

# Giornata di studio sui Motori a Combustione Interna

“I gruppi di ricerca delle Università  
Italiane incontrano le imprese”

## Controllo Innovativo del Sistema di Raffreddamento

Caratterizzazione Numerico – sperimentale  
del sistema di Aspirazione  
di propulsori multivalvola innovativi

*[sergio.bova@unical.it](mailto:sergio.bova@unical.it)*





## Controllo Innovativo del Sistema di Raffreddamento

Caratterizzazione Numerico – sperimentale  
del sistema di Aspirazione  
di propulsori multivalvola innovativi

*[sergio.bova@unical.it](mailto:sergio.bova@unical.it)*

---

# Controllo Innovativo del Sistema di Raffreddamento



---

# Obiettivo

Sviluppo di un sistema di raffreddamento  
con pompa elettrica e basse portate di refrigerante  
(regime di ebollizione nucleata)



---

# Motivazioni

## Vantaggi :

- ✓ Controllo della portata di refrigerante indipendente dalla velocità di rotazione del motore;
- ✓ Massa refrigerante, ingombro radiatore, potenze pompa ridotti;
- ✓ Riscaldamento più veloce (riduzione dei consumi e delle emissioni di CO<sub>2</sub> )

# Motivazioni

## Vantaggi :

- ✓ Controllo della portata di refrigerante indipendente dalla velocità di rotazione del motore;
- ✓ Massa refrigerante, ingombro radiatore, potenze pompa ridotti;
- ✓ Riscaldamento più veloce (riduzione dei consumi e delle emissioni di CO<sub>2</sub> )

## Domanda:

Quanto e quando la portata può essere ridotta in sicurezza?



Una certa ebollizione è tollerata, un'ebollizione eccessiva deve essere evitata.

---

# Obiettivo specifico

Sviluppo di un metodo di controllo della portata.



# Modello di scambio termico

forced convection

nucleate boiling

$$q_w = h_{mac}(T_w - T_\infty) + h_{mic}(T_w - T_{sat})$$

(Chen, 1966)



# Modello di scambio termico

forced convection

nucleate boiling

$$q_w = h_{mac}(T_w - T_\infty) + h_{mic}(T_w - T_{sat})$$

(Chen, 1966)

$$q_w \geq q_{ONB} = h_{fc} \left( (\Delta T_{sat})_{ONB} + \Delta T_{sub} \right)$$

(Frost and Dzakowic, 1967)

Flusso termico “necessario”

# Modello di scambio termico

forced convection

nucleate boiling

$$q_w = h_{mac}(T_w - T_\infty) + h_{mic}(T_w - T_{sat})$$

(Chen, 1966)

$$q_w \geq q_{ONB} = h_{fc} \left( (\Delta T_{sat})_{ONB} + \Delta T_{sub} \right)$$

(Frost and Dzakowic, 1967)

Flusso termico "necessario"

  
*metrica*  

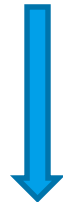

$$NB\_index = \frac{(q_w - q_{ONB})}{q_{ONB}}$$

$NB\_index \leq 0$ : convezione forzata  
 $NB\_index > 0$ : ebollizione nucleata  
 $NB\_index > \sim 1$ : ebollizione satura

# Modello di scambio termico

2 capacità termiche ( $C_w, C_c$ ); 2 variabili di stato ( $T_w, T_c$ )

$$\dot{Q}_g = c \cdot N^{n_1} \dot{m}_c^{n_2} (\dot{m}_f)^n$$



$$\dot{Q}_c = h_{mac} A (T_w - T_\infty) + h_{mic} A_{nb} (T_w - T_{sat})$$



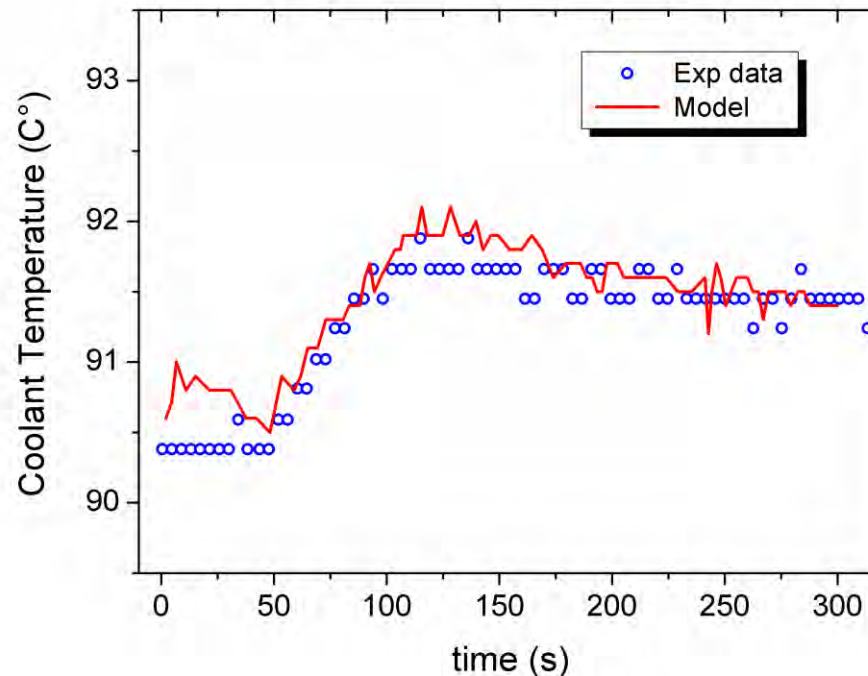
$$\left[ \begin{array}{l} \dot{T}_w C_w = \dot{Q}_g - \dot{Q}_c \\ \dot{T}_c C_c = \dot{Q}_c - \dot{Q}_r \end{array} \right.$$



$$\dot{Q}_r = \dot{m}_c c_p (T_{out} - T_{in})$$

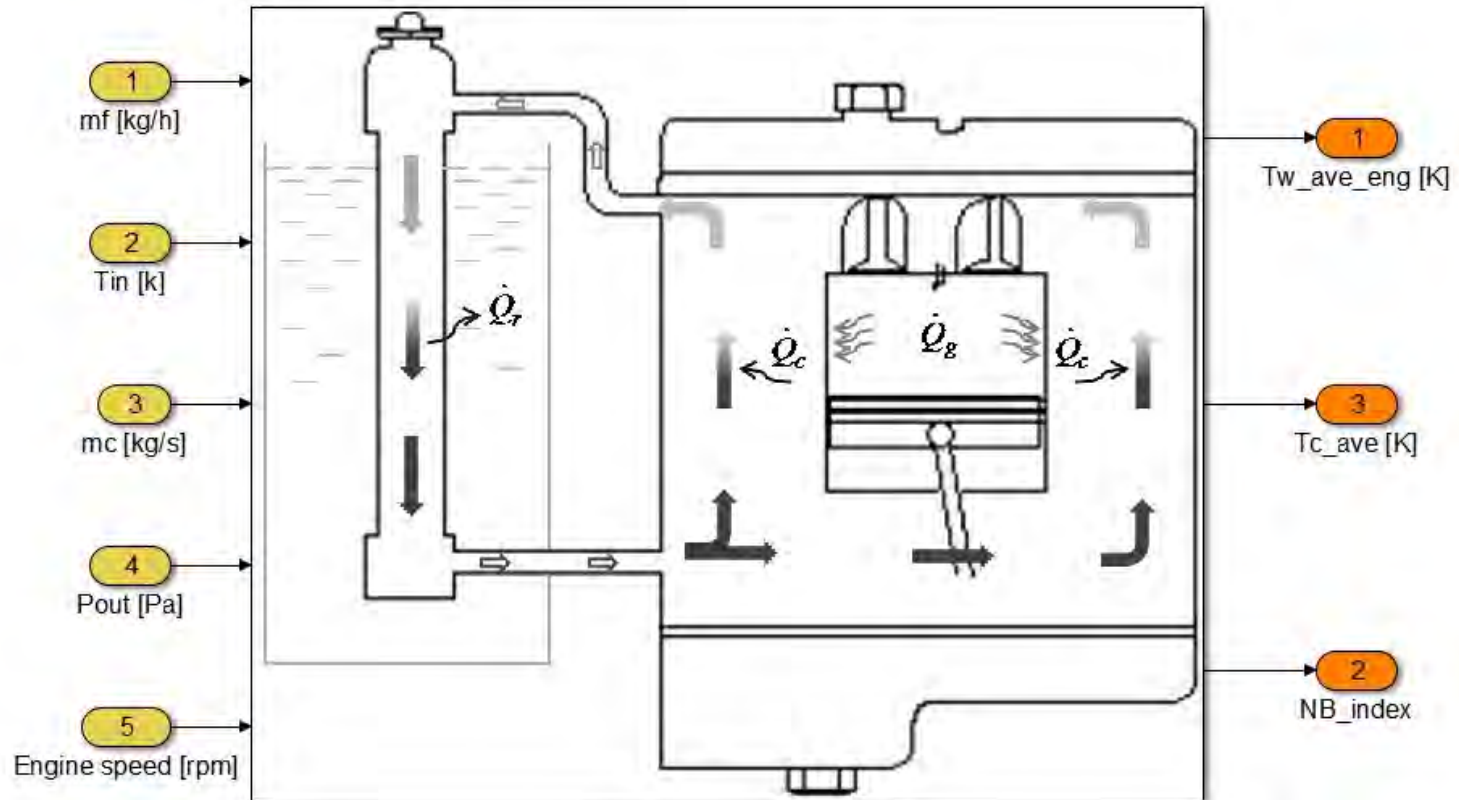
# Modello di scambio termico

Modello validato sia in condizioni stazionarie sia in transitorio



Bova et al. "A dynamic nucleate-boiling model for CO<sub>2</sub> reduction in internal combustion engines", *Applied Energy* 143 (2015) 271–282

# Modello di scambio termico



---

# Model Predictive Control (MPC)

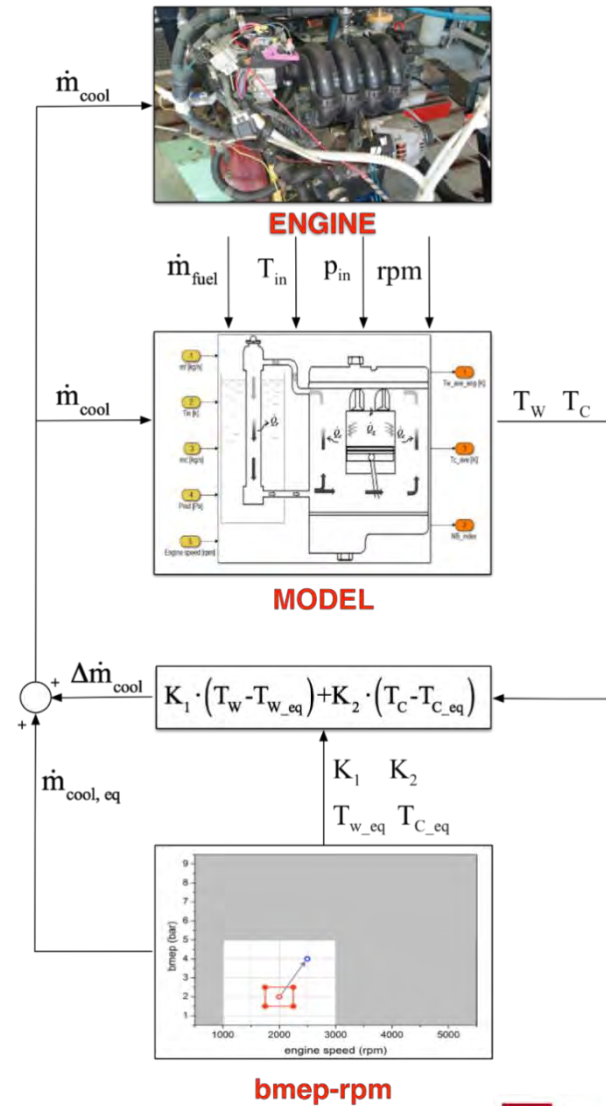


# Model Predictive Control (MPC)

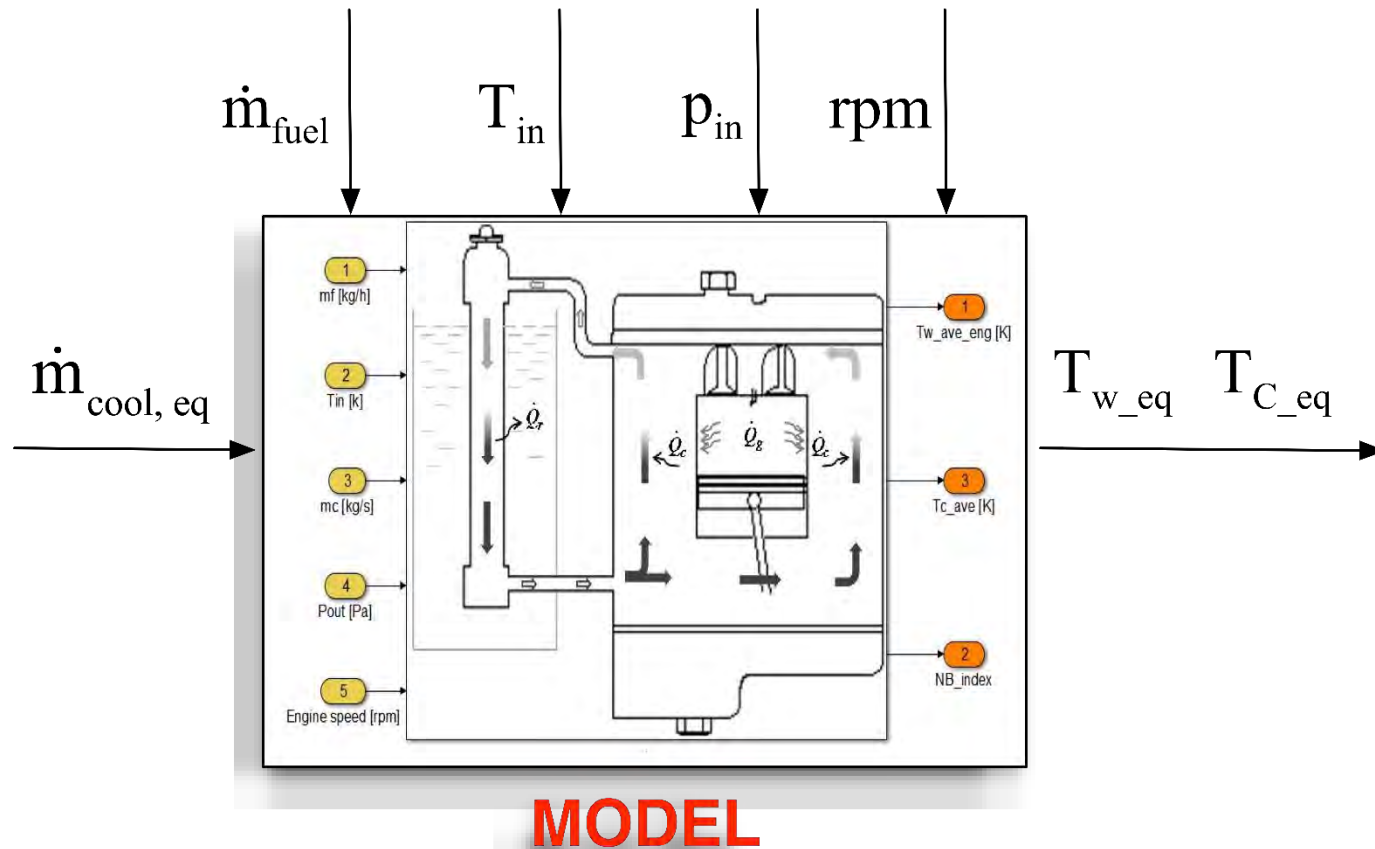
- *I sistemi PID non possono essere usati con sistemi MIMO*
- *MPC largamente adottato con sistemi MIMO a dinamica lenta*



# Model Predictive Control (MPC)



# Model Predictive Control (MPC)



# Model Predictive Control (MPC)

$T_c$  Temp refrigerante modello

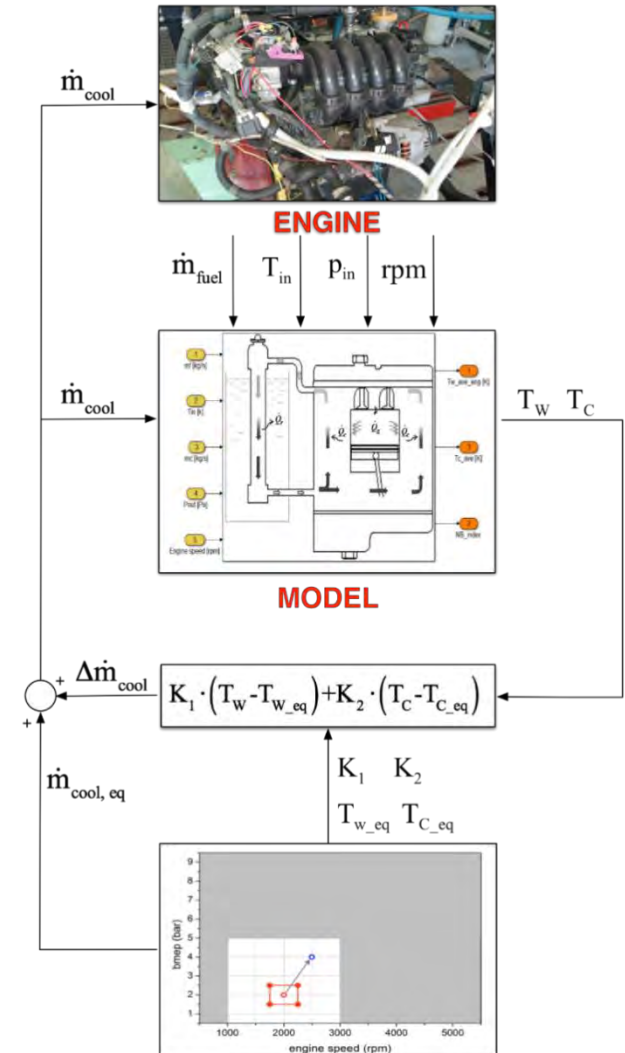
$T_w$  Temp parete modello

$T_{c\_eq}$  Temp di equilibrio (desiderata) refrig.

$T_{w\_eq}$  Temp di equilibrio (desiderata) parete

$$\Delta \dot{m}_c = K_1 (T_w - T_{w\_eq}) + K_2 (T_c - T_{c\_eq})$$

**$K_1$  e  $K_2$  ottenuti dalla soluzione di un problema di ottimizzazione vincolata min-max (Kothare et al., Automatica, 1996)**



hmen-rnm



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

# Model Predictive Control (MPC)

$T_c$  Temp refrig modello

$T_w$  Temp parete modello

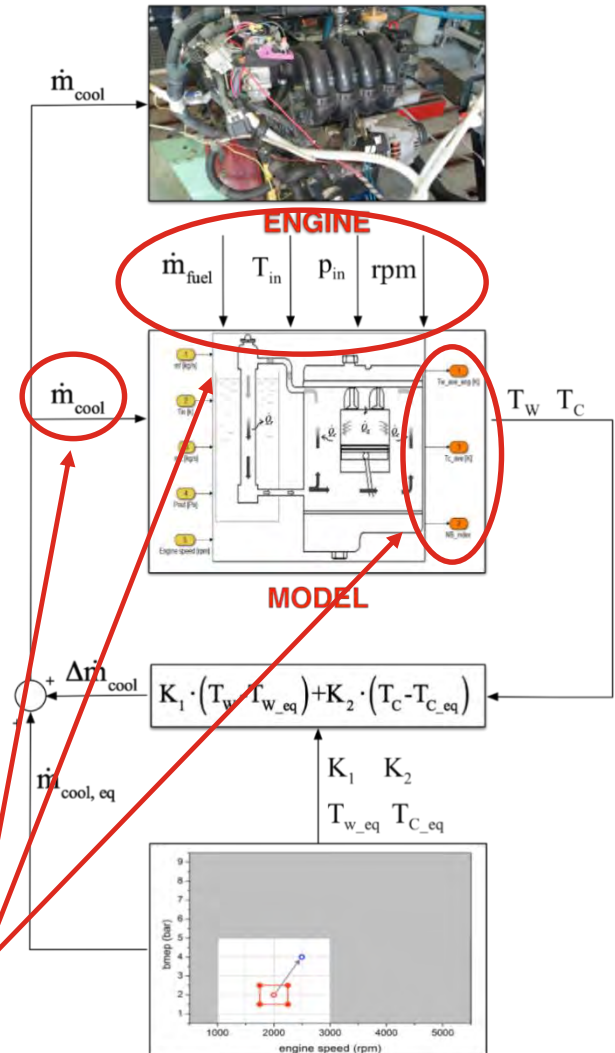
$T_{c\_eq}$  Temp di equilibrio (desiderata) refrig.

$T_{w\_eq}$  Temp di equilibrio (desiderata) parete

$$\Delta \dot{m}_c = K_1 (T_w - T_{w\_eq}) + K_2 (T_c - T_{c\_eq})$$

$K_1$  e  $K_2$  ottenuti dalla soluzione di un problema di ottimizzazione vincolata min-max (Kothare et al., Automatica, 1996)

vincoli



hmen-rnm



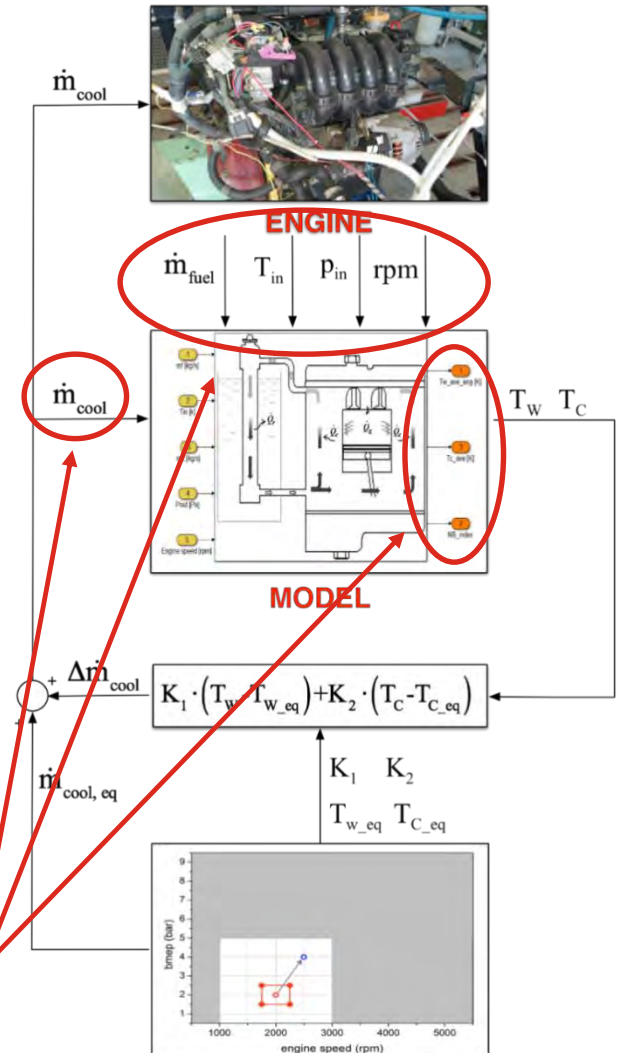
# Model Predictive Control (MPC)

*La procedura  
Può non avere soluzione !*

$$\Delta \dot{m}_c = K_1 (T_w - T_{w\_eq}) + K_2 (T_c - T_{c\_eq})$$

*K1 e K2 ottenuti dalla soluzione di un problema di ottimizzazione vincolata min-max (Kothare et al., Automatica, 1996)*

**vincoli**



hmen-rnm

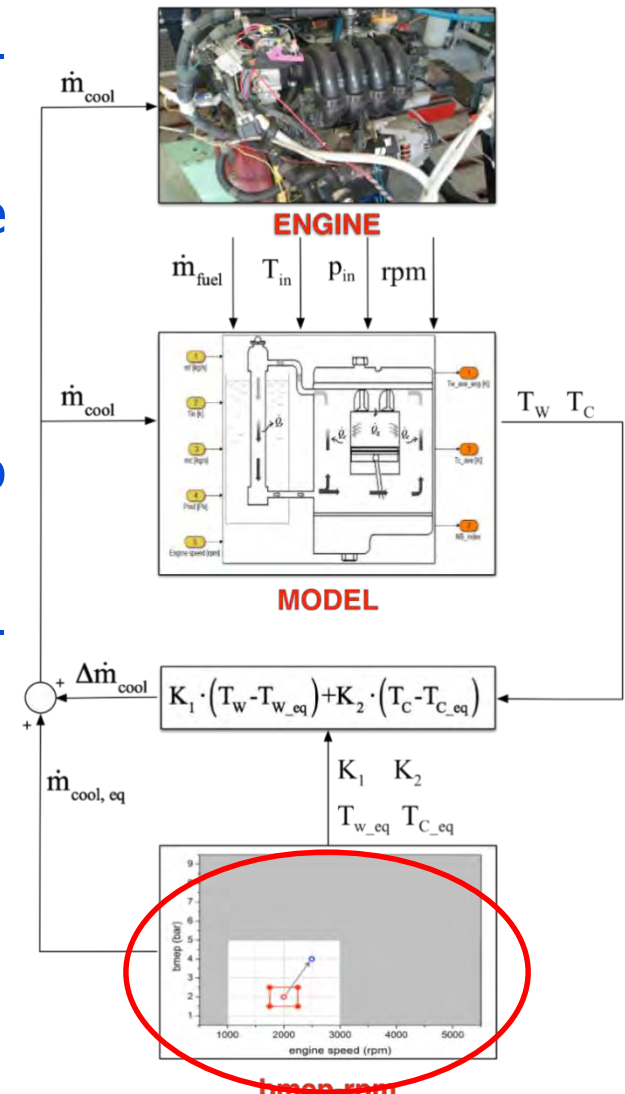


UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

# Model Predictive Control (MPC)

- Campo di funzionamento diviso in sotto-regioni ;
- Valori di  $K_1$ ,  $K_2$  calcolati per ogni regione off-line;
- Nessun calcolo gravoso necessario on-line;
- on-line  $K_1$ ,  $K_2$  e i valori di equilibrio prelevati da tabelle
- Stabilità e transizione dolce fra sotto-regioni garantita.

Wan, Z. and Kothare, M.,V., "Efficient scheduled stabilizing model predictive control for constrained nonlinear systems", *Int. J Robust Nonlinear Control*, 2003; 13:331-346



# Model Predictive Control (MPC)

## Strategia di controllo

- A freddo ( $T_c < 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

  - warm-up rapido

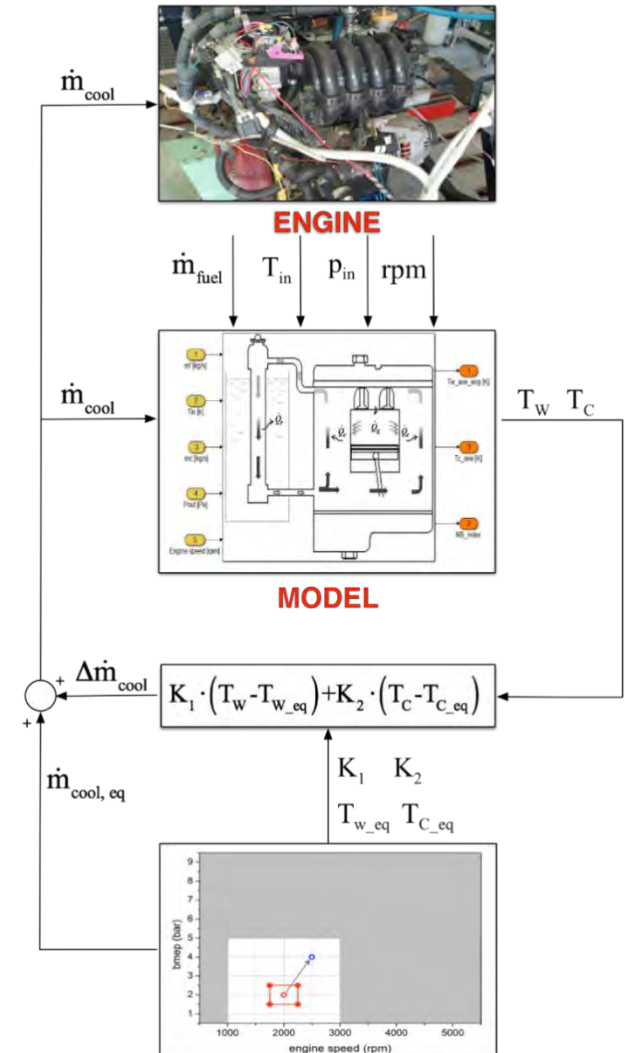
  - ✓  $T_w = -10 \div 156 \text{ } ^\circ\text{C}; T_c = -8 \div 95 \text{ } ^\circ\text{C}$
  - ✓  $(-0.6 \leq \text{NB\_index} \leq 0.5)$

- A motore caldo ( $T_c \geq 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

  - Efficace refrigerazione con minima possibile portata di refrigerante

  - ✓  $T_w, T_c$  in intervalli di sicurezza
  - ✓  $-0.5 \leq \text{NB\_index} \leq 1$

*Pizzonia et al. "A Robust Model Predictive Control for Efficient Thermal Management of Internal Combustion Engines», Applied Energy 169 (2016) 555–566.*



hmen-rnm



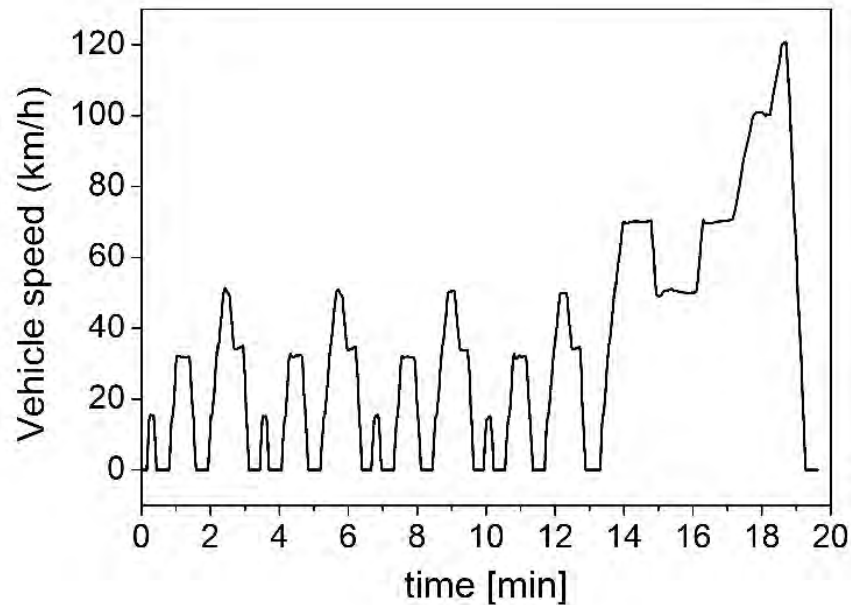
---

# Prove al banco



# Prove al banco

Sono state simulate al banco le condizioni NEDC:



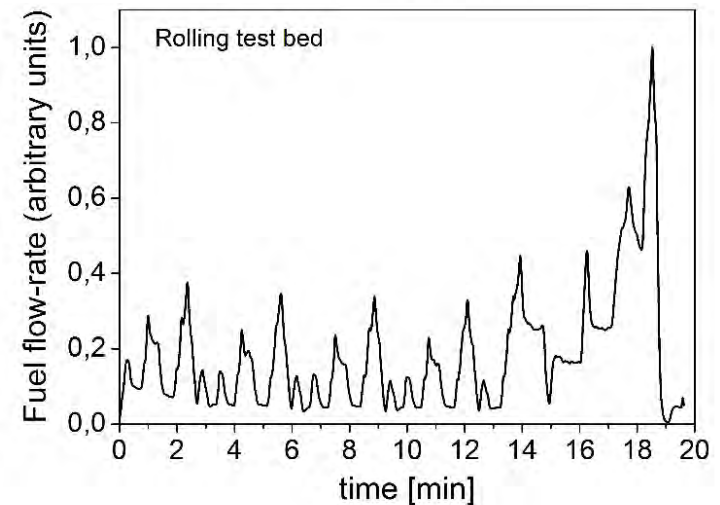
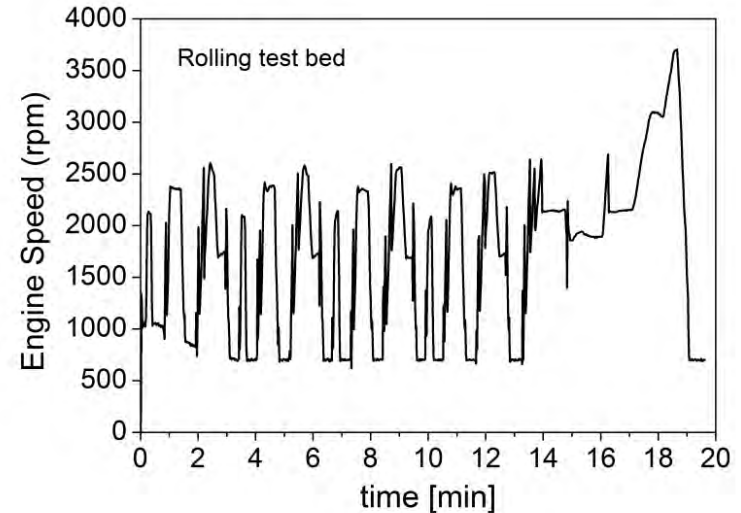
# Prove al banco

## Motore:

- Accensione-comandata;
- 4-cilindri - 16 V;
- $\sim 1.2 \text{ dm}^3$
- $\sim 60 \text{ kW @ 5000-6000 rpm}$

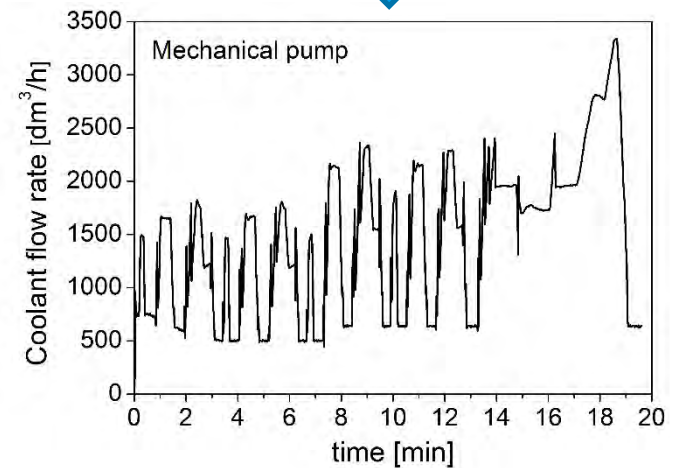
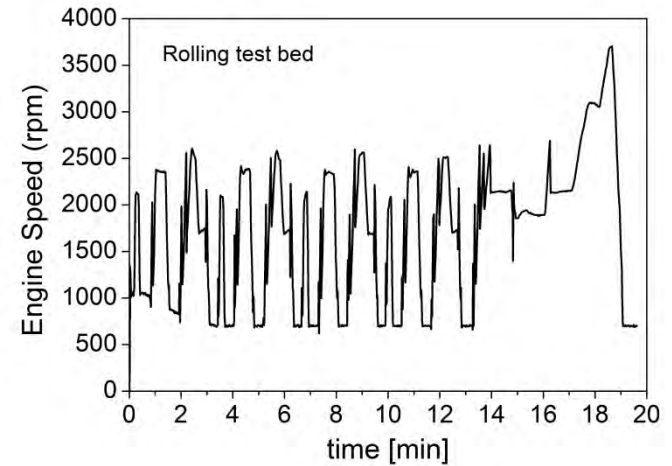
## Dati noti da prove su banco a rulli:

- Velocità di rotazione;
- Coppia;
- Portata combustibile;
- Temperatura refrigerante uscita motore

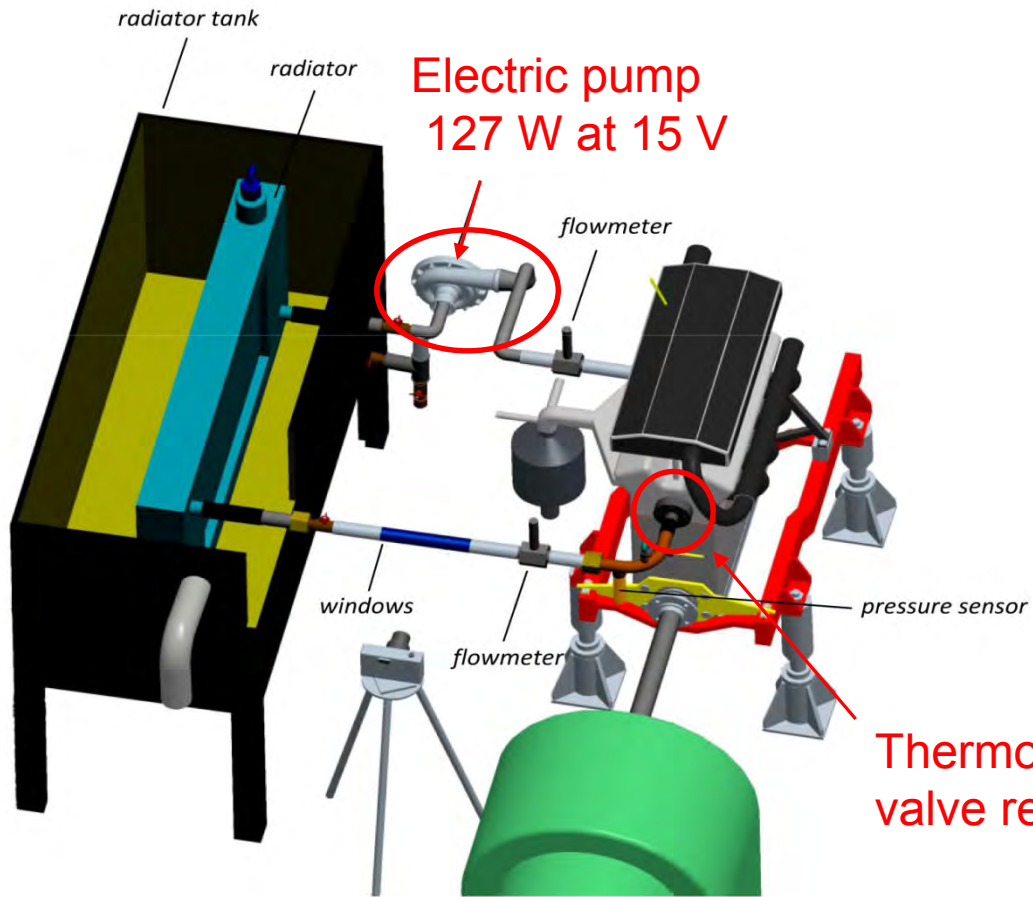


# Prove al banco

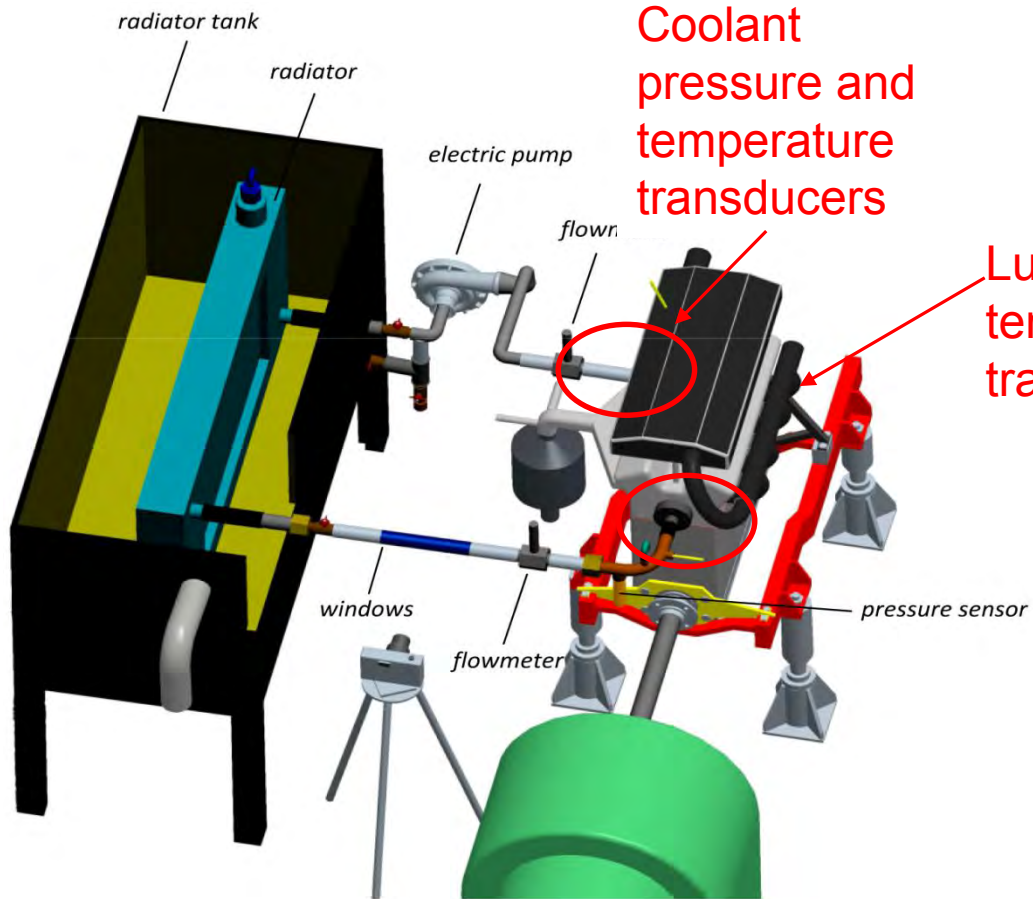
Portata di refrigerante calcolata:



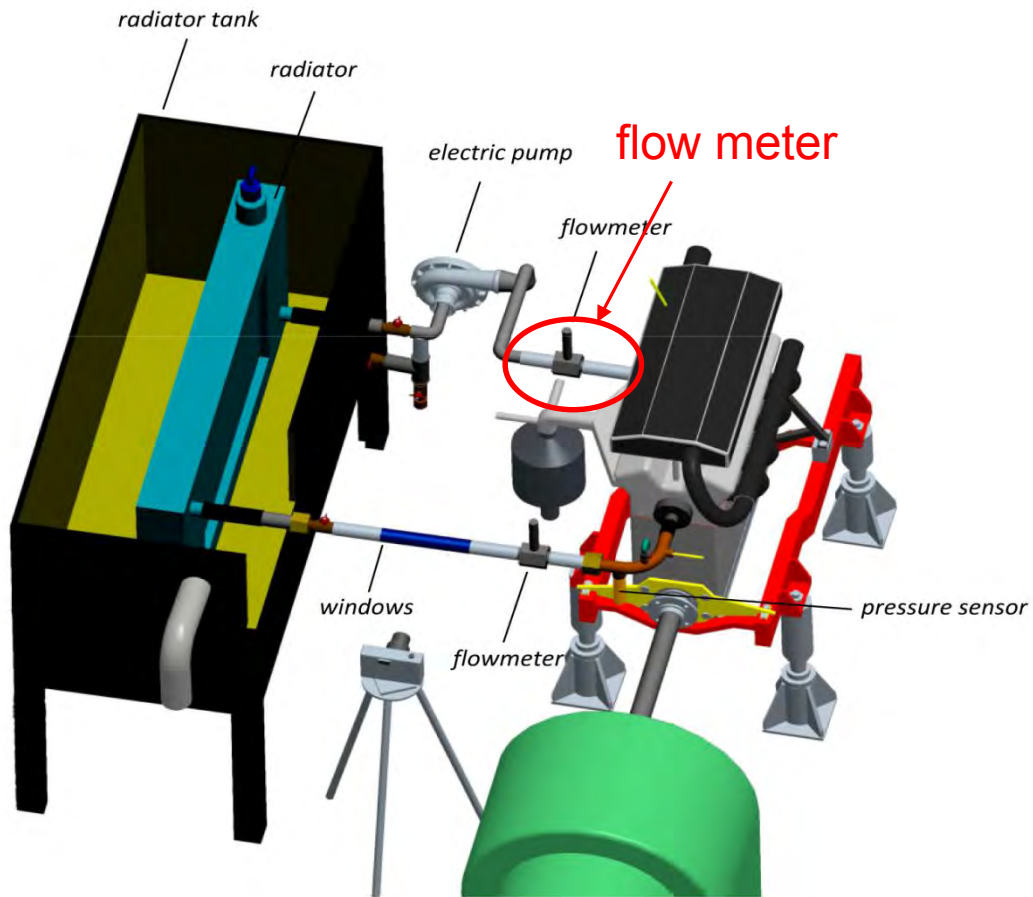
# Prove al banco



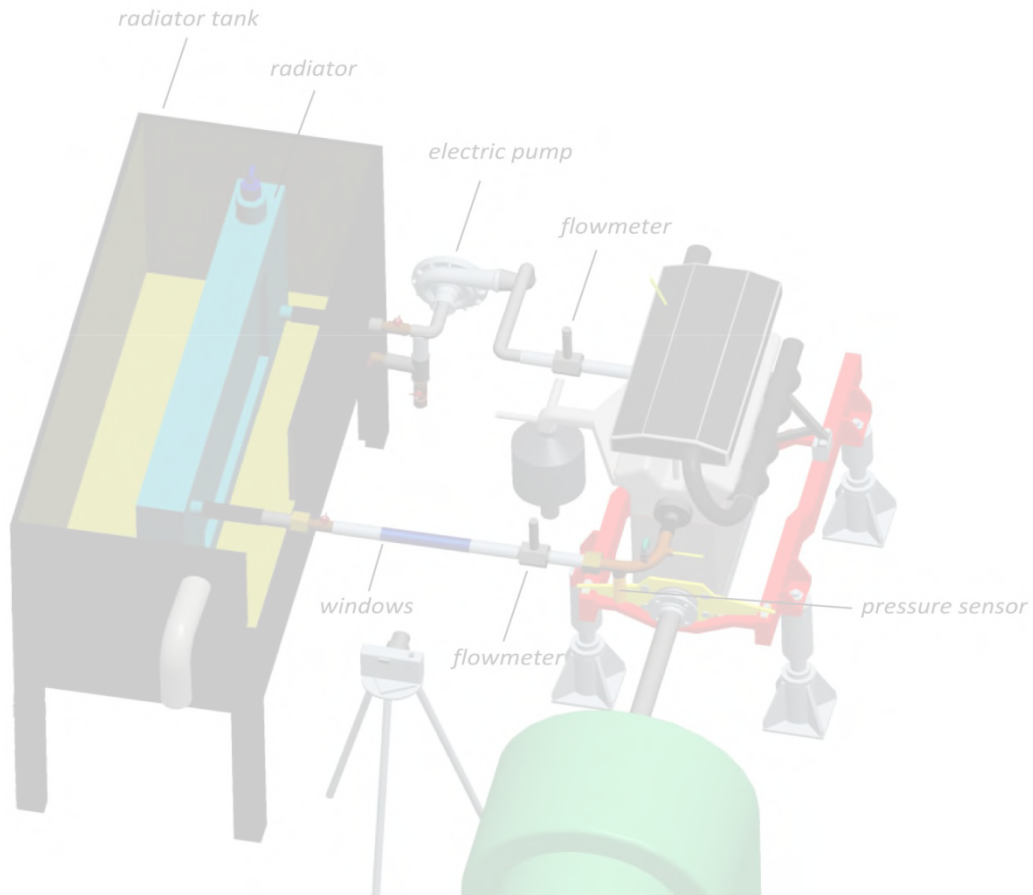
# Prove al banco



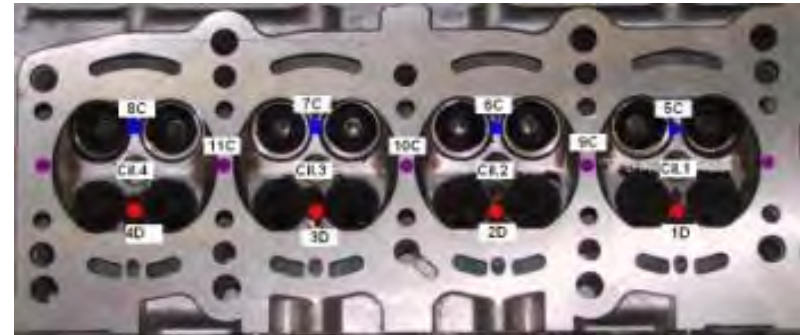
# Prove al banco



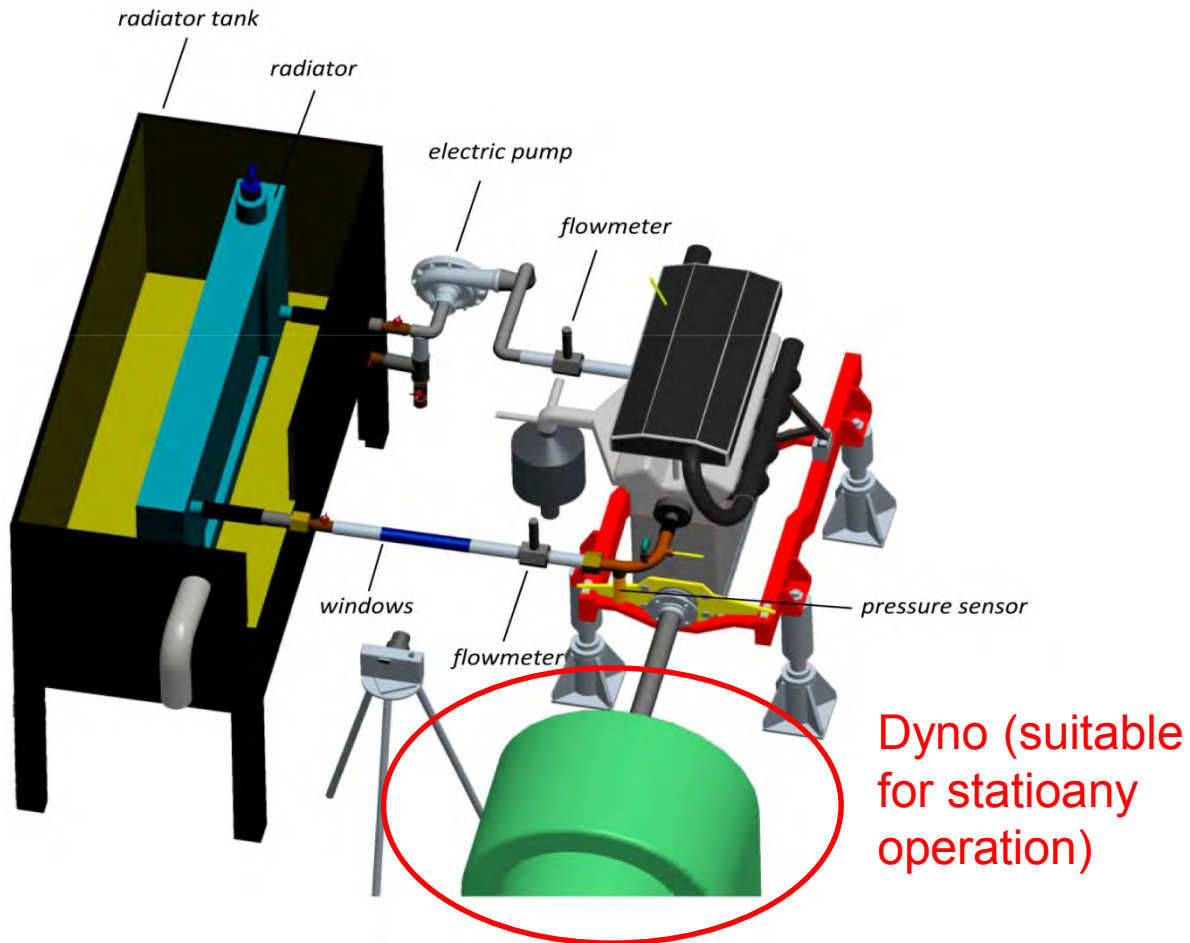
# Prove al banco



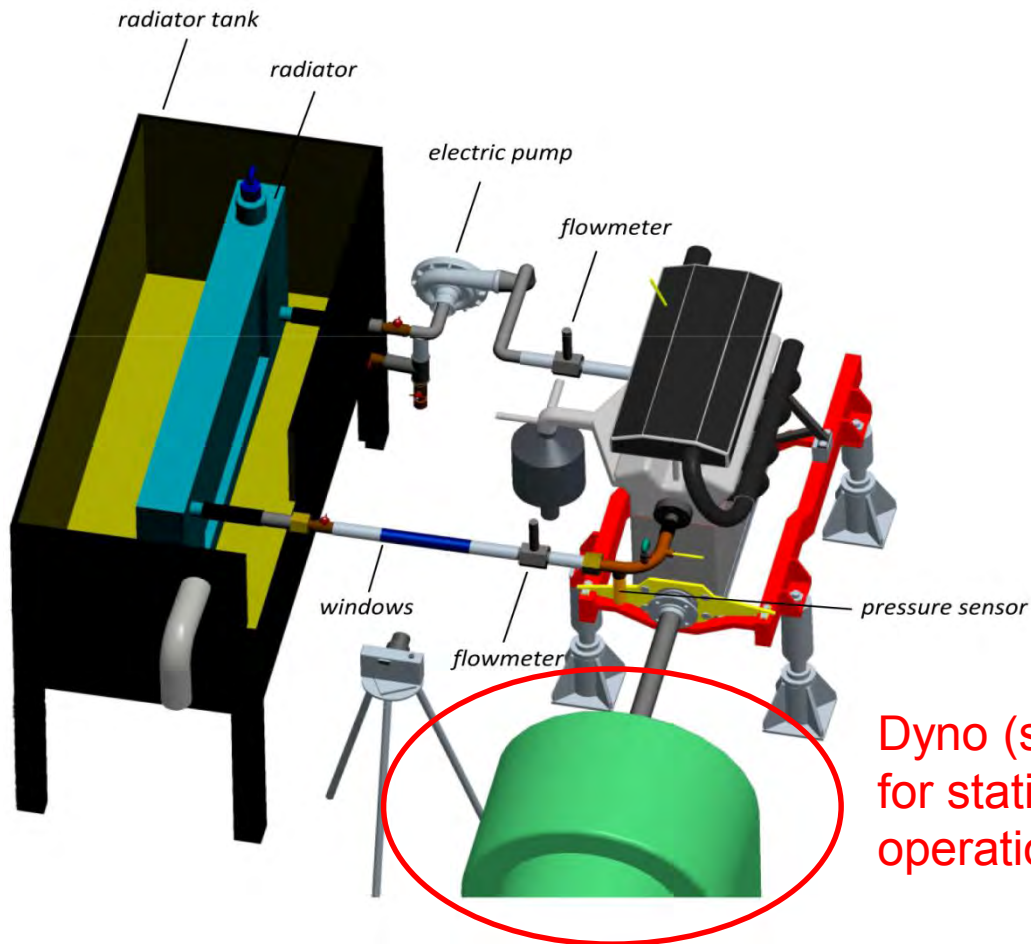
## Thermo-couples



# Prove al banco



# Prove al banco

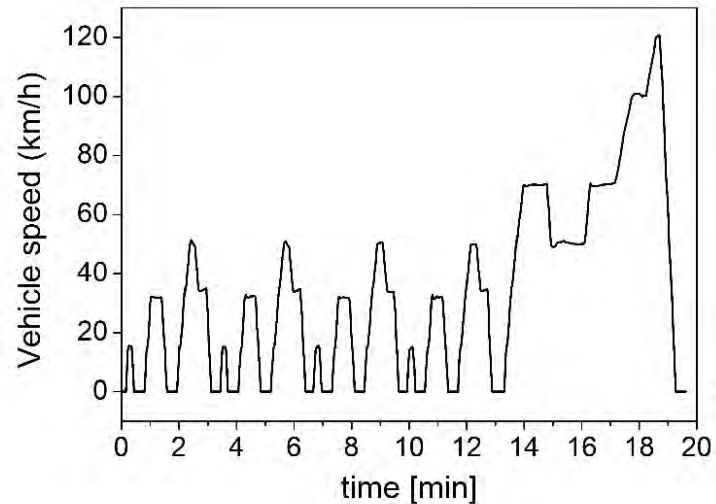


(Coppia – velocità di rotazione)

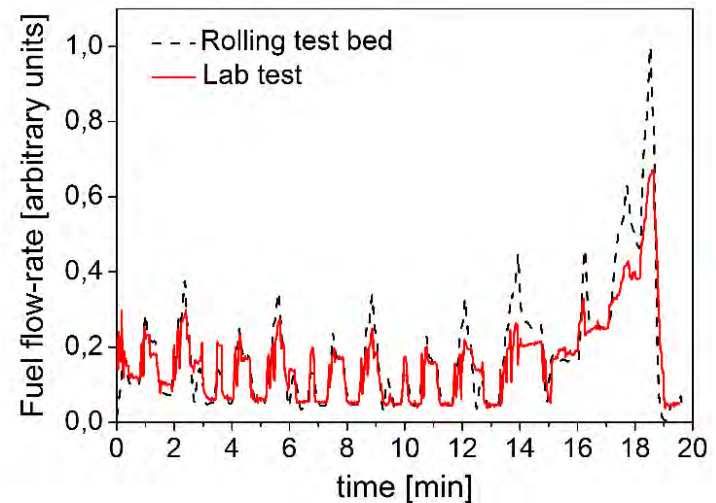
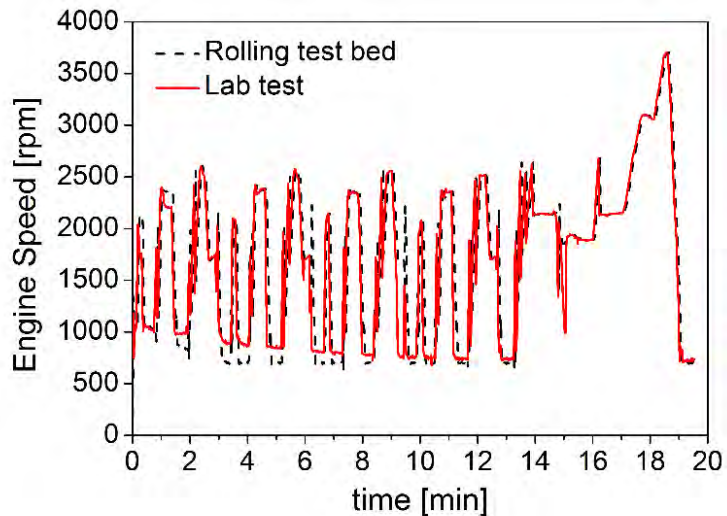
calibrazione

(Farfalla– velocità di rotazione)

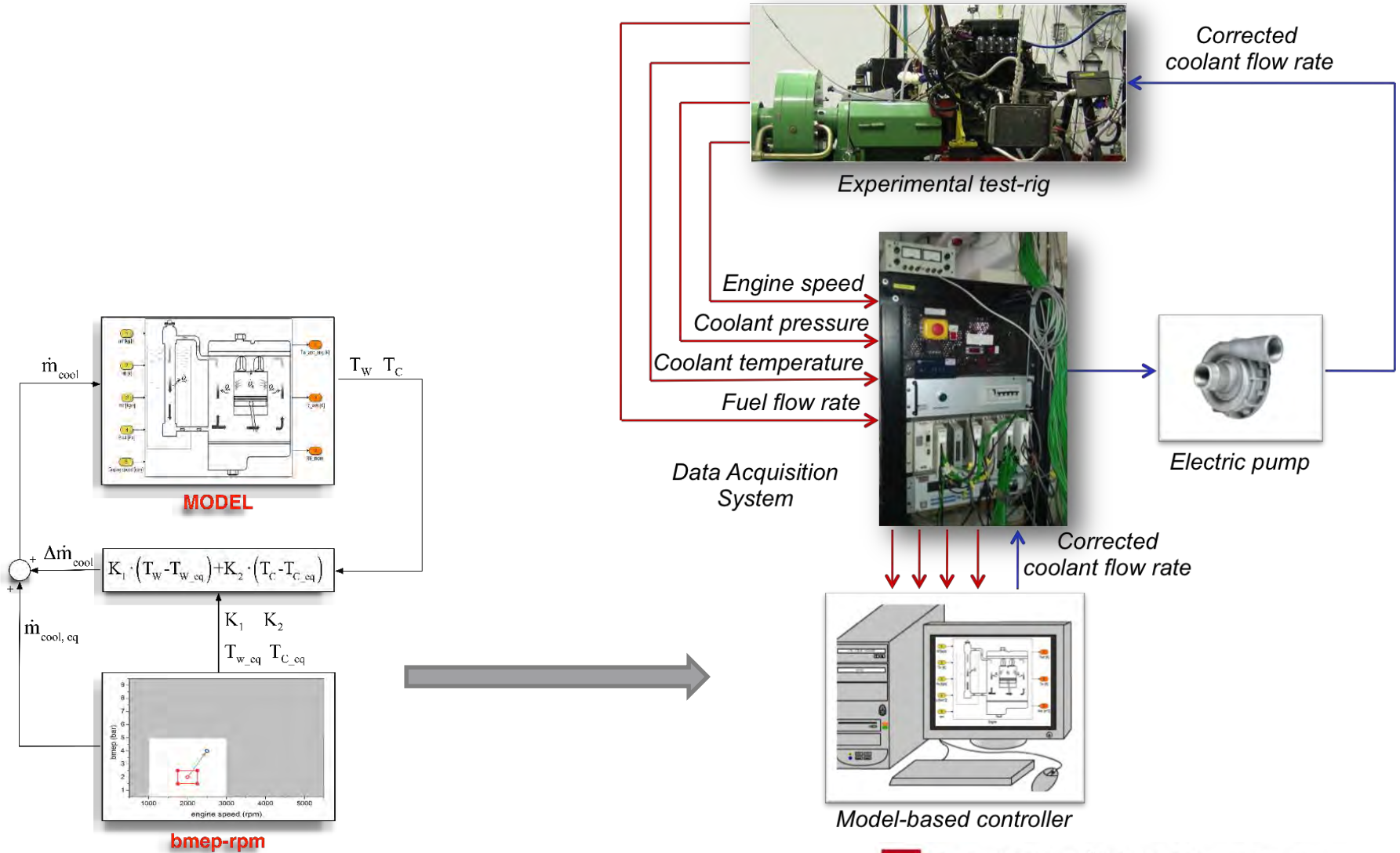
# Prove al banco



- Strumento per realizzare confronti in condizioni ripetibili e prossime a quelle NEDC.



# Prove al banco



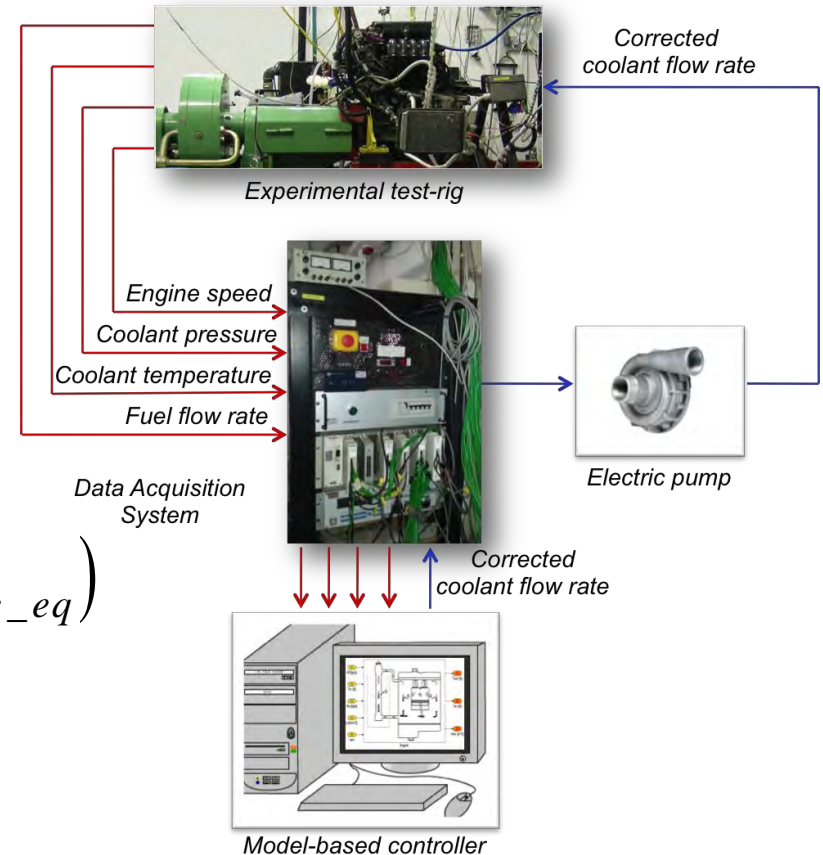
# Prove al banco

## Pompa meccanica

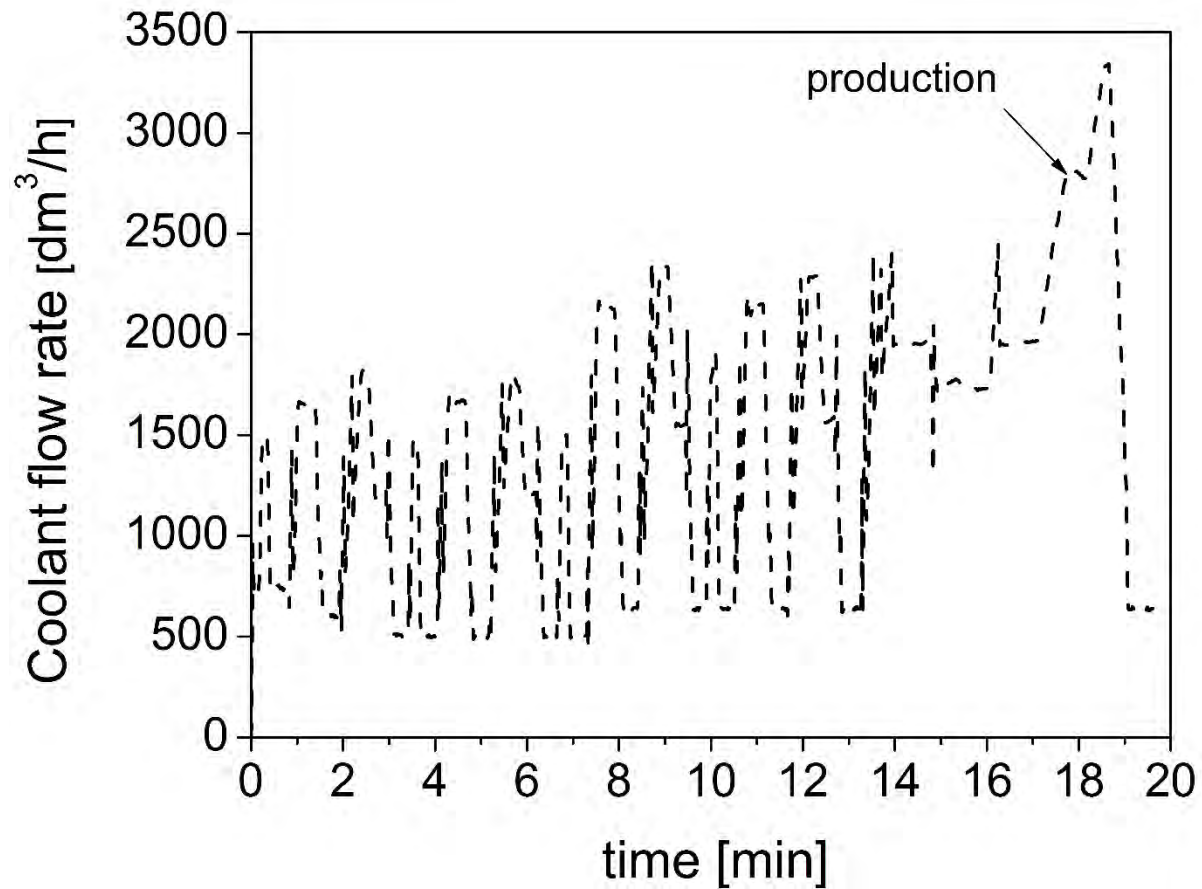
$$\dot{m}_c = K \cdot engine\_speed$$

## Controllo portata refrigerante:

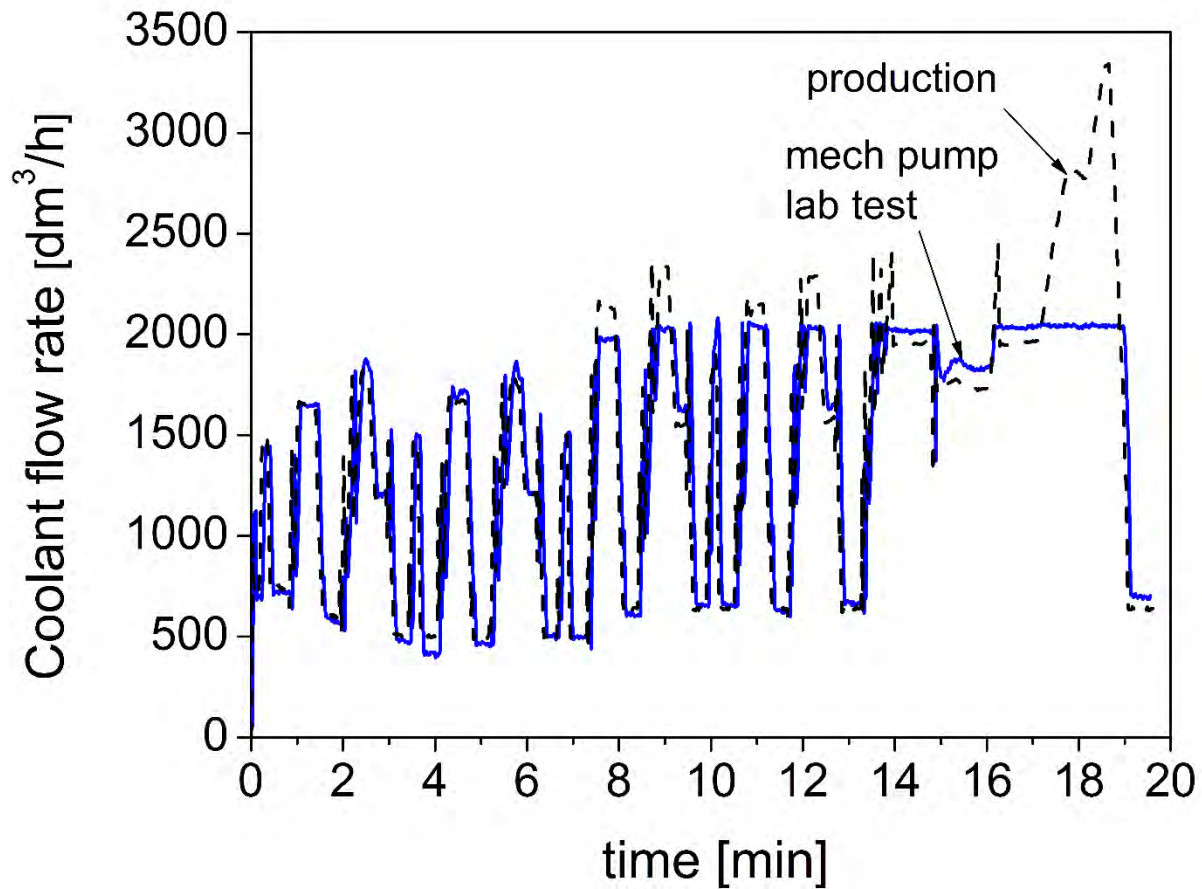
$$\dot{m}_c = \dot{m}_{c\_eq} + K_1(T_w - T_{w\_eq}) + K_2(T_c - T_{c\_eq})$$



# Risultati

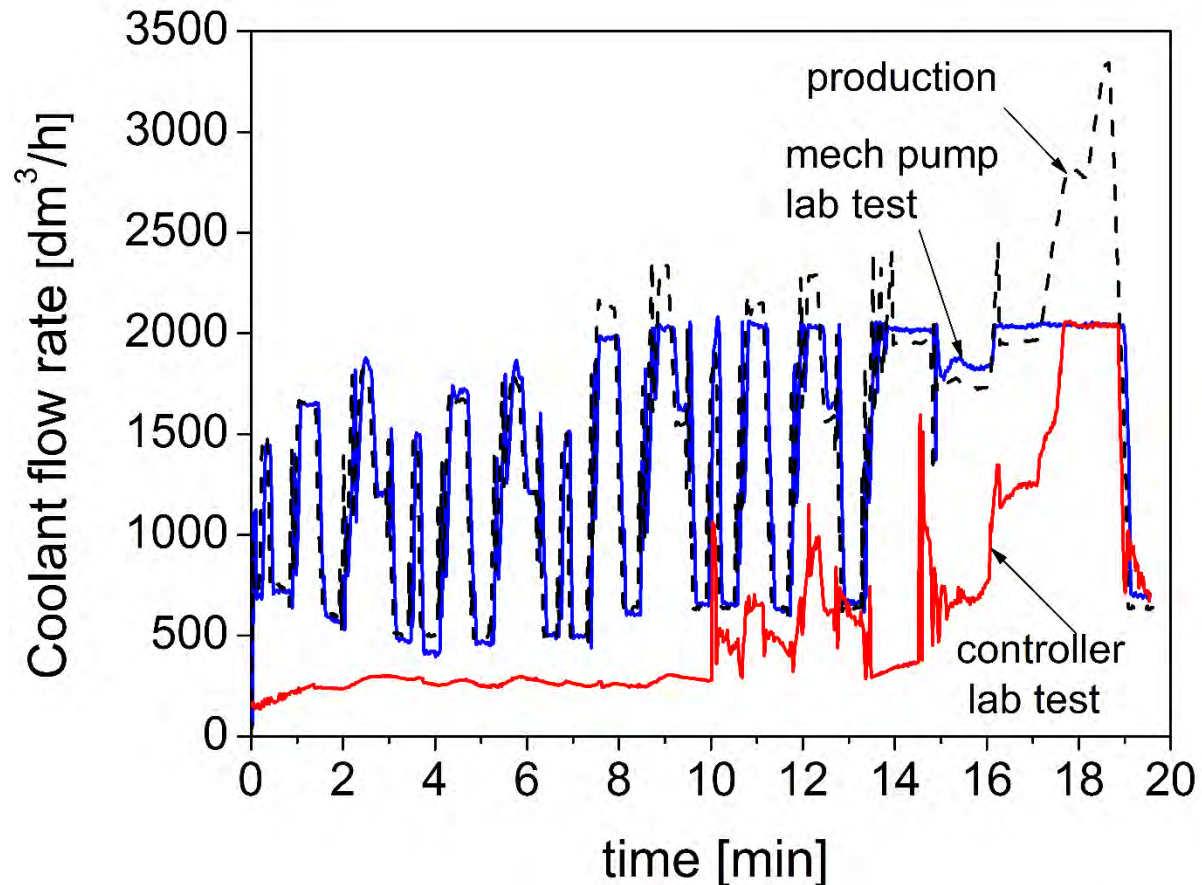


# Risultati

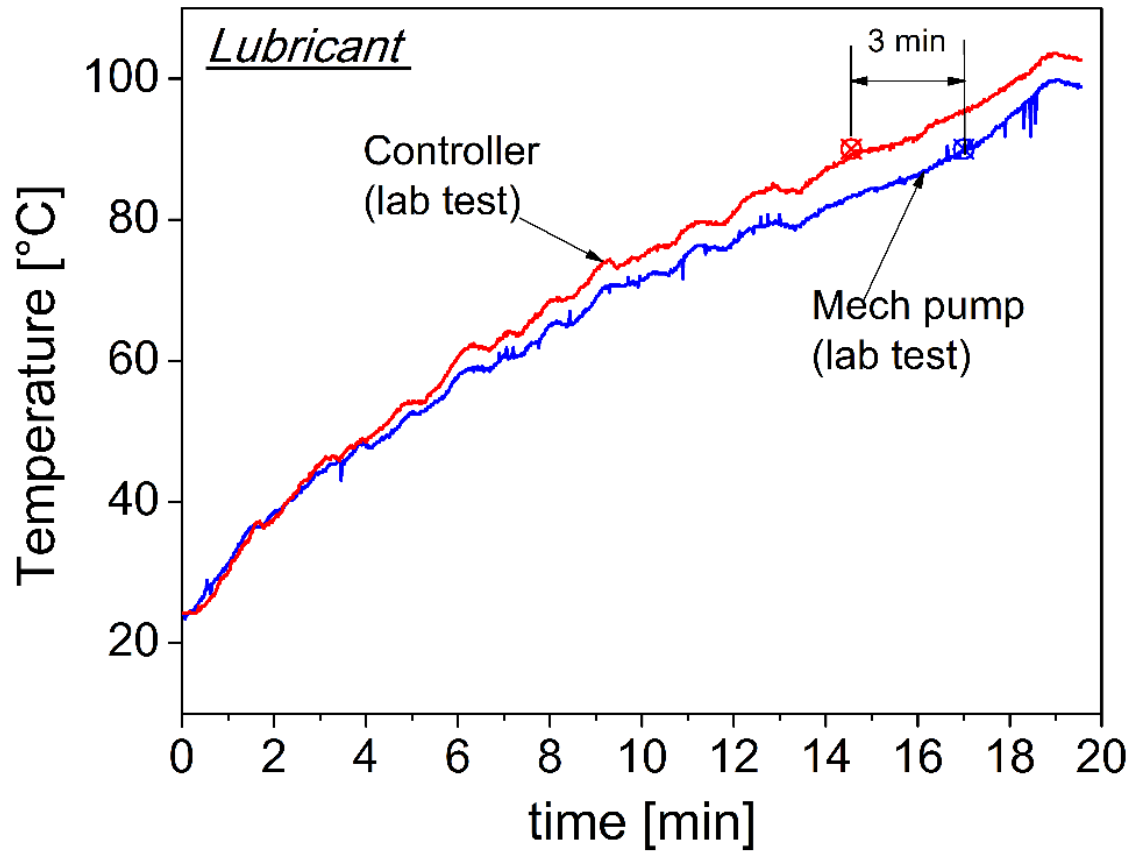


# Risultati

- Portate inferiori del 75% rispetto alla pompa meccanica

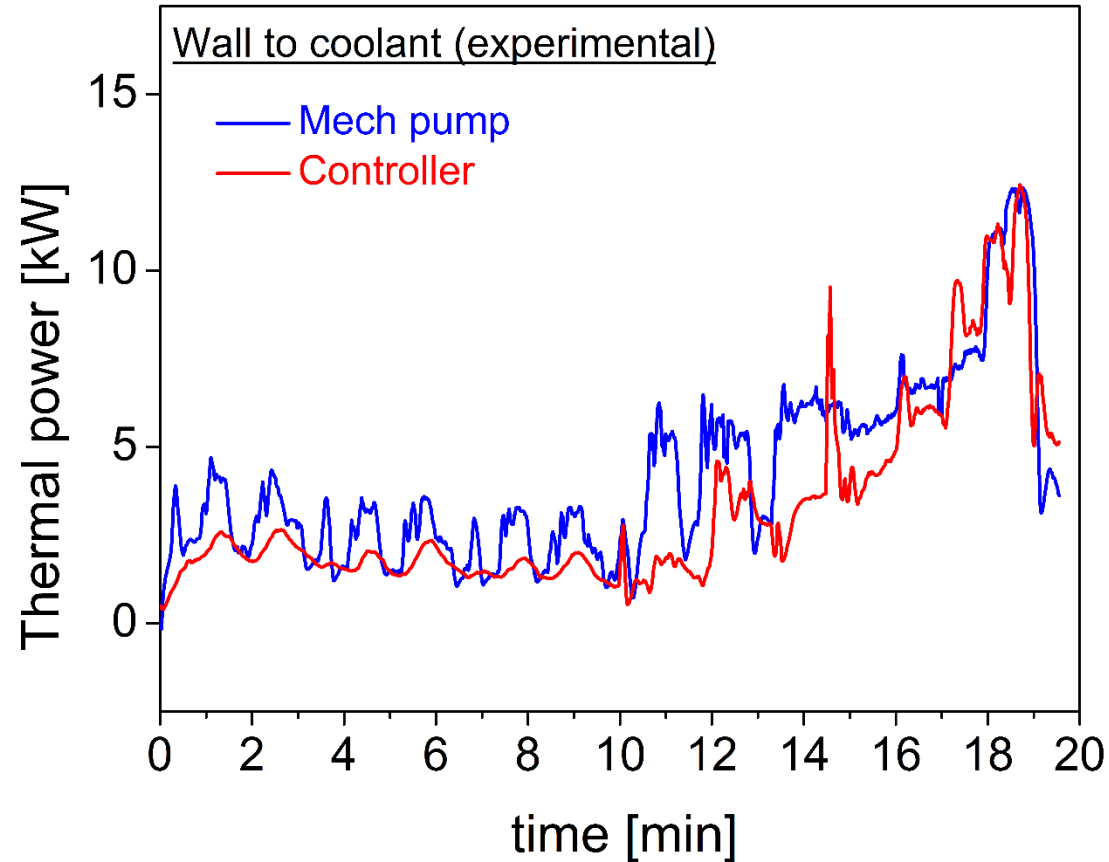


# Risultati



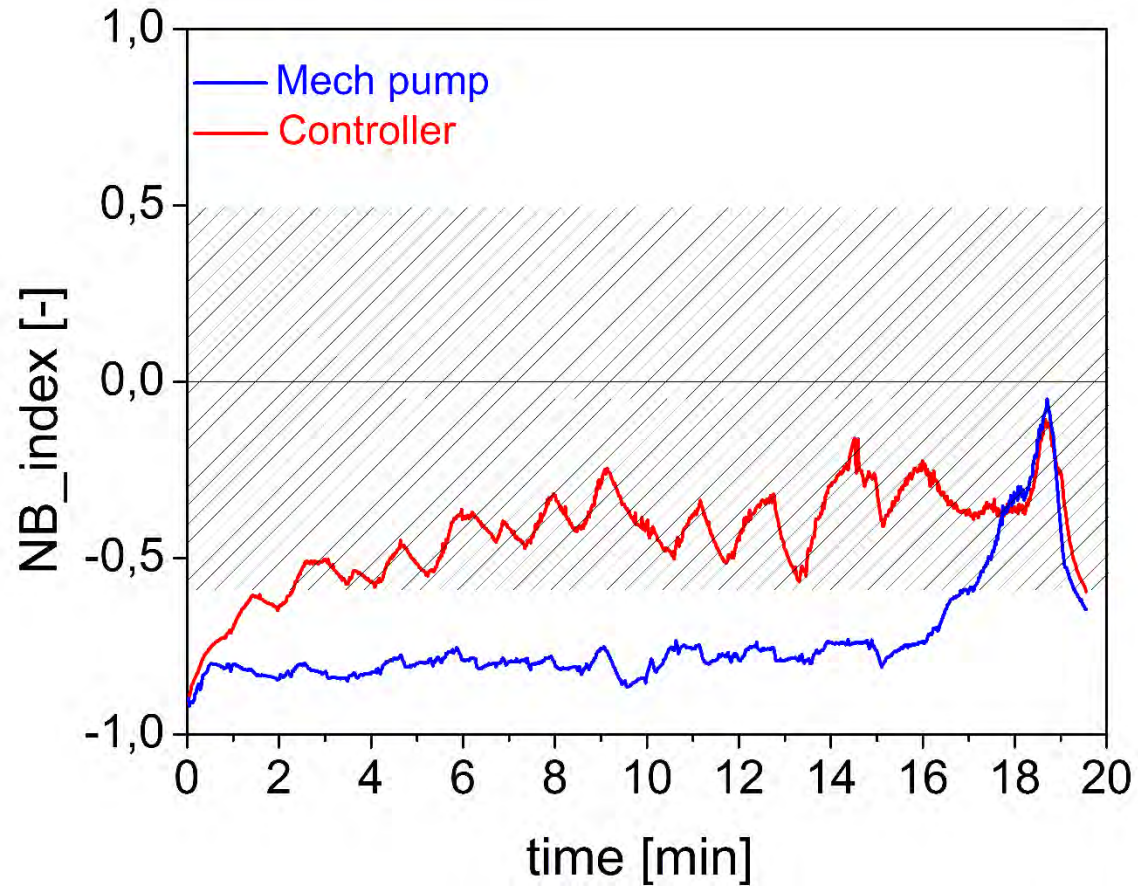


# Risultati



$$\dot{Q}_c = \dot{T}_c C_c + \dot{m}_c c_p (T_{out} - T_{in})$$

# Risultati



---

# Conclusioni

## Il modello di scambio termico:

- Predice grandezze che non sono direttamente misurabili;
- Definisce una metrica per valutare la distanza dall'insorgere dell'ebollizione nucleate;

## Model Predictive Control

- I calcoli più onerosi sono eseguiti *off-line*;
- Piano *coppia-velocità di rotazione* suddiviso in sottoregioni;
- Parametri del controllo prelevati *on-line* da tabelle;
- Stabilità e robustezza garantite

## Prove effettuate su un ciclo NEDC simulato al banco:

---

# Conclusioni

## Results

- Il Sistema di controllo è robusto in termini di reiezione dei disturbi: le temperature di parete e del refrigerante si sono mantenute nei limiti definiti;
- E' stata ottenuta una riduzione del 75% della portata di refrigerante nella fase di *warm-up*;
- Temperatura olio: 90 °C raggiunti ~ 3 min prima;
- Temperatura di parete: 120 °C raggiunti ~ 3 min prima;
- Le costanti del controllore a motore caldo devono essere meglio calibrate.

---

# Conclusioni

## Considerazioni conclusive

- I vantaggi di warm-up sono più evidenti se si mantiene la valvola termostatica;
- La metodologia può essere impiegata anche con diverse configurazioni del sistema di raffreddamento;
- Il *Model Predictive Control* può essere usato anche con altri dispositivi, quali motori elettrici, elettronica di Potenza, ecc.