



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria dell'informazione
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in ingegneria informatica

Relazione per la prova finale

«Algoritmi aperti e chiusi nella soluzione dei flussi di potenza»

Relatore: Prof. Roberto Benato

Laureanda: Irene Cian

Matricola n.: 2077495

ANNO ACCADEMICO 2025/2026



INTRODUZIONE

Dalla pianificazione all'osservazione continua

IERI - pianificazione

Il tempo di elaborazione è irrilevante rispetto ai tempi della decisione.

OGGI - osservazione continua

Il calcolo del regime diventa uno strumento di monitoraggio quasi in tempo reale.

Non più « qual è lo stato di questa rete », ma « qual è lo stato di questa rete adesso, e fra mezzo secondo »

Il solutore diventa un componente software

Invocabile

Riconfigurabile

Integrabile

La tesi sostenuta: l'accessibilità dell'algoritmo è il presupposto del calcolo in tempo reale.



Il calcolo del regime permanente

Formulazione classica

Nodi PQ P, Q

Nodi PV P, |U|

Nodo di saldo |U|, θ

Equazioni non lineari che si risolvono per via iterativa

Newton-Raphson

Standard industriale dal 1967

Convergenza quadratica

Jacobiana da ricostruire e fattorizzare a ogni iterazione

Oltre la sequenza diretta: Multiconductor Cell Analysis

La linea è schematizzata come cascata di celle:

nessun conduttore viene eliminato

$$\mathbf{i}_{\text{cell}} = \mathbf{Y}_{\text{cell}} \cdot \mathbf{u}_{\text{cell}}$$

matrice $2n \times 2n$



CAPITOLO 3

L'algoritmo PFPD

Laboratorio di Trasmissione dell'Energia Elettrica - Università di Padova

1

Nessuna derivata

un problema di teoria dei circuiti

2

Matrice all-inclusive

carichi e generatori come ammettenze di shunt

3

Nodo di saldo incluso

equivalente di Norton

4

Innesco ridotto

Incognite: solo le Q dei nodi PV

10^{-16} p.u.

PRECISIONE - il limite è l'aritmetica di macchina

~ 20

ITERAZIONI - iterazioni (Newton-Raphson: meno di 10)

5

RELAZIONI PER ITERAZIONE - nessuna jacobiana



Solutori chiusi e algoritmi aperti

Solutori chiusi

PSS/E · DigSILENT PowerFactory · NEPLAN

- Automazione: API Python, DPL, modalità batch
- Manca l'audit a livello di sorgente
- Riproducibilità vincolata a versione, licenza

Algoritmi aperti

MATPOWER · OpenDSS · pandapower

- Ogni operazione algebrica è ispezionabile
- Controllo preventivo sui dati
- Rete in memoria: si aggiornano solo gli ingressi

L'apertura è la condizione tecnica che rende un solutore inseribile in una catena di elaborazione continua.



CAPITOLO 4

Un caso occorso durante lo sviluppo

IL DATO

Progressiva 0 km

-> ammettenza infinita e matrice
singolare



PRIMA VERSIONE

500 m imposti d'ufficio

-> profilo traslato di 0,5 km



LA VERSIONE DEFINITIVA

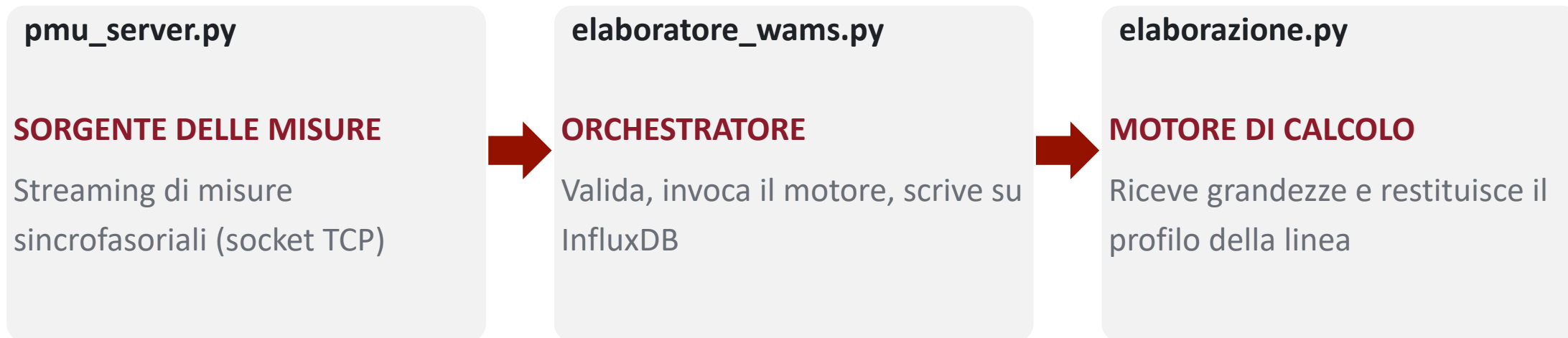
Errore esplicito all'avvio

-> configurazione corretta a
monte

«Un codice aperto non è immune da correzioni silenziose, è però l'unico in cui esse possano essere individuate e rimosse»



Il simulatore WAMS: architettura



Moduli indipendenti: la sorgente delle misure si sostituisce senza toccare il resto della catena



CAPITOLO 5

Chi genera le misure PMU?

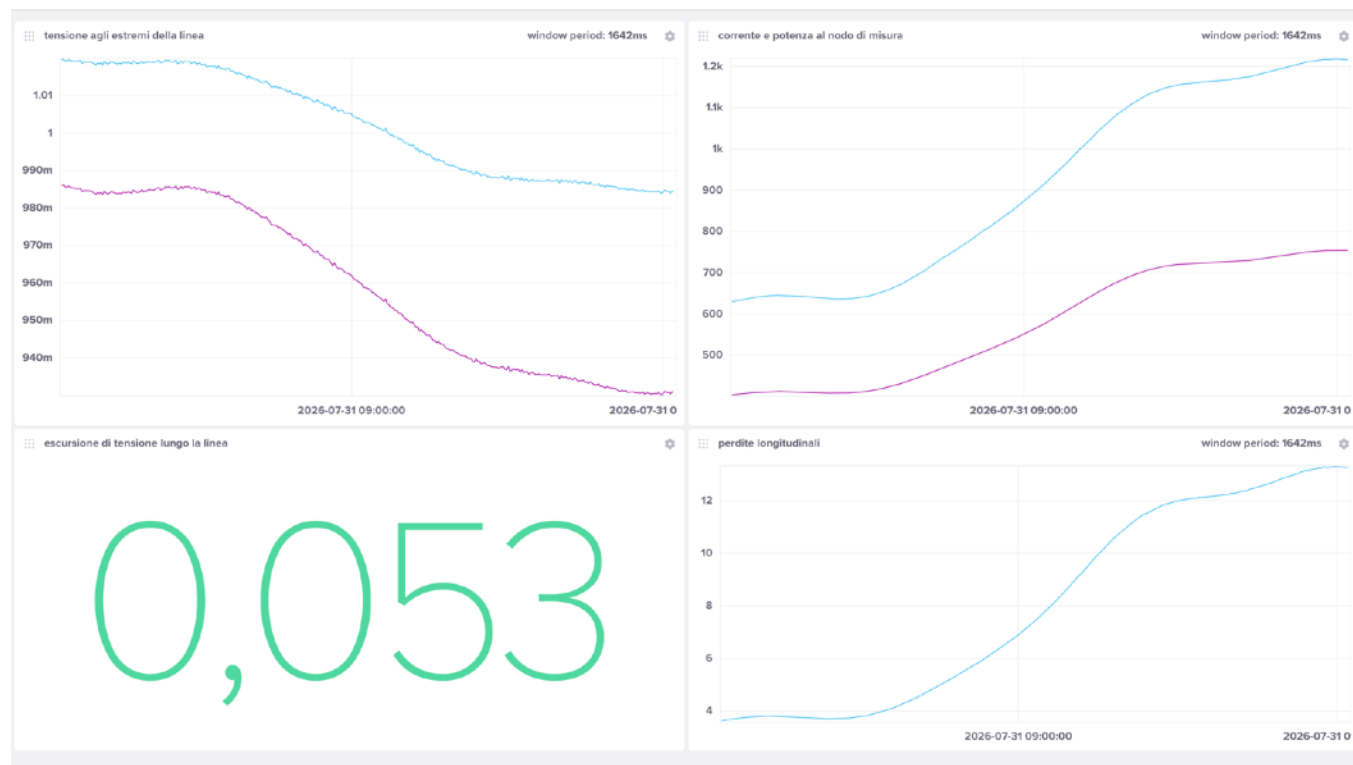
NEL PROTOTIPO

600 campioni, rampa di transito da 402 a 754 MW, cinque campioni non conformi inseriti apposta

IN ESERCIZIO

PMU installata in campo

Cambia la sorgente del flusso, non il resto della catena



Dashboard InfluxDB



Il motore di calcolo: non è un problema di power flow

Singola linea: nessun vincolo nodale

un biporta descritto dalle equazioni dei telegrafisti

2 costanti -> 2 condizioni al contorno

(U_0 , i_0) misurati dalla stessa PMU

Celle a π nominale

La logica della Multiconductor Cell Analysis MCA, ridotta al monofase equivalente. Per il passaggio al multiconduttore basta sostituire la relazione di cella.

Con la sola tensione di testa a 1 p.u.

tensione all'estremità opposta, linea di 100 km

Ipotesi al nodo di arrivo	tensione [p.u.]
estremità aperta	1,0056
carico 300 MVA	0,9727
carico 800 MVA	0,9426
carico 1200 MVA	0,9246

Otto punti percentuali di escursione a parità di dato acquisito. Il primo caso è l'effetto Ferranti.



CAPITOLO 5

Il regime lungo la linea

Il profilo scende lungo la linea e si abbassa al crescere del transito

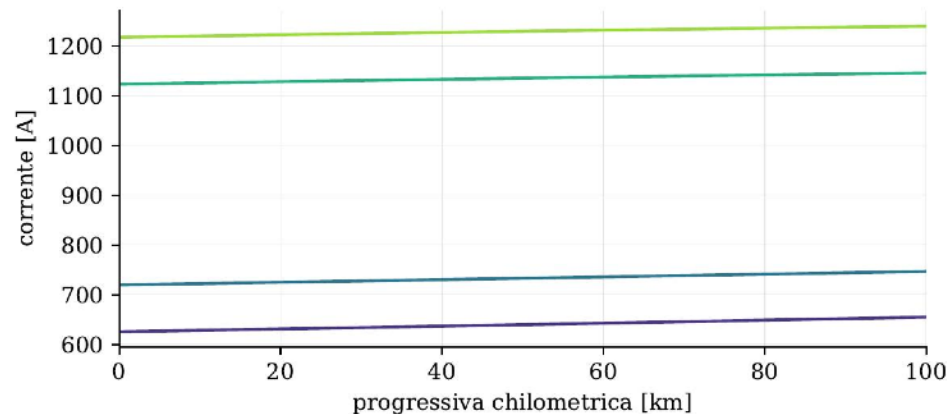
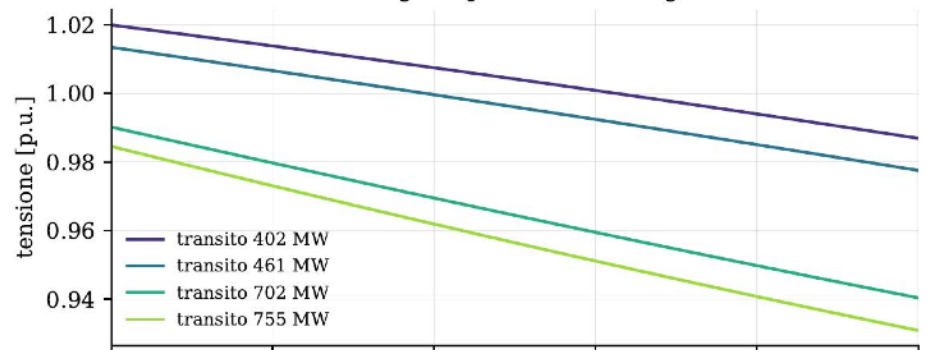
1,6 %

Scostamento dalla retta: è la firma del modello distribuito

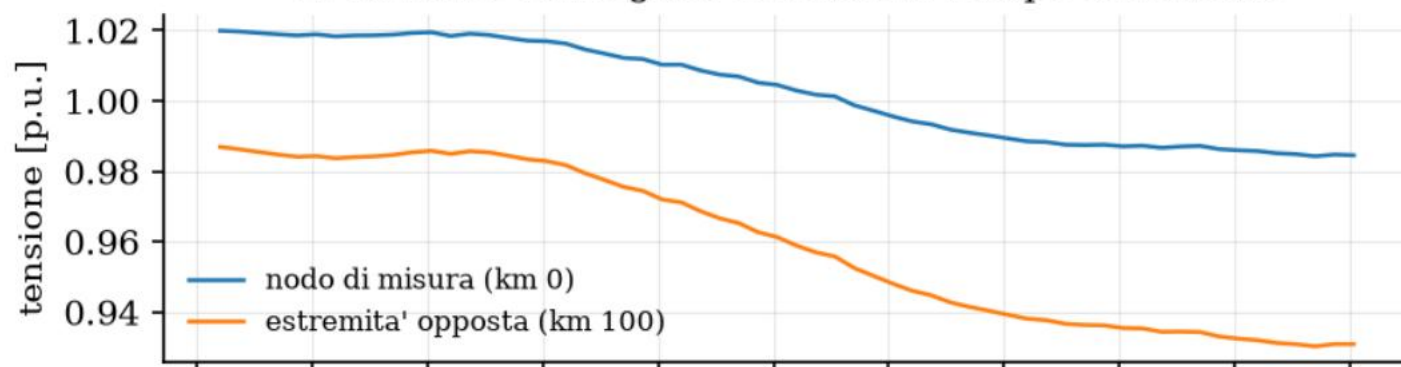
$\frac{3}{4}$

Della caduta dovuti alla potenza reattiva, non all'effetto Joule

Profilo del regime permanente lungo la linea



Evoluzione del regime durante la rampa di transito



Escursione fra gli estremi: da 0,033 a 0,053 p.u.



CAPITOLO 5

Validazione e prestazioni

10^{-8} p.u.

errore del modello di linea

vs

10^{-2} p.u.

incertezza ammessa sulla misura

Sei ordini di grandezza

L'accuratezza è limitata dalla qualità della misura fasoriale

8 / 8

CONTROLLI DI CONSISTENZA FISICA

Dipendenza quadratica delle perdite dalla corrente, $R^2 = 0,999999$

5 / 600

CAMPIONI SCARTATI

Esattamente quelli non conformi inseriti nell'archivio

15,8 ms

LATENZA MEDIANA END-TO-END

1,2 ms di calcolo e 14,5 ms di scrittura



CONCLUSIONI

Quattro risultati e le direzioni di sviluppo

L'algoritmo

Semplicità strutturale fino al limite di macchina.

L'apertura del codice

Condizione tecnica del tempo reale

Il problema, prima del programma

La prima versione del simulatore funzionava, ma il problema che risolveva era sottodeterminato

La gerarchia degli errori

Limitata dal dato e non dal metodo

SVILUPPI FUTURI

- seconda PMU che trasforma il problema in una stima dello stato
- un motore multiconduttore a cella di π nominale
- implementazione nativa del PFPD in Python
- il protocollo normato e la scrittura asincrona.

Grazie per l'attenzione