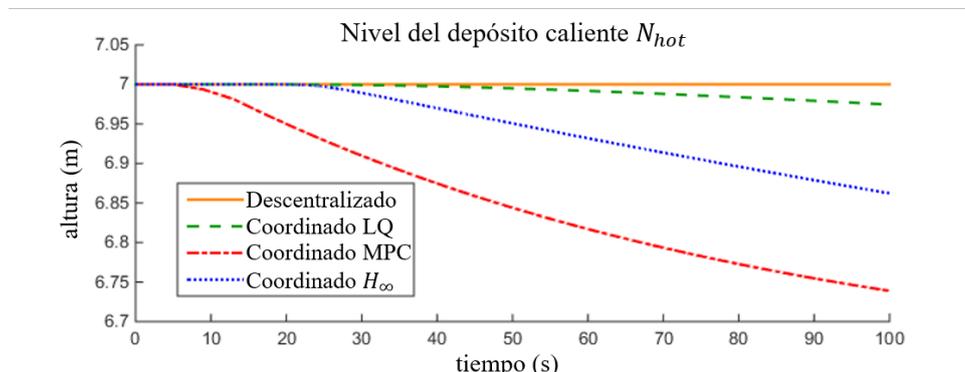


Figura 5.7: Nivel del depósito de almacenamiento caliente en el modelo lineal (Escenario 1)

almacenada en el depósito caliente se usa para aumentar la entalpía del vapor reinyectado en el CCG. Observamos que el caso descentralizado no usa en absoluto el almacenamiento cuando aumenta la demanda de potencia. Sin embargo, como el tiempo de simulación elegido para este escenario no nos permite alcanzar el régimen estacionario en esta dinámica para los casos coordinados, no es posible realizar un análisis cuantitativo.

Asimismo, constatamos que, para todos los casos, la entalpía del vapor a la salida del módulo solar siempre es superior a su entalpía de saturación, lo que nos permite asegurar que se inyecta vapor sobrecalentado.

La tabla 5.2 presenta un resumen de la evaluación de los criterios expuestos:

Criterio	Descentralizado	Coordinado LQ	Coordinado MPC	Coordinado H_∞
t_{90P}	27.82 s	16.22 s	13.56 s	9.88 s
t_{mP}	80.63 s	30.10 s	53 s	26.01 s
D_P	$1.56 \times 10^{-2} \%$	$9.04 \times 10^{-2} \%$	0 %	$1.05 \times 10^{-2} \%$
ϵ_P	$2.49 \times 10^{-1} \%$	$8.06 \times 10^{-3} \%$	$5.19 \times 10^{-1} \%$	$1.07 \times 10^{-2} \%$
E_P	15.22 %	11.15 %	8.7 %	6.83 %
$\%_{TG}/\%_{TV}$	61.35 %/38.65 %	60.61 %/39.39 %	60.37 %/39.63 %	60.1 %/39.9 %
$max_{\dot{m}}$	7.38 kg/s	77.98 kg/s	39.63 kg/s	78.26 kg/s
$m_{\dot{m}}$	7.38 kg/s	13.39 kg/s	16.94 kg/s	18.88 kg/s

Tabla 5.2: Criterios de evaluación en el modelo lineal (Escenario 1)

Escenario 2

La simulación del segundo escenario pretende obtener resultados de una situación más práctica, para poder evaluar el funcionamiento real de los coordinadores.

La figura 5.8 muestra la evolución de la potencia total P , para los casos descentralizado y coordinados. Todos los reguladores alcanzan, en mayor o menor grado, la referencia sobre la

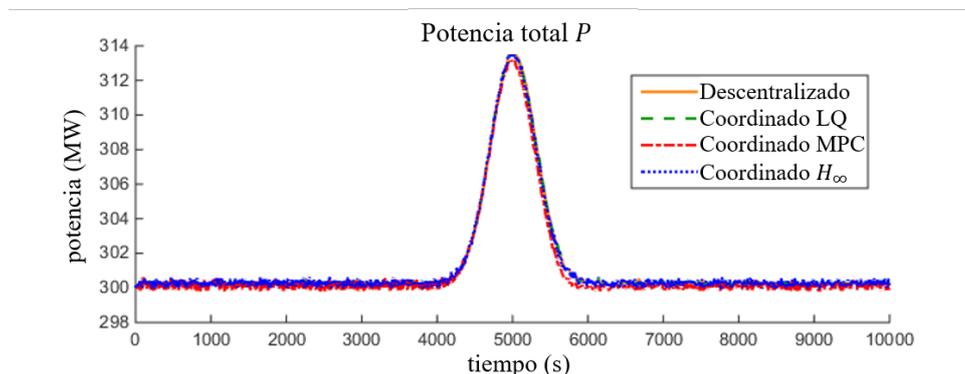


Figura 5.8: Potencia total en el modelo lineal (Escenario 2)

potencia, a pesar de las pequeñas fluctuaciones observadas. Estas curvas solo nos permiten evaluar el error total acumulado, el cual es del 19.79 % en el coordinador descentralizado, del 18.62 % en el LQ, del 21.74 % en el MPC y del 18.21 % en el H_∞ . Concluimos que el coordinador H_∞ ofrece una respuesta de la demanda de potencia más precisa respecto de su referencia impuesta.

La figura 5.9 muestra la utilización de las potencias TC y TV. Los casos coordinados solicitan más la potencia TV, ya que el módulo solar produce rápidamente toda la potencia necesaria para responder a la demanda. De este modo, la utilización de la TV es de 39.78 % para el sistema descentralizado, siendo de 39.86 %, 39.87 % y 39.85 % para los sistemas coordinados LQ, MPC y H_∞ , respectivamente.

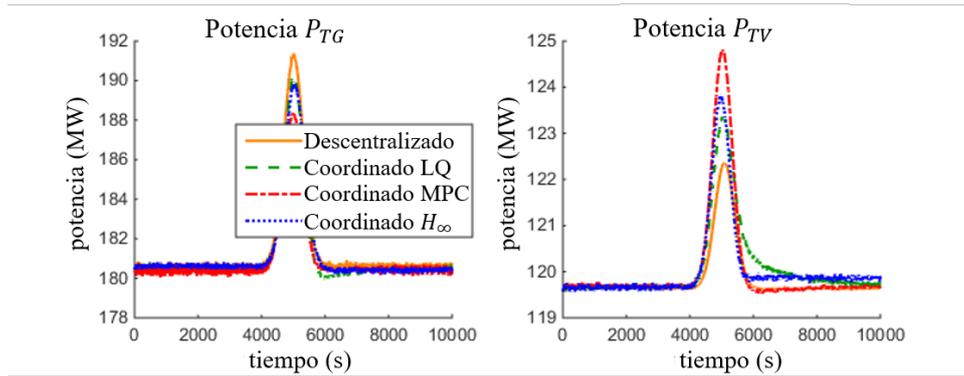


Figura 5.9: Potencias TC y TV en el modelo lineal (Escenario 2)

Por otro lado, la absorción de las fluctuaciones de la demanda de potencia con la producción TV antes que con la TG (figura 5.10), disminuyendo los ciclos de utilización de la cámara de combustión, lo que permite incrementar la vida a fatiga de sus componentes. Para

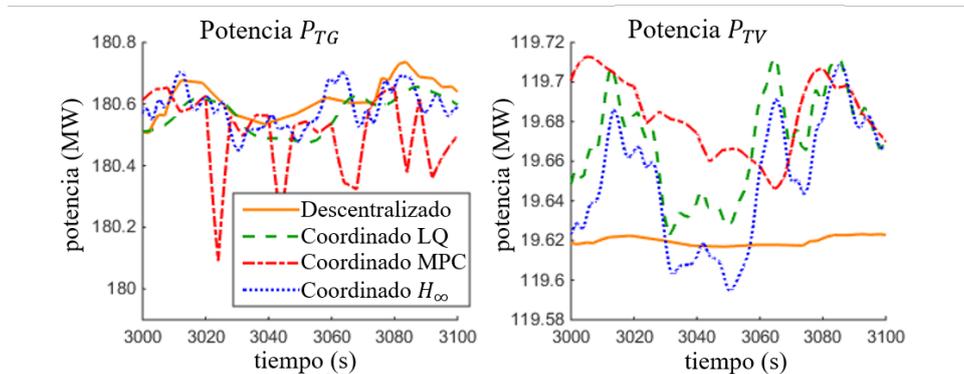


Figura 5.10: Potencias TG y TV en el modelo lineal, zoom (Escenario 2)

estudiar estas fluctuaciones, analizamos la longitud del camino recorrido por la potencia TG. Obtenemos que, para el caso descentralizado, esta longitud vale 1.24×10^{-2} MW/s, menor que para los casos coordinados, en los que toma los valores de 1.49×10^{-2} MW/s para el LQ, de 2.89×10^{-2} MW/s para el MPC y de 2.85×10^{-2} MW/s para el H_∞ . Concluimos que el sistema descentralizado solicita menos esfuerzos a la TG. Este es, por lo tanto, un punto débil de los coordinadores sintetizados, que deberíamos mejorar si deseamos tener en cuenta aspectos más reales de su funcionamiento.

La figura 5.11 muestra el nivel del depósito caliente para los casos estudiados. Resulta evidente que el coordinador que utiliza más eficientemente el almacenamiento es el H_∞ , con un nivel mínimo de 6.64 m y una media de 6.96 m, seguido de los coordinadores MPC y LQ, con un nivel mínimo de 6.75 m y de 6.82 m y una media de 6.98 m y de 6.97 m, respectivamente. Constatamos igualmente que el sistema descentralizado sigue sin utilizar el almacenamiento. Otro parámetro de evaluación es la desviación típica del nivel del depósito caliente respecto de su media, siendo de 4.57×10^{-2} m para el caso coordinado LQ, de 5.3×10^{-2} m para el MPC

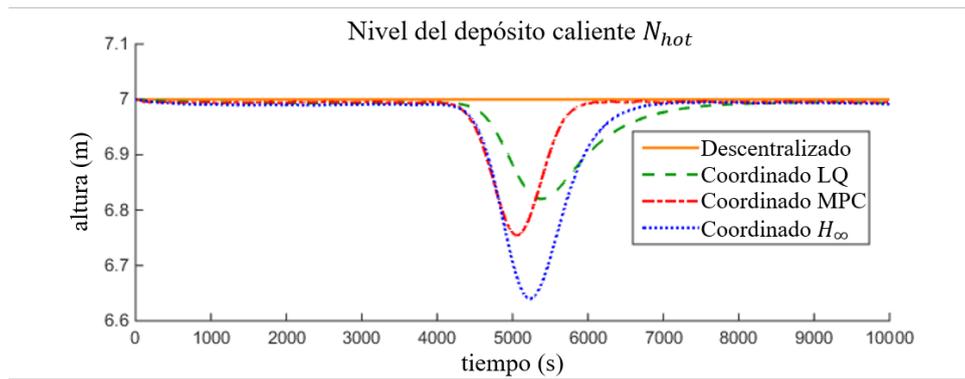


Figura 5.11: Nivel del depósito de almacenamiento caliente en el modelo lineal (Escenario 2)

y de 8.49×10^{-2} m para el H_{∞} . El coordinador H_{∞} , poseyendo la mayor desviación típica, permite alejarse más de la media, lo que significa que utiliza más el almacenamiento cuando es necesario y menos cuando no lo es.

La tabla 5.3 recapitula los valores de los criterios de evaluación obtenidos:

Criterio	Descentralizado	Coordinado LQ	Coordinado MPC	Coordinado H_{∞}
E_P	19.79 %	18.62 %	21.74 %	18.21 %
$\%T_G/\%T_V$	60.22 %/39.78 %	60.14 %/39.86 %	60.13 %/39.87 %	60.15 %/39.85 %
I_{TG}	1.24×10^{-2} MW/s	1.49×10^{-2} MW/s	2.89×10^{-2} MW/s	2.58×10^{-2} MW/s
$min_{N_{hot}}$	7 m	6.82 m	6.75 m	6.64 m
$m_{N_{hot}}$	7 m	6.97 m	6.98 m	6.96 m
$\sigma_{N_{hot}}$	0 m	4.57×10^{-2} m	5.3×10^{-2} m	8.49×10^{-2} m

Tabla 5.3: Criterios de evaluación en el modelo lineal (Escenario 2)

Escenario 3

El interés de este escenario es el de mostrar que, en presencia de una perturbación solar, el subsistema de almacenamiento es capaz de suministrar la energía necesaria al módulo solar para inyectar vapor de agua en el CCG, con potencia constante.

En ausencia de irradiación solar, el almacenamiento sustituye a los colectores solares en la producción de vapor de agua, en el caso de los controles coordinados (figura 5.12). El nivel medio del depósito caliente es de 6.03 m con el coordinador LQ, de 6.23 m con el MPC y de 6.02 m con el H_{∞} . Por otro lado, este depósito alcanza un mínimo de 5.02 m con el control LQ, de 5.41 m con el MPC y de 4.93 m con el H_{∞} . Concluimos que el coordinador H_{∞} permite un mayor uso del almacenamiento. Además, un estudio de la desviación típica nos permite confirmar esta conclusión. En efecto, la mayor desviación típica la obtenemos con el coordinador H_{∞} con un valor de 9.79×10^{-1} m, mientras que para los casos coordinados LQ y MPC, este

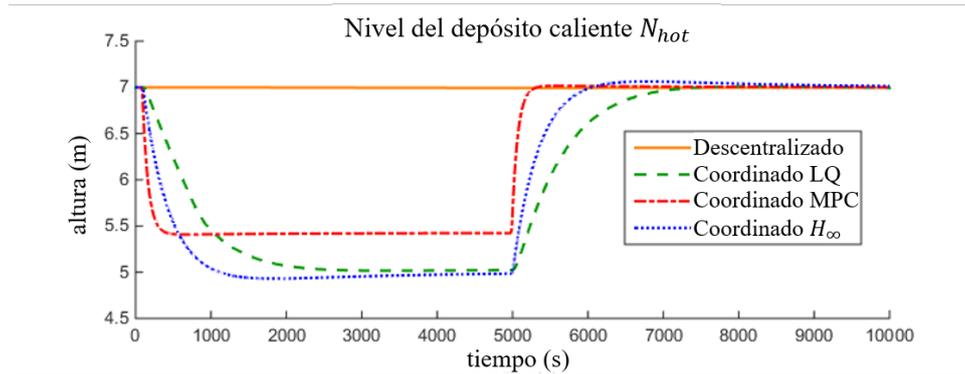


Figura 5.12: Nivel del depósito de almacenamiento caliente en el modelo lineal (Escenario 3)

parámetro toma los valores de 8.82×10^{-1} m y 7.83×10^{-1} m, respectivamente.

La tabla 5.4 resume los resultados numéricos de los criterios de evaluación:

Criterio	Descentralizado	Coordinado LQ	Coordinado MPC	Coordinado H_∞
$min_{N_{hot}}$	7 m	5.02 m	5.41 m	4.93 m
$m_{N_{hot}}$	7 m	6.03 m	6.23 m	6.02 m
$\sigma_{N_{hot}}$	0 m	8.82×10^{-1} m	7.83×10^{-1} m	9.79×10^{-1} m

Tabla 5.4: Criterios de evaluación en el modelo lineal (Escenario 3)

5.2.2. Modelo no lineal

Escenario 1

Para el primer escenario de simulación, se analiza el funcionamiento de los coordinadores implantados en el modelo no lineal, comparando los casos descentralizado, coordinado MPC y coordinado H_∞ .

La figura 5.13 presenta la evolución de la potencia total. La demanda de potencia se alcanza solamente en los casos descentralizado y coordinado MPC. Observamos que las simulaciones no lineales aportan resultados menos satisfactorios, llegando a un caso extremo de inestabilidad con el coordinador H_∞ . Por lo tanto, evaluaremos en un principio únicamente los dos casos estables, dejando el tratamiento del caso inestable para el final.

Respecto al *régimen dinámico*, los tiempos de respuesta al 90 % aumentan respecto a las simulaciones lineales: el sistema descentralizado tarda ahora 35.41 s para responder a la demanda, y el caso coordinado MPC, 44.49 s. El caso descentralizado ofrece ahora una respuesta más rápida que el caso con un coordinador MPC. Sin embargo, el tiempo del primer máximo es inferior con el coordinador MPC (17 s) que con el sistema descentralizado (30.5 s). También,

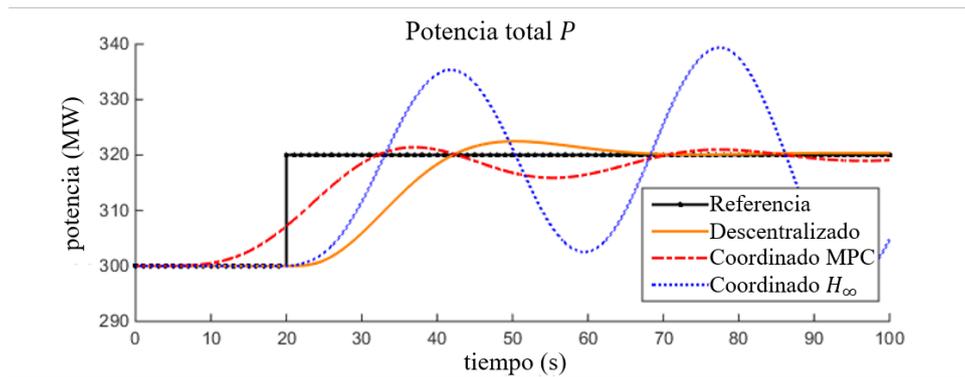


Figura 5.13: Potencia total en el modelo no lineal (Escenario 1)

las oscilaciones de todas las respuestas se ven amplificadas. El porcentaje de sobreoscilamiento alcanza un valor del $7.76 \times 10^{-1} \%$ en el caso descentralizado y del $4.42 \times 10^{-1} \%$ en el coordinado MPC.

Respecto al *régimen estático*, el error relativo es del 1.83 % con el sistema descentralizado y del 4.35 % con el sistema coordinado MPC. El caso descentralizado logra una mayor precisión; sin embargo, cabe destacar que la respuesta correspondiente al caso coordinado MPC no alcanza un régimen completamente estático al final de la simulación, por lo que el error obtenido no representa fielmente la realidad. Por otro lado, el error total acumulado es del 19.65 % en el caso descentralizado y de 12.41 % en el coordinado MPC. El control MPC logra minimizar este error, de nuevo gracias a su efecto predictivo.

Con el objetivo de analizar la utilización del subsistema solar, la figura 5.14 presenta la evolución de las potencias TG y TV. Observamos que el coordinador MPC solicita mucho más

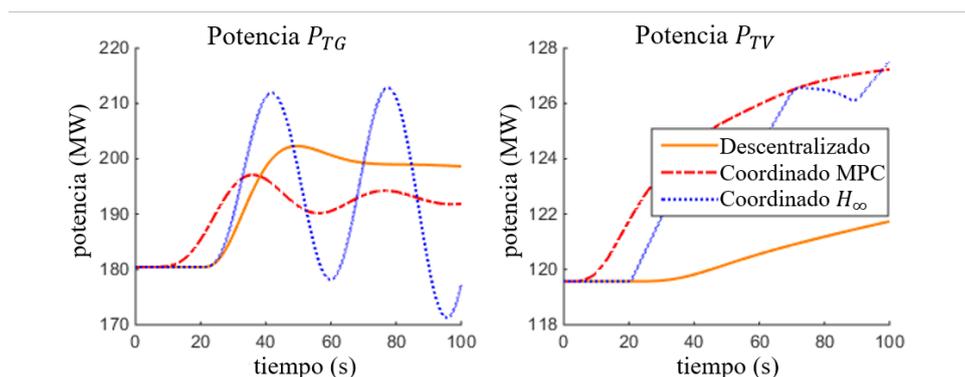


Figura 5.14: Potencias TG y TV en el modelo no lineal (Escenario 1)

la TV que el sistema descentralizado, con un 39.52 % contra un 38.34 %. Esto es debido a que, en el caso coordinado MPC, el gasto másico solar inyectado es más importante (con un máximo de 38.87 kg/s y una media de 18.61 kg/s). Por lo tanto, a pesar de simular en el modelo no lineal, el coordinador MPC logra optimizar la energía solar.

Podemos concluir que, el coordinador MPC calculado con el modelo lineal, se adapta fácilmente al modelo no lineal. Esto es así ya que, como ya comentamos en el capítulo 3, el control predictivo no es un control estándar, sino una técnica avanzada basada en la optimización en tiempo real de un sistema. Este control actualiza constantemente el estado del sistema, pudiéndose adaptar más fácilmente al comportamiento del mismo, actuando en consecuencia (figura 5.15). De la figura observamos que, el coordinador MPC calculado prevee con 12 s de

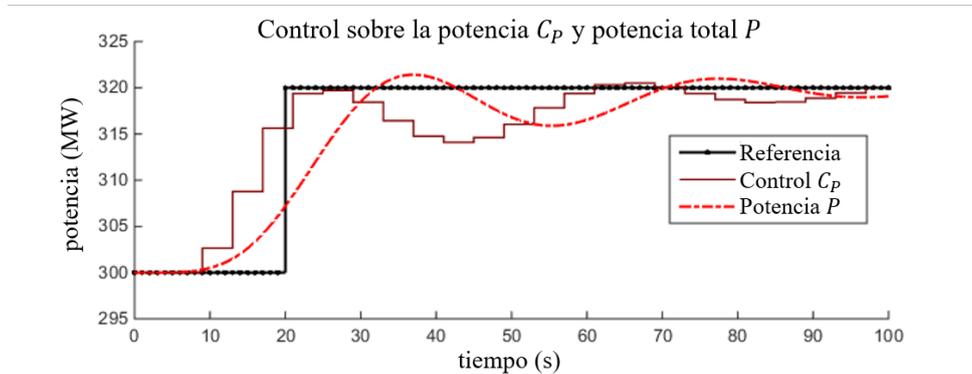


Figura 5.15: Control sobre la potencia y potencia en el modelo no lineal (Escenario 1, coordinador MPC)

antelación (lo que equivale a 3 iteraciones) cuando la salida va a sobrepasar su referencia, lo que permite aplicar un control inverso para estabilizar el sistema lo más rápido posible.

Finalmente, nos interesamos por la respuesta inestable del coordinador H_∞ . Según el anexo E.3, la estabilidad está relacionada con la robustez. Una elevada robustez asegura una elevada garantía de estabilidad. Esta robustez se mide con el margen de ganancia ΔM . Como hemos visto en el apartado 4.2.2, el parámetro K_1 del filtro W_1 actúa directamente sobre el margen de ganancia, imponiendo un límite según la fórmula (4.19). La figura 5.16 muestra la evolución de la potencia en respuesta al escenario 1, para el modelo no lineal corregido con el coordinador H_∞ , con varios ajustes diferentes, que corresponden a diferentes márgenes de ganancia.

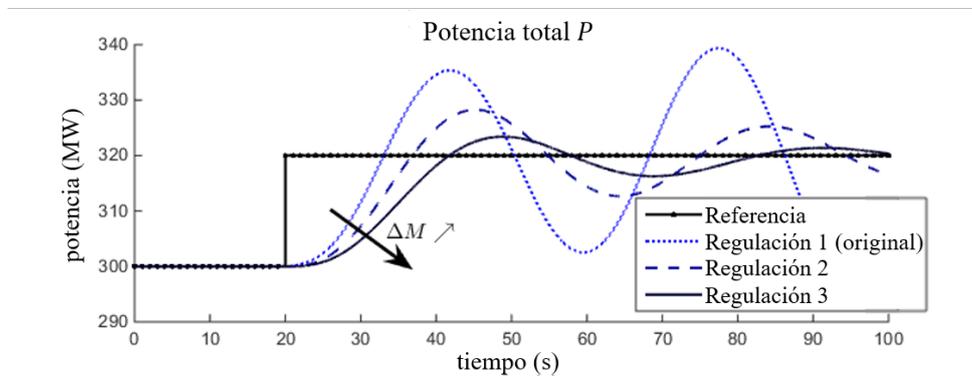


Figura 5.16: Potencia en el modelo no lineal (Escenario 1, coordinador H_∞)

La tabla 5.5 sintetiza los ajustes utilizados para la simulación realizada, sabiendo que para el modelo lineal $\Delta M > 1/K_1\gamma$.

Ajuste	K_1	γ	$(K_1\gamma)^{-1}$
Ajuste 1	1.35	3.11	0.24
Ajuste 2	1.05	1.80	0.53
Ajuste 3	1.05	1.36	0.70

Tabla 5.5: Ajustes del coordinador H_∞ para el modelo no lineal

Constatamos que, a medida que ΔM aumenta, la potencia en el modelo no lineal corregido con el coordinador H_∞ se estabiliza más rápidamente hacia su valor de referencia.

Conservando los resultados obtenidos con el último ajuste de la síntesis del coordinador H_∞ no lineal, obtenemos la tabla 5.6 que resume los criterios de evaluación:

Criterio	Descentralizado	Coordinado LQ	Coordinado MPC	Coordinado H_∞	
				Ajuste 1	Ajuste 3
t_{90_P}	35.41 s	-	44.49 s	Inestable	56.96 s
t_{m_P}	30.5 s	-	17 s	Inestable	28.86 s
D_P	$7.76 \times 10^{-1} \%$	-	$4.42 \times 10^{-1} \%$	Inestable	1.07 %
ϵ_P	1.83 %	-	4.35 %	Inestable	1.75 %
E_P	19.65 %	-	12.41 %	Inestable	24.43 %
$\%_{TG}/\%_{TV}$	61.66 %/38.34 %	-	60.48 %/39.52 %	Inestable	60.95 %/39.05 %
$max_{\dot{m}}$	7.38 kg/s	-	38.87 kg/s	Inestable	29.94 kg/s
$m_{\dot{m}}$	7.38 kg/s	-	18.61 kg/s	Inestable	13.70 kg/s

Tabla 5.6: Criterio de evaluación en el modelo no lineal (Escenario 1)

Capítulo 6

Conclusión

El presente estudio de la regulación de una central de ciclo combinado híbrido ha estado motivado por la existencia de una configuración similar de una central de ciclo combinado en un parque francés, a la cual se ha decidido incorporar un módulo solar compuesto por colectores cilindro-parabólicos y un medio de almacenamiento térmico con sal fundida. La modelización de cada subsistema ha permitido la construcción de sus modelos en forma de representaciones de estado no lineales y el desarrollo del modelo HCC por acoplamiento (capítulo 2), el cual ha sido linealizado. El control de este modelo recibe el nombre de *descentralizada* y está compuesta únicamente por las regulaciones locales de cada subsistema. Este control resulta insuficiente para cumplir los objetivos globales definidos. Como solución, se propone un control *coordinado* para regular el sistema. El coordinador propuesto tiene acceso a información (los estados) de cada subsistema y establece la referencia de los reguladores locales para satisfacer los objetivos globales del HCC.

Se han desarrollado e implantado dos tipos de controles coordinados: un control coordinado MPC (capítulo 3) y un control coordinado H_∞ (capítulo 4). A continuación, han sido testeados en simulación en los modelos lineal y no lineal del sistema HCC. Los resultados de las simulaciones (capítulo 5) muestran una gran diferencia entre los dos coordinadores: el coordinador H_∞ ofrece mejores resultados que el coordinador MPC si lo simulamos con el modelo lineal; sin embargo, las conclusiones son inversas con el modelo no lineal, con el que aparecen inestabilidades, mientras que el MPC logra adaptarse adecuadamente. El análisis de los resultados nos permiten resumir las mejoras que un control coordinado aporta con respecto a un control descentralizado:

- cuando se produce una demanda de potencia, el control coordinado permite responder más rápidamente, utilizando el módulo solar,
- si aparecen elevadas fluctuaciones en la demanda, la parte solar absorbe la mayoría de ellas y se solicita menos la TG,
- en el momento en el que la irradiación solar disminuye, el almacenamiento toma el relevo

para seguir produciendo vapor solar.

Perspectivas La tesis y posteriormente el trabajo realizado en la presente memoria, dejan las puertas abiertas a líneas de mejora y desarrollo, orientadas hacia la ampliación del trabajo en el marco de un proyecto energético. Estas líneas pueden ser:

■ *Mejora*

- Modificación del ajuste del corrector H_∞ con el objetivo de obtener un solo coordinador que regule al mismo tiempo los modelos lineal y no lineal.
- Perfeccionamiento del ajuste de los coordinadores, para absorber al máximo las fluctuaciones con la potencia TV y solicitar menos la TG, como en el caso descentralizado.

■ *Desarrollo*

- Test de los controles desarrollados con un prototipo de un ciclo combinado híbrido.
- Implantación de los controles ensayados para regular una central de características similares.

Conclusiones personales Los conocimientos que he adquirido como resultado del trabajo realizado son muy valiosos. Los más destacables entre ellos son:

- Profundización técnica de los nuevos controles de la automática y su implantación
- Aprendizaje de la estructura interna de la mayor empresa productora de electricidad
- Adquisición de valores humanos muy importantes para mi futuro profesional

Apéndice A

Definición de las entradas y salidas

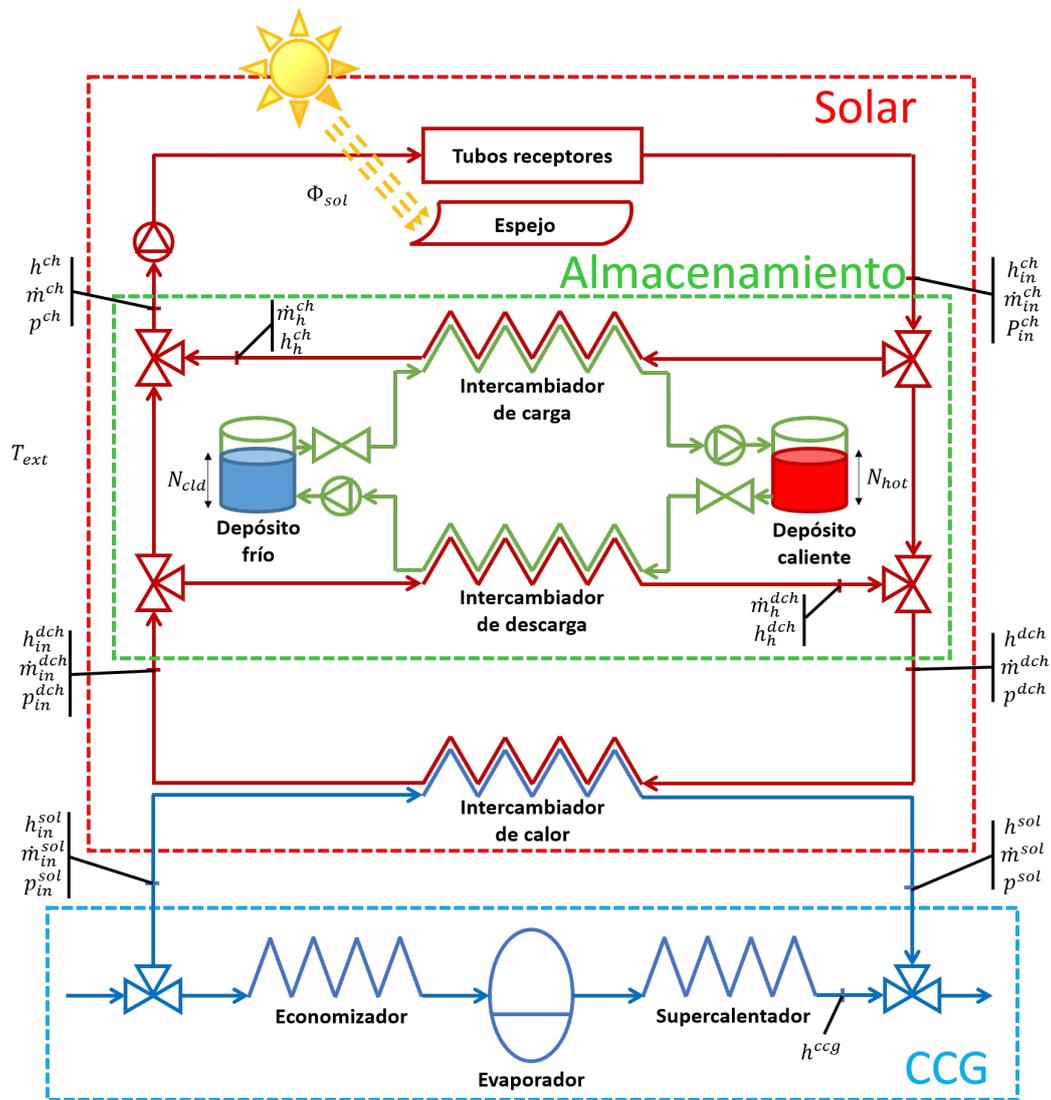


Figura A.1: Esquema del sistema HCC

		CCG	Solar	Almacenamiento
ENTRADAS	Controles	$u_{ccg} = \begin{bmatrix} C_P \\ C_{NLP} \\ C_{NMP} \\ C_{NHP} \end{bmatrix}$	$u_{sol} = \begin{bmatrix} C_{h^{sol}} \\ C_{\dot{m}^{sol}} \end{bmatrix}$	$u_{sto} = \begin{bmatrix} C_{h_h^{ch}} \\ C_{h_h^{dch}} \\ C_{N_{cld}} \end{bmatrix}$
	Perturbaciones	$p_{ccg} = [T_{ext}]$	$p_{sol} = \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \Phi_{sol} \end{bmatrix}$	$p_{sto} = [T_{ext}]$
	Acoplamiento	$d_{sol}^{ccg} = \begin{bmatrix} h^{sol} \\ \dot{m}^{sol} \\ \dot{m}_{in}^{sol} \end{bmatrix}$	$d_{ccg}^{sol} = \begin{bmatrix} h_{in}^{sol} \\ p_{in}^{sol} \\ p^{sol} \end{bmatrix}$	$d_{sto}^{sol} = \begin{bmatrix} h^{ch} \\ p^{dch} \\ \dot{m}_{in}^{ch} \\ h^{dch} \\ p^{dch} \\ \dot{m}_{in}^{dch} \end{bmatrix}$
SALIDAS	Salida	$y_{ccg} = \begin{bmatrix} P \\ P_{TG} \\ P_{TV} \\ h^{ccg} \end{bmatrix}$	$y_{sol} = \begin{bmatrix} h^{sol} \\ p^{sol} \\ \dot{m}^{sol} \end{bmatrix}$	$y_{sto} = \begin{bmatrix} h_h^{ch} \\ h_h^{dch} \\ N_{cld} \\ N_{hot} \\ \dot{m}_h^{ch} \\ \dot{m}_h^{dch} \end{bmatrix}$
	Acoplamiento	$d_{ccg}^{sol} = \begin{bmatrix} h_{in}^{sol} \\ p_{in}^{sol} \\ p^{sol} \end{bmatrix}$	$d_{sol}^{ccg} = \begin{bmatrix} h^{sol} \\ \dot{m}^{sol} \\ \dot{m}_{in}^{sol} \end{bmatrix}$	$d_{sto}^{sol} = \begin{bmatrix} h_{in}^{ch} \\ p_{in}^{ch} \\ \dot{m}^{ch} \\ h_{in}^{dch} \\ p_{in}^{dch} \\ \dot{m}^{dch} \end{bmatrix}$

Tabla A.1: Entradas y salidas del sistema HCC

con:

- C_P - Control de la potencia del HCC (P)
- $C_{N_{LP}}$ - Control del nivel del acumulador de la caldera de baja presión (N_{LP})
- $C_{N_{MP}}$ - Control del nivel del acumulador de la caldera de media presión (N_{MP})
- $C_{N_{HP}}$ - Control del nivel del acumulador de la caldera de alta presión (N_{HP})
- $C_{h^{sol}}$ - Control de la entalpía del vapor a la salida del módulo solar (h^{sol})
- $C_{\dot{m}^{sol}}$ - Control del gasto másico del vapor a la salida del módulo solar (\dot{m}^{sol})
- $C_{h_h^{ch}/C_{h_h^{dch}}}$ - Controles de la entalpía del aceite a la salida de la rama almacenamiento de carga/descarga (h_h^{ch}/h_h^{dch})
- $C_{N_{clid}}$ - Control del nivel de sal fundida en el depósito frío (N_{clid})
- T_{ext} - Temperatura exterior
- Φ_{sol} - Irradiación solar
- P - Potencia del HCC
- P_{TG} - Potencia de la turbina de gas
- P_{TV} - Potencia de la turbina de vapor
- h^{ccg} - Entalpía del vapor en el CCG en el punto de inyección
- h^{sol} - Entalpía del vapor a la salida del módulo solar
- p^{sol} - Presión del vapor a la salida del módulo solar
- \dot{m}^{sol} - Gasto másico del vapor a la salida del módulo solar
- h_{in}^{sol} - Entalpía del agua líquida a la entrada del módulo solar
- p_{in}^{sol} - Presión del agua líquida a la entrada del módulo solar
- \dot{m}_{in}^{sol} - Gasto másico del agua líquida a la entrada del módulo solar
- h_h^{ch}/h_h^{dch} - Entalpía del aceite a la salida de la rama de almacenamiento de carga/descarga
- N_{clid}/N_{hot} - Nivel de la sal fundida en el depósito frío/caliente
- $\dot{m}_h^{ch}/\dot{m}_h^{dch}$ - Gasto másico del aceite a la salida de la rama de almacenamiento de carga/descarga
- $\dot{m}^{ch}/\dot{m}^{dch}$ - Gasto másico del aceite a la salida del módulo de almacenamiento en el lado de la carga/descarga

- h^{ch}/h^{dch} - Entalpía del aceite a la salida del módulo de almacenamiento en el lado de la carga/descarga
- p^{ch}/p^{dch} - Presión del aceite a la salida del módulo de almacenamiento en el lado de la carga/descarga
- $\dot{m}_{in}^{ch}/\dot{m}_{in}^{dch}$ - Gasto másico del aceite a la entrada del módulo de almacenamiento en el lado de la carga/descarga
- h_{in}^{ch}/h_{in}^{dch} - Entalpía del aceite a la entrada del módulo de almacenamiento en el lado de la carga/descarga
- p_{in}^{ch}/p_{in}^{dch} - Presión del aceite a la entrada del módulo de almacenamiento en el lado de la carga/descarga

Apéndice B

Notaciones

B.1. Para el sistema HCC

Variable	HCC	Dimensión (n)	
Estados	$x = \begin{bmatrix} x_{ccg} \\ x_{sol} \\ x_{sto} \end{bmatrix}$	$n_{x_{ccg}} = 121$ $n_{x_{sol}} = 59$ $n_{x_{sto}} = 70$	$n_x = 250$
Controles	$u = \begin{bmatrix} u_{ccg} \\ u_{sol} \\ u_{sto} \end{bmatrix}$	$n_{u_{ccg}} = 4$ $n_{u_{sol}} = 2$ $n_{u_{sto}} = 3$	$n_u = 9$
Perturbaciones	$p = \begin{bmatrix} p_{ccg} \\ p_{sol} \\ p_{sto} \end{bmatrix}$	$n_{p_{ccg}} = 1$ $n_{p_{sol}} = 2$ $n_{p_{sto}} = 1$	$n_p = 4$
Salidas	$y = \begin{bmatrix} y_{ccg} \\ y_{sol} \\ y_{sto} \end{bmatrix}$	$n_{y_{ccg}} = 4$ $n_{y_{sol}} = 3$ $n_{y_{sto}} = 6$	$n_y = 13$

Tabla B.1: Dimensión de las variables del HCC

Variable	Regulada (y)	Referencia (r)	Error (ϵ)	Dimensión (n)
Exterior (ext)	$y_{ext} = [P]$	$r_{ext} = [r_P]$	$\epsilon_{ext} = [r_P - P]$	$n_{ext} = 1$
Interior (int)	$y_{int} = \begin{bmatrix} h^{sol} \\ \dot{m}^{sol} \end{bmatrix}$	$r_{int} = \begin{bmatrix} h^{ccg} \\ \dot{m}_{in}^{sol} \end{bmatrix}$	$\epsilon_{int} = \begin{bmatrix} h^{ccg} - h^{sol} \\ \dot{m}_{in}^{sol} - \dot{m}^{sol} \end{bmatrix}$	$n_{int} = 2$

Tabla B.2: Nomenclatura de las variables del HCC utilizadas por los coordinadores

B.2. Para el coordinador MPC

Restricción	Variable	Dimensión (n)
Trayectoria ($traj$)	$y_{traj} = y$	$n_{traj} = 13$
Finales ($final$)	$y_{final} = \emptyset$	$n_{final} = 0$

Tabla B.3: Nomenclatura y dimensión de las variables del coordinador MPC

B.3. Para el coordinador H_∞

Sistema		Estados	Dimensión (n)
Filtro	W_1	x_1	$n_{x_1} = n_{ext} = 1$
	W_2	x_2	$n_{x_2} = n_u = 9$
	W_3	x_3	$n_{x_3} = n_p = 4$
	W_4	x_4	$n_{x_4} = n_{int} = 2$
Corrector H_∞		x_c	$n_{x_c} = 266$
		$x_{c_{red}}$	$n_{x_{c_{red}}} = 196$

Tabla B.4: Dimensión de las variables del coordinador H_∞

Apéndice C

Valores numéricos

C.1. Sistema HCC

CCG	Solar	Almacenamiento
$\bar{u}_{ccg} = \begin{bmatrix} 300 \text{ MW} \\ -368 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \end{bmatrix}$	$\bar{u}_{sol} = \begin{bmatrix} 3030 \text{ kJ/kg} \\ 7.38 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$	$\bar{u}_{sto} = \begin{bmatrix} 750 \text{ kJ/kg} \\ 860 \text{ kJ/kg} \\ 7 \text{ m} \end{bmatrix}$
$\bar{p}_{ccg} = [296.1 \text{ K}]$	$\bar{p}_{sol} = \begin{bmatrix} 296.1 \text{ K} \\ 3 \text{ kW} \end{bmatrix}$	$\bar{p}_{sto} = [296.1 \text{ K}]$
$\bar{d}_{sol}^{ccg} = \begin{bmatrix} 3030 \text{ kJ/kg} \\ 7.38 \text{ kg/s} \\ 7.38 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$	$\bar{d}_{ccg}^{sol} = \begin{bmatrix} 876 \text{ kJ/kg} \\ 66.83 \text{ bar} \\ 66.83 \text{ bar} \end{bmatrix}$	$\bar{d}_{sol}^{sto} = \begin{bmatrix} 864.6 \text{ kJ/kg} \\ 113.53 \text{ bar} \\ 38.16 \text{ kg/s} \\ 813.33 \text{ bar} \\ 113.67 \text{ bar} \\ 59.72 \text{ bar} \end{bmatrix}$
		$\bar{d}_{sto}^{sol} = \begin{bmatrix} 868 \text{ kJ/kg} \\ 113.67 \text{ bar} \\ 59.72 \text{ kg/s} \\ 820.47 \text{ kJ/kg} \\ 113.53 \text{ bar} \\ 38.16 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$

Tabla C.1: Punto de equilibrio de las entradas del HCC

CCG	Solar	Almacenamiento
$\bar{y}_{ccg} = \begin{bmatrix} 300 \text{ kW} \\ 180.43 \text{ kW} \\ 119.57 \text{ kW} \end{bmatrix}$	$\bar{y}_{sol} = \begin{bmatrix} 3030 \text{ kJ/kg} \\ 66.83 \text{ bar} \\ 7.38 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$	$\bar{y}_{sto} = \begin{bmatrix} 750 \text{ kJ/kg} \\ 860 \text{ kJ/kg} \\ 7 \text{ m} \\ 7 \text{ m} \\ 6.73 \text{ kg/s} \\ 29.04 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$
$\bar{d}_{ccg}^{sol} = \begin{bmatrix} 876 \text{ kJ/kg} \\ 66.83 \text{ bar} \\ 66.83 \text{ bar} \end{bmatrix}$	$\bar{d}_{sol}^{ccg} = \begin{bmatrix} 3030 \text{ kJ/kg} \\ 7.38 \text{ kg/s} \\ 7.38 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$	$\bar{d}_{sto}^{sol} = \begin{bmatrix} 868 \text{ kJ/kg} \\ 113.67 \text{ bar} \\ 59.72 \text{ kg/s} \\ 820.47 \text{ kJ/kg} \\ 113.53 \text{ bar} \\ 38.16 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$
		$\bar{d}_{sol}^{sto} = \begin{bmatrix} 864.6 \text{ kJ/kg} \\ 113.53 \text{ bar} \\ 38.16 \text{ kg/s} \\ 813.33 \text{ bar} \\ 113.67 \text{ bar} \\ 59.72 \text{ bar} \end{bmatrix}$

Tabla C.2: Punto de equilibrio de las salidas del HCC

C.2. Coordinador MPC

Parámetro	Valor numérico	Efecto predictivo $T_e N_p$
T_e	4 s/iteración	12 s
N_p	3 iteraciones	

Tabla C.3: Parámetros de tiempo del coordinador MPC

Ponderación	Variable asociada		Valor numérico
Q	ϵ_{ext}	$r_P - P$	1×10^3
R	ϵ_{int}	$h^{ccg} - h^{sol}$	0.1
		$\dot{m}_{in}^{sol} - \dot{m}^{sol}$	4
S	u	C_P	0
		$C_{N_{LP}}$	100
		$C_{N_{MP}}$	100
		$C_{N_{HP}}$	100
		$C_{h^{sol}}$	1.2
		$C_{\dot{m}^{sol}}$	0
		$C_{h_h^{ch}}$	10
		$C_{h_h^{dch}}$	10
		$C_{N_{cid}}$	3

Tabla C.4: Ponderaciones de la función de coste del coordinador MPC

Restricción	CCG	Solar	Almacenamiento	HCC
Trayectoria	$y_{ccg}^{min} = \begin{bmatrix} 0 \text{ MW} \\ 0 \text{ MW} \\ 0 \text{ MW} \\ 0 \text{ kJ/kg} \end{bmatrix}$ $y_{ccg}^{max} = \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}$	$y_{sol}^{min} = \begin{bmatrix} 0 \text{ kJ/kg} \\ 0 \text{ bar} \\ 0 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$ $y_{sol}^{max} = \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ 80 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$	$y_{sto}^{min} = \begin{bmatrix} 0 \text{ kJ/kg} \\ 0 \text{ kJ/kg} \\ 0 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \\ 0 \text{ kg/s} \\ 0 \text{ kg/s} \end{bmatrix}$ $y_{sto}^{max} = \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \\ \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}$	$y_{min} = \begin{bmatrix} y_{ccg}^{min} \\ y_{sol}^{min} \\ y_{sto}^{min} \end{bmatrix}$ $y_{max} = \begin{bmatrix} y_{ccg}^{max} \\ y_{sol}^{max} \\ y_{sto}^{max} \end{bmatrix}$
Finales	$y_{ccg}^{eq} = []$	$y_{sol}^{eq} = []$	$y_{sto}^{eq} = []$	$y_{eq} = \begin{bmatrix} y_{ccg}^{eq} \\ y_{sol}^{eq} \\ y_{sto}^{eq} \end{bmatrix}$

Tabla C.5: Restricciones sobre las salidas del coordinador MPC

Restricción	CCG	Solar	Almacenamiento	HCC
Trayectoria	$u_{ccg}^{min} = \begin{bmatrix} -\infty \\ -369 \text{ mm} \\ -1 \text{ mm} \\ 99 \text{ mm} \end{bmatrix}$ $u_{ccg}^{max} = \begin{bmatrix} \infty \\ -367 \text{ mm} \\ 1 \text{ mm} \\ 101 \text{ mm} \end{bmatrix}$	$u_{sol}^{min} = \begin{bmatrix} -\infty \\ -\infty \end{bmatrix}$ $u_{sol}^{max} = \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \end{bmatrix}$	$u_{sto}^{min} = \begin{bmatrix} -\infty \\ -\infty \\ -\infty \end{bmatrix}$ $u_{sto}^{max} = \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}$	$u_{min} = \begin{bmatrix} u_{ccg}^{min} \\ u_{sol}^{min} \\ u_{sto}^{min} \end{bmatrix}$ $u_{max} = \begin{bmatrix} u_{ccg}^{max} \\ u_{sol}^{max} \\ u_{sto}^{max} \end{bmatrix}$
Variación	$\Delta u_{ccg}^{min} = \begin{bmatrix} -\infty \\ -\infty \\ -\infty \\ -\infty \end{bmatrix}$ $\Delta u_{ccg}^{max} = \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}$	$\Delta u_{sol}^{min} = \begin{bmatrix} -\infty \\ -\infty \end{bmatrix}$ $\Delta u_{sol}^{max} = \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \end{bmatrix}$	$\Delta u_{sto}^{min} = \begin{bmatrix} -\infty \\ -\infty \\ -\infty \end{bmatrix}$ $\Delta u_{sto}^{max} = \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}$	$\Delta u_{min} = \begin{bmatrix} \Delta u_{ccg}^{min} \\ \Delta u_{sol}^{min} \\ \Delta u_{sto}^{min} \end{bmatrix}$ $\Delta u_{max} = \begin{bmatrix} \Delta u_{ccg}^{max} \\ \Delta u_{sol}^{max} \\ \Delta u_{sto}^{max} \end{bmatrix}$
Finales	$u_{ccg}^{eq} = \bar{u}_{ccg}$	$u_{sol}^{eq} = \bar{u}_{sol}$	$u_{sto}^{eq} = \bar{u}_{sto}$	$u_{eq} = \begin{bmatrix} u_{ccg}^{eq} \\ u_{sol}^{eq} \\ u_{sto}^{eq} \end{bmatrix}$

Tabla C.6: Restricciones sobre los controles del coordinador MPC

C.3. Coordinador H_∞

Filtro	Variable asociada		Parámetro		
			k	ω	K
W_1	ϵ_{ext}	$r_P - P$	2×10^{-5}	0.8	1.35
W_2	u	C_P	2×10^{-2}	0.07	1.01
		$C_{N_{LP}}$	2×10^{-5}	0.01	1.01
		$C_{N_{MP}}$	2×10^{-5}	0.01	1.01
		$C_{N_{HP}}$	2×10^{-5}	0.01	1.01
		$C_{h^{sol}}$	2×10^{-5}	0.01	1.05
		$C_{\dot{m}^{sol}}$	2×10^{-2}	4	6.5
		$C_{h_h^{ch}}$	2×10^{-5}	0.01	1.01
		$C_{h_h^{dch}}$	2×10^{-5}	0.01	1.01
		$C_{N_{cid}}$	2×10^{-5}	0.01	1.01
		W_3	p	T_{ext}	\emptyset
T_{ext}	\emptyset			\emptyset	5
Φ_{sol}	\emptyset			\emptyset	30
T_{ext}	\emptyset			\emptyset	5
W_4	ϵ_{int}	$h^{ccg} - h^{sol}$	0.1	1×10^{-5}	25
		$\dot{m}_{in}^{sol} - \dot{m}^{sol}$	0.1	8×10^{-3}	21

Tabla C.7: Reglajes de los filtros del coordinador H_∞

Apéndice D

Valores singulares y norma H_∞

D.1. Valores singulares

Los valores singulares σ_i de un sistema dinámico $G(j\omega) \in \mathbb{C}^{p \times m}$, $\omega \in \mathbb{R}$, se definen como la raíz cuadrada de los valores propios de la matriz de transferencia G multiplicada por su transpuesta conjugada:

$$\sigma_i(G(j\omega)) = \sqrt{\lambda_i(G(j\omega)G(j\omega)^*)} \quad i = 1, \dots, \min(m, p) \quad (\text{D.1})$$

Además, los valores singulares constituyen una generalización para los *sistemas multivariados* de la noción de *ganancia* de los monovariados. La respuesta de un sistema G a una excitación armónica $E e^{j\omega t}$, con $E \in \mathbb{C}^m$ la ganancia del sistema a la pulsación ω , permite escribir:

$$\underline{\sigma}(G(j\omega)) \leq \frac{\|G(j\omega) E e^{j\omega t}\|_2}{\|E e^{j\omega t}\|_2} \leq \bar{\sigma}(G(j\omega)) \quad (\text{D.2})$$

donde $\underline{\sigma}(G(j\omega))$ es el menor valor singular y $\bar{\sigma}(G(j\omega))$ el mayor.

Notamos que el número de valores singulares no nulos es exactamente igual al rango de la matriz de transferencia. Todo *sistema monovariado* solo tiene un valor singular, que equivale a su módulo:

$$\underline{\sigma}(G(j\omega)) = \bar{\sigma}(G(j\omega)) = |G(j\omega)| \quad (\text{D.3})$$

D.2. Norma H_∞

D.2.1. Definición

La norma H_∞ de un sistema dinámico $G(j\omega)$, $\omega \in \mathbb{R}$, coincide con la máxima amplificación que el sistema puede ejercer sobre la energía de la señal de entrada. En el caso de un *sistema multivariable*, esta norma corresponde al máximo valor singular del sistema (figura D.1):

$$\|G(s)\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \bar{\sigma}(G(j\omega)) \quad (D.4)$$

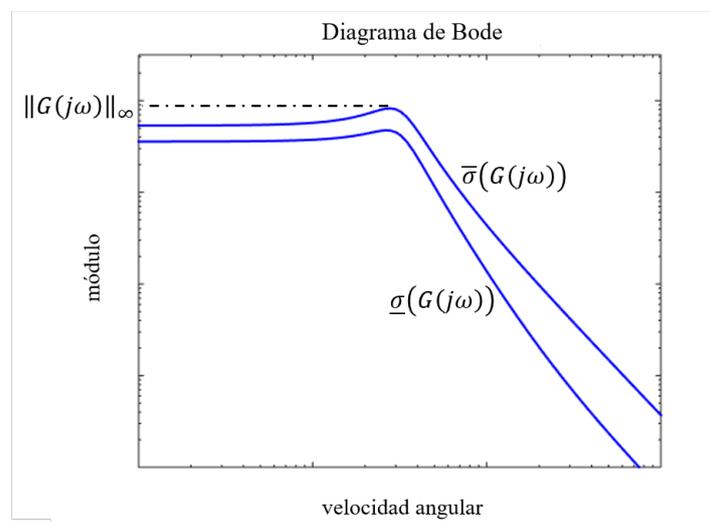


Figura D.1: Valores singulares y norma H_∞ para un sistema multivariable

$\|G(j\omega)\|_\infty$ es el valor más elevado de la ganancia del sistema, en todo el conjunto de las pulsaciones ω .

Para los *sistemas monovariantes*, esta norma H_∞ se traduce por el valor máximo de la amplitud de su respuesta frecuencial:

$$\|G(s)\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} |G(j\omega)| \quad (D.5)$$

D.2.2. Propiedades

Dadas dos matrices de transferencia $F(s)$ y $G(s)$, se deducen las siguientes propiedades:

$$\|F(s)G(s)\|_\infty \leq \|F(s)\|_\infty \|G(s)\|_\infty \quad (D.6a)$$

$$\left\| \begin{pmatrix} F(s) \\ G(s) \end{pmatrix} \right\|_{\infty} \geq \sup (\|F(s)\|_{\infty}, \|G(s)\|_{\infty}) \quad (\text{D.6b})$$

$$\left\| (F(s) \quad G(s)) \right\|_{\infty} \geq \sup (\|F(s)\|_{\infty}, \|G(s)\|_{\infty}) \quad (\text{D.6c})$$

Apéndice E

Criterios de un sistema controlado

E.1. Error estático

El *error estático* o en régimen permanente, denotado por ϵ_0 , se define como la diferencia ϵ entre la salida solicitada y la obtenida, una vez alcanzado el régimen de equilibrio. Para un bucle de control, donde S corresponde a la función de sensibilidad y R a la referencia, el error estático respecto a la referencia se define como:

$$\epsilon_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s S(s) R(s) \quad (\text{E.1})$$

En el caso de una referencia constante $R(s) = R_0/s$, podemos escribir:

$$\epsilon_0 = R_0 \lim_{s \rightarrow 0} S(s) \approx R_0 \lim_{s \rightarrow 0} (H_{BO}(s))^{-1} \quad (\text{E.2})$$

con H_{BO} la función de transferencia del sistema en bucle abierto.

Deducimos que el error estático disminuirá a medida que los ceros de la función de sensibilidad (o los polos de H_{BO}) se acercan al eje imaginario. De modo equivalente, la presencia de al menos un integrador puro en el bucle abierto, permite eliminar completamente este error estático.

E.2. Rapidez

La *rapidez* caracteriza el tiempo de reacción de un sistema a una variación de su referencia. Esta puede definirse por el tiempo de respuesta al 5 % ($t_r(5\%)$) o también por el tiempo del

primer máximo (t_m). Para los sistemas cerrados y estables, el tiempo del primer máximo y la pulsación de corte se relacionan de manera aproximada por la siguiente relación experimental:

$$\omega_0 t_m \approx 3 \quad (\text{E.3})$$

La pulsación de corte de la función de transferencia en bucle abierto, denotada por ω_0 , fija el ancho de banda, que se define como el intervalo de frecuencia en el cual la amplitud de la respuesta del sistema sobrepasa los 0 dB:

$$\forall \omega < \omega_0, |H_{BO}(s)|_{dB} > 0 \quad (\text{E.4})$$

E.3. Estabilidad

La *estabilidad* traduce la capacidad de un sistema a tender o volver hacia un estado de equilibrio. Se dice que un sistema continuo es estable, cuando los polos de su función de sensibilidad (S), es decir, las raíces del *polinomio característico* $1 + G_2(s)K(s)$, tienen la parte real estrictamente negativa.

Existe varios métodos que permiten obtener un criterio para la *robustez* o tendencia a la estabilidad. Entre ellos, el más extendido es el criterio geométrico de Nyquist, que anuncia:

Criterio de Nyquist para los sistemas continuos. *Para que un sistema con entrada acotada y salida acotada (BIBO, Bounded Input Bounded Output) sea estable en bucle cerrado, es necesario y suficiente que el lugar de Nyquist de la función de transferencia en bucle abierto $H_{BO}(s)$, obtenido poniendo $s = j\omega$, $\omega \in]-\infty, +\infty[$, descrito en el sentido de las ω decrecientes:*

- *no pase por el punto crítico -1;*
- *haga, alrededor del punto -1, en el sentido trigonométrico, un número de vueltas igual al número de polos de la función de transferencia en bucle abierto con la parte real estrictamente positiva (por lo que, si el sistema es estable en bucle abierto, el lugar de Nyquist no debe rodear el punto -1).*

Finalmente, gracias al criterio de Nyquist, podemos evaluar el *margen de ganancia*, que representa la distancia geométrica entre la curva H_{BO} y el punto -1:

$$\Delta M = \min_{\omega} |1 + H_{BO}(j\omega)| \quad (\text{E.5})$$

Bibliografía

- [1] Gilles Duc. *Commande robuste multivariable*. Supélec, 2003.
- [2] Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana Lazaro, Pablo Dolado, Belen Zalba, and Luisa F Cabeza. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. part 1-concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1):31–55, 2010.
- [3] Emmanuel Godoy. *Régulation industrielle*. Dunod, L'usine nouvelle, 2007.
- [4] Jessica Leo. Modélisation et conduite optimale d'un cycle combiné hybride avec source solaire et stockage, 2015.
- [5] Jessica Leo, Frans Davelaar, Gildas Besançon, and Alina Voda. Solar parabolic trough reflector modeling and application to control for a combined cycle power plant. In *Control Applications (CCA), 2014 IEEE Conference on*, pages 599–604. IEEE, 2014.
- [6] Jan Marian Maciejowski. *Predictive control: with constraints*. Pearson education, 2002.
- [7] Carlos David Pérez Segarra, Ivette María Rodríguez Pérez, Asensio Oliva Llena, Santiago Torras Ortíz, Oriol Lehmkuhl Barba, et al. Detailed numerical model for the resolution of molten salt storage tanks for csp plants. 2012.
- [8] Antonio Rovira, María José Montes, Fernando Varela, and Mónica Gil. Comparison of heat transfer fluid and direct steam generation technologies for integrated solar combined cycles. *Applied Thermal Engineering*, 52(2):264–274, 2013.
- [9] Adrian Tică, Hervé Guéguen, Didier Dumur, Damien Faille, and Frans Davelaar. Design of a combined cycle power plant model for optimization. *Applied Energy*, 98:256–265, 2012.

PRESUPUESTO

Índice del presupuesto

1. Introducción del presupuesto	97
2. Presentación del presupuesto	98

Presupuesto

1. Introducción del presupuesto

En el presente capítulo se presenta una estimación detallada de los costes en los que se incurrió a lo largo de la realización del trabajo, en forma de presupuesto. Este es un instrumento simple que calcula los gastos incurridos durante un período determinado, en este caso, los seis meses de duración del trabajo.

Para ello, se divide el trabajo en siete apartados, que resumen los costes incurridos durante el mismo, incluyendo desde estudios de ingeniería hasta eventos puntuales.

Además, nos ayudamos del plan de proyecto que se muestra a continuación. Este se elaboró al comienzo del proyecto, con el objetivo de llevar un seguimiento y control de la ejecución del mismo. Además, permitió corregir a tiempo las desviaciones apreciadas, gracias a las reuniones realizadas al final y comienzo de cada fase de las tareas, convirtiéndose así en un documento clave para la elaboración del presupuesto.

Tarea	Descripción	Duración
Recepción	Recepción y comprensión del proyecto	Semana 1
MPC	Investigación y lectura de documentación	Semana 2
	Desarrollo del control en el modelo lineal	Semanas 3-7
	Implementación del control en el modelo no lineal	Semanas 8-10
H_{∞}	Investigación y lectura de documentación	Semana 11
	Desarrollo del control en el modelo lineal	Semanas 12-16
	Implementación del control en el modelo no lineal	Semana 17
Análisis	Simulación y análisis de resultados	Semanas 18-20
Memoria	Redacción de la memoria del proyecto	Semanas 21-24
Exposiciones	Realización de las exposiciones finales necesarias	Semana 25

2. Presentación del presupuesto

Nº orden	Descripción de las unidades de obra	Medición	Precio	Importe
1	EVENTOS			
1.1	REUNIONES Reuniones con el tutor del TFM al terminar cada una de las tareas, para realizar un seguimiento del trabajo			
I01	INGENIERO	h	10.00	40.00
T01	TUTOR	h	10.00	100.00
	Total capítulo 1.1			1400.00 €
1.2	ASAMBLEAS Asambleas generales organizados por la empresa, tales como jornadas de integración o conferencias para promover la seguridad empresarial			
I01	INGENIERO	h	4.00	40.00
O01	ORGANIZACIÓN	h	4.00	0.25
	Total capítulo 1.2			161.00 €
1.3	EXPOSICIONES Exposiciones multitudinarias sobre el avance del TFM para todos aquellos interesados en el trabajo			
I01	INGENIERO	h	3.00	40.00
E01	EMPLEADOS	h	3.00	500.00
A01	AMORTIZACIÓN MATERIAL AUDIOVISUAL	h	3.00	0.19
	Total capítulo 1.3			1620.56 €

Nº orden	Descripción de las unidades de obra	Medición	Precio	Importe
----------	-------------------------------------	----------	--------	---------

2 INVESTIGACIÓN

2.1 RECEPCIÓN

Recepción y comprensión del trabajo ya realizado y a realizar, así como establecimiento y validación del plan de trabajo

I01	INGENIERO	h	37.50	40.00	1500.00
O01	AMORTIZACIÓN ORDENADOR	h	37.50	0.22	8.33

Total capítulo 2.1 1508.33 €

2.2 ESTUDIO CONTROL MPC

Lectura de documentación y estudio de métodos para la implementación del método para el control MPC

I01	INGENIERO	h	37.50	40.00	1500.00
O01	AMORTIZACIÓN ORDENADOR	h	37.50	0.22	8.33

Total capítulo 2.2 1508.33 €

2.3 ESTUDIO CONTROL H_∞

Lectura de documentación y estudio de métodos para la implementación del método para el control H_∞

I01	INGENIERO	h	37.50	40.00	1500.00
O01	AMORTIZACIÓN ORDENADOR	h	37.50	0.22	8.33

Total capítulo 2.3 1508.33 €

3 IMPLEMENTACIÓN LINEAL

3.1 DESARROLLO CONTROL MPC

Desarrollo e implementación del control MPC en el modelo lineal

I01	INGENIERO	h	187.50	40.00	7500.00
O01	AMORTIZACIÓN ORDENADOR	h	187.50	0.22	41.67

Nº orden	Descripción de las unidades de obra	Medición	Precio	Importe	
M01	LICENCIAS MATLAB Y TOOLBOX	h	187.50	1.67	312.50
	Total capítulo 3.1				7854.17 €
3.2	DESARROLLO CONTROL H_∞ Desarrollo e implementación del control H_∞ en el modelo lineal				
I01	INGENIERO	h	187.50	40.00	7500.00
O01	AMORTIZACIÓN ORDENADOR	h	187.50	0.22	41.67
M01	LICENCIAS MATLAB Y TOOLBOX	h	187.50	1.67	312.50
	Total capítulo 3.2				7854.17 €
4	IMPLEMENTACIÓN NO LINEAL				
4.1	IMPLEMENTACIÓN CONTROL MPC Desarrollo e implementación del control MPC en el modelo lineal				
I01	INGENIERO	h	112.50	40.00	4500.00
O01	AMORTIZACIÓN ORDENADOR	h	112.50	0.22	25.00
M01	LICENCIAS MATLAB, TOOLBOX Y SIMULINK	h	112.50	2.50	281.25
	Total capítulo 4.1				4806.25 €
4.2	IMPLEMENTACIÓN CONTROL H_∞ Desarrollo e implementación del control H_∞ en el modelo lineal				
I01	INGENIERO	h	37.50	40.00	1500.00
O01	AMORTIZACIÓN ORDENADOR	h	37.50	0.22	8.33
M01	LICENCIAS MATLAB, TOOLBOX Y SIMULINK	h	37.50	2.50	93.75
	Total capítulo 4.2				1602.08 €

Nº orden	Descripción de las unidades de obra	Medición	Precio	Importe	
5	ANÁLISIS Y PRUEBAS				
5.1	SIMULACIÓN Simulación y análisis de los resultados obtenidos con los controles MPC y H_{∞} implementados en los modelos lineal y no lineal				
I01	INGENIERO	h	112.50	40.00	4500.00
O01	AMORTIZACIÓN ORDENADOR		112.50	0.22	25.00
M01	LICENCIAS MATLAB, TOOLBOX Y SIMULINK	h	112.50	2.50	281.25
	Total capítulo 4.1				4806.25 €
6	MEMORIA				
6.1	REDACCIÓN DE LA MEMORIA Redacción de la memoria incluyendo todos los hitos alcanzados en cada una de las etapas del trabajo				
I01	INGENIERO	h	150.00	40.00	6000.00
O01	AMORTIZACIÓN ORDENADOR	h	150.00	0.22	33.33
E01	LICENCIAS PROGRAMAS DE EDICIÓN DE TEXTOS	h	150.00	2.78	416.67
R01	USO DE MATERIAL REPROGRAFÍA	-			150.00
	Total capítulo 6.1				6600 €
7	OTROS				
7.1	AYUDAS Y SUBVENCIONES Ayudas y subvenciones empresariales de las que todos los empleados pueden beneficiarse				
P01	SUBVENCIÓN TRANSPORTE PÚBLICO	-			210.00
L01	SUBVENCIÓN ALOJAMIENTO	-			840.00
D01	DÍAS LIBRES PAGADOS	h	90.00	8.00	720.00
	Total capítulo 7.1				1770 €

Nº orden	Descripción de las unidades de obra	Medición	Precio	Importe
----------	-------------------------------------	----------	--------	---------

7.2 DESPLAZAMIENTOS

Desplazamientos con vehículo empresarial

V01	AMORTIZACIÓN VEHÍCULO	h	4.00	2.22	8.89
C01	USO DE COMBUSTIBLE	-			50.00

Total capítulo 7.2 58.89 €

Total presupuesto 43058.36 €