

La tecnica Sporadic MPC per l'ottimizzazione energetica

a cura di Alberto Leva

DEIB, Politecnico di Milano

Sommario

Ne report si presenta uno schema di controllo per ottimizzazione energetica – particolarmente adatto all'uso in edifici – che combina unno strato di controllo predittivo model-based (MPC) e uno gerarchicamente inferiore, in generale – ma in realtà non necessariamente – non di tipo MPC. Lo scopo è evitare di risolvere il problema di ottimizzazione insoto nello strato MPC a ogni passo di controllo, alleggerendo così il carico computazionale. Inoltre, il controllore MPC può essere progettato secondo il classico approccio receding horison e soprattutto in modo totalmente indipendente dal livello inferiore. Questa caratteristica, peculiare delle schema proposto rispetto alla letteratura mainstream, semplifica l'applicazione dello schema a sistemi esistenti, dove lo strato inferiore può essere semplicemente fornito dal controllo preesistente, al fine di migliorare l'applicabilità al costruito. L'approccio che fonda lo schema viene chiamato MPC “sporadico” a causa la caratteristica appena evidenziata. Dopo aver presentato e giustificato l'approccio, il report contiene alcuni esempi di simulazione per dimostrare i vantaggi ottenibili.

1 Introduzione

Diverse applicazioni Model Predictive Control (MPC) – in particolare quelle negli edifici, dove il sistema può essere di grandi dimensioni – condividono le seguenti due caratteristiche:

1. Il problema di ottimizzazione coinvolto nel controllore MPC è computazionalmente intenso, quindi non doverlo risolvere ad ogni passo di controllo sarebbe un vantaggio significativo.
2. Il sistema controllato è già dotato di anelli locali gestiti da controllori semplici; il livello MPC deve essere applicato sopra questa struttura e il sistema deve essere in grado di funzionare – pur se non in modo ottimale – anche in assenza del suddetto livello MPC.

L'importanza del punto 1 diminuisce all'aumentare delle risorse computazionali disponibili, tuttavia allo stesso tempo vengono proposte in letterature tecniche di controllo sempre più articolate, quindi aumenta anche la domanda di risorse. La riduzione del carico computazionale consente alle tecniche MPC di utilizzare modelli e tecniche di processo più complessi o di funzionare su hardware meno pregiato.

Affrontare il punto 2 è molto importante per l'accettazione in ambito applicativo, in particolare se il risultato è che si può aggiungere lo strato MPC senza alcuna ritardatura dei loop esistenti — in altri termini, se si può aggiungere lo strato MPC in modo che semplicemente “azionando un interruttore” il sistema torna esattamente al comportamento pre-MPC.

In questo rapporto si propone uno schema di controllo denominato “Sporadic MPC” – di seguito abbreviato in SP-MPC – per facilitare e in generale migliorare il trattamento dei casi in cui si applicano i punti 1 e 2. Lo schema consente di progettare lo strato MPC e i controlli di livello inferiore indipendentemente l'uno dall'altro. Come tale, può essere facilmente integrato in sistemi preesistenti (questione di grande importanza nel settore degli edifici). Inoltre, lo strato MPC può essere sintetizzato secondo il classico approccio receding horizon, a tutto vantaggio delle connessioni con la letteratura e la ricerca. La ricerca connessa al presente report è anche documentata in [11].

2 Minima analisi della letteratura e motivazione

L'ampia applicabilità delle tecniche MPC è ben nota, si veda per esempio l'ampio lavoro [3]. Negli ultimi anni, un'enfasi crescente è stata posta su varie applicazioni di tali tecniche in cui entrano in gioco modelli di predizione non lineari, spesso complessi [2]. Queste applicazioni fanno riferimento per esempio a impianti per la produzione di energia elettrica [5], reti di distribuzione dell'energia elettrica [6], robotica mobile [16], impianti petroliferi e per il trattamento di gas [21] e anche edifici [18, 20].

Ci concentriamo qui sulle applicazioni legate all'edilizia, poiché queste hanno senza dubbio contribuito a stimolare la ricerca e dato il contesto del progetto EEB cui il lavoro si connette, tuttavia a conclusioni simili possono essere facilmente tratte da riferimenti analoghi in altri domini applicativi. Negli edifici, MPC viene utilizzato per la gestione dello stoccaggio di energia [9, 13], per il comfort termico [14, 20], per il cosiddetto "demand response shaping" [17], per applicazioni HVAC [12, 1] e altro. Lavori come [19] forniscono solide motivazioni per l'approccio e ne discutono i vantaggi.

La complessità del modello – e il conseguente carico computazionale per risolvere il problema di ottimizzazione [8, 15] – in alcune applicazioni (quelle dove tendenzialmente non si usano architetture hardware/software molto potenti) potrebbe ancora essere un problema e un ostacolo all'uso di tecniche MPC. Se ci fossero risorse infinite, la scelta sarebbe un'abbastanza ovviamente quella di realizzare un controllore centralizzato seguendo il classico approccio receding horizon a passo fisso. Nel mondo reale questo non è quasi mai il caso, tuttavia, dalla qual cosa trae origine una vasta ricerca sulla distribuzione dello sforzo computazionale [4] o sull'abbandono dell'approccio a passo fisso a favore di uno basato sugli eventi [10, 7].

Non è in alcun modo nostra intenzione competere con i suddetti approcci, che sono senza dubbio più generali dello schema che proponiamo — e tuttavia il più delle volte corrispondentemente più complessi. Al contrario, notiamo solo che se il problema in esame ha le due caratteristiche elencate nell'introduzione, esiste un modo particolare di sfruttare la presenza di controllori locali in modo da preservare la tecnica MPC receding horizon, a passo fisso, a vantaggio della semplicità, pur non dovendo eseguire il calcolo ad ogni passo, a favore dell'efficienza e della leggerezza computazionale.

3 Lo schema proposto

In questa sezione presentiamo lo schema SP-MPC in una situazione semplificata a fini esplicativi, ovvero quando sia il controllore locale preesistente che lo strato MPC gerarchicamente superiore sono SISO e il passo di aggiornamento del controller locale e dello strato MPC è lo stesso. Abbiamo iniziato la nostra ricerca studiando questo problema al fine di valutare l'utilità e la fattibilità dell'approccio, e questi sono i risultati presentati a moment. Si possono facilmente prevedere estensioni a casi più realistici, insieme ai problemi da affrontare e alla strategia che stiamo seguendo a tal fine; la successiva sezione 5 è dedicata a questo argomento.

3.1 Visione d'insieme

Nella situazione appena descritta, lo schema SP-MPC è rappresentato in Figura 1, dove P è il processo sotto controllo e $C(z)$ il controllore locale, che come detto si assume essere LTI e operare a passo fisso.

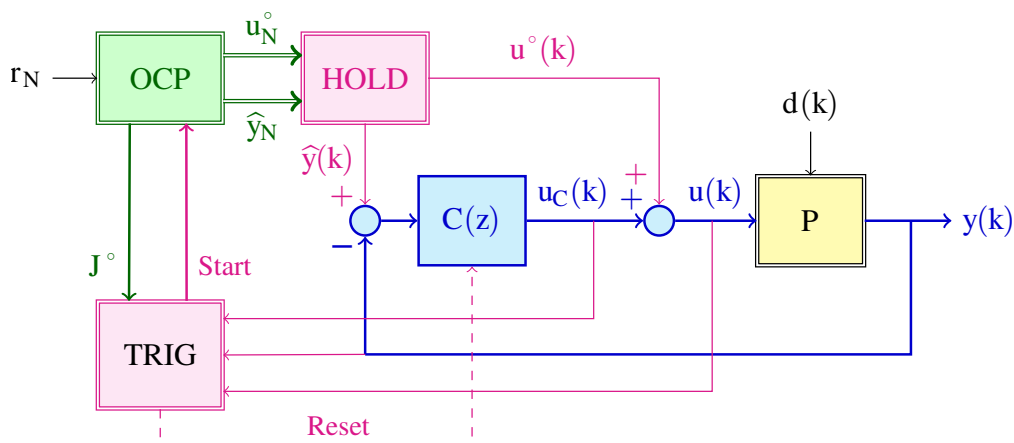


Figura 1: Lo schema SP-MPC.

Il funzionamento dello schema può essere riassunto come segue. Ad un certo istante k viene eseguita l'ottimizzazione MPC (blocco OCP, acronimo di Optimisation Control Problem, l'oggetto a più alta intensità di calcolo). Il blocco OCP opera su un modello P e sul vettore r_N , che contiene N valori futuri del segnale di riferimento r , dove N è l'orizzonte

di controllo. Minimizzando una funzione di costo J , OCP produce due vettori di lunghezza N : u_N° , che contiene i controlli futuri, e \hat{y}_N , con i corrispondenti valori previsti dell'uscita controllata. Il blocco HOLD riceve questi vettori e inizia ad applicare i loro elementi, uno per passo di controllo, alla parte inferiore dello schema.

L'idea chiave dall'approccio SP-MPC è che se il comportamento di P corrisponde (abbastanza) al modello di previsione presente in OCP e se al contempo non ci sono (significativi) disturbi non misurati d , l'applicazione di u° produce (idealmente) esattamente \hat{y} , quindi l'uscita u_C di C è zero. Il blocco TRIG monitora il segnale di controllo u , l'uscita di C e la variabile controllata y . Finché le cose stanno andando “bene” nel senso discusso nella Sezione 3.3 qui di seguito, non viene attivata alcuna ulteriore esecuzione di OCP. Se al contrario il blocco TRIG decide che è necessaria una nuova ottimizzazione, o se i controlli futuri N precedentemente calcolati sono stati esauriti, allora OCP viene nuovamente richiamato tramite la linea “Start” in Figura 1 e vengono fornite le informazioni di inizializzazione necessarie per il modello di ottimizzazione. Per svolgere il suo compito, il blocco TRIG può ad esempio monitorare l'energia di u_C , oppure calcolare la funzione di costo di ottimizzazione J , ma ogni possibile attività di TRIG è molto meno intensiva rispetto all'esecuzione di OCP, da cui il principale vantaggio dello schema SP-MPC. Il motivo per cui OCP comunica la funzione di costo ottimizzato J° a TRIG è relativo all'ultima osservazione, e verrà spiegato nella Sezione 3.3.

3.2 Analisi

Analizziamo ora lo schema nel caso in cui P è LTI e lo +anche il controllore MPC; indichiamo la sua funzione di trasferimento con $P(z)$, mentre $C(z)$ è quella del controllore feedback. È chiaro che in questo caso (che serve solo per l'analisi teorica) l'approccio sporadico non ha alcuna utilità pratica, poiché la legge di controllo è disponibile in forma esplicita. Tuttavia, l'analisi riportata di seguito non può essere condotta in molti casi di reale interesse, ad esempio quando la funzione di costo J da minimizzare è il risultato della simulazione di un sistema non lineare complesso. La congettura che formuliamo, e che è confermata dall'esperienza, è che se l'approccio sporadico può ridurre il numero di valutazioni del controllore MPC (cioè OCP) nel contesto LTI qui analizzato, lo stesso – con i conseguenti vantaggi – varrà anche nei casi applicativi d'interesse.

Innanzitutto, osserviamo che in condizioni nominali (nessun mismatch tra processo e modello e nessun disturbo), applicare tutti i controlli futuri N (politica che chiamiamo N-MPC) e utilizzare l'orizzonte di recessione standard (RH-MPC) in assenza di C sono ovviamente azioni equivalenti — assumendo per completezze che se è presente un vincolo, MPC ne tenga conto.

Tuttavia, assumendo per semplicità e con minima perdita di generalità pratica un processo asintoticamente stabile, è facile dimostrare che in presenza di un disturbo, il valore della funzione di costo calcolata sull'orizzonte di controllo con N-MPC più C è (in generale) intermedio tra quello di RH-MPC e del solo N-MPC, che mostra l'utilità di C (oltre al suo ruolo più ovvio di consentire il funzionamento del sistema senza lo strato MPC).

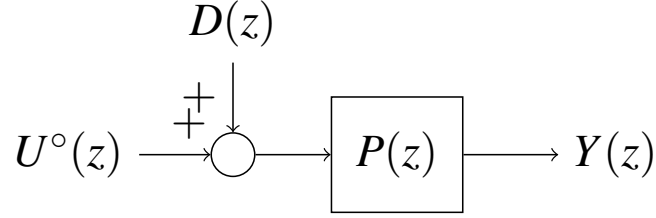


Figura 2: Sistema soggetto a disturbo additivo sul segnale di controllo nel caso di N-MPC puro.

A tal fine, si consideri N-MPC e si supponga ad esempio di avere un disturbo additivo d che agisce sul segnale di controllo u° proveniente dall'MPC, come rappresentato nella Figura 2. In questo caso l'espressione dell'uscita è

$$Y(z) = P(z)(U^\circ(z) + D(z)), \quad (1)$$

e poiché, nella presunta assenza di discrepanza tra il processo e il modello in OCP,

$$P(z)U^\circ(z) = \hat{Y}(z), \quad (2)$$

possiamo scrivere

$$Y(z) = \hat{Y}(z) + P(z)D(z). \quad (3)$$

In generale ciò rende la funzione di costo di N-MPC non ottimale *a priori*, come invece è quella di RH-MPC.

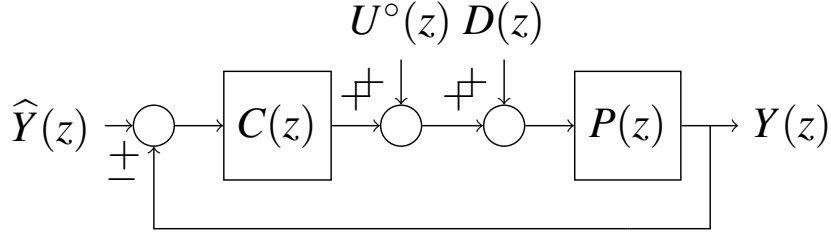


Figura 3: Sistema con disturbo additivo sul segnale di controllo nel caso di N-MPC più controllore feedback.

Invece, mettendo in gioco il controllore feedback $C(z)$ in un loop il cui set-point è l'uscita prevista ottima $\hat{Y}(z)$, come mostrato in Figura 3, l'espressione dell'uscita diventa

$$Y(z) = \frac{P(z)}{1 + P(z)C(z)}(D(z) + U^\circ(z)) + \frac{P(z)C(z)}{1 + P(z)C(z)}\hat{Y}(z), \quad (4)$$

ma poiché ancora assumiamo assenza di discrepanza tra il processo e il modello in OCP, otteniamo

$$U^\circ(z) = P^{-1}(z)\hat{Y}(z), \quad (5)$$

da cui

$$Y(z) = \hat{Y}(z) + \frac{P(z)}{1 + P(z)C(z)}D(z). \quad (6)$$

Confrontando (6) con (3) notiamo che se $C(z)$ rigetta il disturbo in andata $D(z)$, il che è quanto un tale regolatore è in generale progettato per fare, la funzione di costo con lo schema della Figura 3 è più vicina all'ottimo di quella ottenuta con lo schema della Figura 2. Per inciso, osserviamo anche che se il controllore MPC è progettato correttamente nel senso receding horizon, e allo stesso tempo $C(z)$ stabilizza il suo loop, allora (almeno con un P asintoticamente stabile e ovviamente un D limitato) la funzione di costo non può divergere.

Tuttavia, quando si esegue OCP, è consigliabile che il controllore C sia vincolato in tracking a dare uscita zero per un passo. Questo ha due motivazioni. Da un lato, applicare un valore di controllo diverso da quello proveniente dall'OCP al primo passo significherebbe non fidarsi dell'ottimizzatore neppure per un passo, il che è palesemente privo di senso e allo stesso tempo viola il paradigma receding horizon. D'altra parte, al primo passo dopo un'ottimizzazione C deve resettarsi, per non permettere al suo moto libero (indotto

dallo stato non di equilibrio in cui in genere verrà a trovarsi) di influenzare indebitamente l'uscita di controllo decisa dall'ottimizzatore per il nuovo orizzonte temporale.

3.3 Meccanismo di attivazione di OCP

Può accadere che, nonostante l'aiuto di C , sia necessaria una nuova ottimizzazione prima che i campioni di controllo disponibili in N siano esauriti. È quindi conveniente introdurre un meccanismo di attivazione OCP (blocco TRIG nella Figura 1). L'effetto di questo blocco, anche alla luce dell'ultima osservazione nella Sezione 3.2, è di fare in modo che lo schema si comporti in modo intermedio tra RH-MPC e N-MPC. In questa sezione spenderemo alcune parole su come si può ragionare sul meccanismo di attivazione dell'ottimizzazione e quindi presenteremo come tale meccanismo è costruito in base allo stato attuale della ricerca.

Una prima indicazione che le previsioni fatte da OCP non corrispondono al comportamento reale del sistema di controllo, è un contributo significativamente diverso da zero da parte di u_C al segnale di controllo. Un indice naturale per rilevare questo è

$$I_C(\ell) = \sum_{j=1}^{\ell} u_C(k_{LO} + j)^2, \quad (7)$$

che somma i quadrati dei campioni di u_C dal tempo k_{LO} dell'ultima ottimizzazione al tempo presente $k_{LO} + \ell$, $1 \leq \ell \leq N$ e viene reimpostato a zero ogni volta che viene eseguita un'ottimizzazione. Un'alternativa è normalizzare l'indice rispetto all'energia di controllo totale, cioè utilizzare come indice la quantità

$$I_{CN}(\ell) = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^{\ell} u_C(k_{LO} + j)^2}{\sum_{j=1}^{\ell} u(k_{LO} + j)^2} & \sum_{j=1}^{\ell} u_C(k_{LO} + j)^2 > 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^{\ell} u_C(k_{LO} + j)^2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

dove – si ricordi la Figura 1, $u(k) = u_C(k) + u^o(k)$. In entrambi i casi un indizio per attivare un'ottimizzazione è che l'indice superi una certa soglia. Questa soglia è un parametro di controllo, più facile da selezionare nel caso normalizzato che in assenza di normalizzazione.

Tuttavia, l'attivazione basata sull'energia di u_C presenta uno svantaggio rilevante. Infatti, l'obiettivo finale di MPC è ridurre al minimo la funzione di costo J . Quando OCP viene eseguito, viene prodotto un valore ottimale J° di tale funzione nei successivi N istanti di tempo. Questo valore di J rappresenta il miglior risultato possibile del sistema di controllo dato il suo stato all'inizio dell'orizzonte di controllo e gli input noti o previsti sullo stesso orizzonte. In linea di principio, tuttavia, è possibile che l'azione del controllore feedback C , o quella dei fenomeni esogeni riassunti nel disturbo d , faccia comportare il sistema in modo tale da produrre un valore di J oltre l'orizzonte di controllo che è *inferiore* alla previsione J° . In tal caso, in modo abbastanza intuitivo, l'attivazione di un'ottimizzazione si traduce solo in un inutile sovraccarico computazionale.

Un modo per ovviare a questo problema è prevedere un'attivazione basata sulla *storia* della funzione di costo dall'inizio dell'attuale orizzonte di controllo, come spiegato di seguito. Evidenziando la dipendenza di J dal set point, dalla variabile controllata e dal segnale di controllo, possiamo scrivere

$$J^\circ = J(r_N, \hat{y}_N, u_N^\circ). \quad (9)$$

e quindi, concentrandoci sull'orizzonte a partire da k_{LO} , definire le funzioni di costo corrente nominale e reale rispettivamente come

$$\begin{aligned} J_r^\circ(\ell) = J([r_N(1) \dots r_N(\ell)], \\ [\hat{y}_N(1) \dots \hat{y}_N(\ell)], \\ [u_N^\circ(1) \dots u_N^\circ(\ell)]), \quad \ell = 1 \dots N, \end{aligned} \quad (10)$$

cioè J calcolato da k_{LO} fino all' ℓ -esimo istante dell'orizzonte con i valori ottimali previsti di y e u , e come

$$\begin{aligned} J_r(\ell) = J([r(k_{LO} + 1) \dots r(k_{LO} + \ell)], \\ [y(k_{LO} + 1) \dots y(k_{LO} + \ell)], \\ [u(k_{LO} + 1) \dots u(k_{LO} + \ell)]), \quad \ell = 1 \dots N, \end{aligned} \quad (11)$$

che è lo stesso di (10) ma calcolato con i valori *effettivi* (non predetti) di r , y e u . Se questi segnali seguono quelli predetti, allora chiaramente $J_r(\ell) = J_r^\circ(\ell) \forall \ell \in [1, N]$ e

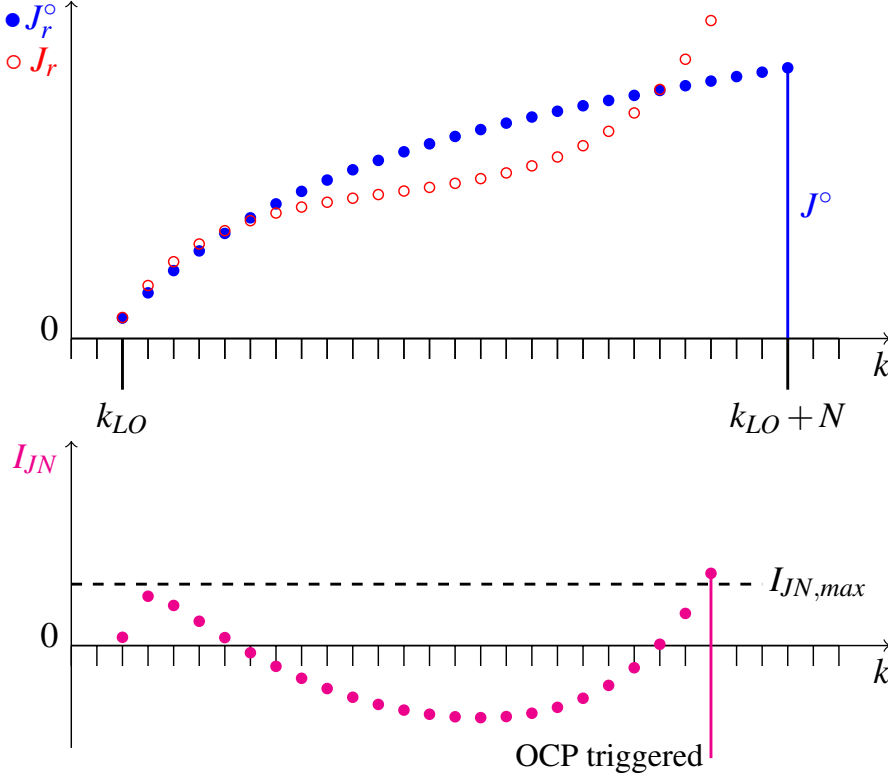


Figura 4: Un possibile comportamento di J_r^o , J_r e I_{JN} su un orizzonte di controllo.

$J_r(N) = J_r^o(N) = J^o$. Se al contrario le cose non stanno andando “bene” nel senso anticipato nella Sezione 3.1 e ora spiegato, allora $J_r(\ell)$ assume valori maggiori rispetto a $J_r^o(\ell)$. Un indice per rilevare questo è

$$I_{JN}(\ell) = \frac{J_r(\ell) - J_r^o(\ell)}{J_r^o(\ell)} \quad (12)$$

dove assumiamo $J_r^o(\ell) > 0$ per semplicità, poiché descrivere soluzioni alternative per il caso opposto (peraltro molto improbabile) sarebbe qui soltanto un’inutile complicazione. A titolo di esempio illustrativo, un possibile comportamento di J_r^o , J_r e I_{JN} su un orizzonte di controllo, che porta a innescare un’ottimizzazione prima che sia trascorso l’orizzonte, è mostrato nella Figura 4.

Riassumendo, I_{CN} indica che le cose non stanno andando come previsto all’inizio dell’orizzonte di controllo, ma non necessariamente peggio. D’altra parte, con l’assumere

valori positivi, I_{JN} segnala che i risultati del controllo non sono buoni come previsto. Pertanto attiviamo un'ottimizzazione se I_{JN} supera una soglia prescritta $I_{JN,max}$, e impieghiamo I_{CN} solo come indicatore che sta accadendo qualcosa di "imprevisto". Attualmente quest'ultimo indice non ha quindi un ruolo diretto nel meccanismo di attivazione, ma si prevede di sfruttare le informazioni che esso veicola nel futuro della ricerca qui presentata.

4 Esempi di applicazione

Presentiamo ora due esempi di simulazione, uno per illustrare lo schema in un caso volutamente molto semplice, l'altro per mostrare la sua fattibilità in un caso più complesso.

4.1 Esempio 1

Questo esempio si riferisce ad una capacità termica concentrata, la cui temperatura è controllata agendo tramite un comando nel range $[0,1]$ su una potenza termica imposta, e che disperde calore verso una temperatura esterna fissa attraverso una conduttanza termica costante. Un disturbo è fornito da un secondo ingresso di potenza alla capacità termica. Il controllore feedback (non MPC) è un PI. Lo strato MPC ha come funzione di costo l'errore quadratico e non viene introdotta alcuna penalizzazione sul controllo. L'orizzonte di controllo è l'intera giornata. Ulteriori dettagli non sono essenziali ai fini di questa sezione.

La figura 5 mostra il set point e la temperatura controllata per quasi un giorno di tempo simulato, il passo temporale dell'MPC e del PI digitale è di 12 minuti. Il sistema è soggetto a disturbi di potenza a tre gradini e ad un certo momento il set point viene modificato rispetto al profilo utilizzato per l'ottimizzazione precedente (quindi chiaramente da quel momento in poi la modifica è nota all'ottimizzatore). Questi fatti sono indicati con le frecce nella figura. Il funzionamento dello schema è soddisfacente e viene attivata una sola ottimizzazione (causata dalla variazione imprevista del set point e indicata anche da una variazione di colore nel grafico della temperatura).

La figura 6 mostra il segnale di controllo e la sua scomposizione nei contributi dell'MPC e del controllore feedback, ingrandendo anche l'intervallo di tempo che precede un'attivazione di OCP. Si può osservare che l'uscita dell'MPC fa la maggior parte del lavoro,

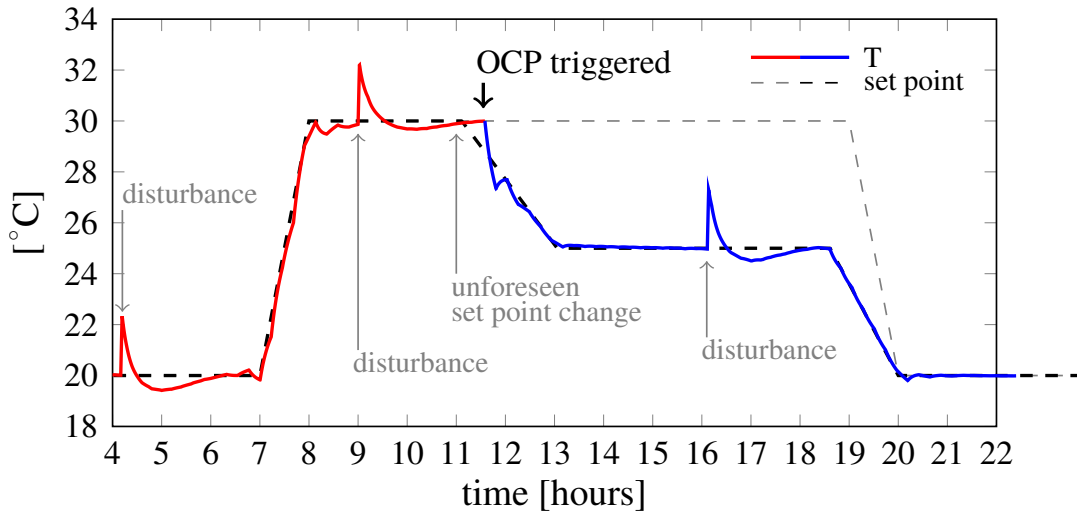


Figura 5: Esempio 1 – set point e variabile controllata.

mentre il controllore feedback interviene con parsimonia, per correggere azioni esogene impreviste; se questa correzione è sufficiente, OCP non viene richiamato.

Infine, la Figura 7 riporta il comportamento della funzione di costo “running” e dell’indice normalizzato rispetto alla sua soglia $I_{JN,max}$, per illustrare anche questa parte dello schema SP-MPC e il suo ruolo nell’attivazione di OCP.

4.2 Esempio 2

Questo esempio si riferisce ad un ambiente modellato come un unico volume contenente aria umida, una parete di contenimento multistrato, un fan coil, uno riscaldatore per l’acqua che alimenta il fan coil, una pompa, un pressurizzatore e le necessarie tubazioni, il tutto complessivamente pari a circa 350 equazioni non banali e 50 variabili di stato. Il diagramma Modelica del sistema controllato è mostrato nella Figura 8.

Anche in questo caso l’orizzonte MPC è l’intera giornata, per generare una situazione volutamente abbastanza estrema. Inoltre, contrariamente all’esempio precedente, il modello di ottimizzazione è una descrizione semplificata del sistema controllato reale: in particolare, il circuito dell’acqua non è rappresentato. È comunque vero che le variabili di stato del modello di ottimizzazione hanno una controparte diretta in termini misu-

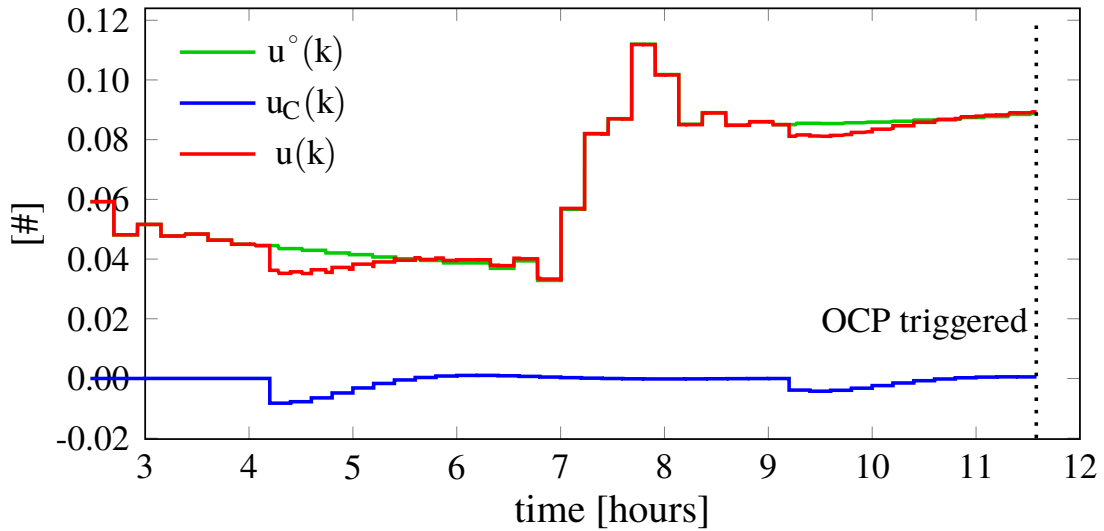


Figura 6: Esempio 1 – segnale di controllo e sue componenti (zoom prima di un’attivazione di OCP).

re prese dal modello di sistema controllato (in un caso reale, dall’impianto). Inoltre, in questo esempio il PI è modellato come un controllore a tempo continuo, per supportare la nostra congettura che può essere rilasciata l’assunzione di passi temporali uguali per l’aggiornamento dell’MPC e del controllore C .

La figura 9 riporta i risultati. Viene attivata una sola ottimizzazione, causata dall’applicazione simultanea di un disturbo a scalino sulla potenza radiativa verso la stanza e di un carico termico aggiuntivo (anch’esso a scalino) sul circuito idraulico.

4.3 Breve discussione

Abbiamo presentato due esempi senza l’intenzione di fare riferimento a una specifica applicazione reale (per quanto il secondo non sia poi tanto semplice rispetto ad alcune possibili applicazioni) ma piuttosto per ottenere una ragionevole certezza che le ipotesi che abbiamo fatto nel concepire lo schema SP-MPC siano realmente ragionevoli e conducano a una soluzione praticabile e utile nelle applicazioni.

A valle dell’osservazione dei test presentati – e anche di altri qui omessi per brevità – lo schema sembra rispondere all’esigenza per cui è stato concepito. In particolare, il test

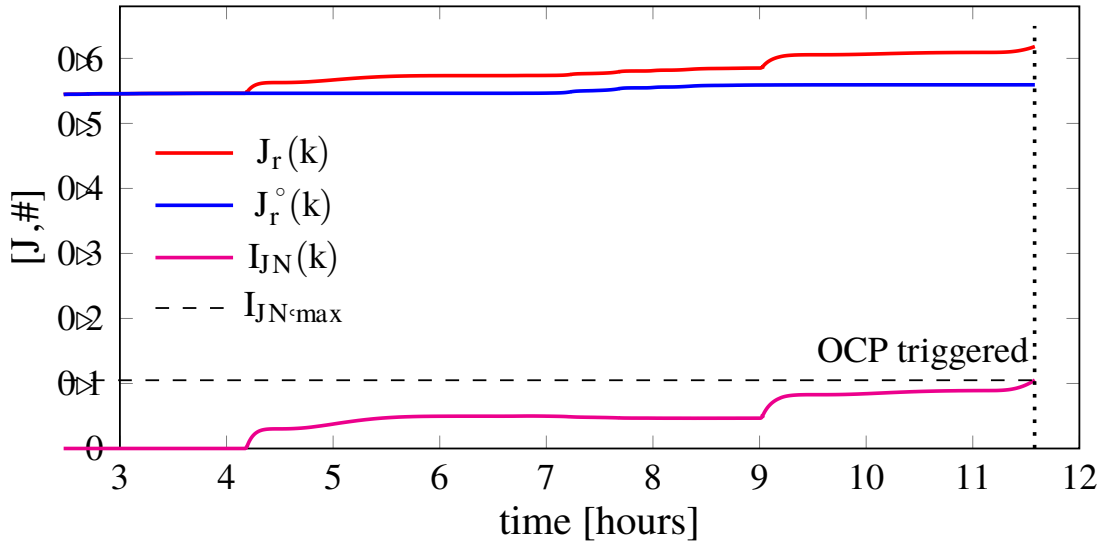
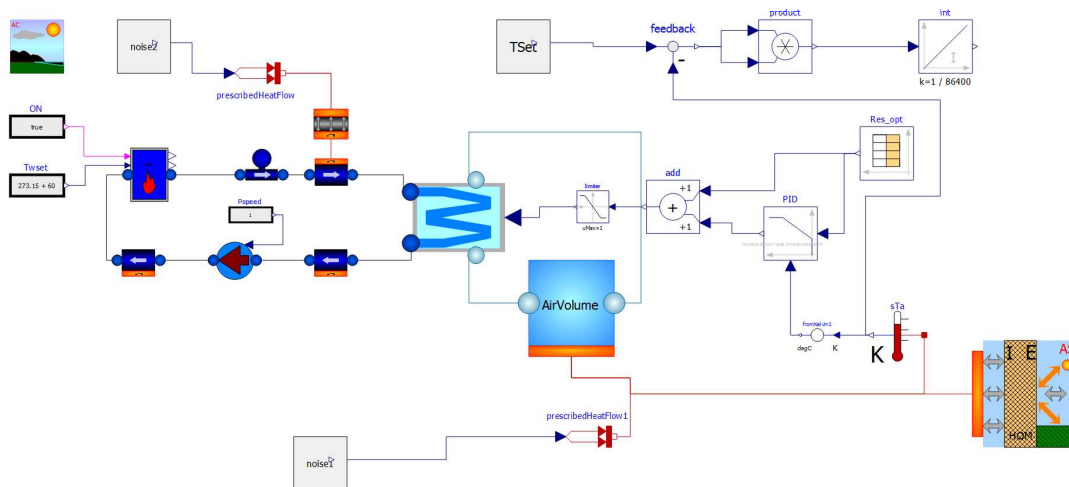


Figura 7: Esempio 1 – funzione di costo “running” e indice normalizzato (zoom prima di un’attivazione di OCP).

con un orizzonte MPC deliberatamente troppo lungo dimostra che non ha una tendenza indebita a innescare ottimizzazioni, anche se il controllore feedback C è abbastanza reattivo (come talvolta avviene, pensando al contesto building, se per esempio le esigenze di comfort sono stringenti). Inoltre, il passo temporale di C non sembra essere un problema significativo nella pratica. Infine, il modello utilizzato per l’ottimizzazione non deve necessariamente corrispondere alla struttura del processo reale a condizione che la sua inizializzazione non sia ambigua, a vantaggio dell’applicabilità dello schema a una varietà di tecniche MPC.

5 Estensioni e problemi aperti

Dopo aver dimostrato l’utilità dello schema SP-MPC, spendiamo ora alcune parole sui problemi aperti da affrontare. Il primo è che prima di eseguire OCP, il modello di processo ivi contenuto deve essere inizializzato. Questo non è un problema se tutte le variabili di stato di detto modello corrispondono a misure nel sistema reale, rendendo naturale l’utilizzo di modelli di primo principio; può essere tuttavia più difficile con i blocchi OCP che com-



prendono modelli “non fisici”, dove le variabili di stato possono avere un’interpretazione non immediata in termini di misure disponibili.

- rendere il blocco TRIG MIMO e anch'esso centralizzato,
- dotare ciascuno del proprio TRIG, che in un certo senso “ vota ” per eseguire un nuovo OCP.

Inoltre, l'MPC e gli anelli di controllo locali possono operare a passi temporali differenti, dove quello dell'MPC è ovviamente quello più lungo. Lasciamo anche questo punto a indagini future, sebbene l'esempio mostrato nella Sezione 4.2 indichi che lo schema può funzionare correttamente.

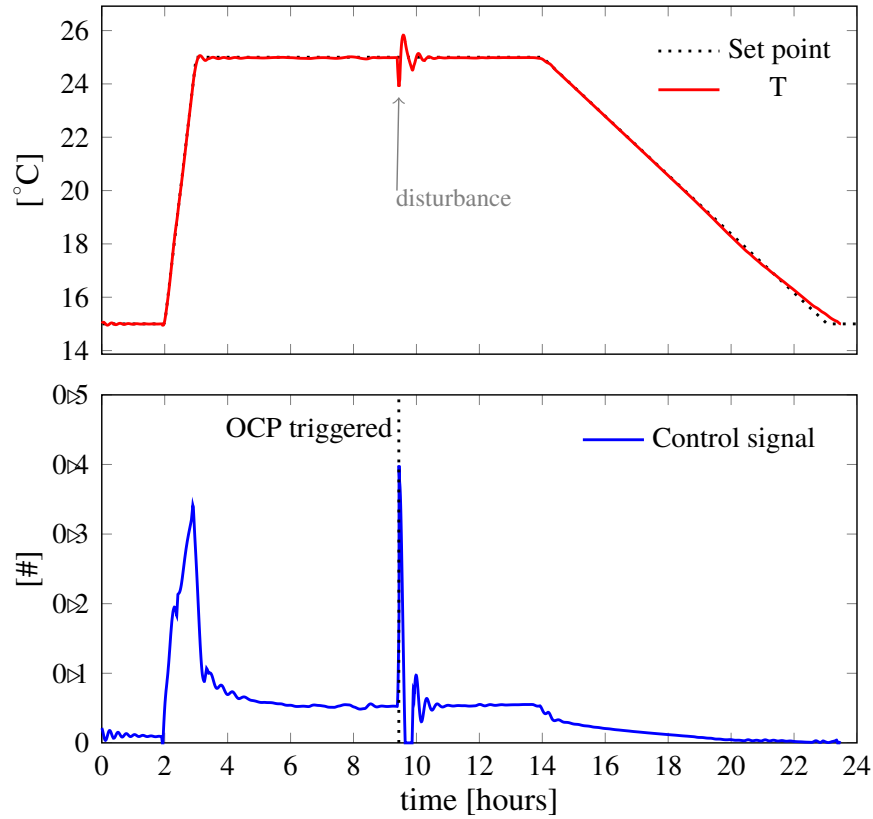


Figura 9: Esempio 2 – set point e variabile controllata (sopra) e segnale di controllo (sotto).

da r – come dovrebbe essere senza MPC – a \hat{y} . Se il passaggio avviene quando r e \hat{y} sono vicini l'uno all'altro (come si riscontra in prossimità di condizioni di regime) non c'è problema, altrimenti il controllore deve gestire correttamente i trasferimenti senza intoppi. Questo non è difficile in generale, ma può risultare una invasività leggermente maggiore di SP-MPC per un sistema preesistente.

Infine, citiamo la limitazione forse più rilevante dell'approccio SP-MPC come ora concepito. Sebbene il problema di ottimizzazione non debba essere eseguito ad ogni passo, quando viene eseguito deve comunque essere completato entro il tempo di un passo. Quindi c'è già così un risparmio di risorse computazionali, però senza dubbio lo schema sarebbe più interessante e attraente se il problema appena menzionato fosse risolto. Una possibilità per farlo sarebbe quella di prevedere l'arrivo di un'attivazione di OCP, ad esempio

estrapolando le funzioni di attivazione nel tempo e avviando OCP in anticipo utilizzando i segnali così predetti. Ovviamente però questo deve potersi tradurre in algoritmi abbastanza semplici, per preservare i vantaggi dello schema.

6 Conclusioni e linee future di ricerca

Abbiamo presentato uno schema di controllo, denominato Sporadic MPC, in breve SP-MPC. Quando un controllo MPC deve essere applicato sopra uno strato esistente di anelli locali, o più in generale quando tale strato è consigliabile per gestire il sistema in assenza di MPC, allora SP-MPC può ridurre significativamente il numero di soluzioni da computare per il problema di ottimizzazione. Se il suddetto problema è computazionalmente intensivo, il vantaggio è evidente. Abbiamo descritto lo schema SP-MPC e il suo funzionamento, ne abbiamo giustificato il razionale e presentato un paio di esempi applicativi – in simulazione – per testimoniare la fattibilità e l'utilità.

Il lavoro futuro affronterà i problemi finora aperti, elencati nella Sezione 5 insieme alla strategia che prevediamo al momento per affrontarli. Inoltre, è prevista la sperimentazione su casi più complessi: i test qui presentati avevano lo scopo di valutare la fattibilità dell'idea e riferiti a situazioni abbastanza idealizzate, quelle previste si muoveranno verso la quantificazione dei vantaggi ottenibili in casi più realistici.

Riferimenti bibliografici

- [1] A. Afram and F. Janabi-Sharifi. Theory and applications of HVAC control systems—a review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 72:343–355, 2014.
- [2] T.A. Badgwell and S.J. Qin. Model-predictive control in practice. *Encyclopedia of Systems and Control*, pages 756–760, 2015.
- [3] E. Camacho and C. Bordons. *Model predictive control*. Springer, London, UK, 2013.
- [4] E.F. Camacho and C. Bordons. Distributed model predictive control. *Optimal Control Applications and Methods*, 36(3):269–271, 2015.

- [5] A. Cortinovis, M. Mercangoez, T. Mathur, J. Poland, and Marcel M. Blaumann. Nonlinear coal mill modeling and its application to model predictive control. *Control Engineering Practice*, 21(3):308–320, 2013.
- [6] A.M. Ersdal, L. Imsland, and K. Uhlen. Model predictive load-frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1):777–785, 2016.
- [7] K. Hashimoto, S. Adachi, and D.V. Dimarogonas. Time-constrained event-triggered model predictive control for nonlinear continuous-time systems. In *Proc. 54th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 4326–4331, Osaka, Japan, 2015.
- [8] G.P. Henze. Model predictive control for buildings: a quantum leap? *Journal of Building Performance Simulation*, 6(3):157–158, 2013.
- [9] G.P. Henze, C. Felsmann, and G. Knabe. Evaluation of optimal control for active and passive building thermal storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 43:173–183, 2004.
- [10] D. Lehmann, E. Henriksson, and K. H. Johansson. Event-triggered model predictive control of discrete-time linear systems subject to disturbances. In *Proc. European Control Conference*, pages 1156–1161, 2013.
- [11] A. Leva, F.M. Benzi, V. Magagnotti, and G. Vismara. Sporadic model predictive control. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):4887–4892, 2017.
- [12] Y. Ma, F. Borrelli, B. Hencsey, B. Coffey, S. Bengea, and P. Haves. Model predictive control for the operation of building cooling systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(3):796–803, 2012.
- [13] Y. Ma, F. Borrelli, B. Hencsey, A. Packard, and S. Bortoff. Model predictive control of thermal energy storage in building cooling systems. In *Proc. 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, Shangai, P.R. China, 2009.
- [14] Y. Ma, A. Kelman, A. Daly, and F. Borrelli. Predictive control for energy efficient buildings with thermal storage. *IEEE Control Systems Magazine*, 2012.

- [15] A. Mirakhorli and B. Dong. Occupancy behavior based model predictive control for building indoor climate—a critical review. *Energy and Buildings*, 129:499–513, 2016.
- [16] T.P. Nascimento, A.P. Moreira, and A.G. Scolari Conceição. Multi-robot nonlinear model predictive formation control: Moving target and target absence. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12):1502–1515, 2013.
- [17] F. Oldewurtel, A. Ulbig, M. Morari, and G. Andersson. Building control and storage management with dynamic tariffs for shaping demand response. In *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Manchester, UK, 2011.
- [18] S. Privara, J. Cigler, Z. Váňa, F. Oldewurtel, C. Sagerschnig, and E. Žáčková. Building modeling as a crucial part for building predictive control. *Energy and Buildings*, 56:8–22, 2013.
- [19] T. Salsburya, P. Mhaskarb, and S.J. Qinc. Predictive control methods to improve energy efficiency and reduce demand in buildings. *Computers and Chemical Engineering*, 51:77–85, 2013.
- [20] A. Schirrer, M. Brandstetter, I. Leobner, S. Hauer, and M. Kozek. Nonlinear model predictive control for a heating and cooling system of a low-energy office building. *Energy and Buildings*, 125:86–98, 2016.
- [21] A. Willersrud, L. Imsland, S.O. Hauger, and P. Kittilsen. Short-term production optimization of offshore oil and gas production using nonlinear model predictive control. *Journal of Process Control*, 23(2):215–223, 2013.