Estas características han hecho del control predictivo una de las escasas estrategias de control avanzado con un impacto importante en problemas de ámbito industrial. En este sentido es importante resaltar que el control predictivo se ha desarrollado en el mundo de la industria, y ha sido la comunidad investigadora la que se ha esforzado en dar un soporte teórico a los resultados prácticos obtenidos.

# £.£. ¢ormulación del MPC

El control predictivo está formado por los siguientes elementos [8]:

* Modelo de predicción:

Es el modelo matemático que describe el comportamiento esperado del sistema. Este modelo puede ser lineal o no lineal, en tiempo continuo o en tiempo discreto, en variables de estado o en entrada salida. El hecho de que el problema de optimización implicado se resuelva mediante el computador, así como la técnica de horizonte deslizante con la que se aplica la solución, hace que sea más natural considerar modelos discretos que continuos. Por ello, en lo que sigue se consideran modelos en tiempo discreto 2. Asimismo, dado que los modelos en el espacio de estados son más generales que los modelos entrada−salida, en lo que sigue se adopta dicha formulación. Se considera además que el origen es el punto de equilibrio en el que se quiere regular el sistema, lo cual no resta generalidad pues se puede conseguir con un cambio de variables adecuado. Así el modelo de predicción considerado tiene la forma:

s(k + 1) = ƒ(s(k), ¬(k))

Siendo x(k) el estado y u(k) las actuaciones sobre el sistema en el instante k.

En el caso en que el sistema presente incertidumbres, estas pueden aparecer en el modelo de predicción. En consecuencia, se considera su efecto en la predicción del comportamiento futuro del sistema, dependiendo éste del valor futuro de las incertidumbres que se consideren. A esta secuencia de incertidumbres Juturas se denomina realización de las mismas.

* ¢unción de coste:

Es la función que indica el criterio a optimizar. Es una función definida positiva que expresa el coste asociado a una determinada evolución del sistema a lo largo del horizonte de predicción Np. Dado que el coste considera el comportamiento del sistema hasta un horizonte Nh, este depende del estado actual del sistema x(k) y de la secuencia de N actuaciones que se aplican durante el horizonte de predicción Nc. Usualmente se considera constante la señal de control tras el horizonte de control.

* Restricciones:

Indican los límites dentro de los cuales debe discurrir la evolución del sistema. La evolución de las señales de un sistema no debe exceder determinadas restricciones que, ya sea por límites físicos o bien por motivos de seguridad, se imponen al sistema. Por ejemplo, los límites de los actuadores forman parte de estas restricciones. La necesidad, generalmente por motivos económicos, de trabajar en puntos de operación cercanos a los límites físicos admisibles del sistema ha provocado la incorporación de dichas restricciones en la síntesis de los controladores.

Estas restricciones se suelen expresar como conjuntos X y U, generalmente cerrados y acotados, en los cuales deben estar contenidos los estados del sistema y las actuaciones en cada instante, de forma que:

s(k) C X Çk

¬(k) C U Çk

* Optimización:

Teniendo en cuenta todos estos elementos, el problema de optimización asociado al controlador predictivo que se debe resolver en cada instante es:

min J(s(k), ¬(k))s. a. :

u(k)

¬(k + j|k) C U gara j = 0,1, … , Nc — 1 s(k + j|k) C X gara j = 0,1, … , Ng — 1

s(k + j|k) = ƒ(k + j|k, ¬(k + j|k) gara j = 0,1, … , Ng — 1

¬(k + j|k) = ¬(k + j — 1|k) gara j = Nc, Nc + 1, … , Ng — 1

Este problema de optimización tiene como variables de decisión las actuaciones a lo largo del horizonte de control y depende de forma paramétrica del estado del sistema. Una vez obtenida la solución, según la estrategia del horizonte deslizante, se aplica la actuación obtenida para el instante siguiente y se vuelve a resolver en el siguiente periodo u(k/k) de muestreo.

# £.3. Ventajas e Inconvenientes del MPC

Los controladores predictivos han tenido un notable éxito en el campo de la industria así como en la comunidad investigadora. Esto se debe a las propiedades que tienen estas técnicas de control, no exentas, por otro lado, de desventajas [9].

Entre las ventajas del MPC se pueden destacar:

* Formulación en el dominio del tiempo, flexible, abierta e intuitiva.
* Permite tratar con sistemas lineales y no lineales, monovariables y multivariables utilizando la misma formulación del controlador.
* La ley de control responde a criterios óptimos.
* Permite la incorporación de restricciones en la síntesis del controlador.

De todas estas ventajas, sin duda la más importante es la posibilidad de incorporar restricciones en el cálculo de las actuaciones, aspecto que las técnicas clásicas de control no permiten. Entre las desventajas de esta técnica de control se pueden citar las siguientes:

* Requiere el conocimiento de un modelo dinámico del sistema suficientemente preciso.
* Requiere un algoritmo de optimización, por lo que solo puede implementarse por un computador.
* Requiere un alto coste computacional, lo que hace difícil su aplicación a sistemas rápidos.
* Hasta hace relativamente poco, no se podía garantizar la estabilidad de los controladores, especialmente en el caso con restricciones. Esto hacía que el ajuste de estos controladores fuese heurístico y sin un conocimiento de cómo podían influirlos parámetros en la estabilidad.
* Resulta compleja la consideración de incertidumbres.

Merece la pena destacar que el control predictivo es una técnica muy potente que permite formular controladores para sistemas complejos y con restricciones. Esta potencia tiene un precio asociado: el coste computacional y la sintonización del controlador. Recientes avances en el campo del MPC proveen un conocimiento más profundo de estos controladores, obteniéndose resultados que permiten relajar estos requerimientos. Así por ejemplo, se han establecido condiciones generales para garantizar la estabilidad [fO], condiciones bajo las cuales se puede relajar la optimalidad del controlador garantizando su estabilidad y se han desarrollado algoritmos eficientes para la resolución del problema.

# £.4. Control Predictivo aplicado a sistemas de control de tráłico

Esta sección se centra en como las características del MPC afectan al control de sistemas de tráfico. Las principales razones por las que se usara control predictivo para resolver el problema del control del tráfico en tiempo real son:

* ”Coordinación”: El MPC es capaz de tratar de forma directa el problema multivariable, permitiendo así coordinar los distintos mecanismos de control de tráfico (”Ramp metering”, ”Control dinámico de velocidad”…).
* ”Predicción”: Se puede predecir el efecto de las acciones de control en el futuro teniendo en cuenta los valores típicos futuros de demanda de vehículos que entran y salen de la vía.
* La señal de control es calculada de forma óptima, permitiendo así minimizar el tiempo de circulación de los vehículos.
* Puede manejarse de forma explícita el problema no lineal.
* Puede tenerse consideración explicita de las restricciones en las variables.

Es importante tener en cuenta que nuestro sistema se verá afectado por distintas perturbaciones. Por un lado la demanda futura de vehículos es una perturbación estimable (teniendo en cuenta la de días anteriores) que deberá tenerse en cuenta de forma explícita. Por otro lado, se nos presentan perturbaciones medibles pero no estimables, como la congestión a la salida de la zona controlada. Estas variables serán