UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BERGAMO

Dipartimento
di Ingegneria Gestionale,
dell'Informazione e della Produzione

Artificial Pancreas: approccio basato su MPC non lineare per la regolazione automatica della glicemia in pazienti diabetici Tipo 1

Gabriele Morè
1058401

RELATORE
Prof. Antonio Ferramosca

CORRELATORE
Dott. Nicola Licini

SEDE
Università degli Studi di Bergamo

DATA
28-03-2025

Outline

- Introduzione
- Problema analizzato
- Soluzione proposta
- Risultati
- Conclusioni

Outline

- **Introduzione**
- Problema analizzato
- Soluzione proposta
- Risultati
- Conclusioni

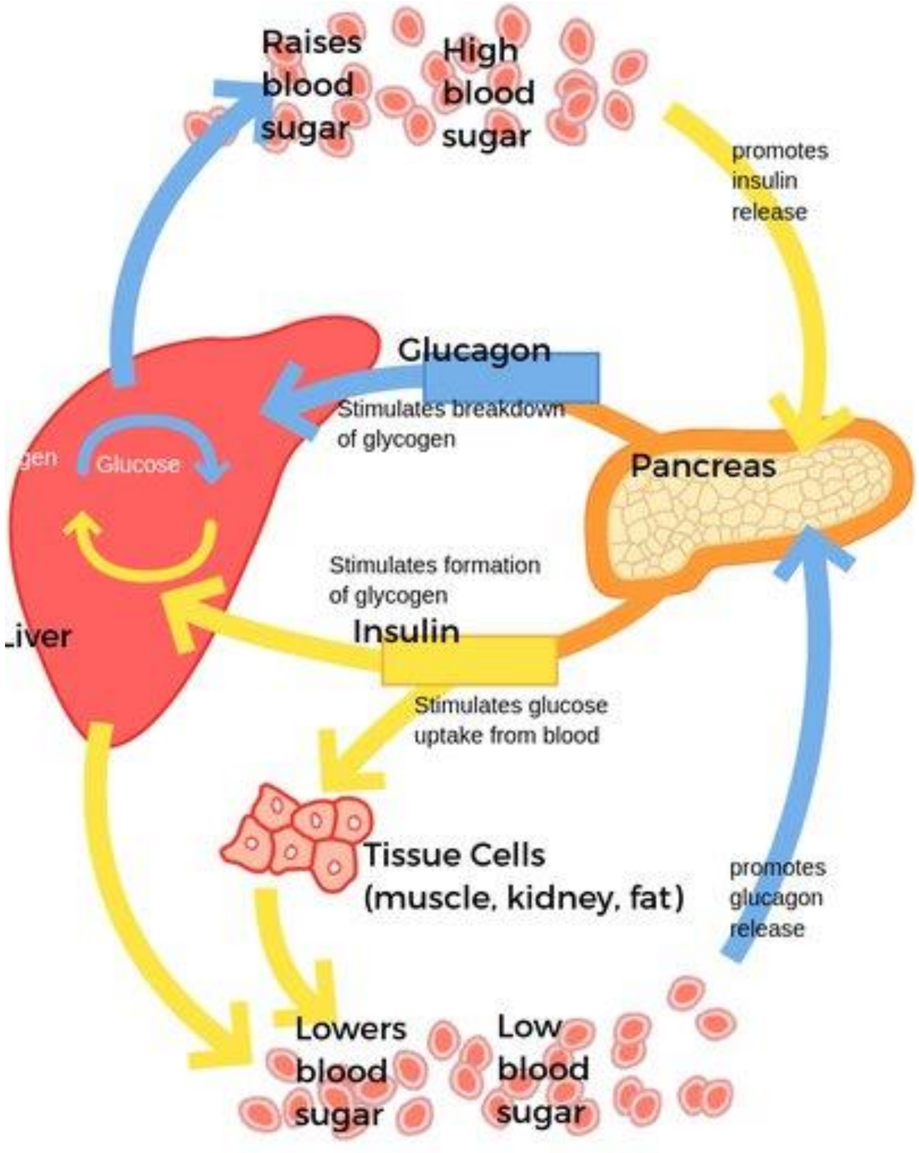
Diabete di tipo 1 (T1DM)

- Patologia che si manifesta quando il pancreas non produce una quantità adeguata di **insulina**

- E' causata dalla distruzione delle **cellule β** pancreatiche

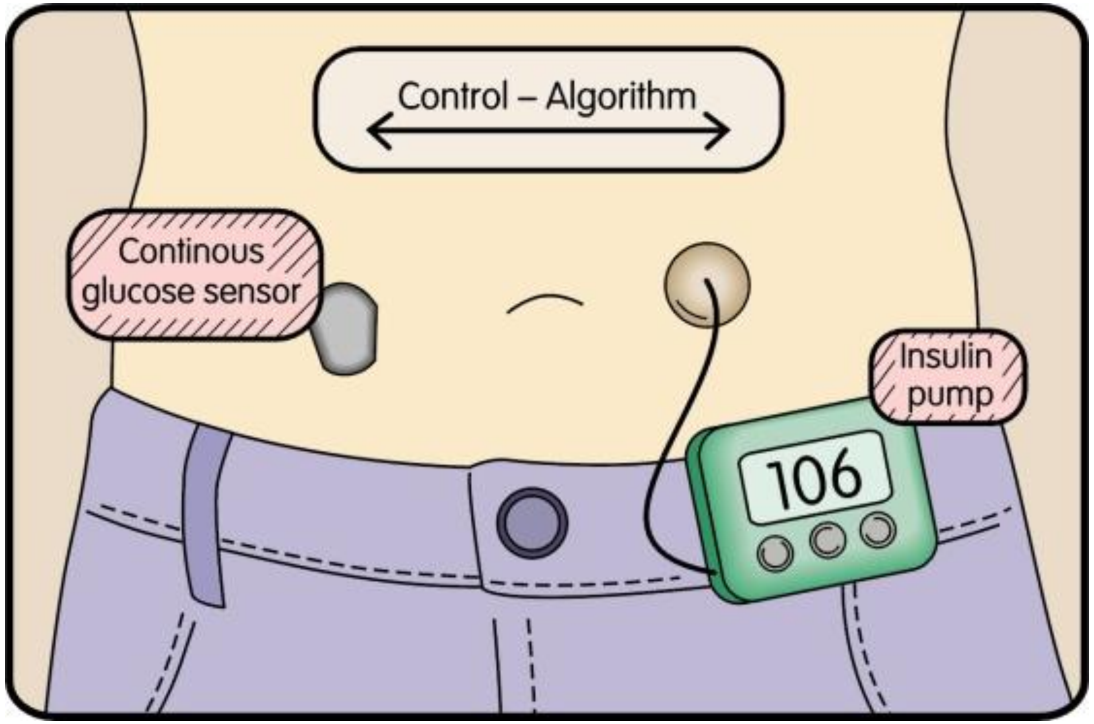
- Le principali conseguenze sono l'**ipoglicemia** e l'**iperglicemia**

G < 70mg/dL G > 180mg/dL



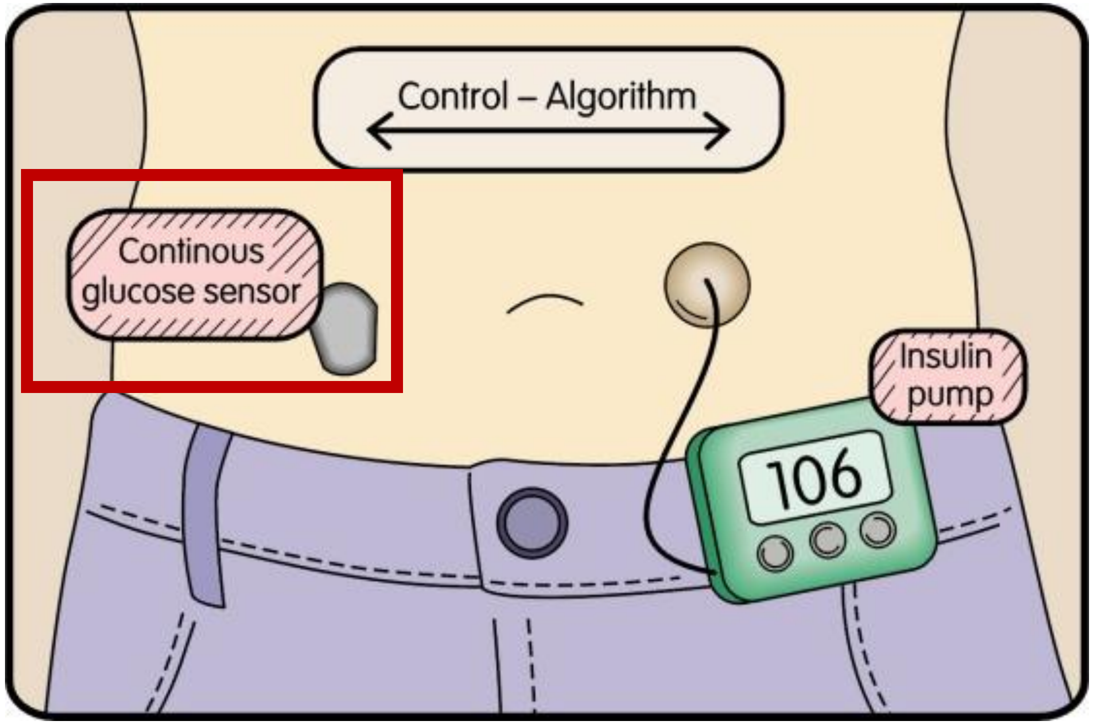
Pancreas Artificiale (AP)

- Sistema **ibrido** in anello chiuso utilizzato per il trattamento di pazienti diabetici



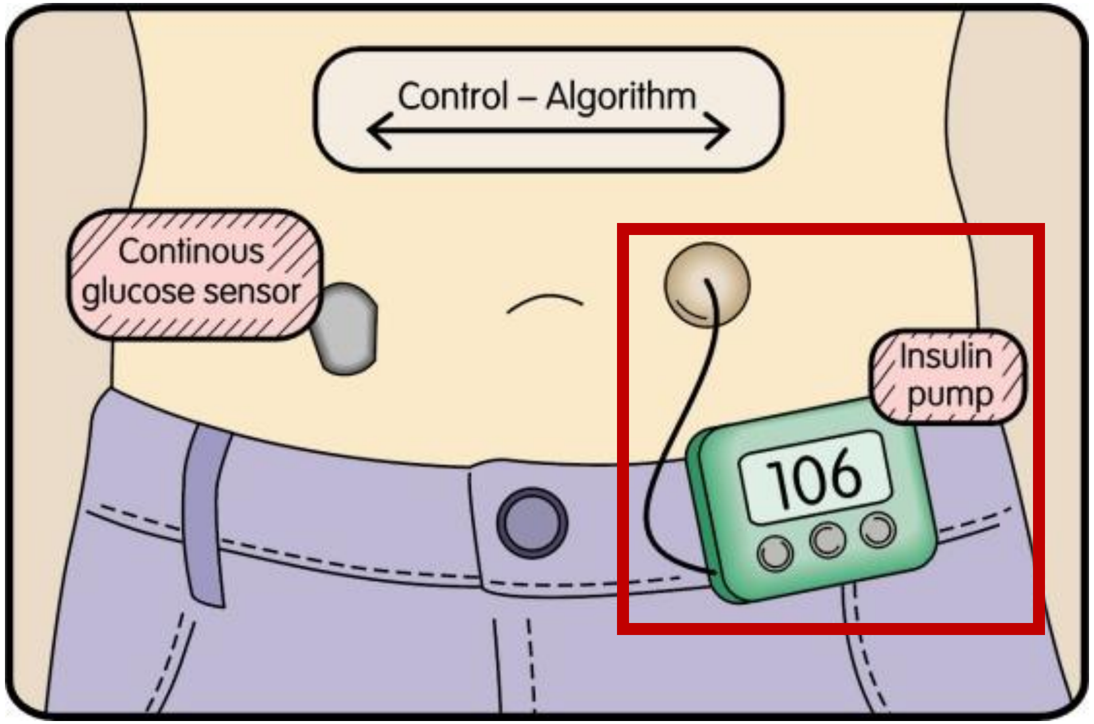
Pancreas Artificiale (AP)

- Sistema **ibrido** in anello chiuso utilizzato per il trattamento di pazienti diabetici



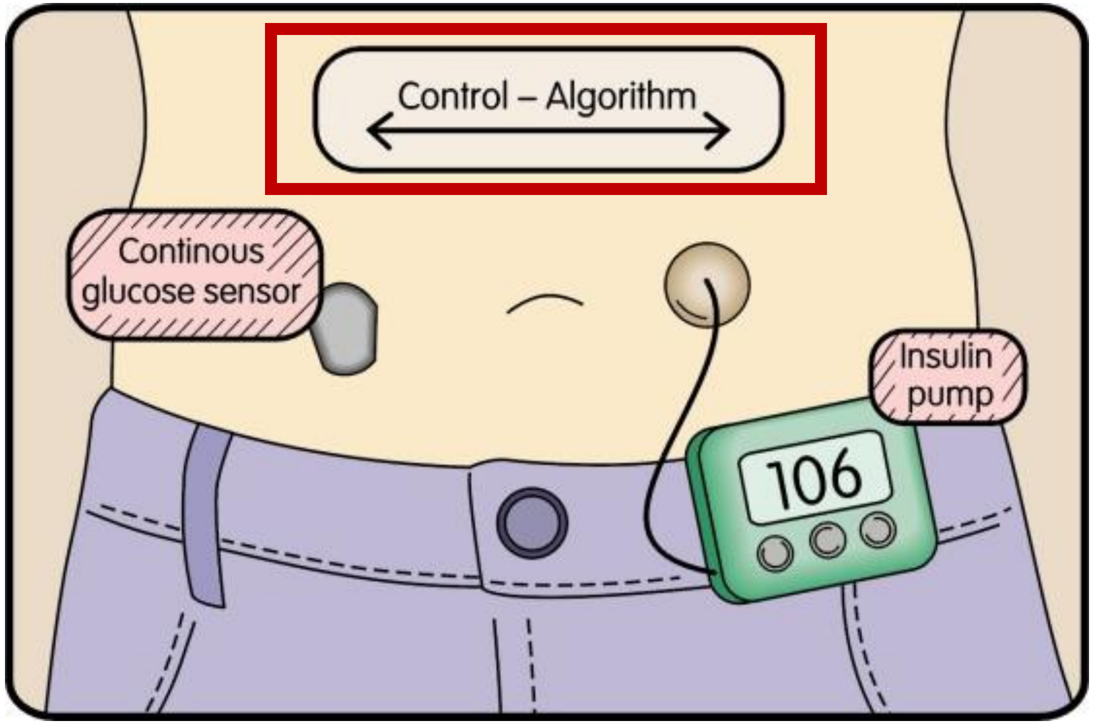
Pancreas Artificiale (AP)

- Sistema **ibrido** in anello chiuso utilizzato per il trattamento di pazienti diabetici



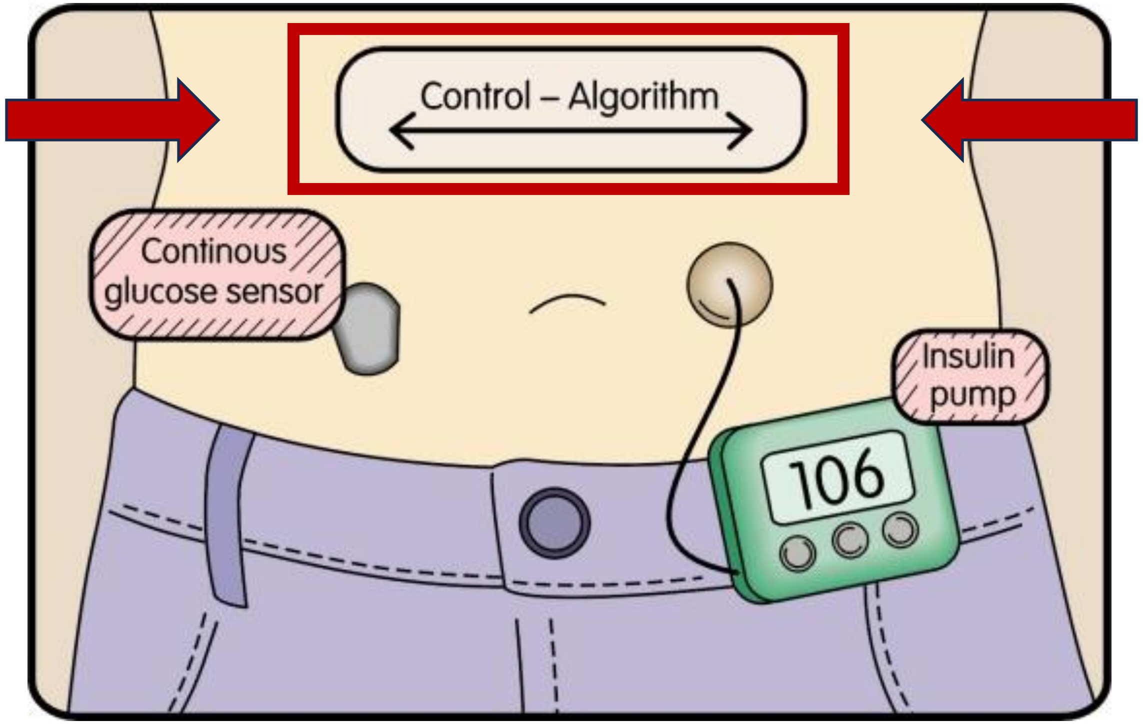
Pancreas Artificiale (AP)

- Sistema **ibrido** in anello chiuso utilizzato per il trattamento di pazienti diabetici



Pancreas Artificiale (AP)

- Sistema **ibrido** in anello chiuso utilizzato per il trattamento di pazienti diabetici



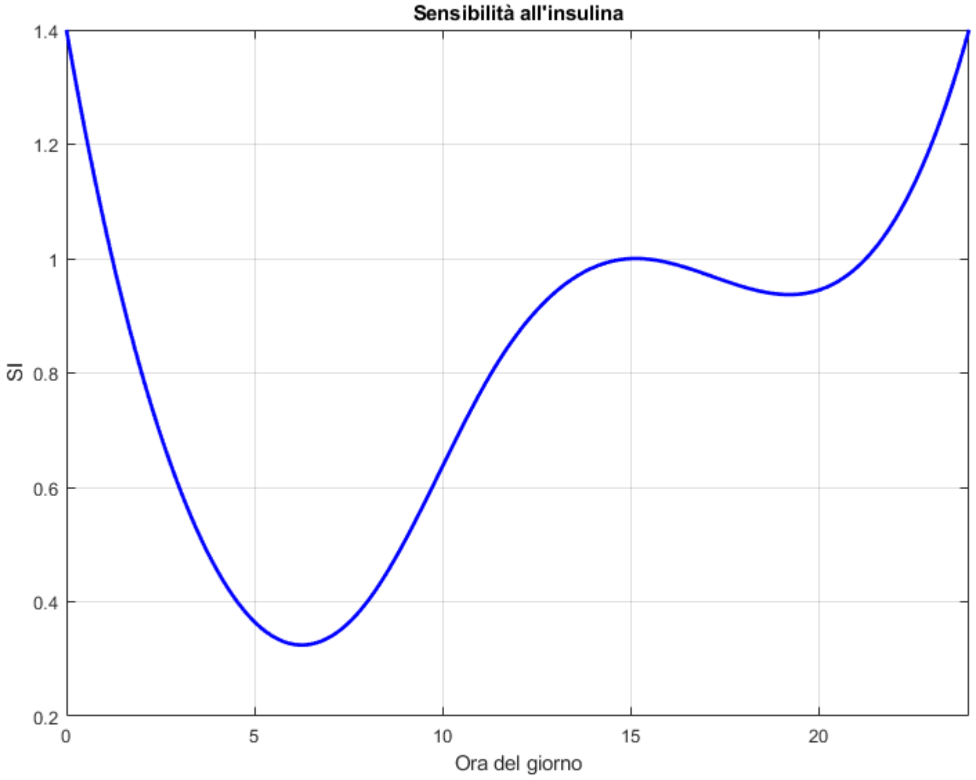
Outline

- Introduzione
- **Problema analizzato**
- Soluzione proposta
- Risultati
- Conclusioni

Sensibilità insulinica

- La **sensibilità all'insulina** in un paziente diabetico varia seguendo un **ritmo circadiano**

- La sensibilità all'insulina presenta una **notevole variabilità interindividuale** difficile da modellare in modo uniforme oltre che influenzabile da **fattori esterni**



Outline

- Introduzione
- Problema analizzato
- **Soluzione proposta**
- Risultati
- Conclusioni

Model Predictive Control (MPC)

Obiettivo: trovare la miglior sequenza di N azioni di controllo all'istante k

$$\min_{\boldsymbol{u}} \sum_{j=0}^{N-1} ||x_j - r(k)||_Q^2 + ||u_j - u_r(j)||_R^2$$

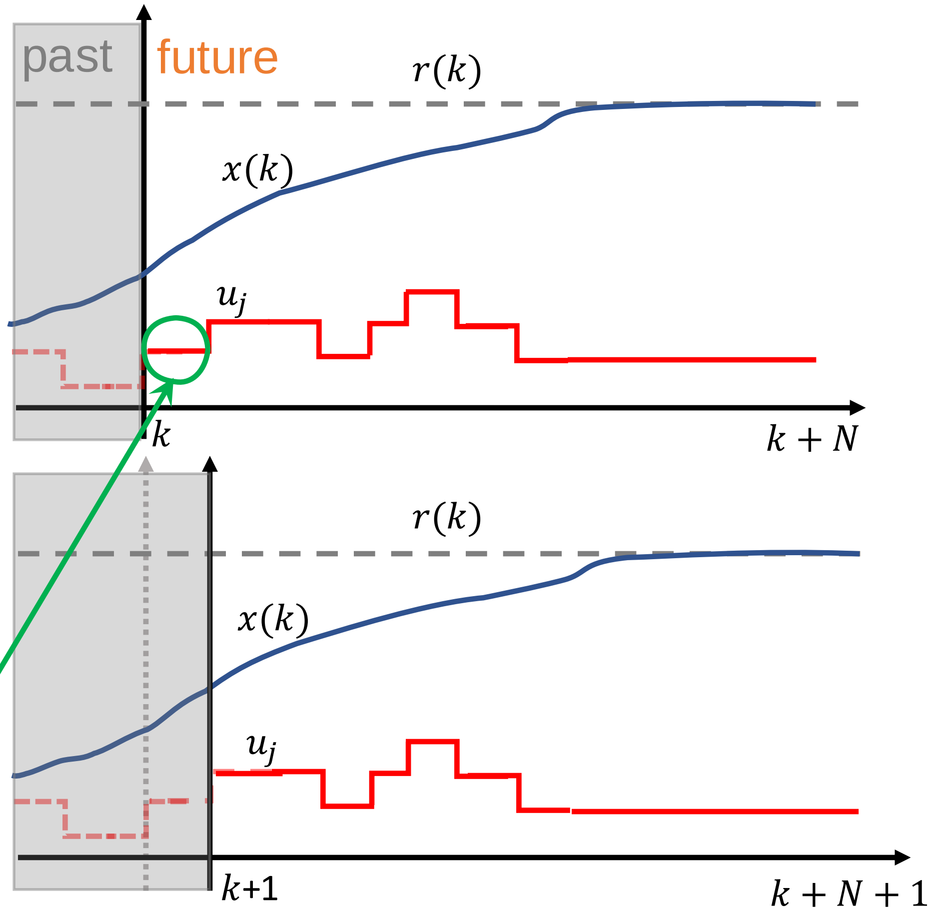
$s.t.$ $x(j+1) = f(x(j), u(j))$ — *Modello matematico*

$y(j) = g(x(j))$

$u_{min} \leq u_j \leq u_{max}$ — *Vincoli*

$x_{min} \leq x_j \leq x_{max}$

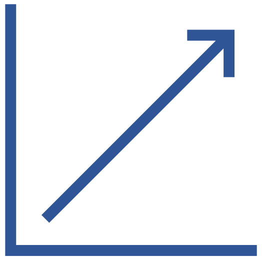
$x_0 = x(k)$ — *Feedback di stato*



Ad ogni istante di tempo k:

1. Si misura lo stato attuale del sistema x(k)
2. Si risolve un problema di minimizzazione per ottenere la sequenza ottima **u**={u(j), … , u(N-1)}
3. Si applica al sistema solo il primo elemento della sequenza ottenuta, $u(k)=u_0^*$

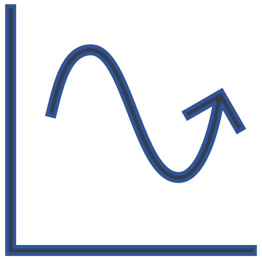
Modello matematico



Modello base **lineare**
(Abuin et. Al.)

La sensibilità all'insulina è considerata un **parametro fisso**

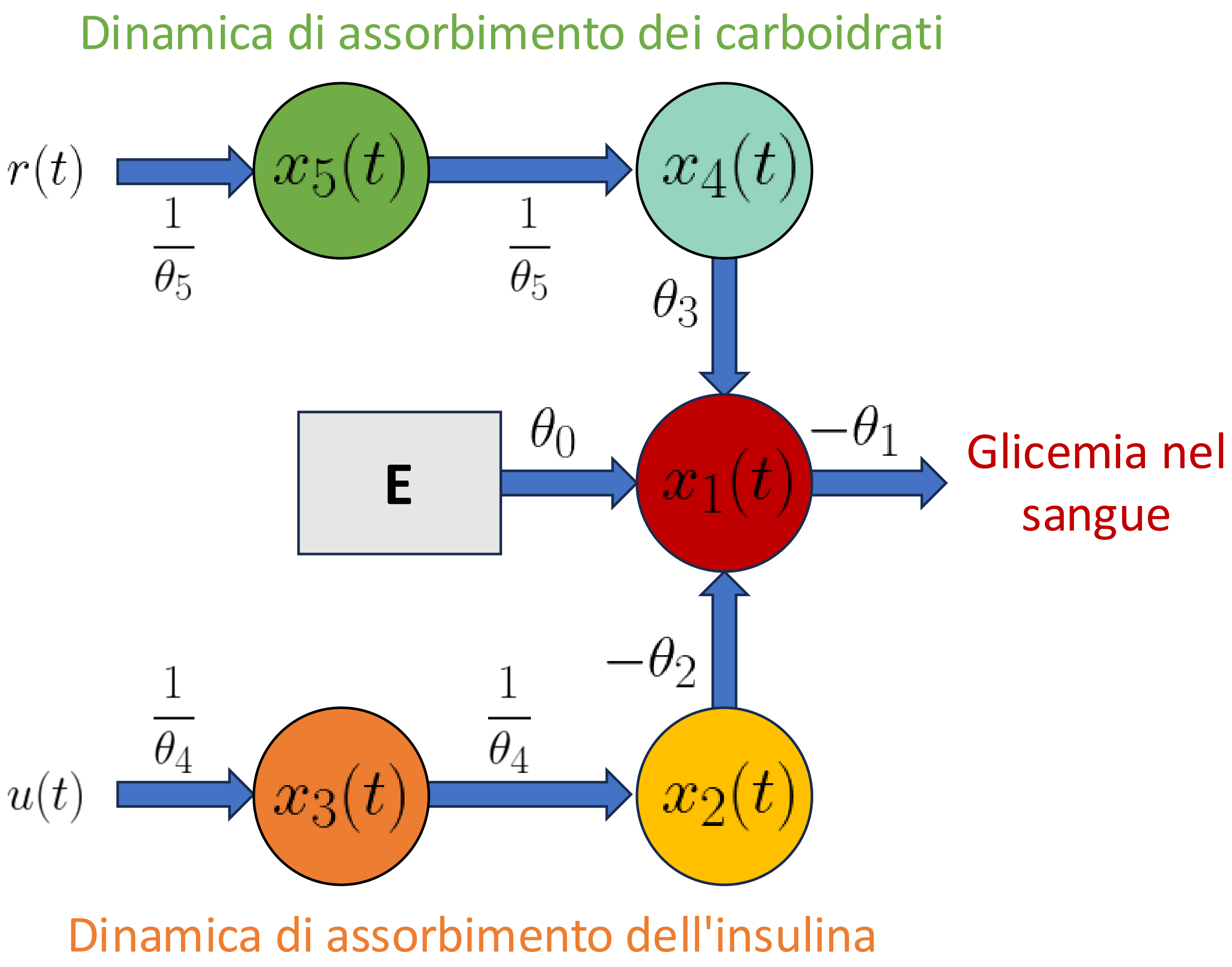
Estensione



Modello **non lineare**
(Licini et. Al.)

La sensibilità all'insulina è considerata un nuovo **stato variabile**

Modello AP lineare



$$\frac{dQ_g(t)}{dt} = -\frac{1}{\theta_5} Q_g(t) + \frac{1}{\theta_5} Q_{sto}(t)$$
$$\frac{dQ_{sto}(t)}{dt} = -\frac{1}{\theta_5} Q_{sto}(t) + \frac{1}{\theta_5} r(t)$$

$$\frac{dG(t)}{dt} = \theta_0 - \theta_1 G(t) - \theta_2 Q_i(t) + \theta_3 Q_g(t)$$

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = -\frac{1}{\theta_4} Q_i(t) + \frac{1}{\theta_4} Q_{isub}(t)$$
$$\frac{dQ_{isub}(t)}{dt} = -\frac{1}{\theta_4} Q_{isub}(t) + \frac{1}{\theta_4} u(t)$$

Modello AP non lineare

- **Estensione** del modello lineare

- Aggiungiamo un **nuovo stato** che descrive la variabilità della **sensibilità insulinica**

$$\boxed{\frac{dG(t)}{dt} = \theta_0 - \theta_1\, G(t) - S_I(t)\, Q_i(t) + \theta_2\, Q_g(t)}$$

Dinamica della glicemia

Modello AP non lineare

$$\boxed{\frac{dS_I(t)}{dt} = -\frac{1}{\theta_5} S_I(t) - \frac{\theta_1}{\theta_6} \Delta G(t) - \frac{1}{\theta_7} \Delta IOB(t) + \frac{1}{\theta_5} S_{I_{Tar}}(t)}$$

Dinamica della sensibilità insulinica

Modello AP non lineare

Deviazioni dal livello basale

$$\frac{dS_I(t)}{dt} = -\frac{1}{\theta_5} S_I(t) - \frac{\theta_1}{\theta_6} \boxed{\Delta G(t)} - \frac{1}{\theta_7} \boxed{\Delta IOB(t)} + \frac{1}{\theta_5} S_{I_{Tar}}(t)$$

Dinamica della sensibilità insulinica

Modello AP non lineare

Deviazioni dal livello basale

$$\frac{dS_I(t)}{dt} = -\frac{1}{\theta_5} S_I(t) - \frac{\theta_1}{\theta_6} \boxed{\Delta G(t)} - \frac{1}{\theta_7} \boxed{\Delta IOB(t)} + \frac{1}{\theta_5} \boxed{S_{I_{Tar}}(t)}$$

Dinamica della sensibilità insulinica

$$\boxed{S_{I_{Tar}}(t) = CF \cdot \left(1 + \theta_8 \cdot 10^{-2} \sin\left(\frac{2\pi\ t}{60 \cdot 24} - 2\pi\, \theta_9 \cdot 10^{-2}\right)\right)}$$

Modulazione circadiana

Identificazione dei parametri

Simulazione di **7 giorni**

10 pazienti in silico affetti da diabete di Tipo 1

4 giorni dedicati all'**addestramento**

3 giorni dedicati alla **validazione**

Identificazione dei parametri

$$GoF = 100\left(1 - \frac{\|y(k) - \hat{y}(k)\|}{\|y(k) - \bar{y}\|}\right)$$

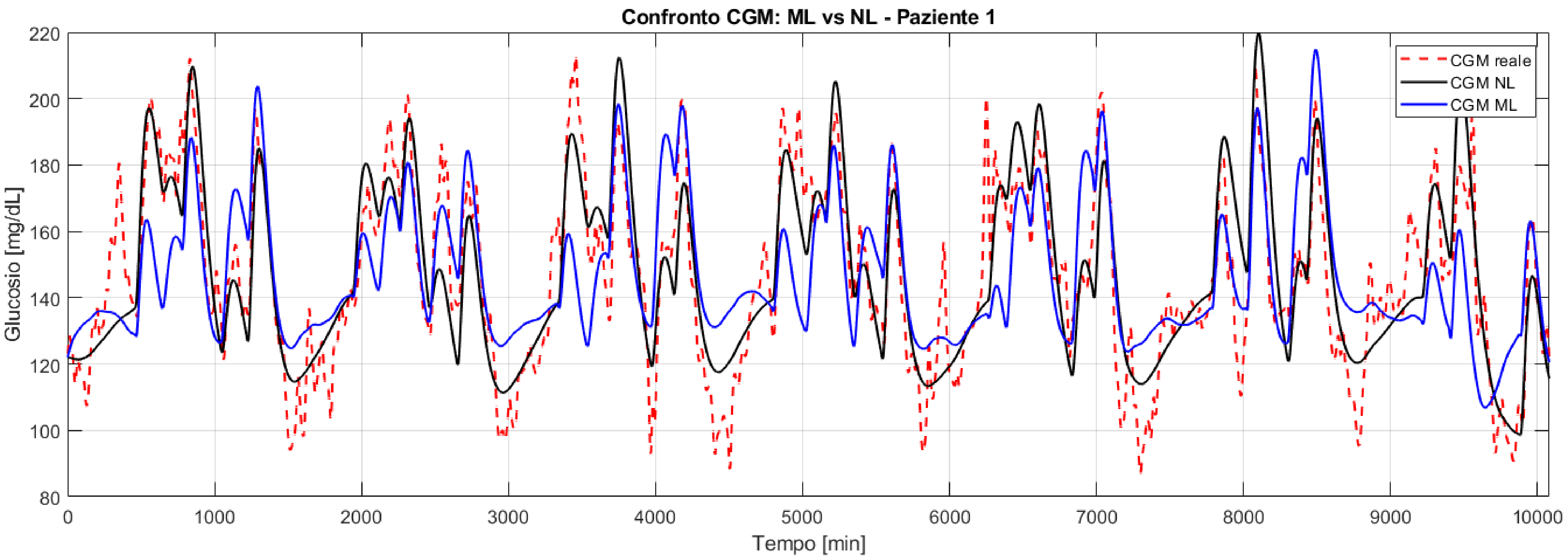
Modello lineare

- GoF addestramento
  34.70[26.42, 37.72]
- GoF validazione
  32.56[24.52, 37.88]
- GoF dataset indipendente
  25.29[16.63, 28.08]

Modello non lineare

- GoF addestramento
  55.97[52.16, 58.12]
- GoF validazione
  50.47[40.21, 55.07]
- GoF dataset indipendente
  39.10[35.07, 47.59]

Identificazione dei parametri



Formulazione problema MPC lineare

$$
\begin{aligned}
\min_{u,\, u_a,\, y_a,\, \delta_{hyper},\, \delta_{hypo}} \quad & V_N(\hat{x}, \hat{r}, \mathcal{Y}_s^{Tar}; \boldsymbol{u}, u_a, y_a, \delta_{hyper}, \delta_{hypo}) \\
& = V_{dyn}(\hat{x}, \hat{r}; \boldsymbol{u}, u_a, y_a) + V_s(\mathcal{Y}_s^{Tar}; \delta_{hyper}, \delta_{hypo}) \\
\text{s.t.} \quad & x(0) = \hat{x}, \quad r(0) = \hat{r} \\
& x(j+1) = A^d\, x(j) + B_u^d\, u(j) + B_r^d\, r(j) + E^d && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& u(j) \in \mathcal{U} && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& \tilde{C}\, x(j) \in \tilde{C}\mathcal{X}(k) && j \in \mathbb{I}_{[1,N]} \\
& r(j) = 0 && j \in \mathbb{I}_{[1,N-1]} \\
& \tilde{C}\, x(N) = x_a \\
& y_a = x_{1,a} \\
& x_a = \tilde{A}_d\, x_a + \tilde{B}_d\, u_a + \tilde{E}_d \\
& y_s^{min} - \delta_{hypo} \leq y_a \leq y_s^{max} + \delta_{hyper} \\
& \delta_{hypo} \geq 0, \quad \delta_{hyper} \geq 0
\end{aligned}
$$

Formulazione problema MPC lineare

Funzionale di costo

$$
\begin{aligned}
\min_{u, u_a, y_a, \delta_{hyper}, \delta_{hypo}} \quad & \boxed{\begin{aligned} & V_N(\hat{x}, \hat{r}, \mathcal{Y}_s^{Tar}; \boldsymbol{u}, u_a, y_a, \delta_{hyper}, \delta_{hypo}) \\ & = V_{dyn}(\hat{x}, \hat{r}; \boldsymbol{u}, u_a, y_a) + V_s(\mathcal{Y}_s^{Tar}; \delta_{hyper}, \delta_{hypo}) \end{aligned}} \\
\text{s.t.} \quad & x(0) = \hat{x}, \quad r(0) = \hat{r} \\
& x(j+1) = A^d x(j) + B_u^d u(j) + B_r^d r(j) + E^d && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& u(j) \in \mathcal{U} && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& \tilde{C} x(j) \in \tilde{C} \mathcal{X}(k) && j \in \mathbb{I}_{[1,N]} \\
& r(j) = 0 && j \in \mathbb{I}_{[1,N-1]} \\
& \tilde{C} x(N) = x_a \\
& y_a = x_{1,a} \\
& x_a = \tilde{A}_d x_a + \tilde{B}_d u_a + \tilde{E}_d \\
& y_s^{min} - \delta_{hypo} \leq y_a \leq y_s^{max} + \delta_{hyper} \\
& \delta_{hypo} \geq 0, \quad \delta_{hyper} \geq 0
\end{aligned}
$$

Formulazione problema MPC lineare

$$\min_{u, u_a, y_a, \delta_{hyper}, \delta_{hypo}} \quad V_N(\hat{x}, \hat{r}, \mathcal{Y}_s^{Tar}; \boldsymbol{u}, u_a, y_a, \delta_{hyper}, \delta_{hypo})$$

$$= V_{dyn}(\hat{x}, \hat{r}; \boldsymbol{u}, u_a, y_a) + V_s(\mathcal{Y}_s^{Tar}; \delta_{hyper}, \delta_{hypo})$$

$$\begin{aligned}
\text{s.t.} \quad & \boxed{x(0) = \hat{x}, \quad r(0) = \hat{r}} \\
& x(j+1) = A^d\, x(j) + B_u^d\, u(j) + B_r^d\, r(j) + E^d && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& u(j) \in \mathcal{U} && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& \tilde{C}\, x(j) \in \tilde{C}\, \mathcal{X}(k) && j \in \mathbb{I}_{[1,N]} \\
& \boxed{r(j) = 0} && j \in \mathbb{I}_{[1,N-1]} \\
& \tilde{C}\, x(N) = x_a \\
& y_a = x_{1,a} \\
& x_a = \tilde{A}_d\, x_a + \tilde{B}_d\, u_a + \tilde{E}_d \\
& y_s^{min} - \delta_{hypo} \le y_a \le y_s^{max} + \delta_{hyper} \\
& \delta_{hypo} \ge 0, \quad \delta_{hyper} \ge 0
\end{aligned}$$

Condizioni iniziali e pasti

Formulazione problema MPC lineare

$$
\begin{aligned}
\min_{u,u_a,y_a,\delta_{hyper},\delta_{hypo}} \quad & V_N(\hat{x},\hat{r},\mathcal{Y}_s^{Tar};\boldsymbol{u},u_a,y_a,\delta_{hyper},\delta_{hypo}) \\
& = V_{dyn}(\hat{x},\hat{r};\boldsymbol{u},u_a,y_a) + V_s(\mathcal{Y}_s^{Tar};\delta_{hyper},\delta_{hypo}) \\
\text{s.t.} \quad & x(0)=\hat{x}, \quad r(0)=\hat{r} \\
& \boxed{x(j+1) = A^d x(j) + B_u^d u(j) + B_r^d r(j) + E^d} && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& u(j) \in \mathcal{U} && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& \tilde{C}\,x(j) \in \tilde{C}\mathcal{X}(k) && j \in \mathbb{I}_{[1,N]} \\
& r(j) = 0 && j \in \mathbb{I}_{[1,N-1]} \\
& \tilde{C}\,x(N) = x_a \\
& y_a = x_{1,a} \\
& x_a = \tilde{A}_d\,x_a + \tilde{B}_d\,u_a + \tilde{E}_d \\
& y_s^{min} - \delta_{hypo} \le y_a \le y_s^{max} + \delta_{hyper} \\
& \delta_{hypo} \ge 0, \quad \delta_{hyper} \ge 0
\end{aligned}
$$

Modello matematico

Vincoli su stati e ingressi

Formulazione problema MPC lineare

$$
\begin{aligned}
\min_{u,\,u_a,\,y_a,\,\delta_{hyper},\,\delta_{hypo}} \quad & V_N(\hat{x},\hat{r},\mathcal{Y}_s^{Tar};\boldsymbol{u},u_a,y_a,\delta_{hyper},\delta_{hypo}) \\
& = V_{dyn}(\hat{x},\hat{r};\boldsymbol{u},u_a,y_a) + V_s(\mathcal{Y}_s^{Tar};\delta_{hyper},\delta_{hypo}) \\
\text{s.t.} \quad & x(0)=\hat{x}, \quad r(0)=\hat{r} \\
& x(j+1) = A^d\,x(j) + B_u^d\,u(j) + B_r^d\,r(j) + E^d && j\in\mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& u(j)\in\mathcal{U} && j\in\mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& \tilde{C}\,x(j)\in\tilde{C}\mathcal{X}(k) && j\in\mathbb{I}_{[1,N]} \\
& r(j)=0 && j\in\mathbb{I}_{[1,N-1]} \\
& \boxed{\begin{aligned} &\tilde{C}\,x(N)=x_a \\ &y_a = x_{1,a} \\ &x_a = \tilde{A}_d\,x_a + \tilde{B}_d\,u_a + \tilde{E}_d \end{aligned}} \\
& y_s^{min} - \delta_{hypo} \le y_a \le y_s^{max} + \delta_{hyper} \\
& \delta_{hypo}\ge 0, \quad \delta_{hyper}\ge 0
\end{aligned}
$$

Equilibrio/Stato finale

Formulazione problema MPC lineare

Costo terminale

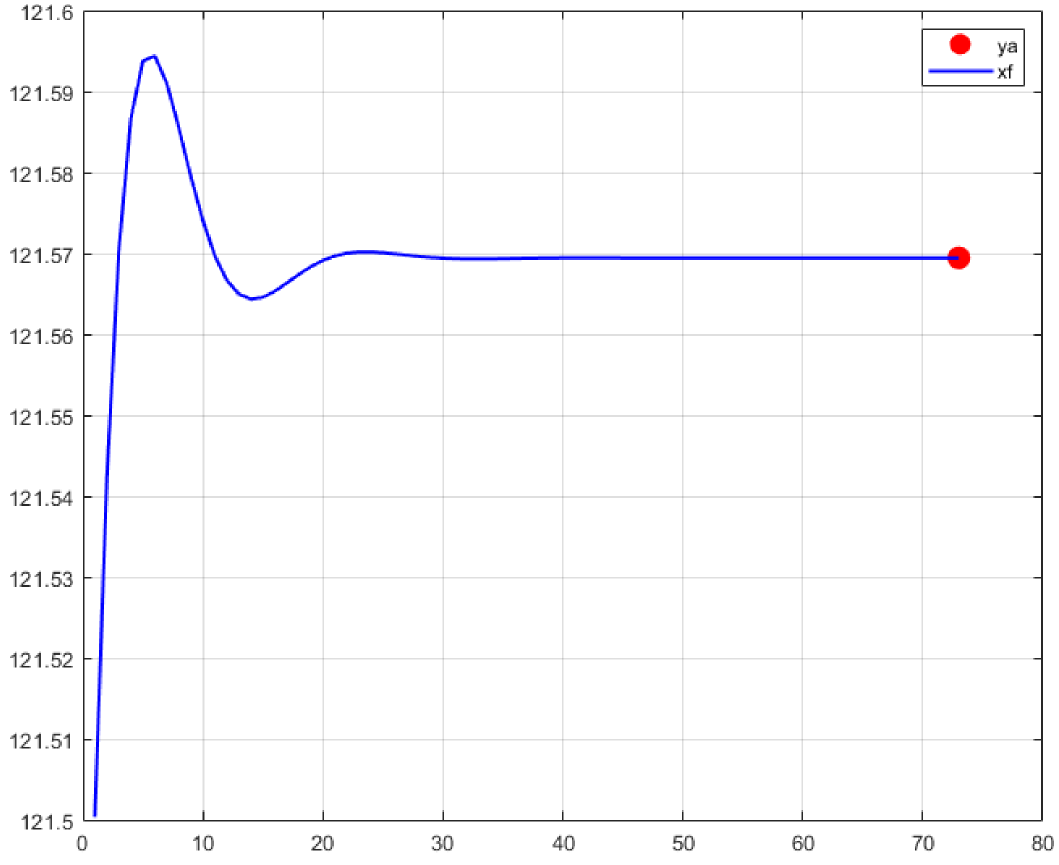
$$\min_{u,\, u_a,\, y_a,\, \delta_{hyper},\, \delta_{hypo}} \quad V_N(\hat{x}, \hat{r}, \mathcal{Y}_s^{Tar}; \boldsymbol{u}, u_a, y_a, \delta_{hyper}, \delta_{hypo})$$

$$= V_{dyn}(\hat{x}, \hat{r}; \boldsymbol{u}, u_a, y_a) + \boxed{V_s(\mathcal{Y}_s^{Tar}; \delta_{hyper}, \delta_{hypo})}$$

$$\begin{aligned}
\text{s.t.} \quad & x(0) = \hat{x}, \quad r(0) = \hat{r} \\
& x(j+1) = A^d\, x(j) + B_u^d\, u(j) + B_r^d\, r(j) + E^d && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& u(j) \in \mathcal{U} && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& \tilde{C}\, x(j) \in \tilde{C}\mathcal{X}(k) && j \in \mathbb{I}_{[1,N]} \\
& r(j) = 0 && j \in \mathbb{I}_{[1,N-1]} \\
& \tilde{C}\, x(N) = x_a \\
& y_a = x_{1,a} \\
& x_a = \tilde{A}_d\, x_a + \tilde{B}_d\, u_a + \tilde{E}_d \\
& \boxed{\begin{array}{l} y_s^{min} - \delta_{hypo} \leq y_a \leq y_s^{max} + \delta_{hyper} \\ \delta_{hypo} \geq 0, \quad \delta_{hyper} \geq 0 \end{array}}
\end{aligned}$$

Variabili Slack

Formulazione problema MPC lineare



$$\boxed{V_{\text{dyn}} = \sum_{j=0}^{N-1} \left(\|C\, x(j) - y_a\|_Q^2 + \|u(j) - u_a\|_R^2 \right)}$$

Costo dinamico

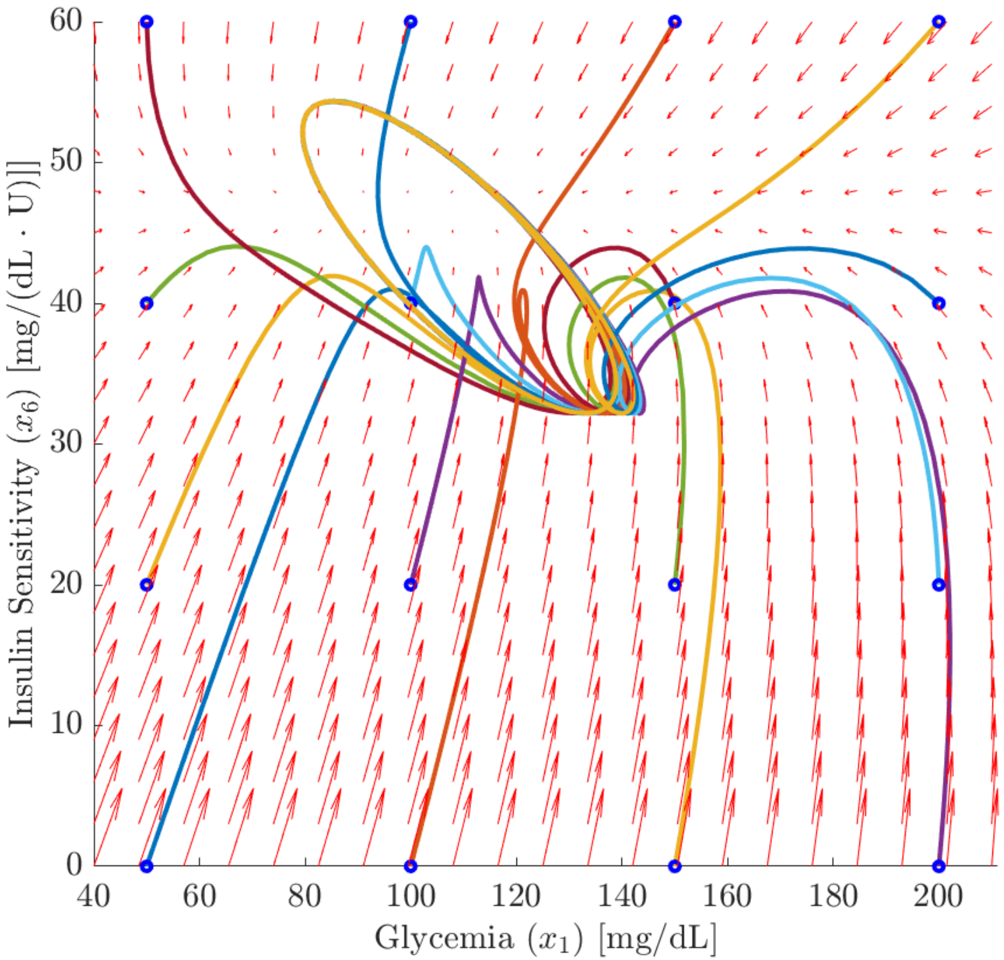
$$\boxed{\begin{array}{c} V_s = \hat{p}\,\delta_{hyper}^2 + \check{p}\,\delta_{hypo}^2 \\[1em] y_s^{min} - \delta_{hypo} \leq y_a \leq y_s^{max} + \delta_{hyper} \end{array}}$$

Costo terminale

$$\boxed{(y_a, u_a)}$$

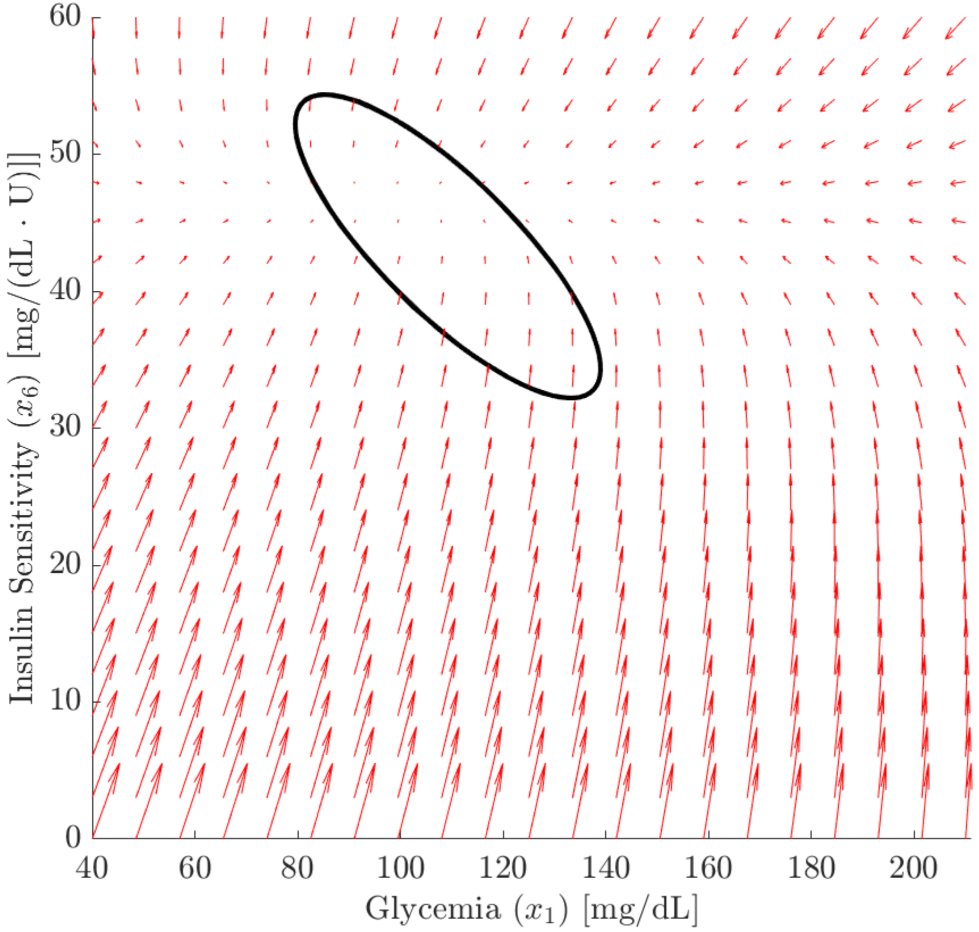
Equilibrio artificiale

Ipotesi di equilibrio nel modello non lineare



- La **variabilità circadiana** non permette di ottenere un **singolo punto di equilibrio**
- In **condizioni basali** l'equilibrio del sistema è rappresentato da una **traiettoria periodica**

Ipotesi di equilibrio nel modello non lineare



La **traiettoria periodica di equilibrio** si può ottenere considerando:

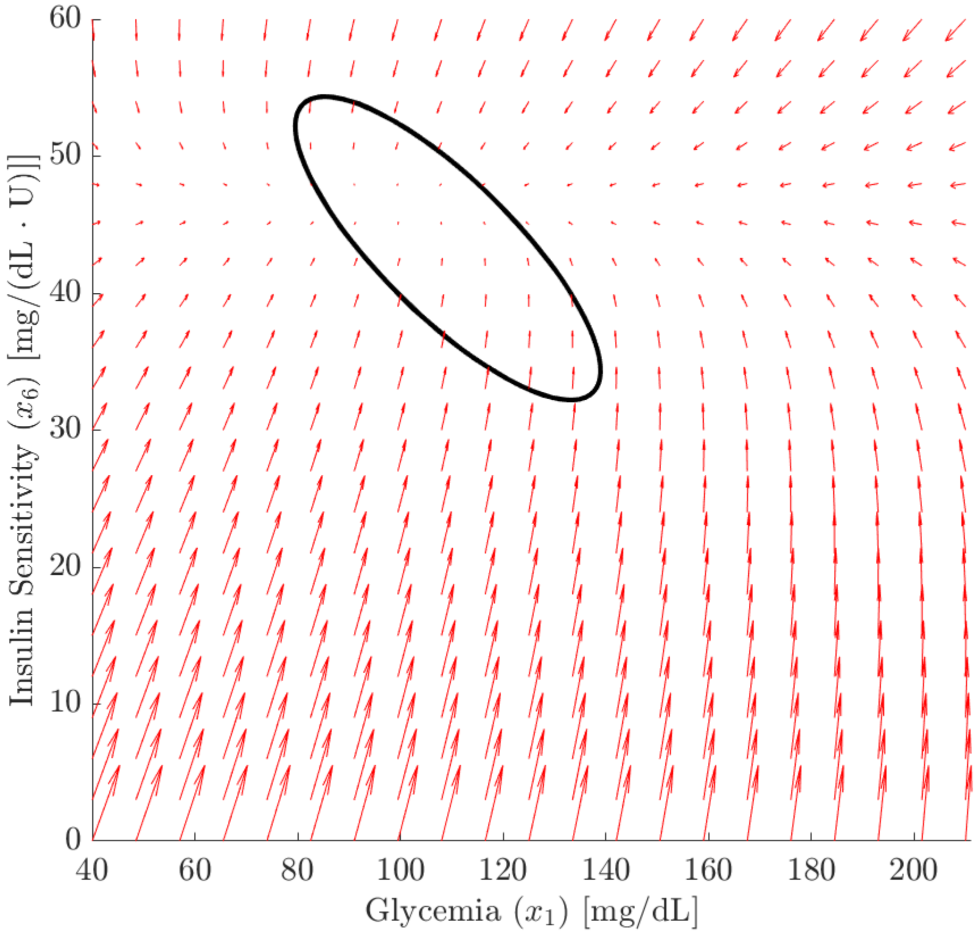
Un valore di riferimento basale della **glicemia** costante

Insulina basale periodica

Un valore di riferimento basale dell'**insulina** costante

Glicemia basale periodica

Ipotesi di equilibrio nel modello non lineare



La **traiettoria periodica di equilibrio** si può ottenere considerando:

Un valore di riferimento basale della **glicemia** costante

Insulina basale periodica

Un valore di riferimento basale dell'**insulina** costante

Glicemia basale periodica

Formulazione problema MPC non lineare

$$\min_{u,\, u_a,\, x_a} \; V_N(\hat{x}, \hat{r}, \boldsymbol{G_b^{ref}}, k; \boldsymbol{u}, \boldsymbol{u_a}, \boldsymbol{x_a})$$

$$= V_{dyn}(\hat{x}, \hat{r}; \boldsymbol{u}, \boldsymbol{u_a}, \boldsymbol{x_a}) + V_{traj}(G_b^{ref}, k; \boldsymbol{u_a}, \boldsymbol{x_a})$$

$$\begin{aligned}
\text{s.t.} \quad & x(0) = \hat{x}, \quad r(0) = \hat{r} \\
& x(j+1) = F(x(j),\, u(j),\, r(j),\, S_{I_{Tar}}(j),\, k+j) && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& u(j) \in \mathcal{U}, \quad x(j) \in \mathcal{X}(k+j) && j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\
& x(N) = x_a(N) \\
& x_a(j+1) = F(x_a(j), u_a(j), 0, S_{I_{Tar}}(j), k+j) && j \in \mathbb{I}_{[0,T-1]} \\
& u_a(j) \in \mathcal{U}, \quad x_a(j) \in \mathcal{X}(k+j) && j \in \mathbb{I}_{[0,T-1]} \\
& x_a(0) = F(x_a(T-1), u_a(T-1), 0, S_{I_{Tar}}(T-1))
\end{aligned}$$

Formulazione problema MPC non lineare

$$\min_{u,\, u_a,\, x_a} \; V_N(\hat{x}, \hat{r}, \boldsymbol{G_b^{ref}}, k; \boldsymbol{u}, \boldsymbol{u_a}, \boldsymbol{x_a})$$

$$= V_{dyn}(\hat{x}, \hat{r}; \boldsymbol{u}, \boldsymbol{u_a}, \boldsymbol{x_a}) + V_{traj}(G_b^{ref}, k; \boldsymbol{u_a}, \boldsymbol{x_a})$$

$$\text{s.t.} \quad x(0) = \hat{x}, \quad r(0) = \hat{r}$$

$$\boxed{\begin{aligned} & x(j+1) = F(x(j),\, u(j),\, r(j),\, S_{I_{Tar}}(j),\, k+j) \\ & u(j) \in \mathcal{U}, \quad x(j) \in \mathcal{X}(k+j) \end{aligned}} \qquad \begin{aligned} & j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \\ & j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]} \end{aligned}$$

Modello di predizione e vincoli

$$x(N) = x_a(N)$$

$$\boxed{\begin{aligned} & x_a(j+1) = F(x_a(j), u_a(j), 0, S_{I_{Tar}}(j), k+j) \\ & u_a(j) \in \mathcal{U}, \quad x_a(j) \in \mathcal{X}(k+j) \end{aligned}} \qquad \begin{aligned} & j \in \mathbb{I}_{[0,T-1]} \\ & j \in \mathbb{I}_{[0,T-1]} \end{aligned}$$

$$x_a(0) = F(x_a(T-1), u_a(T-1), 0, S_{I_{Tar}}(T-1))$$

Traiettoria di equilibrio artificiale e vincoli

Formulazione problema MPC non lineare

$$\min_{u,\,u_a,\,x_a} \; V_N(\hat{x}, \hat{r}, \boldsymbol{G_b^{ref}}, k; \boldsymbol{u}, \boldsymbol{u_a}, \boldsymbol{x_a})$$

$$= V_{dyn}(\hat{x}, \hat{r}; \boldsymbol{u}, \boldsymbol{u_a}, \boldsymbol{x_a}) + V_{traj}(G_b^{ref}, k; \boldsymbol{u_a}, \boldsymbol{x_a})$$

$$\text{s.t.} \quad x(0) = \hat{x}, \quad r(0) = \hat{r}$$

$$x(j+1) = F(x(j),\, u(j),\, r(j),\, S_{I_{Tar}}(j),\, k+j) \qquad j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]}$$

$$u(j) \in \mathcal{U}, \quad x(j) \in \mathcal{X}(k+j) \qquad j \in \mathbb{I}_{[0,N-1]}$$

$$\boxed{x(N) = x_a(N)}$$

Vincolo di convergenza

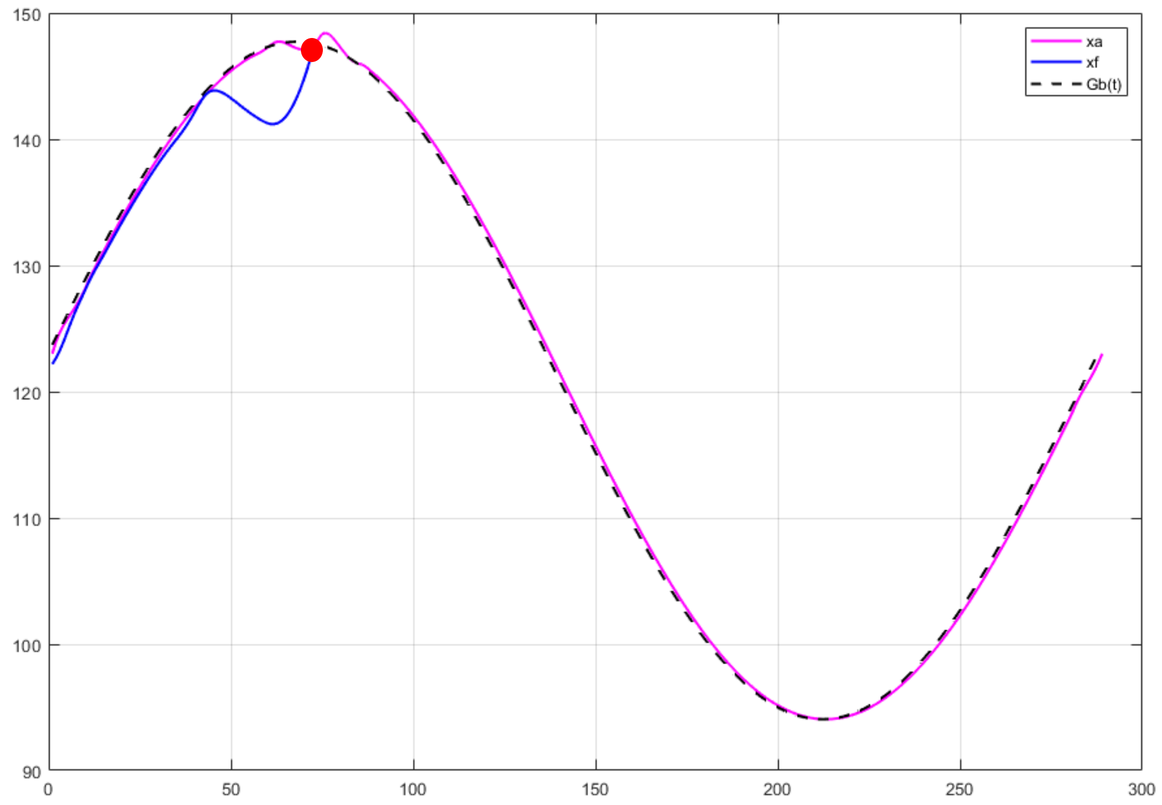
$$x_a(j+1) = F(x_a(j), u_a(j), 0, S_{I_{Tar}}(j), k+j) \qquad j \in \mathbb{I}_{[0,T-1]}$$

$$u_a(j) \in \mathcal{U}, \quad x_a(j) \in \mathcal{X}(k+j) \qquad j \in \mathbb{I}_{[0,T-1]}$$

$$\boxed{x_a(0) = F(x_a(T-1), u_a(T-1), 0, S_{I_{Tar}}(T-1))}$$

Vincolo di periodicità

Formulazione problema MPC non lineare



$$V_{\text{dyn}} = \sum_{j=0}^{N-1} \left(\|x_1(j) - x_{1,a}(j)\|_Q^2 + \|u(j) - u_a(j)\|_R^2 \right)$$

Costo dinamico

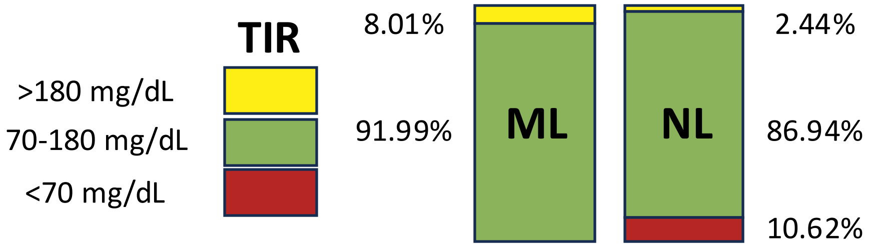
$$V_{\text{traj}} = \sum_{j=0}^{T-1} \left(\|x_{1,a}(j) - G_b^{ref}(k+j)\|_S^2 \right)$$

Costo di traiettoria

Outline

- Introduzione
- Problema analizzato
- Soluzione proposta
- **Risultati**
- Conclusioni

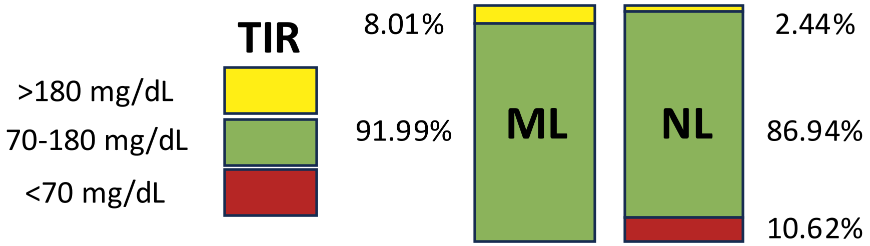
Simulazione modelli

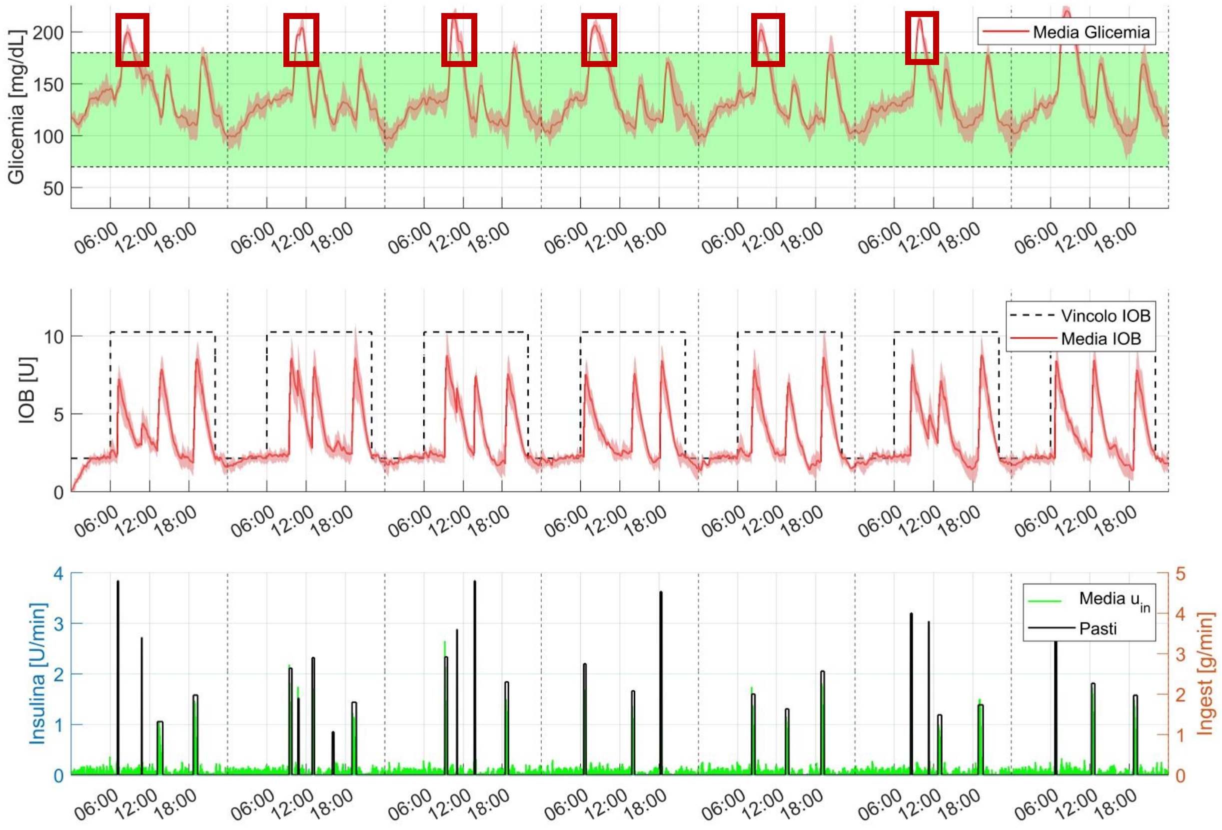


Modello lineare

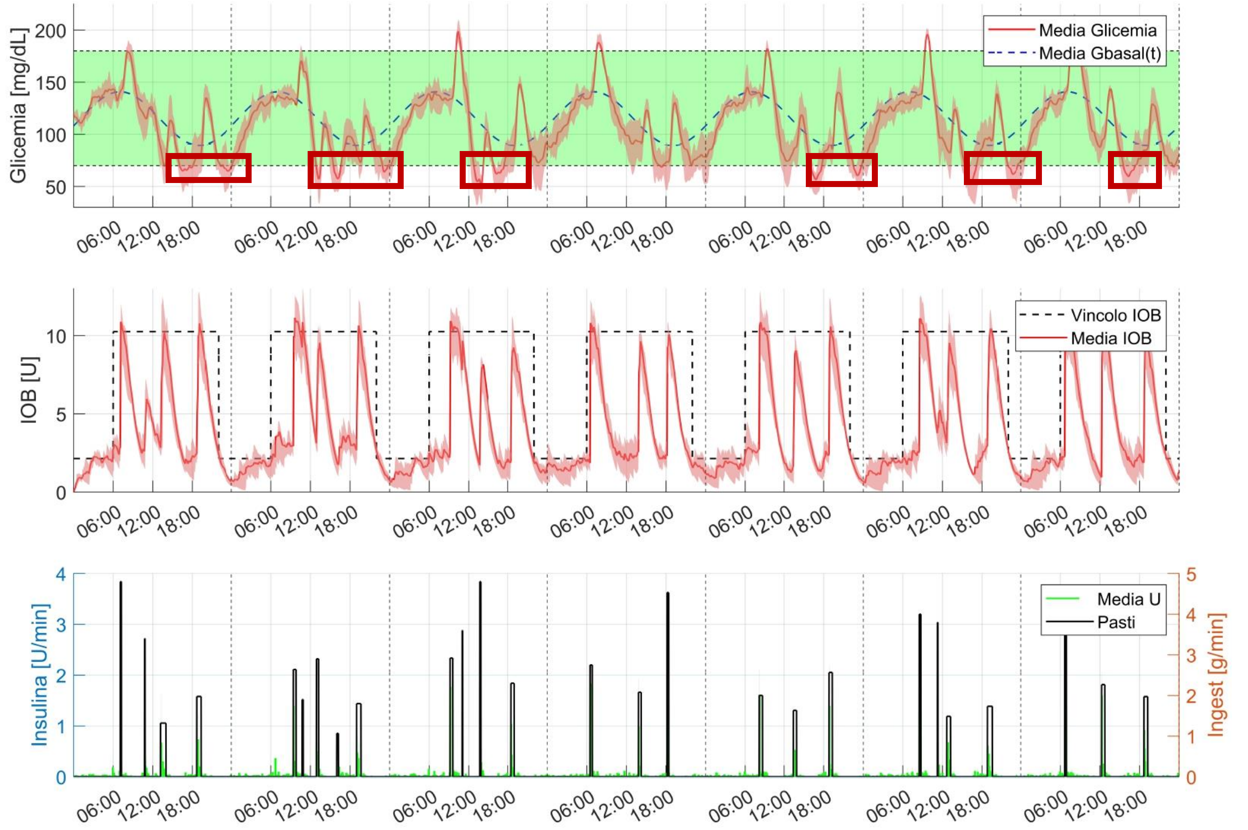
Modello non lineare

Simulazione modelli



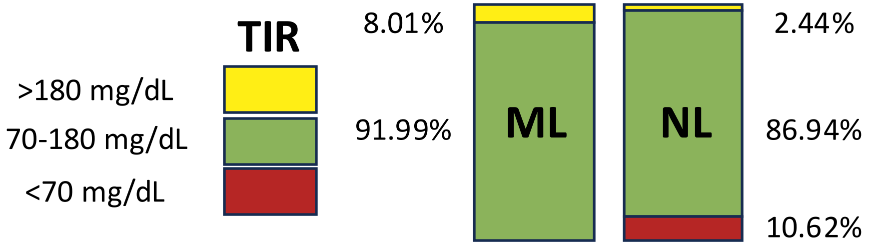


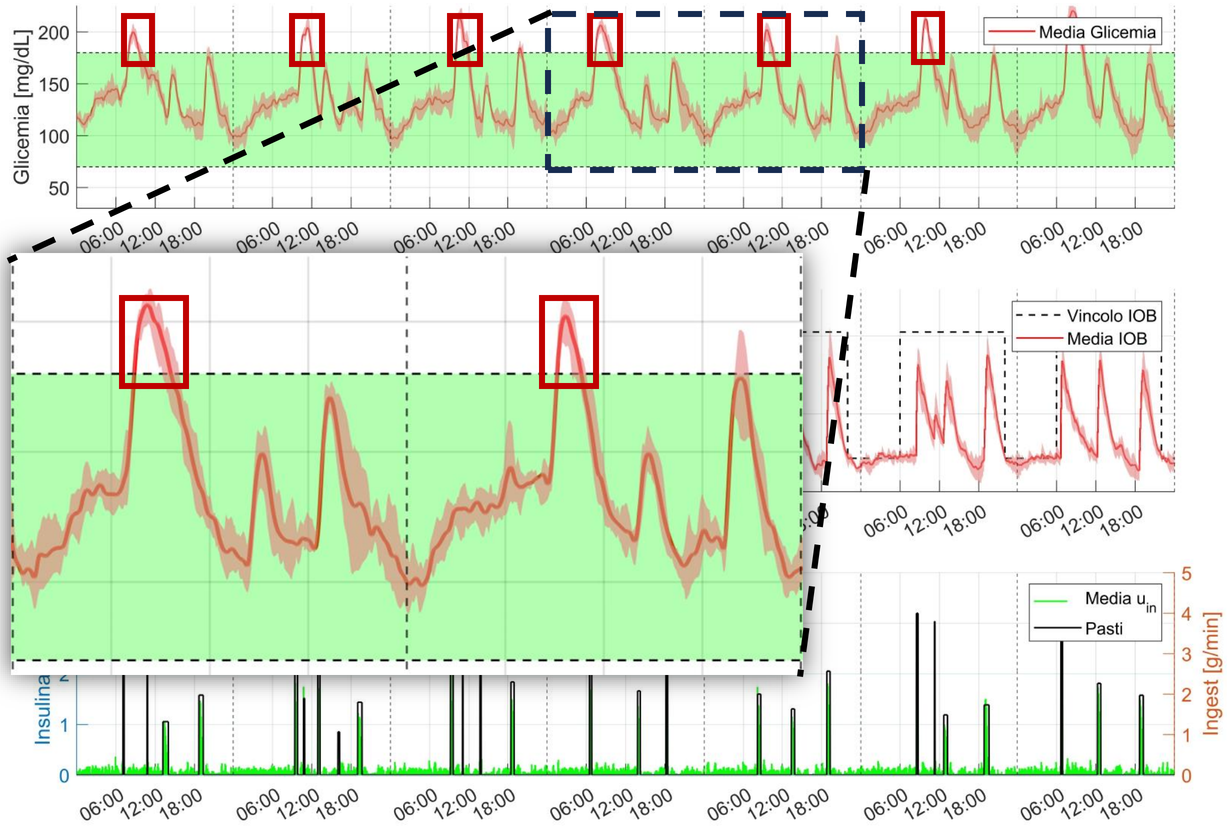
Modello lineare

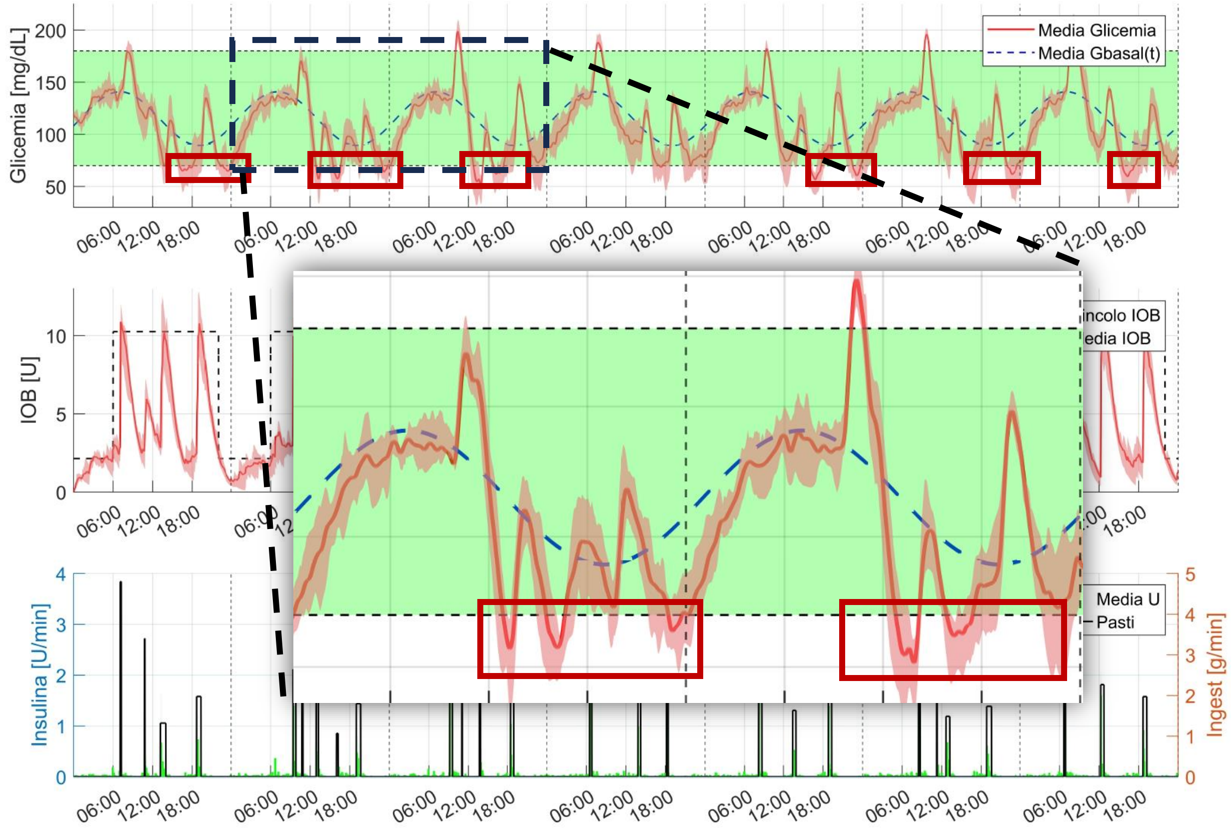


Modello non lineare

Simulazione modelli

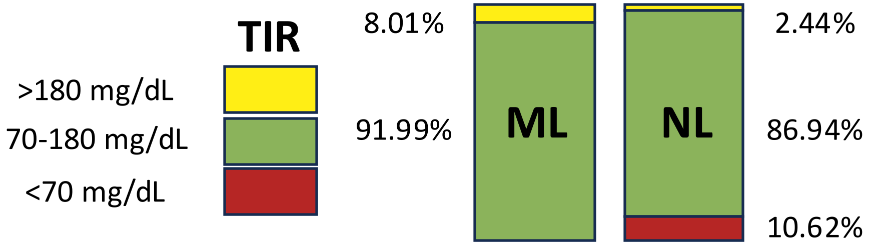


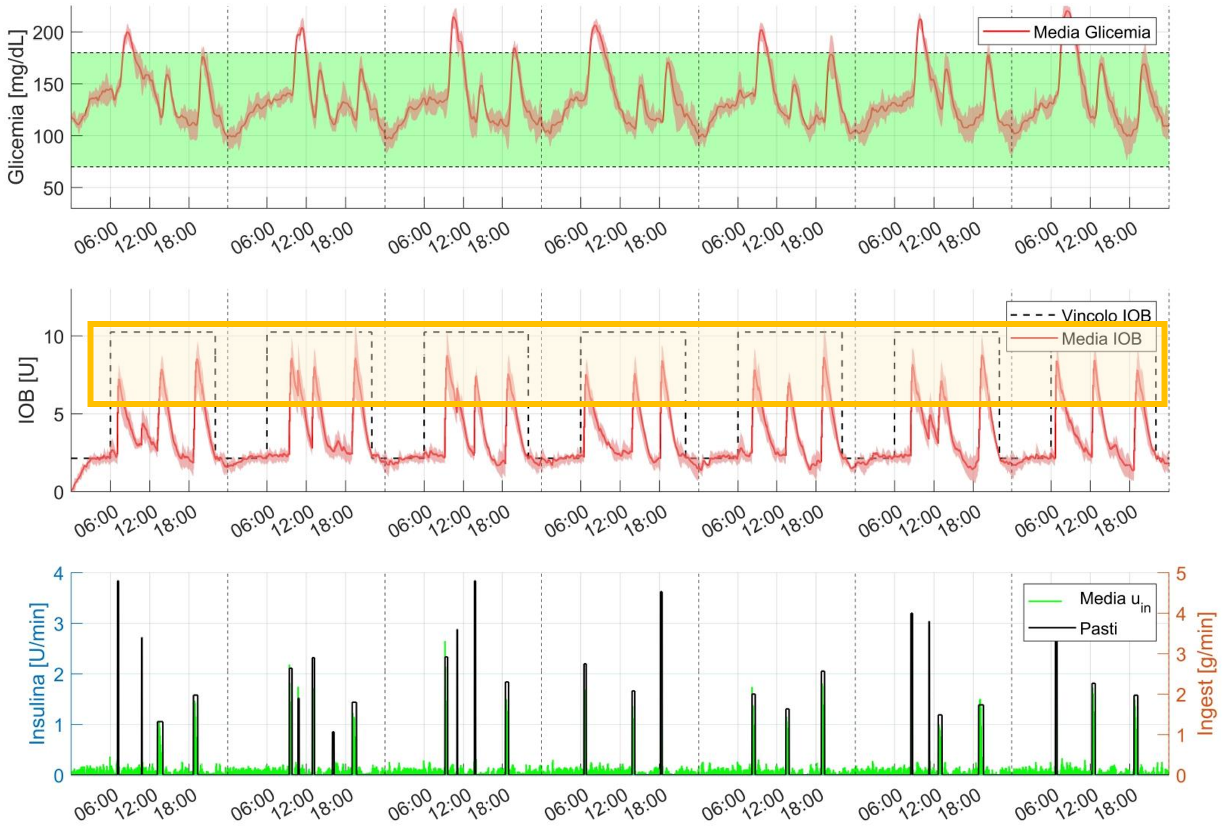




Modello lineare **Modello non lineare**

Simulazione modelli





Modello lineare

Modello non lineare

Outline

- Introduzione
- Problema analizzato
- Soluzione proposta
- Risultati
- **Conclusioni**

Conclusioni

L'**ipotesi** della **traiettoria periodica di equilibrio** fatta porta il controllo del sistema non lineare a presentare episodi **ipoglicemici**

Cambiare l'**ipotesi di equilibrio** nel modello non lineare potrebbe avere come conseguenza una **migliore gestione glicemica** per il paziente

Grazie per l'attenzione!