

*Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale*  
*Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il*  
*Territorio*

 POLITECNICO DI MILANO



**Modello matematico per biodigestori in Paesi in via di sviluppo**

Relatore: Prof. Mario Grosso  
Correlatori: Prof. Federico Viganò  
Ing. Davide Scaglione

Tesi di laurea di:  
Lorenzo Ivan Balzaretti



1. Modello del comportamento termico  
dell'impianto

2. Analisi dei risultati

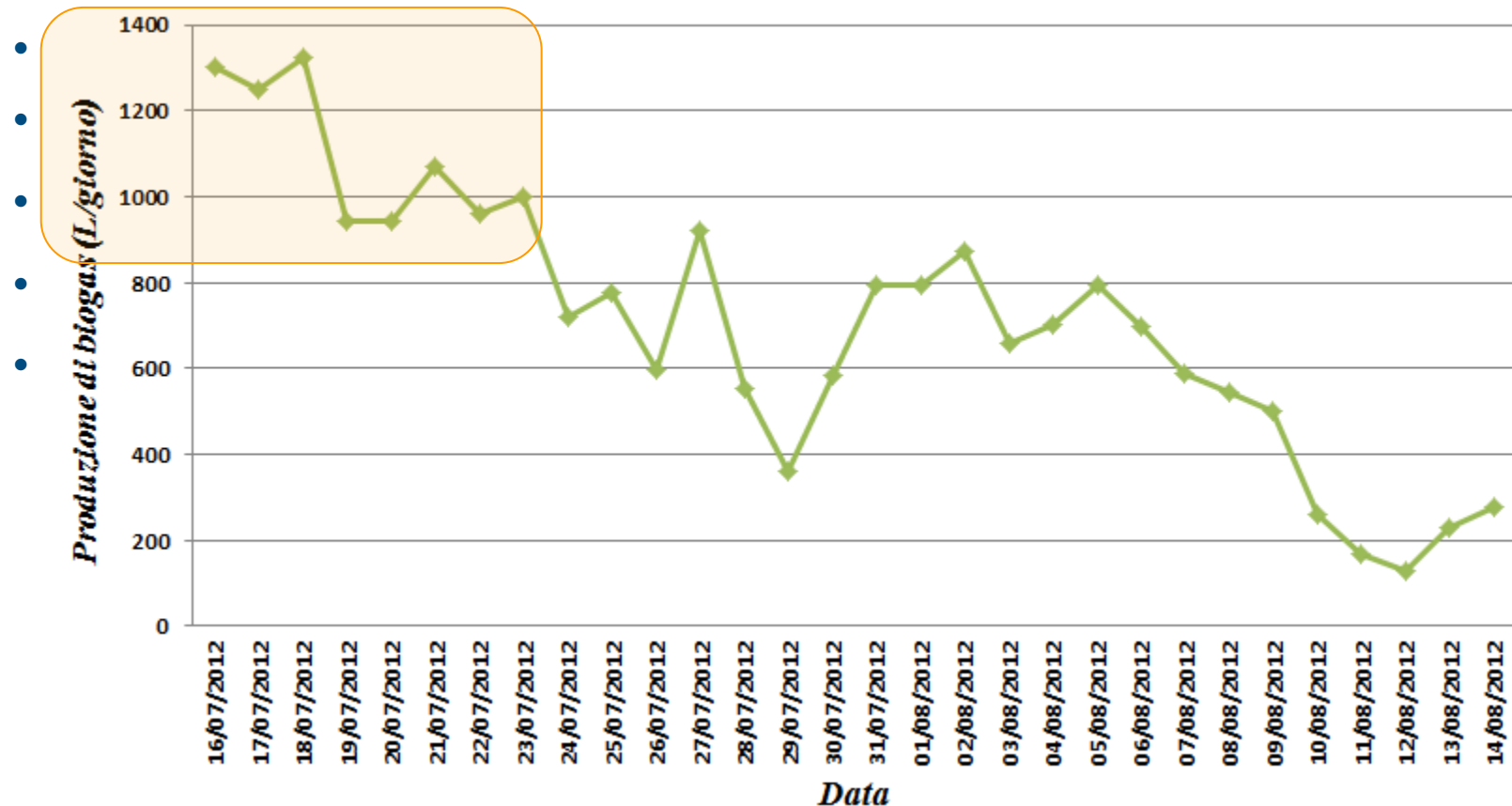
3. Conclusioni



## MODELLO TERMICO – Dati a disposizione

- Serie di misure di temperatura dal 16 Luglio al 4 Ottobre 2012
- Serie di misure di produzione di biogas dal 16/07 al 14/08
- Da

Produzione giornaliera di biogas

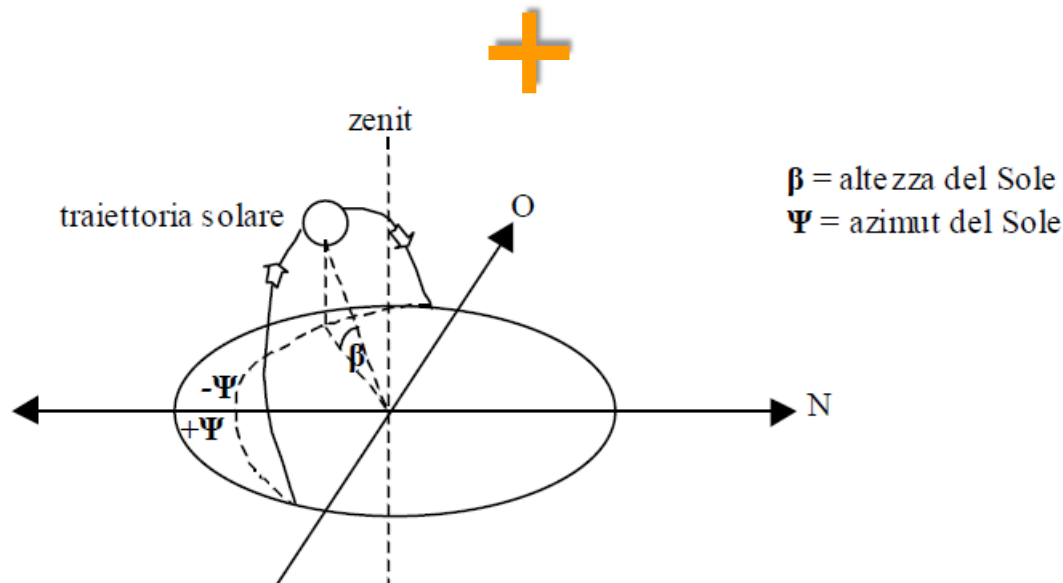




## MODELLO TERMICO – Radiazione solare

- Non disponendo di dati sito specifici, la **radiazione solare** è stata calcolata mediante di **modello di Campbel & Norman**

<i>Latitudine (°)</i>	<i>Longitudine (°)</i>	<i>Quota (m slm)</i>	<i>Pressione atmosferica (atm)</i>	<i>Umidità relativa dell'aria (%)</i>
$\phi$	$\lambda$	$z$	$p$	$u$
-13.70806	-72.39000	2800	0.7071	65



$$\theta_i = \cos^{-1}[\cos(\beta) \cdot \cos(\Psi - \Psi_i) \cdot \sin(\alpha_i) + \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha_i)]$$



# MODELLO TERMICO – Radiazione solare

$$m (q_{Sole-i})_{esterno} = I_{t,T}(\phi)_i \cdot \alpha_{\lambda_i} \cdot A_i$$

$$(q_{Sole,diretta-i})_{interno} = I_{t,b}(\phi)_j \cdot \tau_{\lambda_c} \cdot \alpha_{\lambda_i} \cdot A_i \cdot F_{ombra-i}$$

$$\leftarrow (q_{Sole,diffusa-i})_{interno} = I_{t,d}(\phi)_i \cdot \tau_{\lambda_c} \cdot \alpha_{\lambda_i} \cdot A_i \cdot F_{vista_{i-c}}$$

			C	S	N	E	O	G	NY
Esposizione	[°]	$\Psi$	0.00	180.00	0.00	90.00	-90.00	0.00	0.00
Inclinazione	[°]	$\alpha$	22.20	90.00	90.00	90.00	90.00	0.00	22.20
Area	[m <sup>2</sup> ]	A	16.64	9.03	2.75	1.47	1.47	11.12	16.64
Coefficiente di assorbimento sul lato esterno	/	$\alpha_{\lambda}$	0.20	0.80	0.80	0.80	0.80	0.00	0.60
$F_{vis}$ Coefficiente di assorbimento sul lato interno	/	$\alpha_{\lambda}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
Coefficiente di trasmissione	/	$\tau_{\lambda}$	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Ψ)



## MODELLO TERMICO – Flussi di calore

- Irraggiamento tra le diverse superfici interne alla serra
- Irraggiamento tra le superfici esterne e l'ambiente
- Convezione tra le superfici interne alla serra e l'aria interna alla serra
- Convezione tra le superfici esterne e l'aria ambiente
- Convezione tra la cupola della geomembrana e il biogas in essa contenuto
- Conduzione tra il suolo circostante la fossa di alloggiamento e lo slurry contenuto nel reattore tubolare
- Energia termica apportata nello slurry dall'ingestato al momento di caricare il reattore
- Energia termica che viene sottratta al sistema sottoforma di biogas prodotto



## MODELLO TERMICO – Ipotesi e semplificazioni

- $\tau_\lambda$  della copertura **indipendente** dall'angolo di **incidenza**
- $\alpha_\lambda = 1$  per gli elementi interni alla serra (ipotesi di **corpo nero**)
- **Curvatura** della cupola gasometrica della geomembrana **trascurabile**
- Coefficiente di scambio termico globale  $U_{g,i}$  = 1.65 (cielo che si muove) **volosa** durante la notte  
presenta un salto di temperatura  $\Delta T_i$  nel periodo considerato  
$$T_i^k = T_i^{k-1} + \frac{\Delta t}{m_i \cdot c_{P_i}} \cdot \sum_j^{N-1} q_{j-i}$$
- Componente solare  $q_{s,i}$  e solare diffusa  $q_{d,i}$  e solare riflessa  $q_{r,i}$  sono fuse in un **unico contributo** (indipendente dal fattore di vista con il cielo)
- **Modello:**
  - **Esplicito:** convergenza funzione del  $\Delta t$  adottato
  - **A parametri concentrati:** ogni elemento del sistema è rappresentato da una unica temperatura



## MODELLO TERMICO – Implementazione e calibrazione

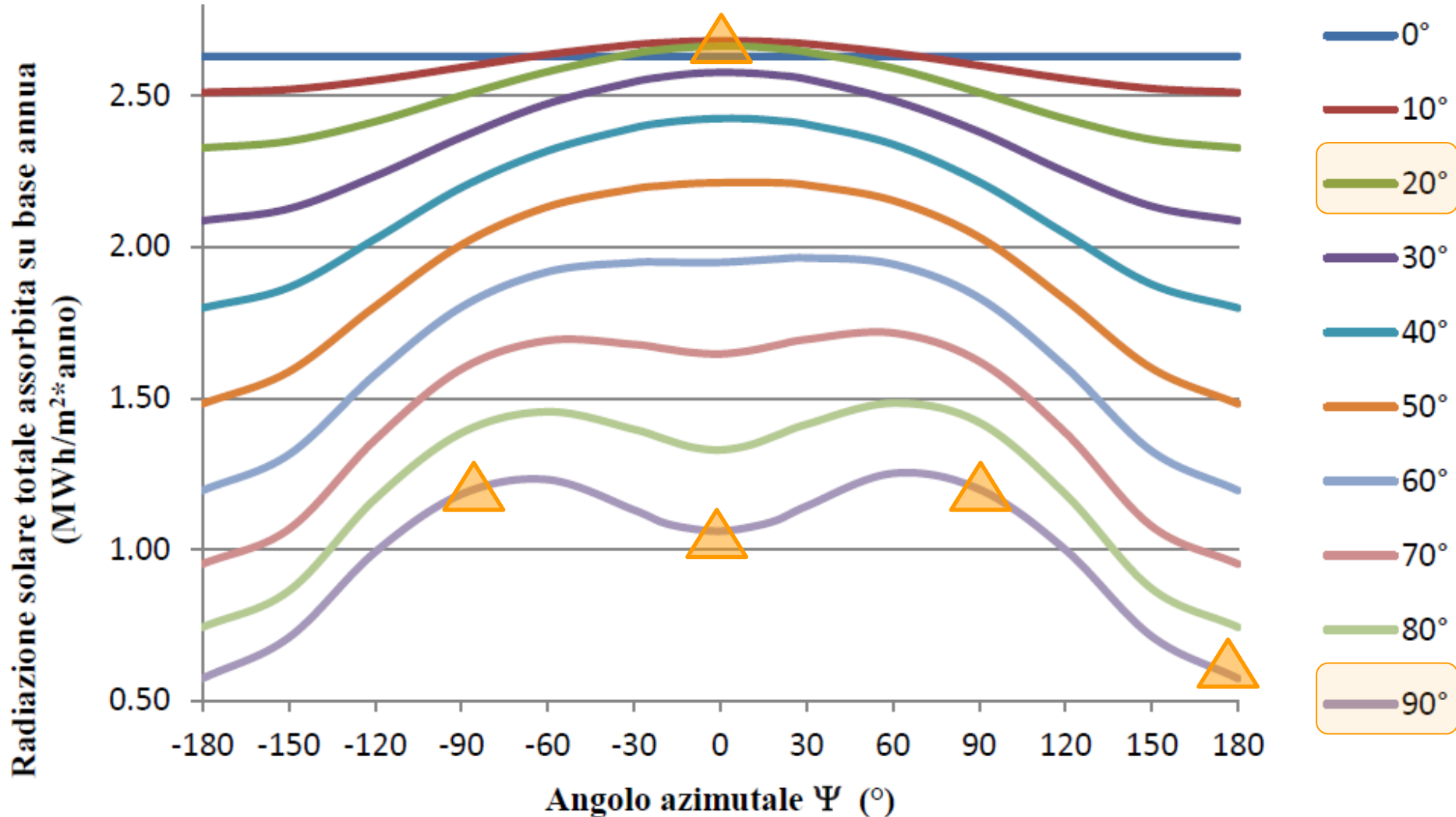
- **Forzanti:**
  - **Temperatura aria ambiente** misurata con sensore
  - **Radiazione solare** calcolata con modello Campbel & Norman
- **Scambi di calore tra i diversi elementi del sistema e tra sistema e ambiente**
- **Calcolo delle temperature:**
  - **Temperatura dell'aria interna alla serra**
  - **Temperatura dello slurry**
- **Confronto con le temperature misurate con i sensori**
- **Calibrazione dei coefficienti di scambio termico:** minimizzare  $\Delta T$





## ANALISI DEI RISULTATI – Orientamento della serra

Andamento della radiazione totale annua in funzione della giacitura della superficie



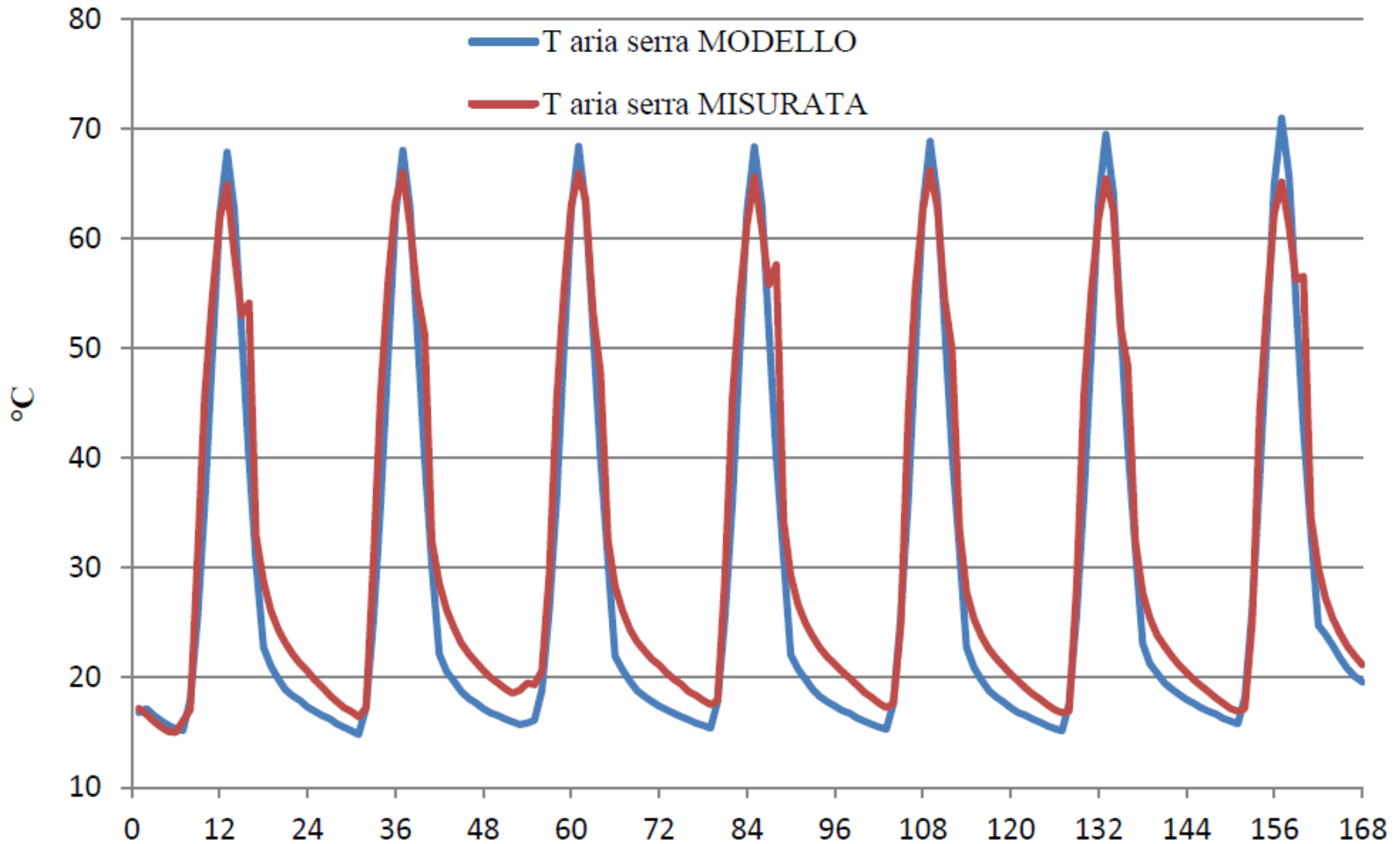


## ANALISI DEI RISULTATI – Orientamento della serra

<i>Elemento del sistema</i>	<i>Radiazione solare totale assorbita (MWh/anno)</i>	<i>Radiazione solare diretta sul lato esterno (%)</i>	<i>Radiazione solare diffusa e riflessa sul lato esterno (%)</i>	<i>Radiazione solare diretta sul lato interno (%)</i>	<i>Radiazione solare diffusa e riflessa sul lato interno (%)</i>
<i>Copertura</i>	8.64	86.15%	13.85%	0.00%	0.00%
<i>Parete Sud</i>	7.14	18.28%	39.65%	23.42%	18.65%
<i>Parete Nord</i>	2.34	63.18%	36.82%	0.00%	0.00%
<i>Parete Est</i>	1.74	54.58%	26.53%	10.97%	7.92%
<i>Parete Ovest</i>	1.73	53.81%	26.71%	11.50%	7.97%
<i>Geomembrana</i>	6.97	0.00%	0.00%	68.58%	31.42%
<i>Coperta Nylon</i>	0.52	38.40%	61.60%	0.00%	0.00%



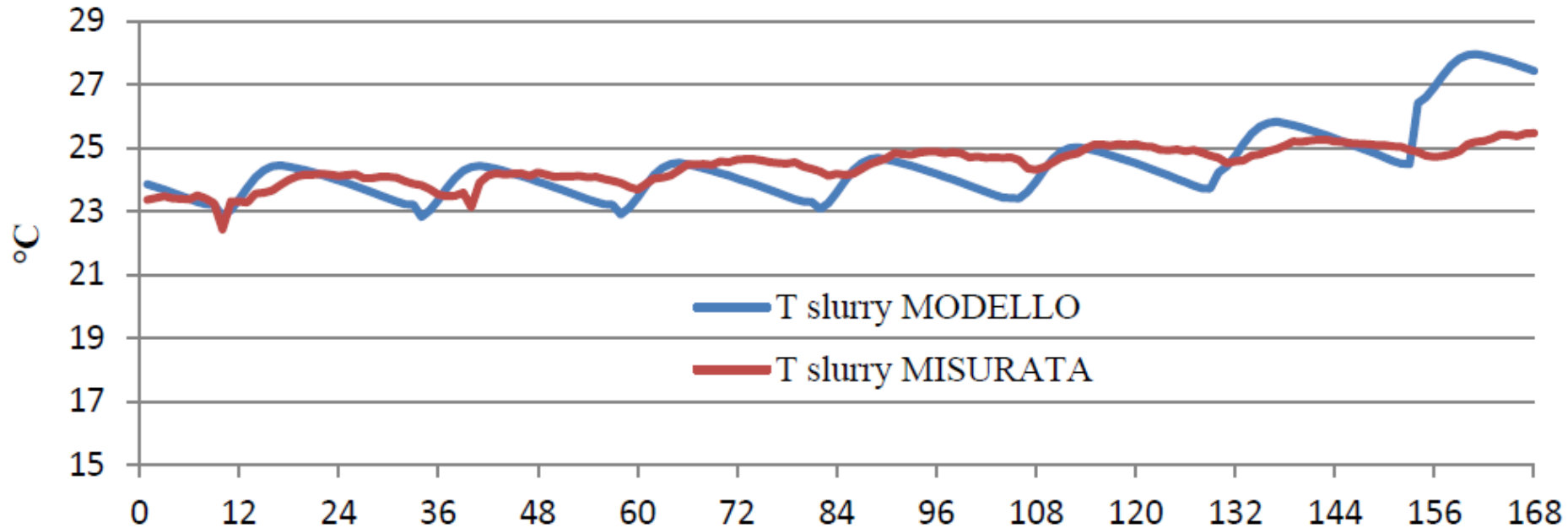
## ANALISI DEI RISULTATI – Calibrazione



Parametri concentrati: viene trascurato l'isolamento termico offerto dagli adobes



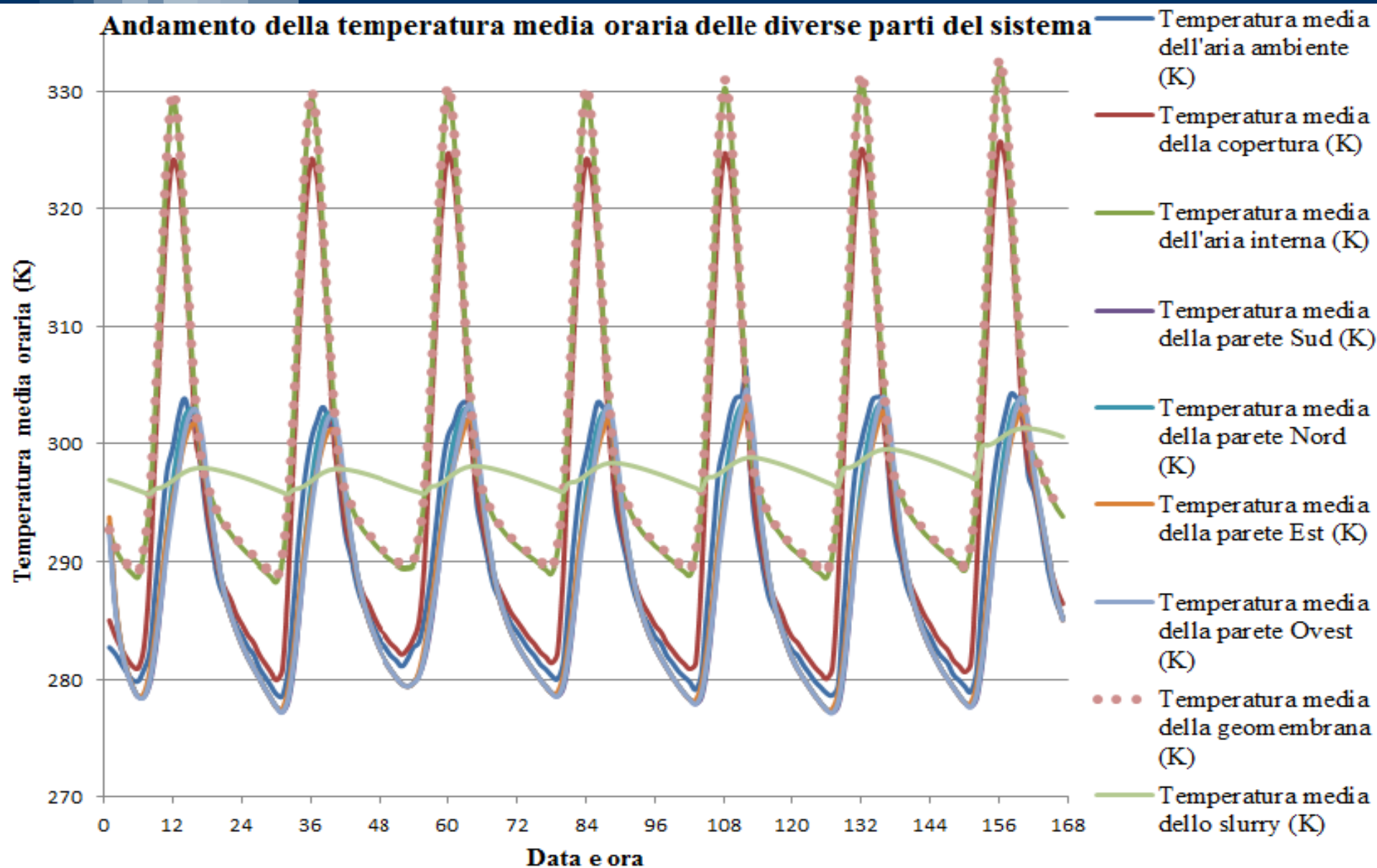
## ANALISI DEI RISULTATI – Calibrazione



- **non** tiene conto dell'**evoluzione dei solidi** in sospensione
- ipotizza **produzione di biogas costante** nel tempo e indipendente dalla temperatura
- **non** tiene conto dell'**effetto termico** delle **reazioni** batteriche
- **l'introduzione dell'ingestato** e lo spurgo del reattore nei giorni considerati **non** siano avvenuti **puntualmente** alle ore 9

# ANALISI DEI RISULTATI – Temperature

Andamento della temperatura media oraria delle diverse parti del sistema





## CONCLUSIONI – Limiti del modello

- **Scarsa disponibilità di dati di sito** (temperature; radiazione solare etc.)
- **Mancanza** di un **modello biologico** che simuli il comportamento plug-flow
- È stata **trascurata** la dinamica della **frazione solida del digestato**



Vengono introdotte **notevoli approssimazioni** sia in fase di **implemetazione** che in fase di **calibrazione**



## CONCLUSIONI – Sviluppi futuri

- **Ottimizzazione dei parametri:**

- di orientamento  $-180^\circ < \Psi_c < +180^\circ$   $0^\circ < \alpha_c < 90^\circ$
- di dimensionamento  $5 < \eta_{dig} = \frac{L_{dig}}{d_{dig}} < 10$   $0.3 < Y < 0.4$
- gestionali  $t_{ING}$   $t_{NY\_up}$   $t_{NY\_down}$

- **Modifiche dello schema impiantistico:**

- Inserimento all'interno della serra di **tubi** per il **pre-riscaldamento** dell'ingestato
- Installazione di **serbatoi** per la **pre-fermentazione** del refluo





# RINGRAZIAMENTI

