

Introduzione alla Simulazione

La simulazione nel Industry 4.0

Introduzione alla simulazione (IND4.0)

Tipologie di simulazione (CFD e FEM)

Relatori: **V. Battaglia, V. Pirro**



- Definizioni generali
- Livelli di Simulazione e loro applicazione
- Codici commerciali e macchine di calcolo
- Linee di sviluppo

Definizione di simulazione di processo

What is Simulation

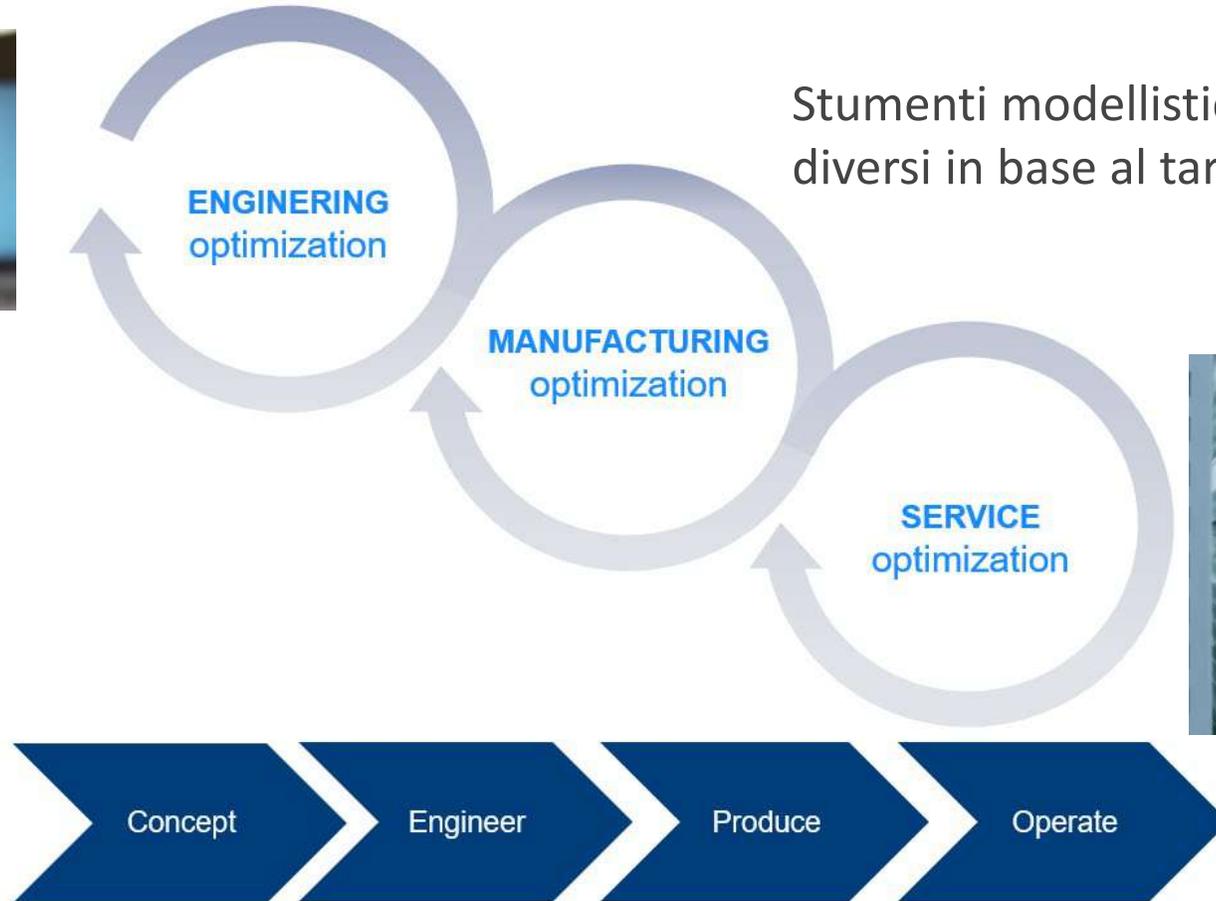
Simulation is the act of representing some aspects of the real world by numbers or symbols which may be manipulated to facilitate their study

What is a Process Simulator

An Engineering Tool which performs:

- Automated calculations
- Mass and Energy balances
- Design/rating calculations
- Process optimization

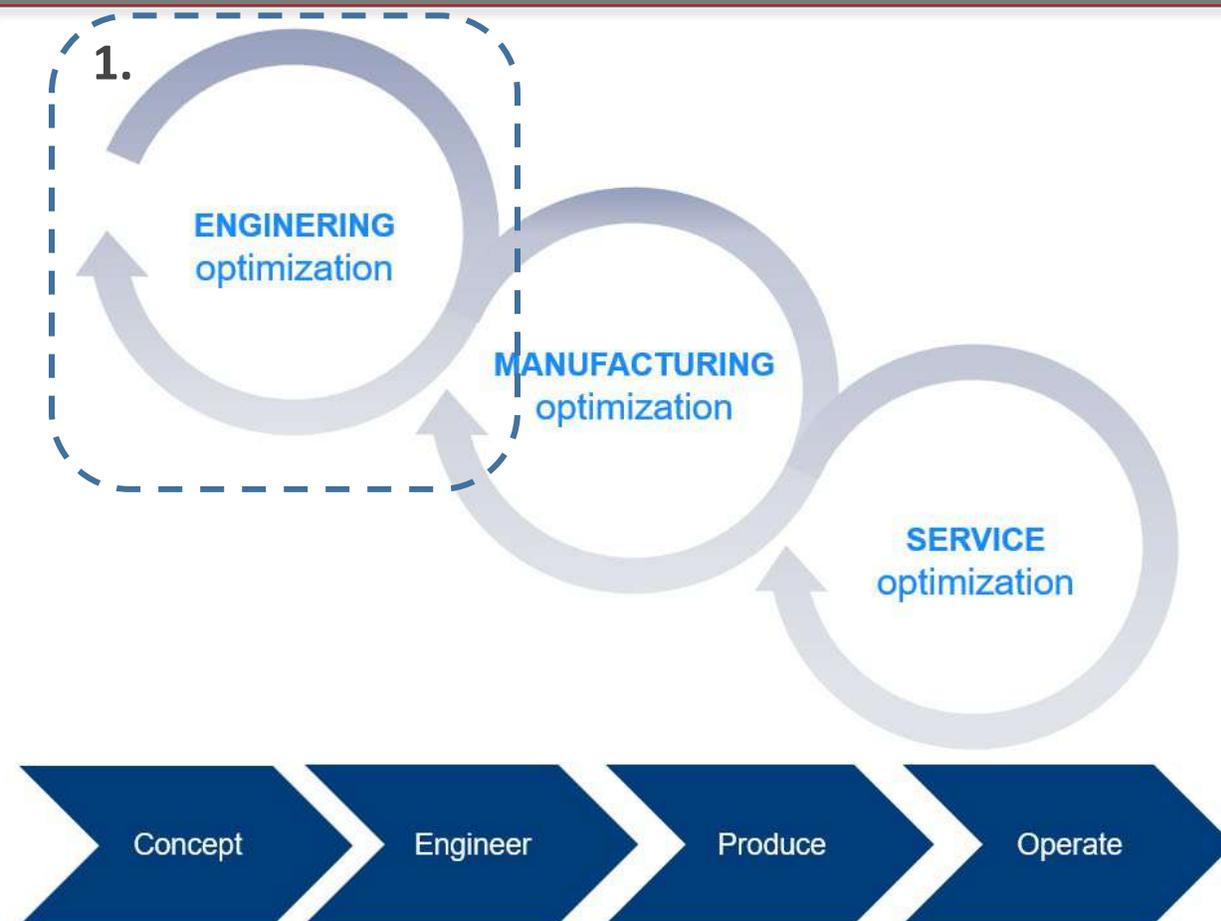
Applicazioni della simulazione di processo



Applicazioni della simulazione di processo

1. Simulazione per la fase di Progettazione

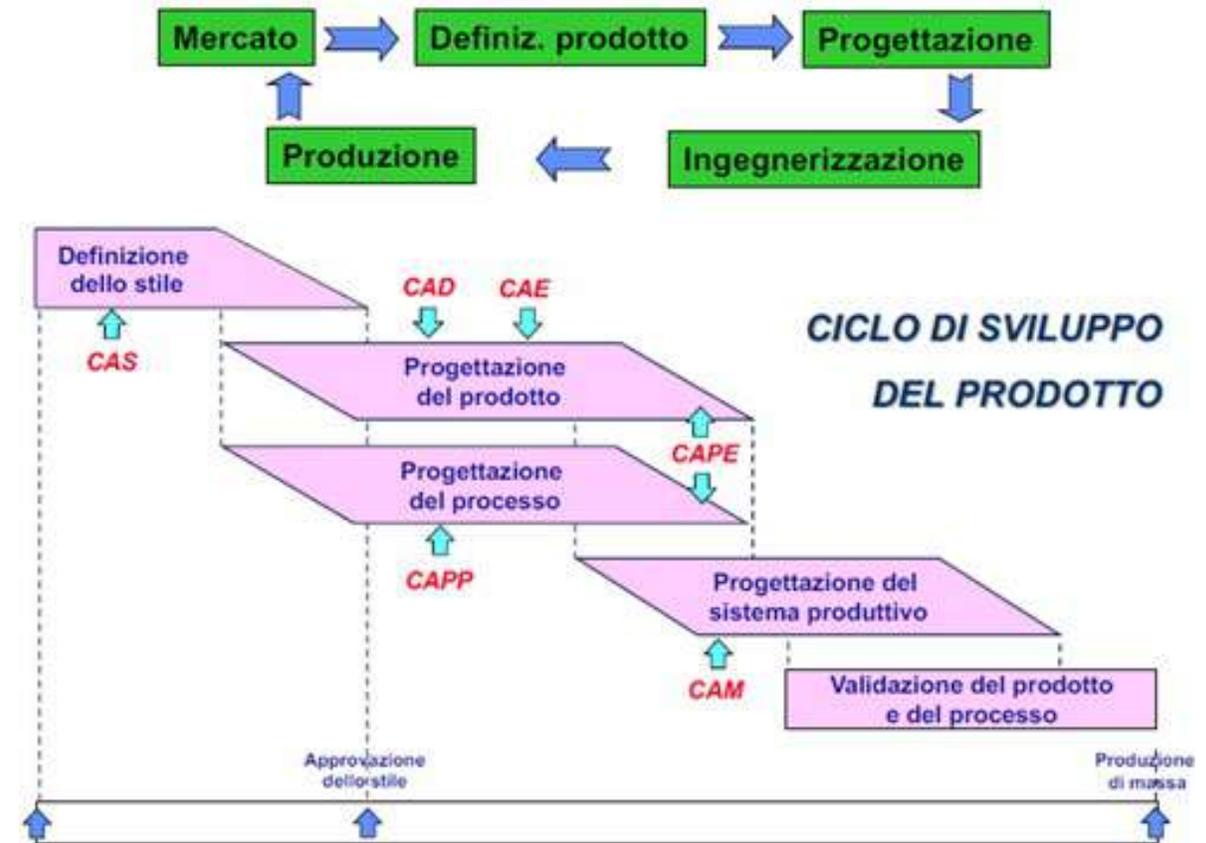
- > Sviluppo di modelli per coadiuvare la fase di progettazione di un componente o di un impianto.
- > Dall'analisi concettuale di diverse opzioni progettuali all'analisi di dettaglio dei componenti.
- > Applicazione di codici di processo e di codici per la simulazione termica, strutturale, fluidodinamica e chimica (FEM, CFD, Reactor Sim, etc.).
- > Elevata complessità modellistica e computazionale.
- > Necessità di una fase di validazione dell'approccio modellistico selezionato.



Simulazioni per la progettazione

1. Simulazione per la fase di Progettazione

- > Sviluppo di modelli per coadiuvare la fase di progettazione di un componente o di un impianto.
- > Dall'analisi concettuale di **diverse opzioni progettuali** all'analisi di dettaglio dei componenti.
- > Applicazione di codici di processo e di **codici per la simulazione termica, strutturale, fluidodinamica e chimica** (FEM, CFD, Reactor Sim, etc.).
- > Elevata complessità modellistica e computazionale.
- > Necessità di una fase di validazione dell'approccio modellistico selezionato.

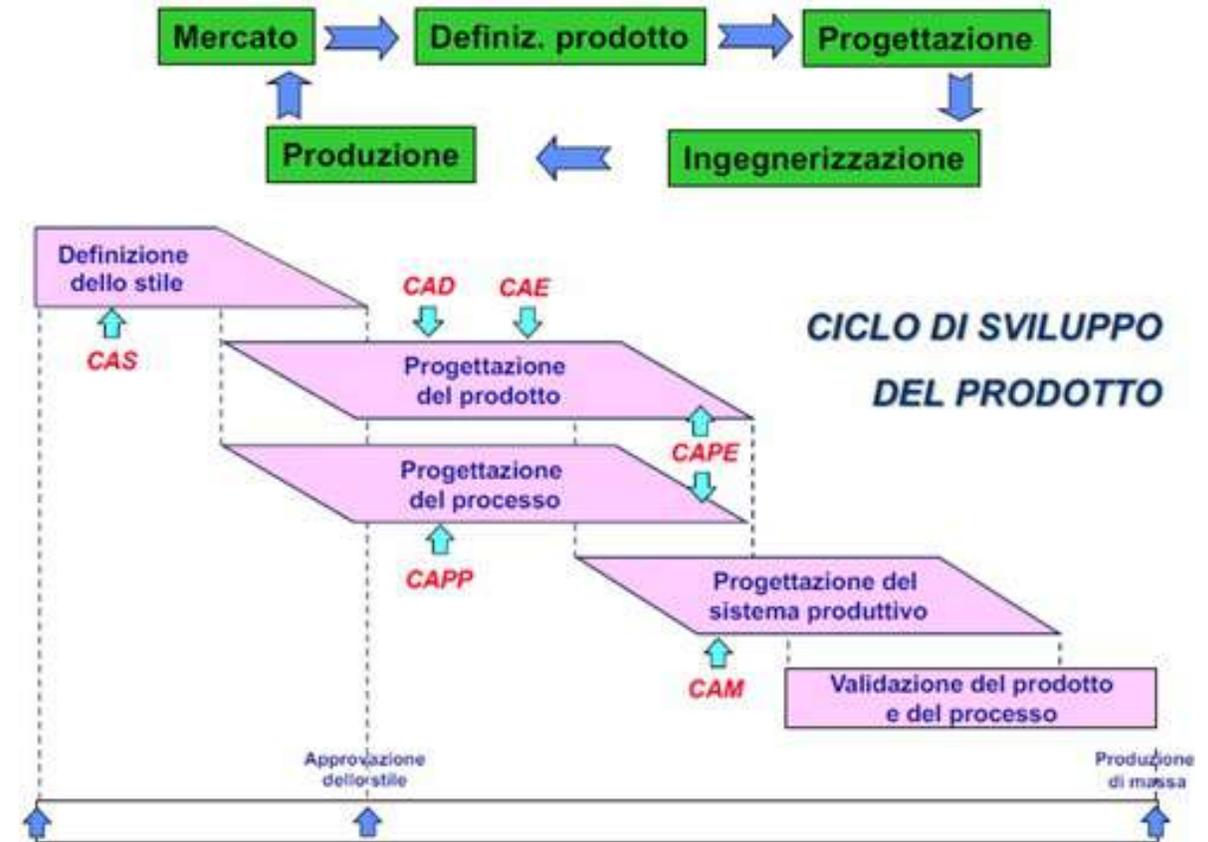


Simulazioni per la progettazione

1. Simulazione per la fase di Progettazione

- > Sviluppo di modelli per coadiuvare la fase di progettazione di un componente o di un impianto.
- > Dall'analisi concettuale di diverse opzioni progettuali all'analisi di dettaglio dei componenti.

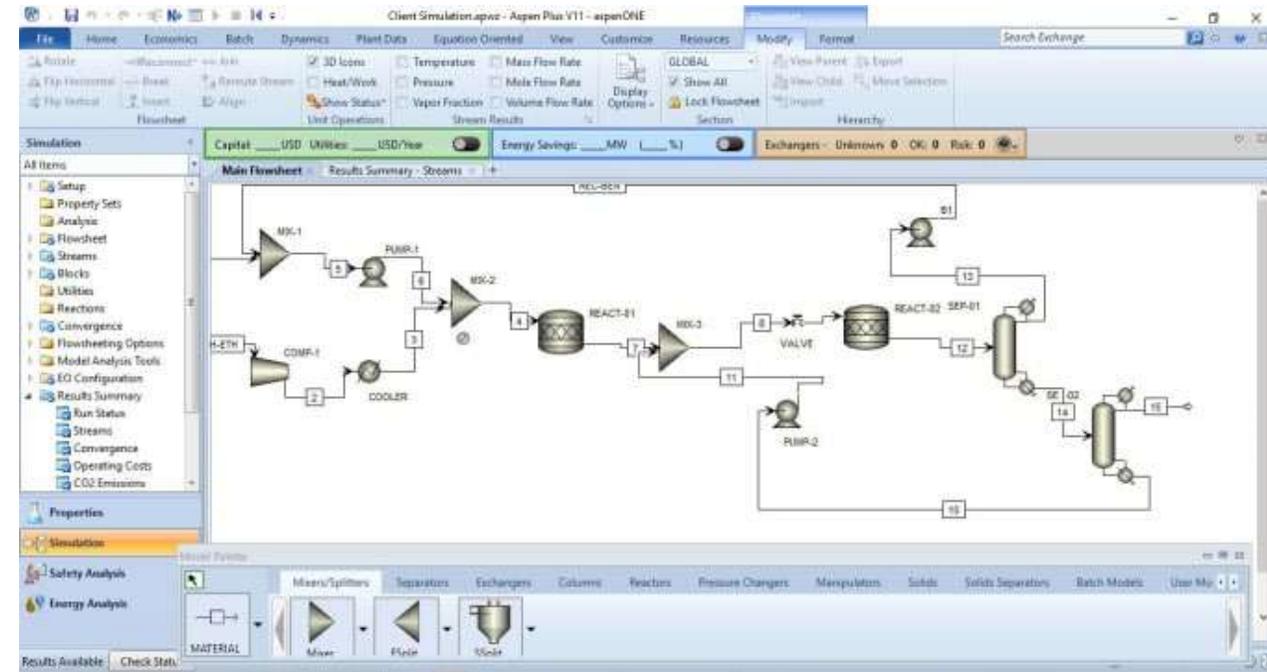
- **CAS**: Computer Aided Styling
- **CAD**: Computer Aided Design
- **CAE**: Computer Aided Engineering
- **CAPE**: Computer Aided Process Engineer
- **CAPP**: Computer Aided Process Planning
- **CAM**: Computer Aided Manufacturing



Simulazioni per la progettazione

1. Simulazione per la fase di Progettazione

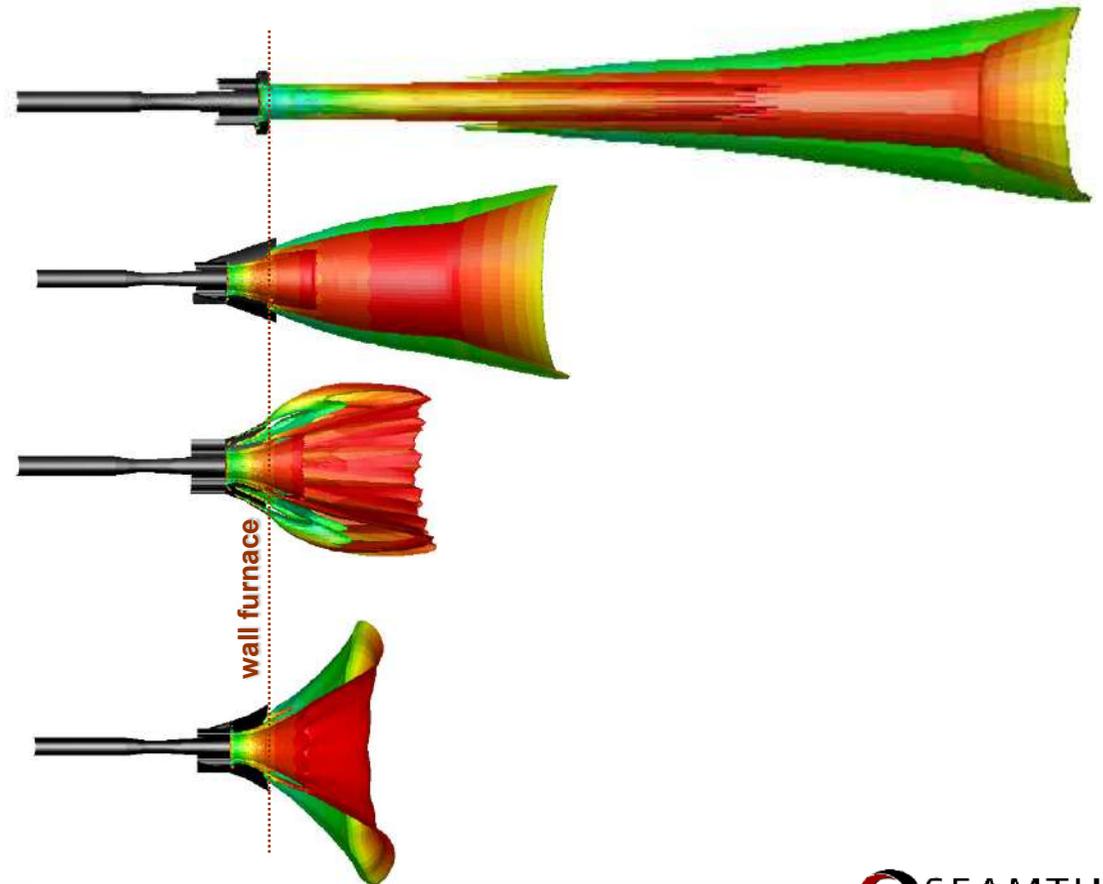
- > Sviluppo di modelli per coadiuvare la fase di progettazione di un componente o di un impianto.
- > Dall'analisi concettuale di diverse opzioni progettuali all'analisi di dettaglio dei componenti.
- > Applicazione di **codici di processo** e di codici per la simulazione termica, strutturale, fluidodinamica e chimica (FEM, CFD, Reactor Sim, etc.).
- > Elevata complessità modellistica e computazionale
- > Necessità di una fase di validazione dell'approccio modellistico selezionato



1. Simulazione per la fase di Progettazione

- > Sviluppo di modelli per coadiuvare la fase di progettazione di un componente o di un impianto.
- > Dall'analisi concettuale di diverse opzioni progettuali all'**analisi di dettaglio dei componenti**.
- > Applicazione di codici di processo e di **codici per la simulazione termica, strutturale, fluidodinamica e chimica** (FEM, CFD, Reactor Sim, etc.).
- > Elevata complessità modellistica e computazionale.
- > Necessità di una fase di validazione dell'approccio modellistico selezionato.

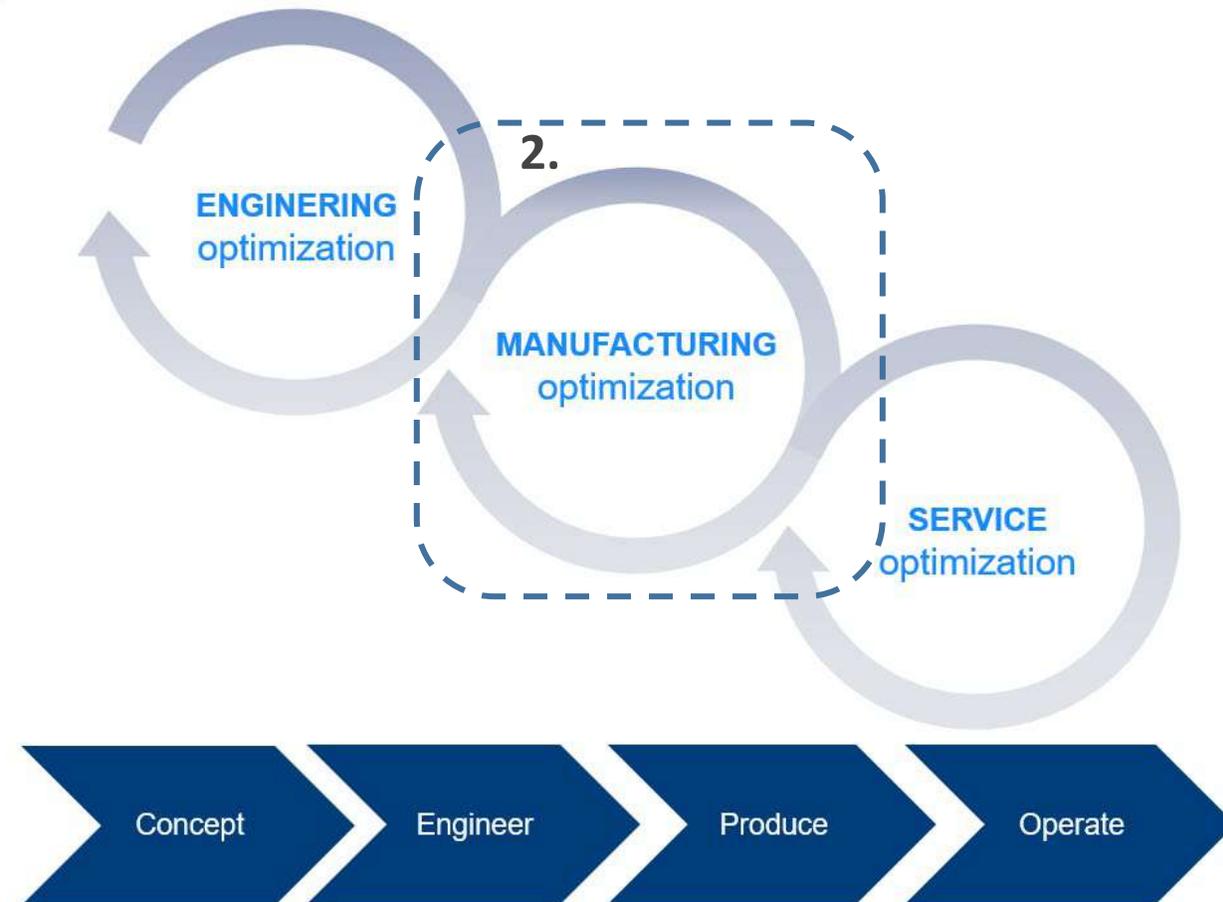
CFD: Temperature profiles plotted on a CO concentration iso - surface



Simulazioni per l'ottimizzazione della fase produttiva

2. Simulazione della fase produttiva

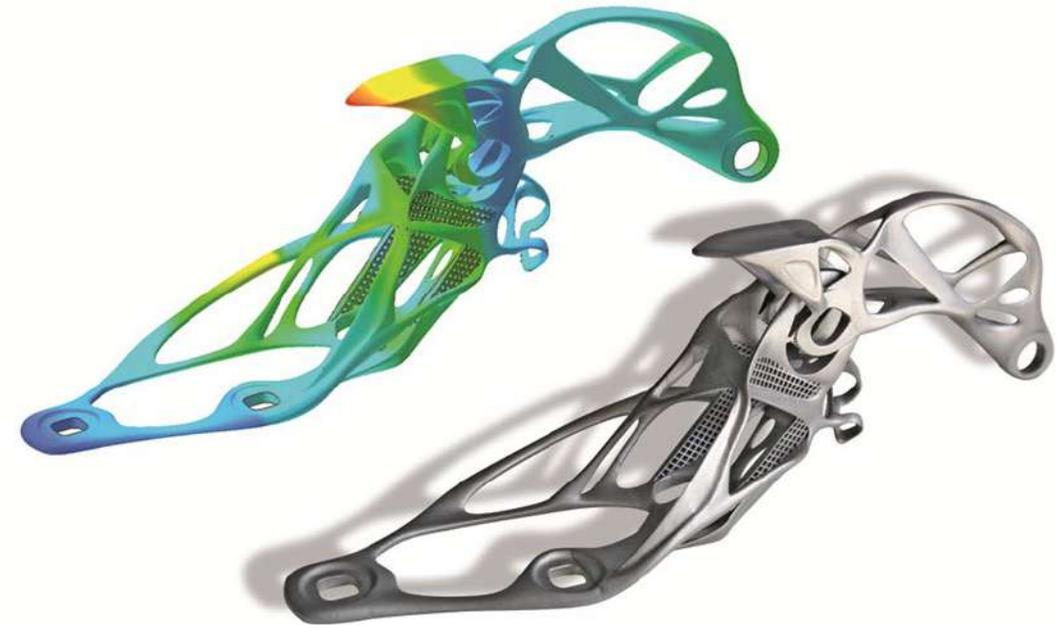
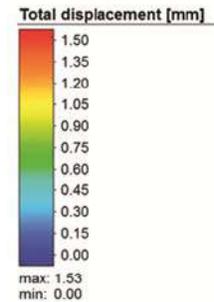
- > Sviluppo di modelli per studiare ed ottimizzare la produzione di un componente
- > Simulazione delle tecniche produttive come colaggio, forgiatura, stampaggio, manifattura additive, etc.
- > Applicazione di codici di specifici per il processo di interesse.
- > Necessaria un elevate accuratezza nella definizione delle pratiche operative (parametri di processo) da simulare
- > Possibilità di associare il modello a software di ottimizzazione parametrica



2. Simulazione della fase produttiva

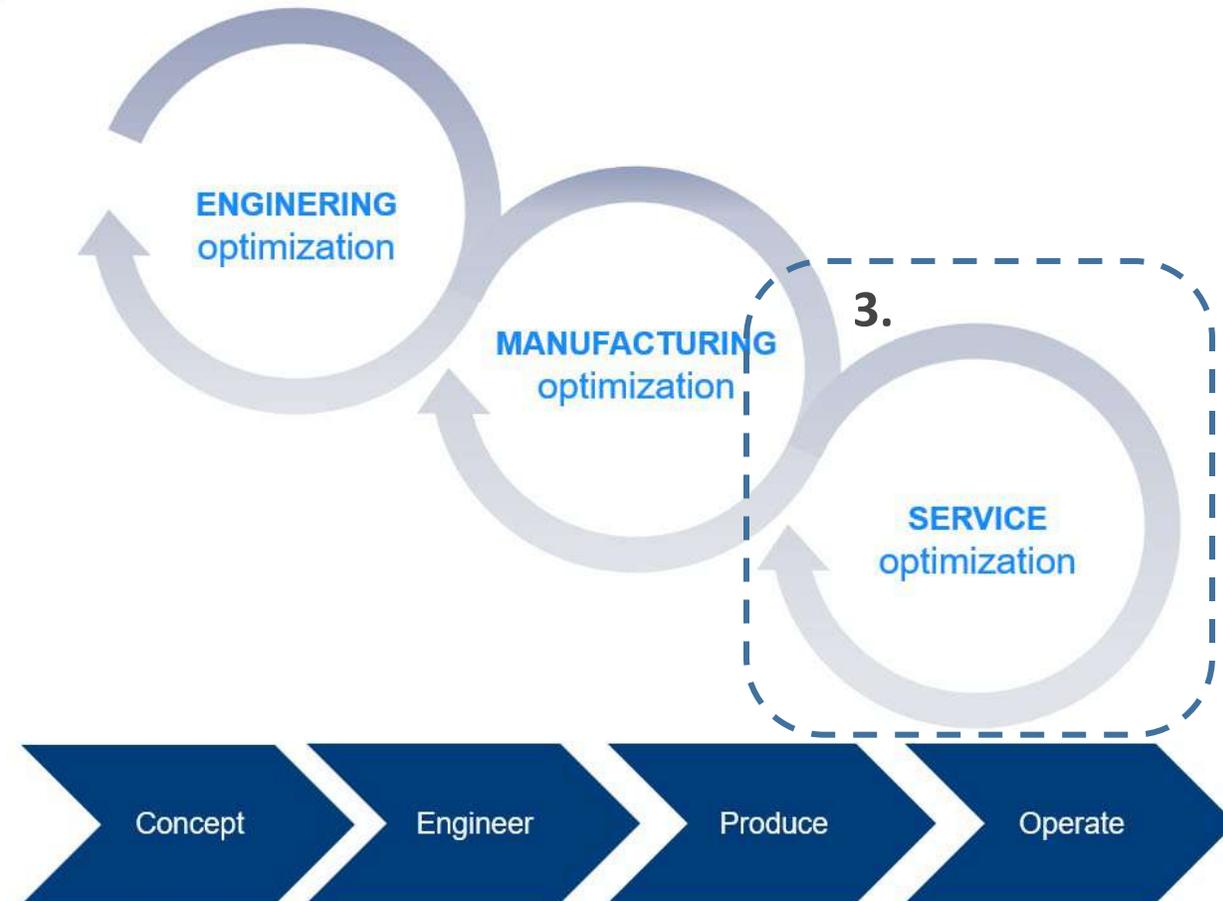
- > Sviluppo di modelli per studiare ed ottimizzare la produzione di un componente
- > Simulazione delle tecniche produttive come colaggio, forgiatura, stampaggio, **manifattura additiva**, etc.
- > **Applicazione di codici specifici per il processo di interesse.**
- > Necessaria un'elevata accuratezza nella definizione delle pratiche operative (parametri di processo) da simulare
- > Possibilità di associare il modello a software di ottimizzazione parametrica

Simulation of the Powder Bed Fusion process for Metals



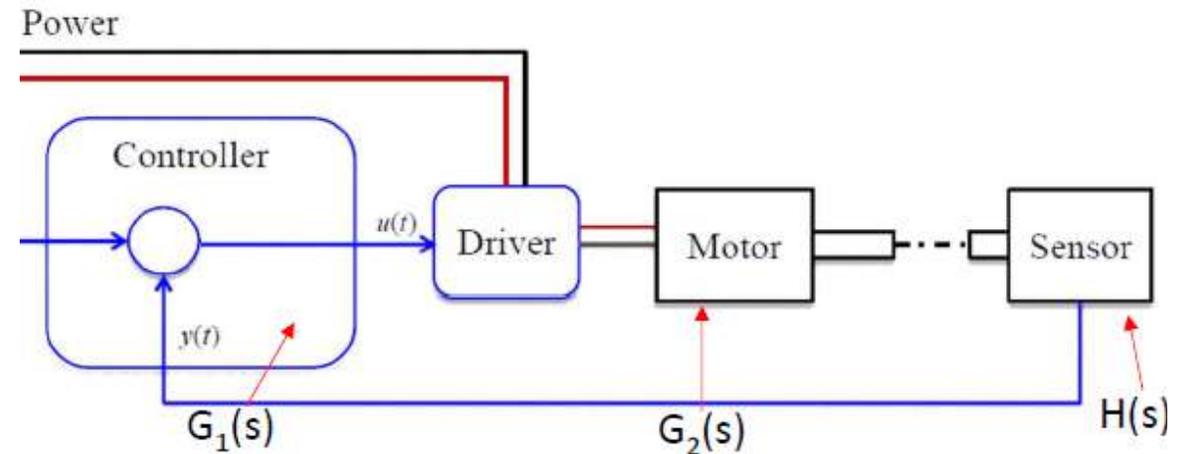
3. Simulazione per il controllo processo

- > Sviluppo di modelli da inserire nel sistema di controllo processo.
- > Di norma questi modelli sono sviluppati in linguaggi di base come C++, Matlab, Visual Basic.
- > La complessità del modello è legata al tempo di risposta richiesto dal sistema di controllo in cui va inserito.
- > Questi modelli si legano a modelli di Intelligenza Artificiale che elaborano in continuo i dati modellistici e i dati acquisiti dai sensori sull'impianto per un'ottimizzazione in continuo del processo.



3. Simulazione per il controllo processo

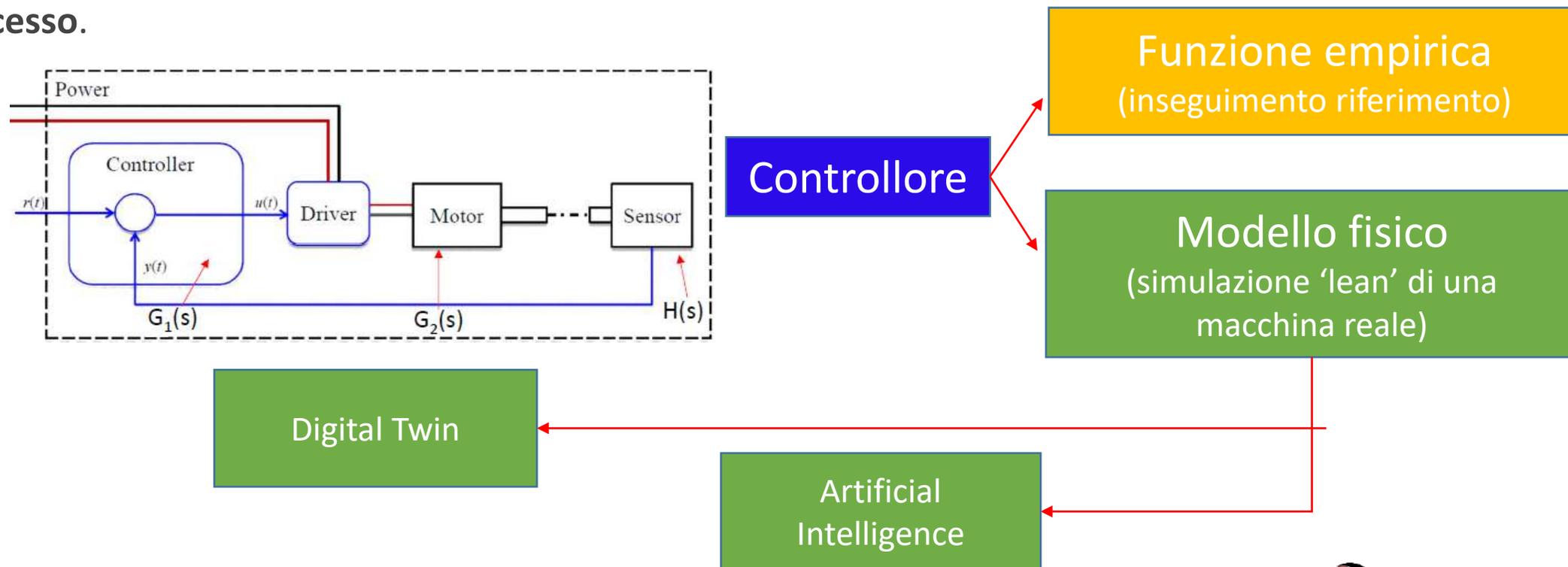
- > Sviluppo di modelli da inserire nel **sistema di controllo processo**.
- > Di norma questi modelli sono sviluppati in linguaggi di base come C++, Matlab, Visual Basic.
- > La complessità del modello è legata al tempo di risposta richiesto dal sistema di controllo in cui va inserito.
- > Questi modelli si legano a modelli di Intelligenza Artificiale che elaborano in continuo i dati modellistici e i dati acquisiti dai sensori sull'impianto per un'ottimizzazione in continuo del processo.



Livelli della simulazione di processo

3. Simulazione per il controllo processo

- > Sviluppo di modelli da inserire nel sistema di controllo processo.

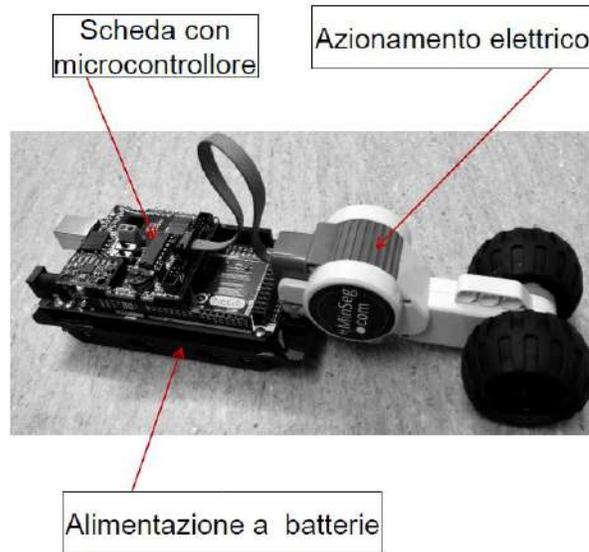
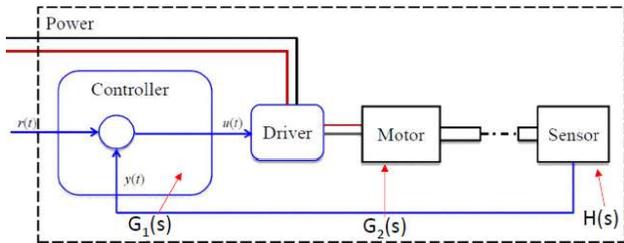


Livelli della simulazione di processo

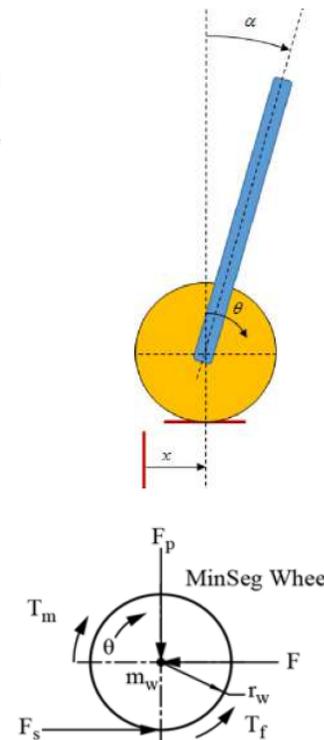
3. Simulazione per il controllo processo

> Sviluppo di modelli da inserire nel sistema di controllo processo.

Controllore



Il controllo consiste nell'azzerare l'angolo α , anche quando interviene una forza esterna.

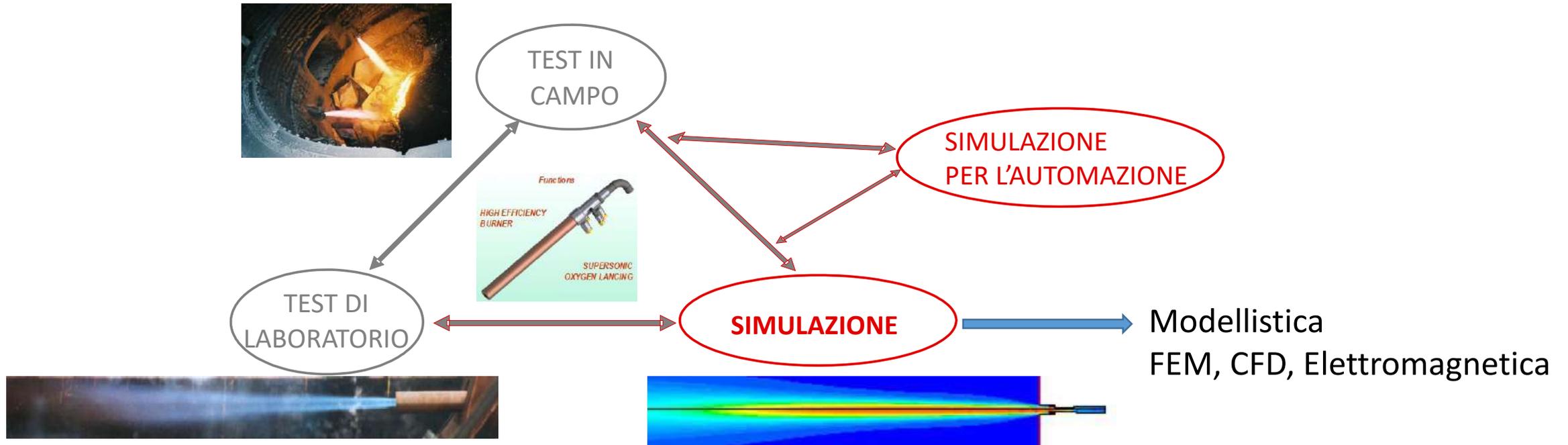


- F_p : Force from pendulum body on wheel
- T_m : Motor torque
- T_f : Friction torque proportional to motor angular velocity
- F : Horizontal force at motor shaft
- F_s : Reaction force between wheel and surface
- m_w : Mass of wheel
- r_w : Radius of wheel
- θ : Wheel angle, relative to inertial frame
- $I_{cm,w}$: Moment of inertia at center of mass of wheel

- Suite software contenenti una serie di codici applicative:
FEM / CFD / Chemical Reactor / Elettromag. / Additive Manufacturing / Parametric Optimization
Le principali sono prodotte da Siemens PLM, Hexagon MSC, ANSYS
- Le machine di calcolo comunemente utilizzate per le simulazioni di processo per la progettazione sono Workstation con 8-32 processori (configurazioni Desktop) con processori Intel Xeon.
L'utilizzo di un numero di processor >32 richiede architetture cluster con configurazioni complesse
I processori per i modelli inseriti in sistemi di automazione sono oggi inseriti nella macchina stessa e collegati in rete per la gestione in Cloud.

Linee di sviluppo per la simulazione di processo

- Design-centric workflow – already adopted in digital industry models
 - Ease of use and/or usability – applications should be friendly, for large numbers of users
 - Analysis and simulation of CAD – as part of modern digital processes
- The impact of the Web, Cloud, and mobile devices – opening access and communication facilities
 - Capturing and reuse of knowledge – by embedding digital data science models
 - Systems approach to combining heterogeneous models – multiphysics simulations
- Speed and model fidelity – improved by Cloud infinite computational power
 - Changes to licensing models – due to essential differences offered by Cloud subscription Software



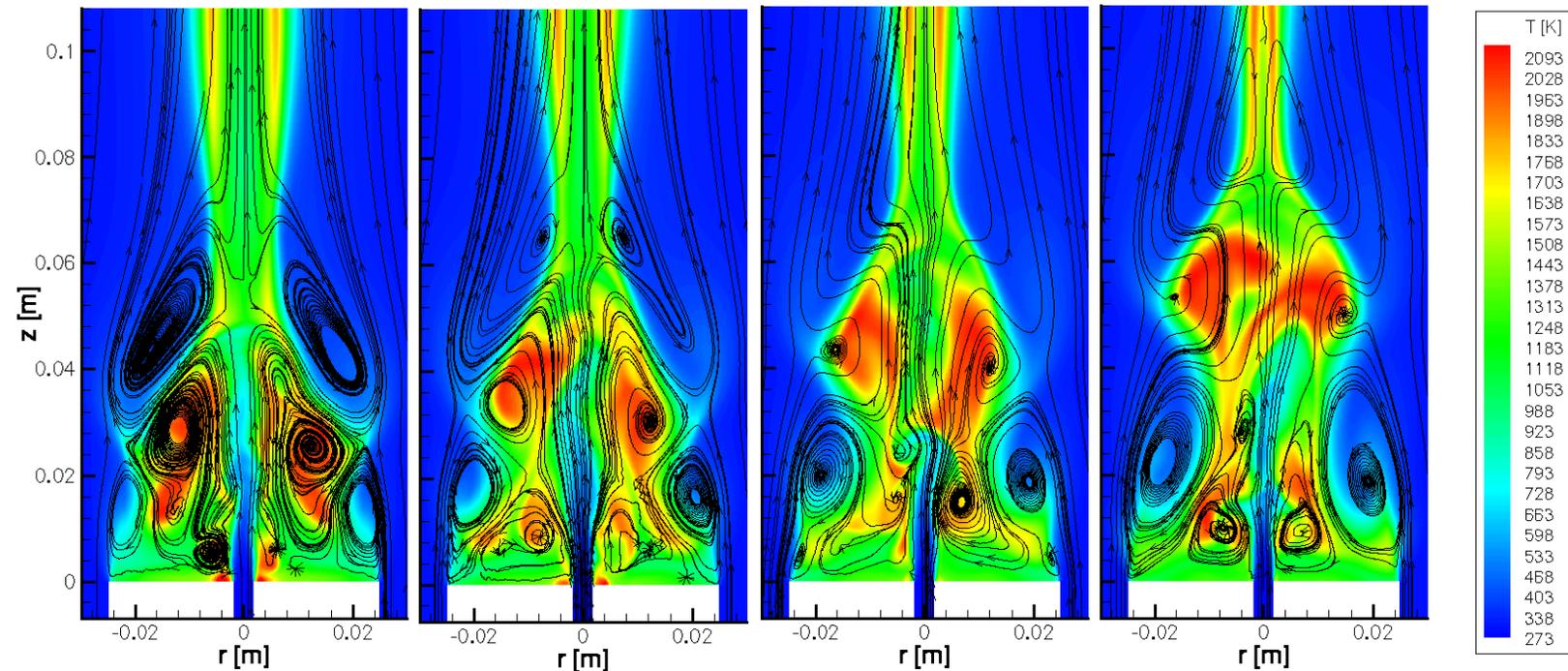
- per investigare l'applicabilità di tecnologie innovative
- per sviluppare nuovi prodotti/processi
- per il trasferimento tecnologico dalla R&S all'applicazione industriale

Modelli matematici per la termo-fluidodinamica

Il grande sviluppo dei modelli matematici per sistemi termofluidodinamici è legato alla sempre maggior disponibilità di risorse di calcolo.

Si utilizzano:

- Software ingegneristici
- codici commerciali CFD
- codici online

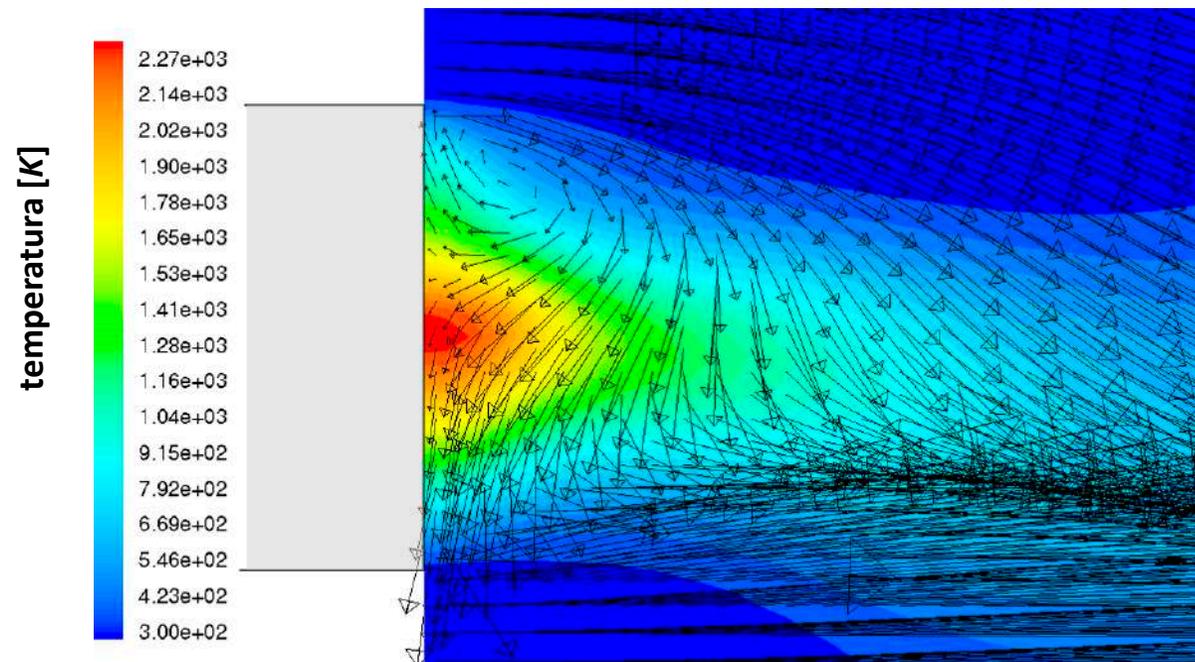


Simulazione CFD

La simulazione numerica, CFD (Computational Fluid Dynamics), risolve le equazioni di flusso suddividendo il dominio in celle elementari discrete (volumi finiti o elementi).

Si applica principalmente a flussi stazionari.

Simulazione RANS del campo di temperatura e dei vettori di velocità sovrapposti nel campo di temperatura vicino al bruciatore

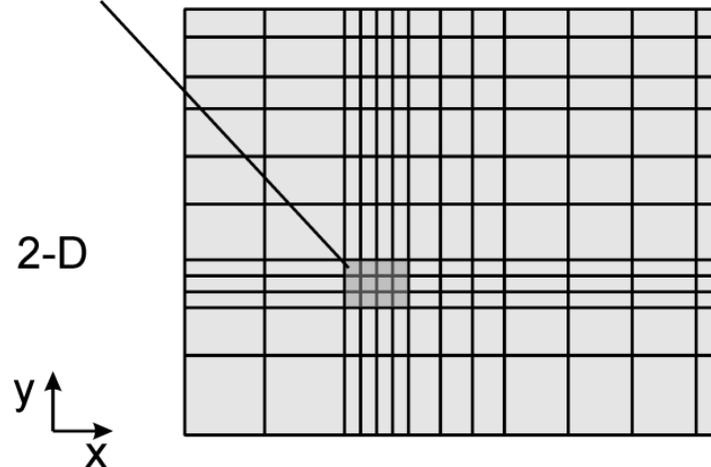


Flusso di lavoro con codici commerciali CFD

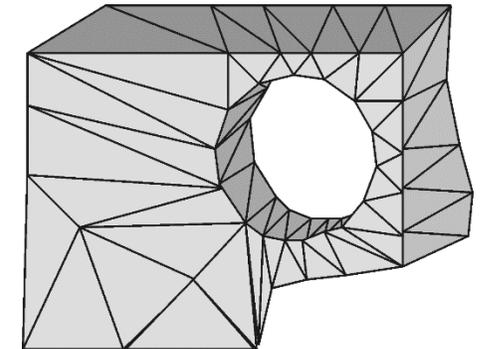
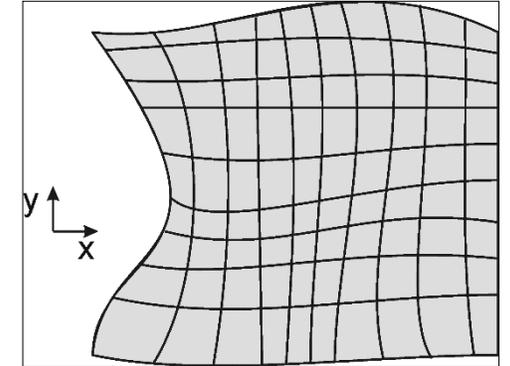
1. Setting dei dati in ingresso (pre-elaborazione)
2. Soluzione delle equazioni (solutore)
3. Presentazione dei risultati (post-elaborazione)

- 1.1 step: Scelta della meshatura
(esaedri, tetraedri, poliedri)

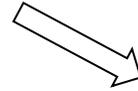
local grid refinement



Local grid refinement, body fitted coordinates, structured and unstructured grid....



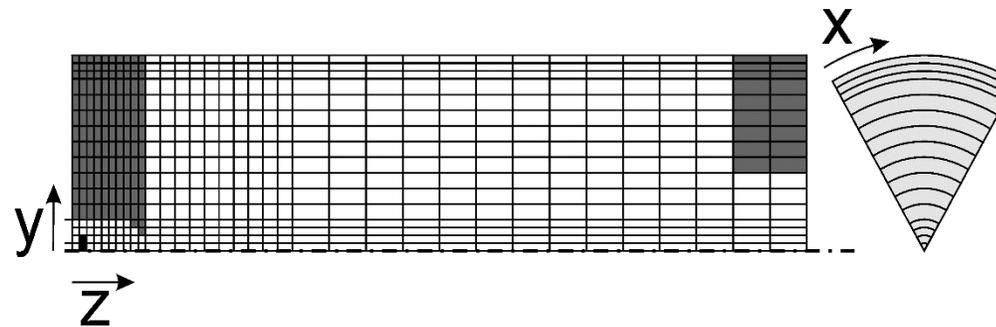
- Step 1.2: Condizioni al contorno (boundary conditions)



- Step 1.3: Modelli di turbolenza e combustione (submodels)

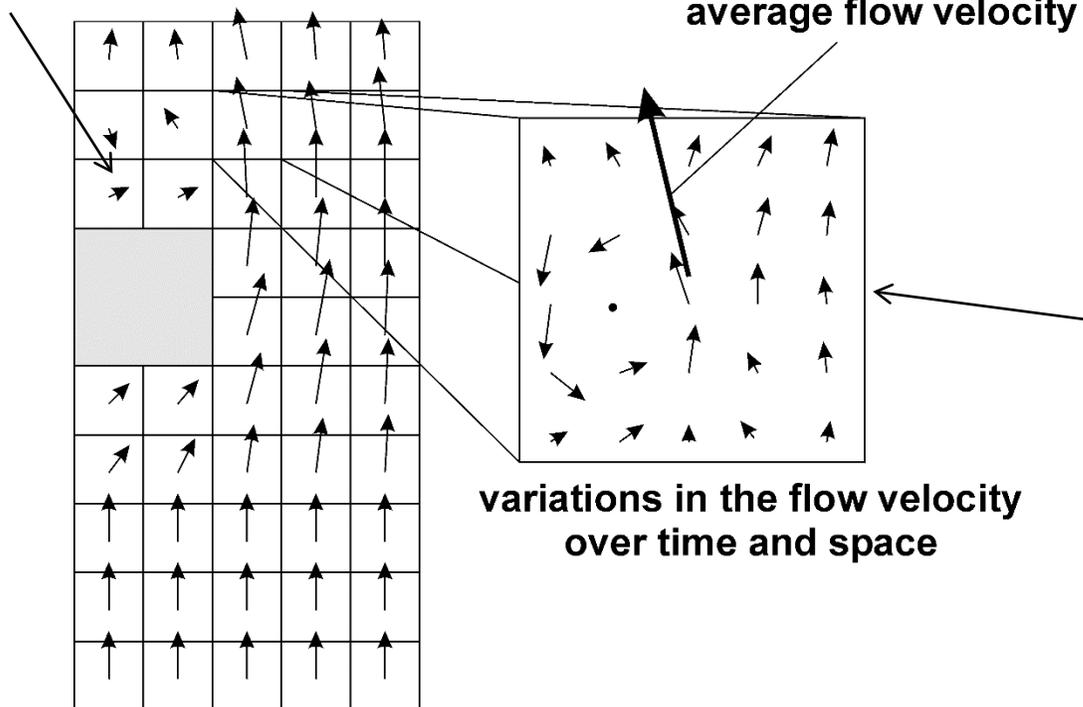
Boundary conditions

Condizioni al contorno non corrette possono generare risultati che trasmettano un'impressione realistica grazie alla somiglianza geometrica ma non si ha alcuna indicazione a priori che i risultati siano corretti o meno.



Punti critici della modellazione CFD

Main bubble captured



L'influenza della turbolenza locale sulla miscelazione non può essere trascurata.

Necessità di modelli di turbolenza

L'insorgenza di una zona con forte gradiente di pressione (fronte di fiamma) richiede elevata accuratezza per essere simulata

Equazioni di conservazione per la CFD (Navier-Stokes)

Massa

densità \rightarrow $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = S_m$ \leftarrow Sorgente di massa

Quantità
di moto

$\vec{\tau} = -\left(p + \frac{2}{3}\mu\nabla\vec{u}\right)I + \mu[\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T]$ \leftarrow Tensore degli sforzi fluido newtoniano

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla(\rho \vec{u} \vec{u} - \vec{\tau}) = S_u$ \leftarrow Forza esterna

Energia

Entalpia \rightarrow $\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho \vec{u} h) = \nabla\left(\frac{k}{c_p} \nabla h\right) + \frac{\partial p}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) p + (\vec{\tau} \nabla) \vec{u} + S_h$ \leftarrow Sorgente di energia

Conducibilità \rightarrow

Principali sottomodelli CFD

Sottomodelli richiesti dalla simulazione di un sistema termo-fluidodinamico

- Turbulence models
- Reaction models
- Radiation models

Quale modello scegliere deve essere definito dal processista sulla base della sua esperienza e delle caratteristiche di flusso previste. La scelta del modello di turbolenza e del modello di reazione influenza molto anche il tempo necessario al calcolo.

È fondamentale poter valutare criticamente l'accuratezza dei risultati. Alcuni modelli e i relativi parametri di modellazione possono produrre risultati molto precisi per alcune condizioni definite, ma possono essere completamente inadeguati per un altro caso di calcolo, perché descrivono il processo in modo incompleto o errato. Anche in questo caso la regola sostiene che è preferibile un modello più semplice e comprensibile.

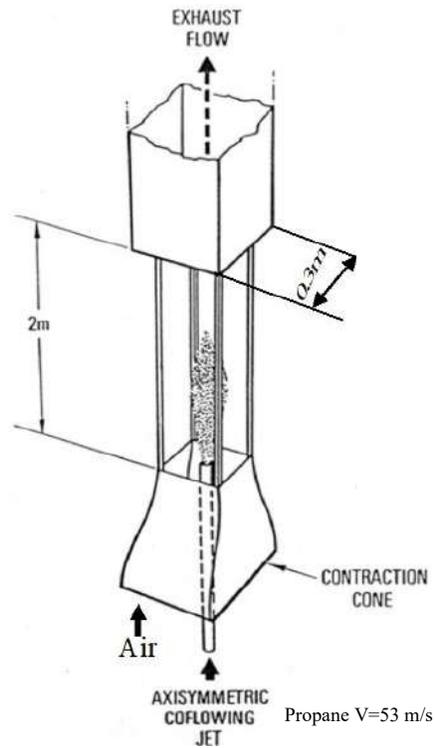
Modelli disponibili in codici CFD

	Multiphase Models		Moving Domain Models				Turbulence Models				Combustion Models				Other								
	Eulerian	VOF	Mixture	Discrete Phase	Sliding Mesh	Mixing Plane	Dynamic Mesh	Multiple Reference Frame	Single Reference Frame	Spalart-Allmaras	k-epsilon	k-omega	Reynolds Stress	LES	Laminar Finite Rate	Eddy Dissipation	Eddy Dissipation Concept	Non-Premixed	Premixed	Partially Premixed	Composition PDF Transport	NOx	Soot
Multiphase Models																							
Eulerian	-	-	-	-	y	n	y	y	y	n	y	n	y	n	y	y	n	n	n	n	n	n	n
VOF	-	-	-	-	y	n	y	y	y	y	y	y	y	n	y	y	n	n	n	n	n	n	n
Mixture	-	-	-	-	y	n	y	y	y	y	y	y	y	n	y	y	n	n	n	n	n	n	n
Discrete Phase	-	-	-	-	y	n	y	y	y	y	y	y	y	n	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Moving Domain Models																							
Sliding Mesh	y	y	y	y	-	-	-	-	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Mixing Plane	n	n	n	n	-	-	-	-	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Dynamic Mesh	y	y	y	y	-	-	-	-	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Multiple Reference Frame	y	y	y	y	-	-	-	-	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Single Reference Frame	y	y	y	y	-	-	-	-	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Turbulence Models																							
Spalart-Allmaras	n	y	y	y	y	y	y	y	y	-	-	-	-	-	y	n	n	n	n	n	n	n	n
k-epsilon	y	y	y	y	y	y	y	y	y	-	-	-	-	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y
k-omega	n	y	y	y	y	y	y	y	y	-	-	-	-	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Reynolds Stress	y	y	y	y	y	y	y	y	y	-	-	-	-	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y
LES	n	n	n	n	y	y	y	y	y	-	-	-	-	-	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Combustion Models																							
Laminar Finite Rate	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eddy Dissipation	y	y	y	y	y	y	y	y	y	n	y	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eddy Dissipation Concept	n	n	n	y	y	y	y	y	y	n	y	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Non-Premixed	n	n	n	y	y	y	y	y	y	n	y	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Premixed	n	n	n	y	y	y	y	y	y	n	y	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Partially Premixed	n	n	n	y	y	y	y	y	y	n	y	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Composition PDF Transport	n	n	n	y	y	y	y	y	y	n	y	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NOx	n	n	n	y	y	y	y	y	y	n	y	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Soot	n	n	n	y	y	y	y	y	y	n	y	y	y	y	-	-	-	-	-	-	-	-	-

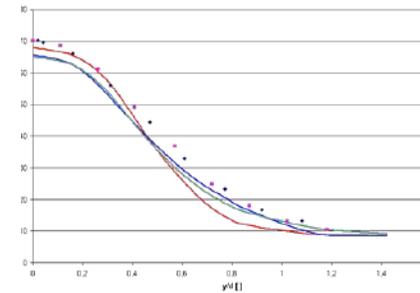
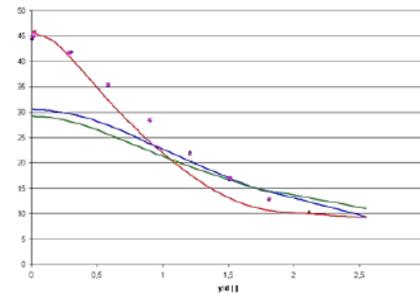
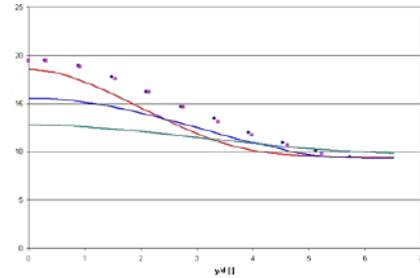
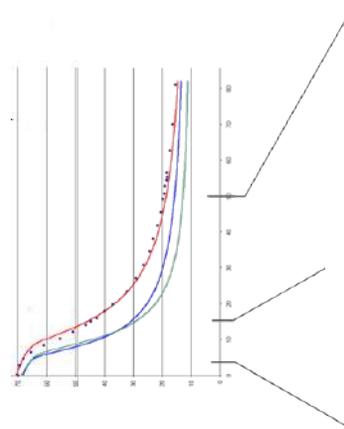
Key: n = not compatible y = compatible

CFD di un "semplice" getto coassiale

Sandia National Lab's test case

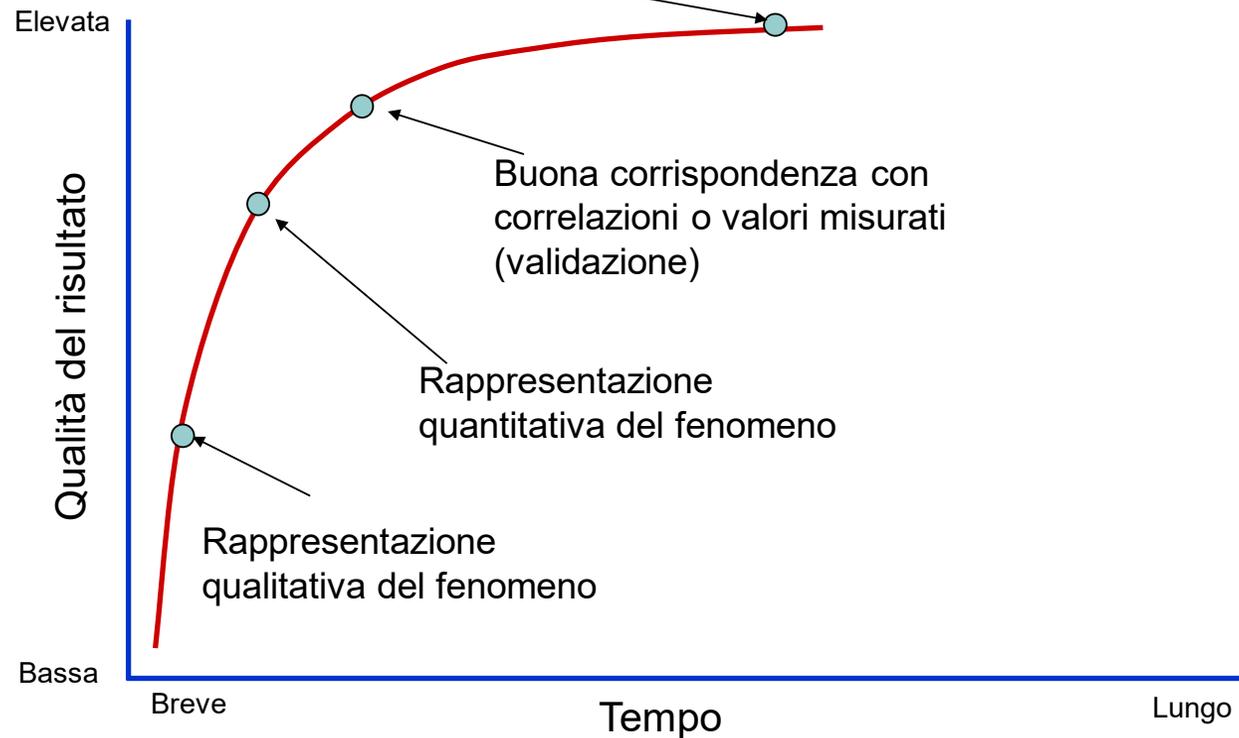


- experimental
- k- Ω Wilcox 98
- k- Ω Wilcox 88
- k- ϵ standard

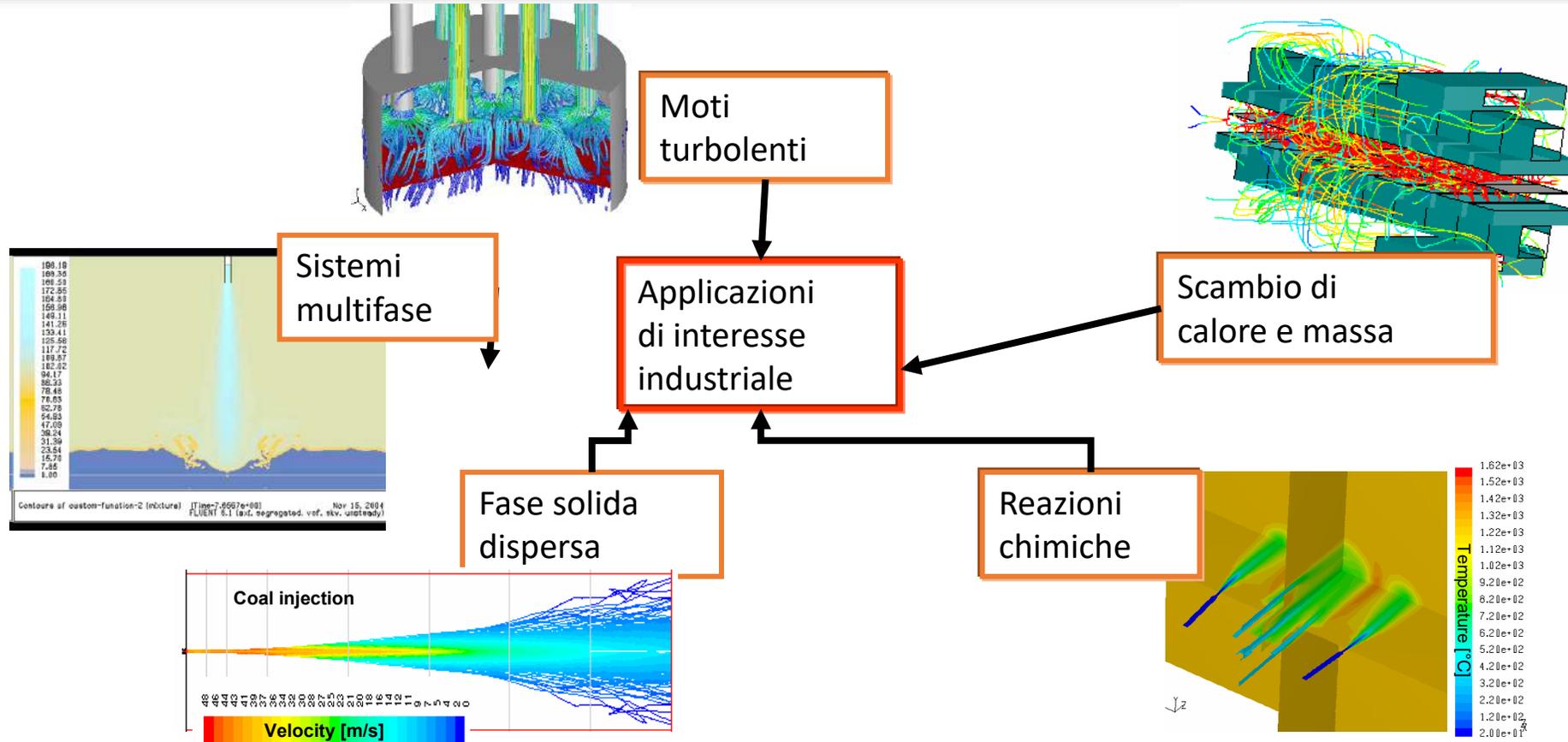


“Learning Curve” simulazioni CFD

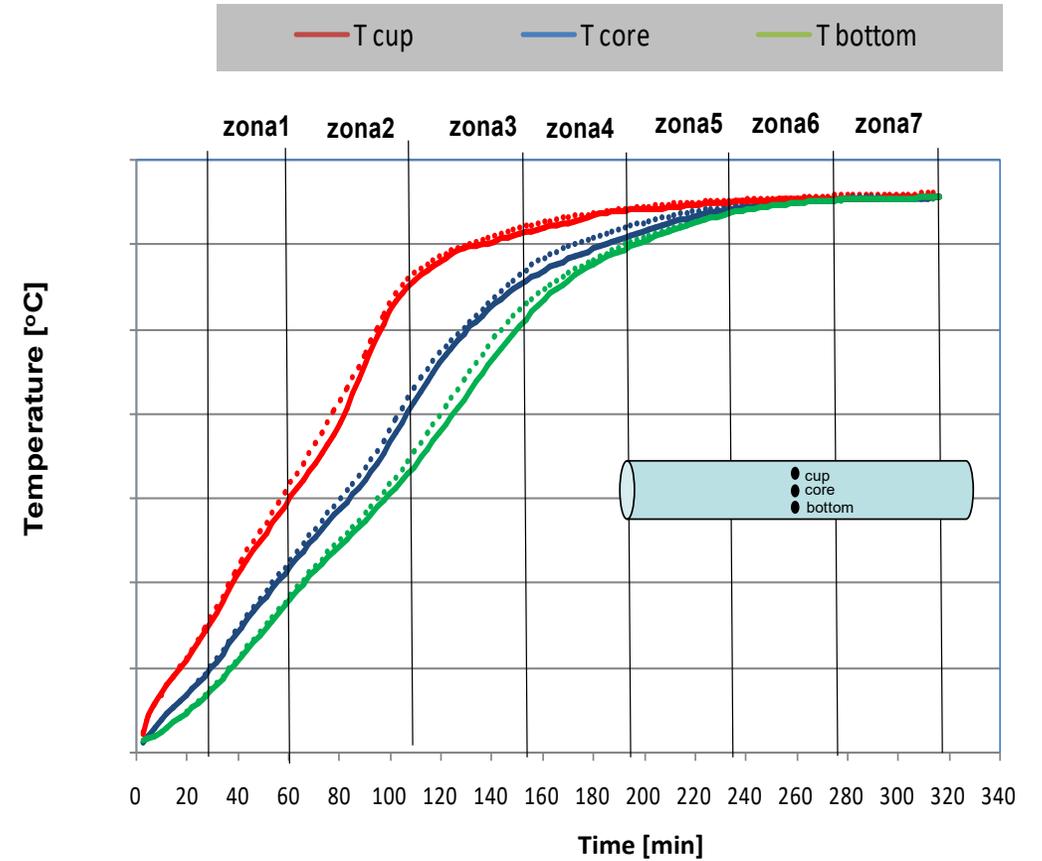
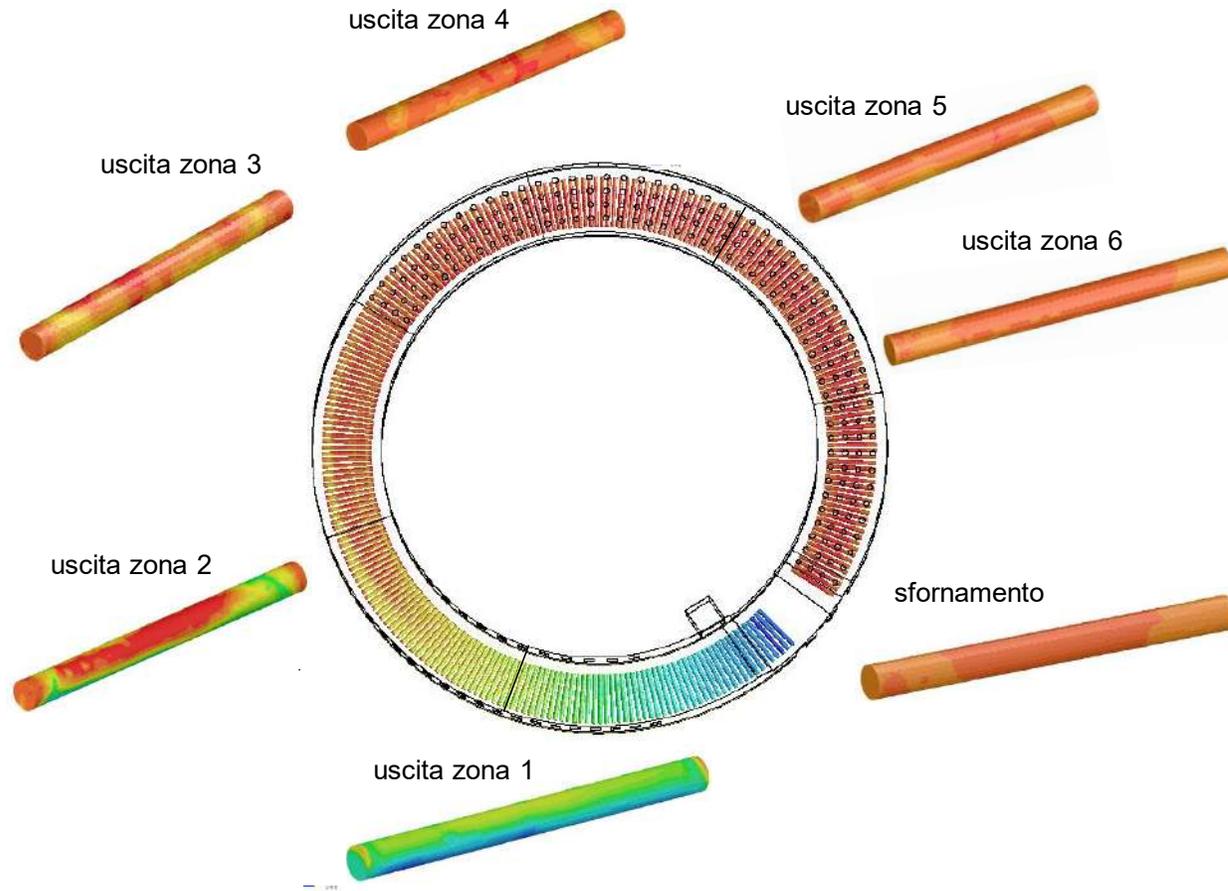
CFD come unico strumento di progetto
Necessità di risultati sperimentali di qualità:
spesso la simulazione detta le linee guida per il
miglioramento delle tecniche di misura -Elevati costi di sviluppo



Modellistica di sistemi complessi

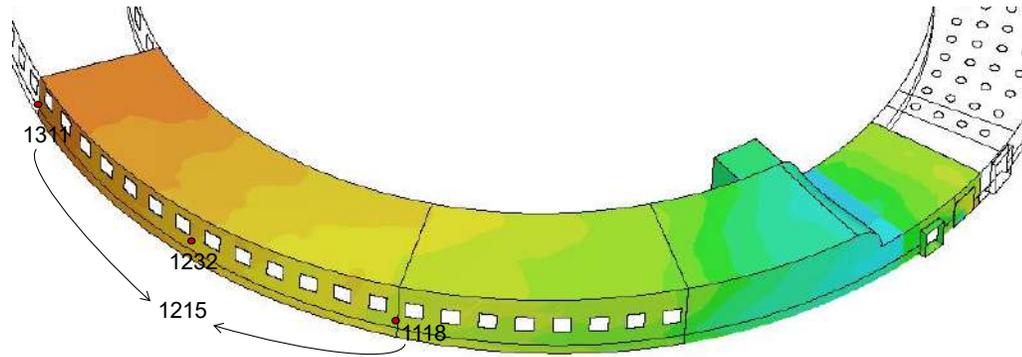


Calcolo prestazioni del forno rotativo

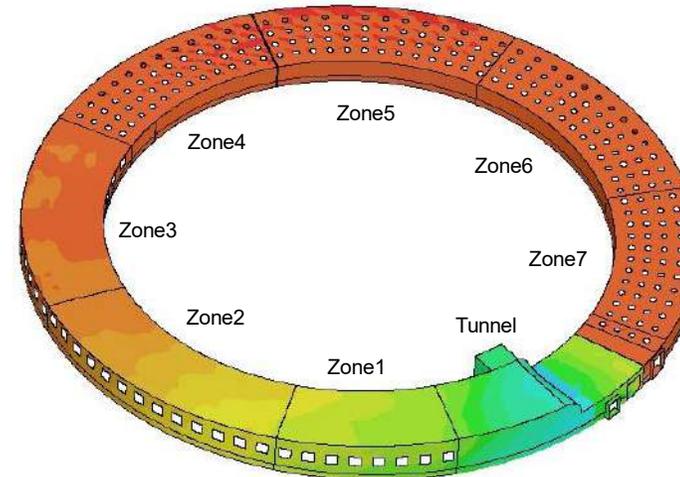


Studio del sistema di controllo del forno

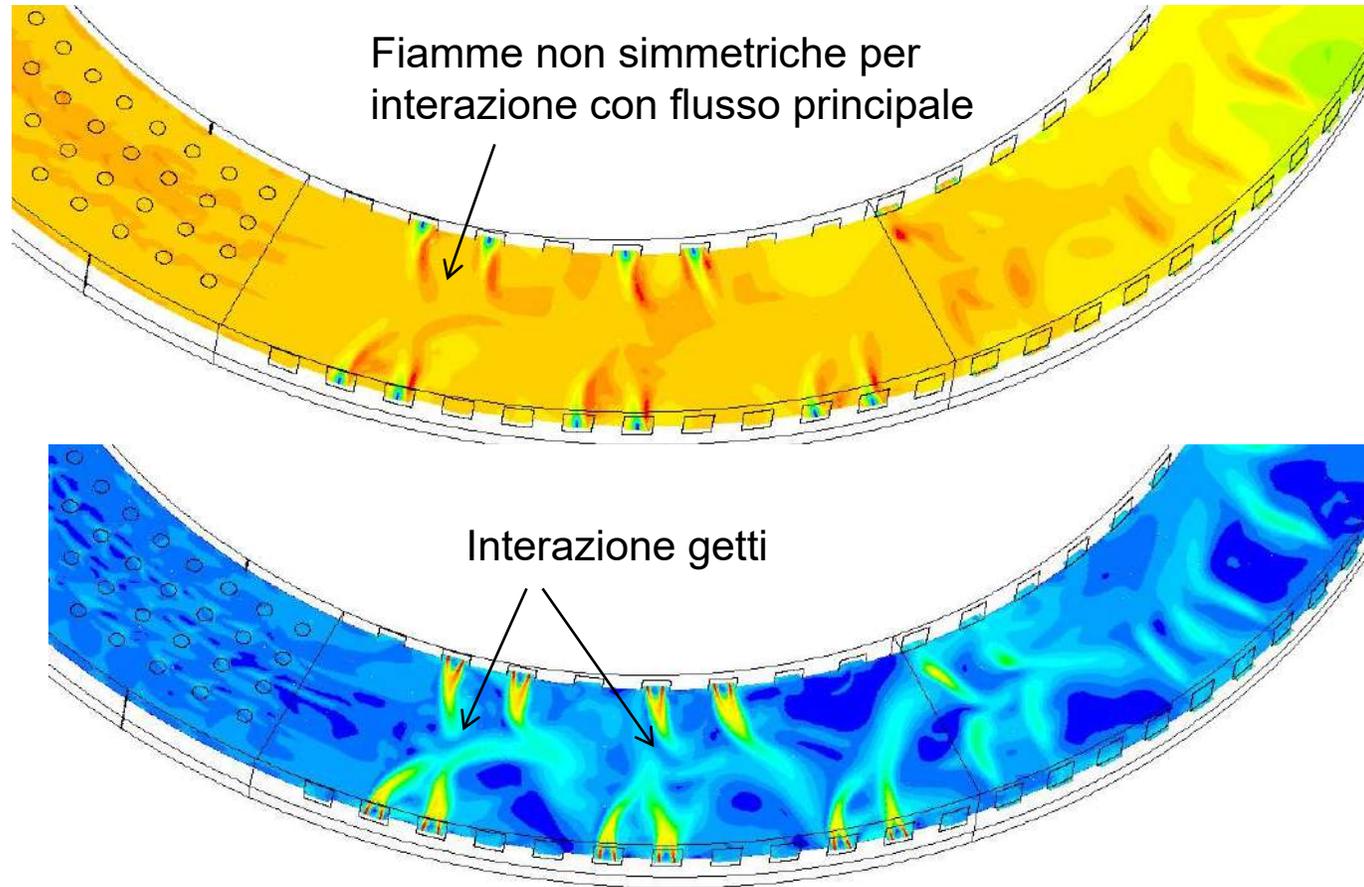
Posizionamento delle termocoppie di controllo



	T set	T measured	T avg. CFD
tunnel	-	-	941
zone 1	1045	1044	1078
zone 2	1225	1216	1218
zone 3	1310	1294	1325
zone 4	1330	1330	1346
zone 5	1330	1330	1348
zone 6	1320	1317	1337
zone 7	1305	1305	1329

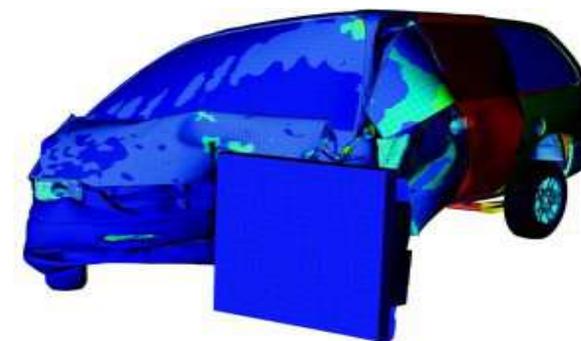


Studio dell'interazione dei bruciatori



Analisi FEM

Una simulazione FEM è un ‘banco di prova virtuale’: un **prototipo virtuale**, ovvero un **modello CAD**, viene testato col vantaggio della riduzione dei costi di sviluppo



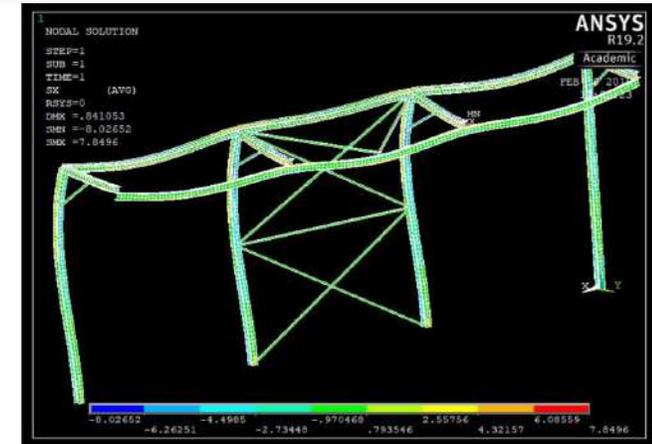
Analisi FEM

Simulazione FEM: **prototipazione virtuale.**

Metodo FEM: risoluzione equazioni differenziali non risolvibili analiticamente quando la geometria è complessa; è possibile trasformare queste equazioni differenziali in sistemi di equazioni algebriche.

Ciò avviene attraverso la creazione di una mesh la cui dimensione può essere variabile (in base all'accuratezza della soluzione).

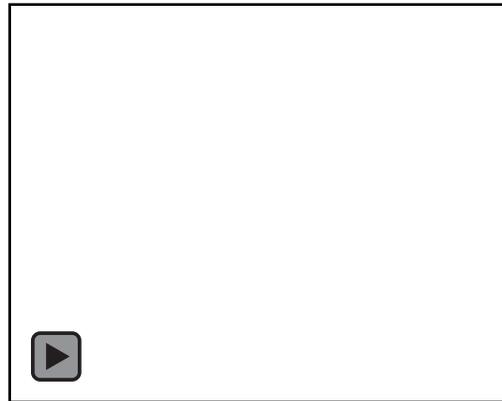
La mesh rappresenta il modello geometrico scomposto in tanti piccoli volumi (o facce, se l'analisi è bidimensionale) all'interno dei quali vengono calcolate le grandezze fisiche di interesse per una determinata analisi. Sommando le soluzioni su tutti gli elementi di questa griglia si completa l'analisi.



I vantaggi delle analisi FEM sono:

- Predizione accurata di fatica, stress, deformazioni, grandezze elettromagnetiche, termodinamiche, fluidodinamiche, ecc.
- riduzione costi, velocità di sviluppo, aumento di produttività ed efficienza
- Individuazione di eventuali punti critici o deboli, soggetti a possibile rottura

Esempio – Analisi FEM (strutturale&modale)



Le analisi FEM sono utilizzate, tra le varie cose, per:

- valutare il campo degli spostamenti, delle deformazioni e delle tensioni;
- eseguire analisi modali

In questo modo è possibile capire se la struttura che si sta analizzando lavora in condizioni troppo vicine (se non addirittura oltre) quelle critiche.

Le condizioni critiche si possono avere, per esempio, quando

$$\sigma \geq \sigma_{eq}$$

oppure quando

$$f_{sollecitazione} \approx f_{naturale}$$