



Ricerca di Sistema elettrico

Tecniche per l'identificazione di instabilità di combustione

R.Camussi, E.Martellini, T.Pagliaroli, G.Troiani, C.Stringola, M.Terzitta

TECNICHE PER L'IDENTIFICAZIONE DI INSTABILITÀ DI COMBUSTIONE

R. Camussi ,
Università Roma Tre
E. Martellini, T. Pagliaroli,
Università Niccolò Cusano
G. Troiani, C. Stringola
ENEA C.R. Casaccia
M. Terzitta,
Università Roma Tre

Dicembre 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - Il annualità

Progetto: Tema 1.2 – Sistemi di accumulo, compresi power to gas, e relative interfacce con le reti

Work package: “Power to Gas” (P2G)

Linea di attività: Integrazione P2G e sistemi di generazione elettrica innovativi: fuel-flexibility – tecniche per l'identificazione di instabilità di combustione

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Work package: Eugenio Giacomazzi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione “Integrazione P2G e sistemi di generazione elettrica innovativi”

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Guido Troiani

Responsabile scientifico Università degli studi ROMA TRE: Prof. Roberto Camussi

1 Indice

-	SOMMARIO.....	4
2	INTRODUZIONE	4
3	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
3.1	INTRODUZIONE ALL'ANALISI DI RICORRENZA	6
3.1.1	<i>Svolgimento dell'Analisi</i>	6
3.2	APPLICAZIONE.....	9
3.2.1.1	<i>Ricostruzione dello spazio di fase</i>	9
3.2.1.2	<i>Average Mutual Information (AMI)</i>	9
3.2.1.3	<i>Averaged False Nearest Neighbor (AFNN)</i>	9
3.2.1.4	<i>Recurrence Plots</i>	10
3.2.1.5	<i>Recurrence quantification analysis</i>	10
3.3	IL CODICE LABVIEW	11
3.3.1	<i>SubVI Resample</i>	12
3.3.2	<i>SubVI Tau - Ricerca tempo correlazione</i>	12
3.3.3	<i>SubVI Generazione spazio delle fasi</i>	13
3.3.4	<i>SubVI 1st_NN</i>	13
3.3.5	<i>AFNN SubVI</i>	13
3.3.6	<i>Diagonals SubVI</i>	14
3.3.7	<i>Diagonal IP(I) SubVI</i>	14
3.3.8	<i>Interfaccia del software</i>	14
3.3.9	<i>Codice a blocchi</i>	15
3.3.9.1	<i>Primo Test</i>	16
3.3.9.2	<i>Secondo test</i>	18
3.3.9.3	<i>Altri test</i>	19
3.3.9.4	<i>Validazione indicatori caotici</i>	20
3.4	INTERFACCIA GENERALE DEL SOFTWARE	22
3.5	APPLICAZIONE DEL SOFTWARE A DATI SPERIMENTALI	23
4	CONCLUSIONI.....	26
5	BIBLIOGRAFIA.....	27

- Sommario

I bruciatori durante il loro funzionamento generano rumori dovuti alla combustione (ROAR) simili a quelli di un phone. Questo tipo di rumore è del tutto simile ad un rumore bianco distribuito su tutte le frequenze. In alcuni casi l'energia prodotta dalla combustione, in particolare nella fase di espansione, si concentra in un range di frequenze ridotto accoppiandosi con le fluttuazioni di pressione fino a raggiungere la risonanza e generando quella che è chiamata instabilità termoacustica. Quando questo fenomeno si verifica possono essere generate vibrazioni, un fischio e oscillazioni autoeccitate che possono provocare danni o stressare la combustione che risulterà non ottimale, il che comporta in genere rilascio di inquinanti o spegnimenti localizzati. Generalmente i grandi bruciatori sono progettati per non subire instabilità termoacustica se funzionanti in determinati range e con determinati combustibili ma al giorno d'oggi, non essendo più utilizzato un combustibile unico, i bruciatori devono lavorare con vari combustibili (syngas, metano, idrogeno, ecc.) a vari regimi di funzionamento e questo genera più frequentemente instabilità termoacustica. Per affrontare il fenomeno è stato progettato lo "Slot Burner" ovvero un bruciatore caratterizzato da una geometria semplice ma che sia rappresentativo del fenomeno, ovvero che sia affetto da instabilità termoacustica. Grazie a studi di analisi caotica, che evidenziano lo stato di instabilità o di combustione controllata, sono stati ricavati dei precursori di instabilità (indicatori) che avvertono dell'avvenimento del fenomeno con un leggero anticipo (millisecondi). A seguito di risultati convincenti per un bruciatore alimentato a metano nuovi studi sono volti alla ricerca di nuovi metodi per prevedere e contrastare l'instabilità termoacustica e alla gestione della stessa nel caso di un combustibile contenente anche idrogeno, il quale ha solitamente un effetto destabilizzante sulla combustione. Per valutare il bruciatore con l'introduzione di idrogeno si prevede di introdurre una quantità sempre crescente e acquisire dati che forniscono un'indicazione sull'influenza dell'idrogeno per l'instabilità della combustione.

2 Introduzione

Nelle applicazioni ingegneristiche dove i processi di combustione avvengono in camere confinate possono avvenire interazioni tra sorgenti di rumore (prodotte dalle dinamiche di fiamma e dai processi di rilascio del calore) e pressioni del suono. Ci sono due tipi di interazioni accoppiate: una debole, nella quale la combustione rimane stabile ed una forte, in cui le fluttuazioni acustiche sono sincronizzate ad una frequenza di risonanza e producono oscillazioni ampie ed autoeccitate [1] [2].

Questo fenomeno avviene quando un processo pilota produce perturbazioni a monte del flusso come fluttuazioni di velocità. Queste oscillazioni possono indurre fluttuazioni nel rilascio di calore a valle del flusso e infine eccitare oscillazioni acustiche.

Come conseguenza un processo dovuto alla propagazione delle onde acustiche accoppia queste perturbazioni facendo oscillare alla stessa frequenza il rilascio di calore e le fluttuazioni di pressione generando nuove fluttuazioni di velocità sincronizzate che possono provocare interazioni risonanti e condurre a oscillazioni auto eccitate.

È importante considerare per questo fenomeno il criterio di Rayleigh [3] [4] il quale afferma che il processo di combustione aggiunge energia alle oscillazioni acustiche solo se la sfasatura tra il rilascio di calore e le oscillazioni di pressione è minore di 90° . Quindi le instabilità di combustione sono moti oscillatori di gas che influenzano dannosamente le performance del combustore riducendo la vita ed i range di operabilità dello stesso [5] producendo vibrazioni strutturali, aumentando il tasso di trasferimento di calore sulle superfici o provocando il malfunzionamento del sistema [6]. Queste instabilità sono rappresentate da modi acustici che crescono da oscillazioni di pressione a basse ampiezze passando per un regime di transizione fino al processo di saturazione dove oscillazioni di pressione costanti con grandi ampiezze sono eccitate, questa condizione è chiamata "ciclo-limite".

Basandosi sulla frequenza e l'ampiezza delle oscillazioni i processi di combustione possono essere classificati in due categorie: un regime di combustione stabile chiamato "Rumore di Combustione", caratterizzato da fluttuazioni aperiodiche con basse ampiezze senza una frequenza dominante, ed un regime instabile di combustione chiamato "Instabilità di Combustione" caratterizzato da oscillazioni periodiche con grandi ampiezze ed una chiara frequenza dominante. La transizione tra i due regimi è indicata da raffiche

intermittenti con ampiezze elevate composte da periodiche oscillazioni che emergono durante oscillazioni aperiodiche a bassa ampiezza. Poiché le interazioni non lineari dominano la dinamica del sistema quando le oscillazioni dell'instabilità crescono esponenzialmente fino a raggiungere l'ampiezza costante del ciclo-limite, un'insufficiente conoscenza degli aspetti non lineari delle instabilità termoacustiche potrebbe provocare una incorretta previsione dell'ampiezza delle oscillazioni e quindi un controllo inadeguato del sistema di combustione.

Molti studi sono stati volti all'individuazione di precursori della transizione da combustione stabile a instabile. L'analisi caotica, ad esempio, permette di identificare oscillazioni periodiche e non più stocastiche di questi precursori. Analizzando l'energia radiale spontanea emessa dalla fiamma è possibile studiare la transizione da instabilità termoacustica allo spegnimento.

Lo studio di questa grandezza garantisce alcuni vantaggi:

- L'energia radiale mostra gli stessi componenti tonali delle fluttuazioni di pressione durante l'instabilità termoacustica
- Lo spettro ha le stesse caratteristiche di decadimento della scala inerziale dell'energia cinetica di un flusso turbolento omogeneo isotropico non reattivo.

Acquisendo serie temporali di instabilità termoacustiche di uno "Slot Burner" sperimentale, incrementando gradualmente il numero di Reynolds del bruciatore pilota, è possibile quindi sviluppare indici che avvisino tempestivamente dell'imminente avvenimento delle oscillazioni di combustione instabile [7].

Sono state applicate, ad esempio, analisi lineari e non lineari su un bruciatore ad olio che opera da condizioni stabili a instabili aumentando la massa di olio liquido.

Il metodo lineare è stato utilizzato applicando la cross correlazione e lo spettro delle serie temporali mentre il metodo non lineare è stato applicato ricostruendo gli spazi delle fasi delle serie temporali della pressione e dell'energia radiante utilizzando il metodo "time delay embedding" [8] [9].

L'analisi non lineare nello specifico consiste nella ricostruzione degli spazi delle fasi attraverso l'algoritmo "Average Mutual Information" e "Averaged False Nearest Neighbor" [10] per stimare il ritardo di tempo (lag) ottimo per una dimensione di incorporamento appropriata.

Con questo approccio è possibile studiare le dinamiche dei vari regimi di combustione tracciando le traiettorie di ricorrenza nei rispettivi spazi di fase come il "Recurrence Plot (RPs)" che mostra il tempo nel quale il sistema ritorna vicino alla stessa area nello spazio di fase [7].

I tre indici basati su questa quantificazione della ricorrenza sono:

- RR recurrence rate index , che misura la densità dei punti di ricorrenza nel recurrence plot
- τ_0 indice di tempo che quantifica le linee verticali del recurrence plot
- s , Shannon entropy index che misura le linee diagonali del recurrence plot

L'obiettivo dell'analisi non lineare basata sulla ricostruzione dello spazio di fase delle fluttuazioni di pressione misurate consiste nel provare che i processi di combustione mantengono un comportamento non lineare dimostrando che l'analisi di ricorrenza è uno strumento efficace per l'analisi dell'instabilità termoacustica. Si prevede quindi di analizzare le instabilità di attraverso la quantificazione diagonale per studiare la distribuzione dei punti di ricorrenza per ogni RP la quale potrebbe dare nuovi indizi sulla natura dell'instabilità.

Quindi in questo studio le fluttuazioni di pressione sono acquisite da uno "slot Burner" sperimentale con un graduale incremento del numero di Reynolds del flusso.

3 Descrizione delle attività svolte e risultati

3.1 Introduzione all'analisi di ricorrenza

L'analisi di un fenomeno può essere approssiata in differenti modi distinguibili tra :

- Aggregato : Una moltitudine di dati diventano un solo elemento tramite l'utilizzo di medie e semplificazioni
- Separato : Tutti i dati vengono considerati in modo disconnesso dalla struttura temporale.

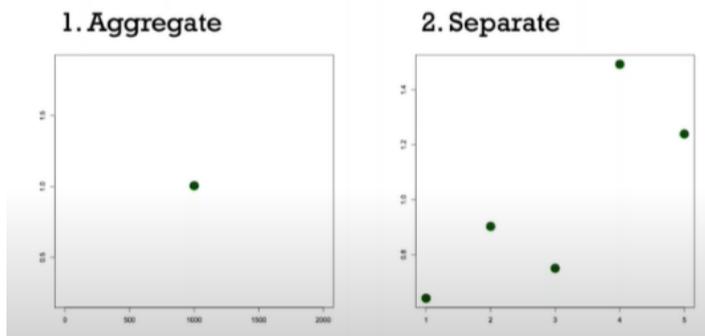


Figura 1: Metodi di approccio (aggregato, separato) per l'analisi di un fenomeno.

Quando i dati vengono analizzati in modo separato esistono due diverse tipologie per affrontare il problema:

- Linearizzazione: Con questo metodo si semplificano i dati generando una retta che ignora le dinamiche dei singoli elementi
- Descrizione: Con questo metodo viene descritto con precisione cosa succede osservando i cambiamenti nel tempo.

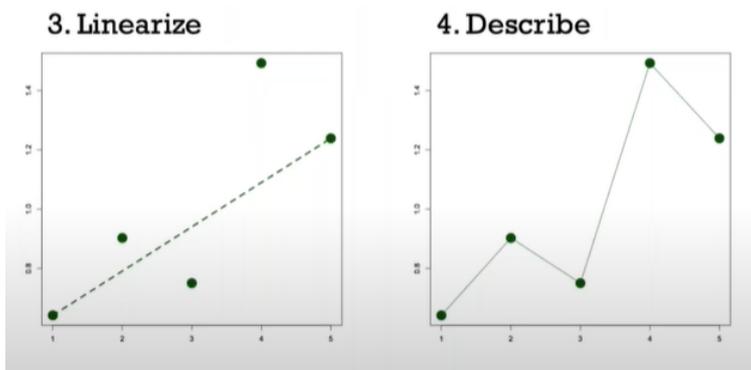


Figura 2: Tipologie di analisi (linearizzazione, descrizione) per l'approccio "separato".

Arriviamo quindi all'analisi di ricorrenza che permette di approcciare diversamente allo studio di gruppi dinamici. Questo metodo infatti permette di considerare le dinamiche non lineari con tutta la loro complessità.

3.1.1 Svolgimento dell'Analisi

1. Acquisizione Dati

Il primo step consiste nell'acquisizione dei dati del fenomeno, ovvero della serie temporale delle grandezze di interesse. E' necessario acquisire serie temporali multiple per un'analisi più corretta.

2. Implementazione nello Spazio di Fase

Lo spazio di fase è uno spazio multidimensionale dove viene rappresentato lo stato di un sistema in un punto nel tempo. Questo spazio, quindi, rappresenta uno stato multidimensionale del sistema.

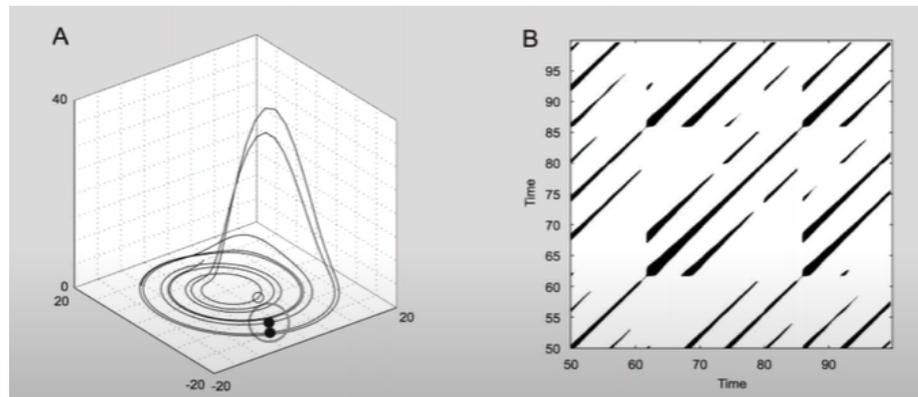


Figura 3: Rappresentazione esemplificativa dello spazio di fase con relativo recurrence plot.

3. Creare una matrice ed un grafico di ricorrenza

Il grafico di ricorrenza è un grafico bidimensionale che rileva quando un sistema ritorna ad uno stato già avuto nel passato.

Ad esempio, consideriamo un treno che esegue la stessa tratta dalle 5 alle 23 passando per 10 stazioni all'andata e le stesse 10 al ritorno. Lo spostamento del treno è graficabile come:

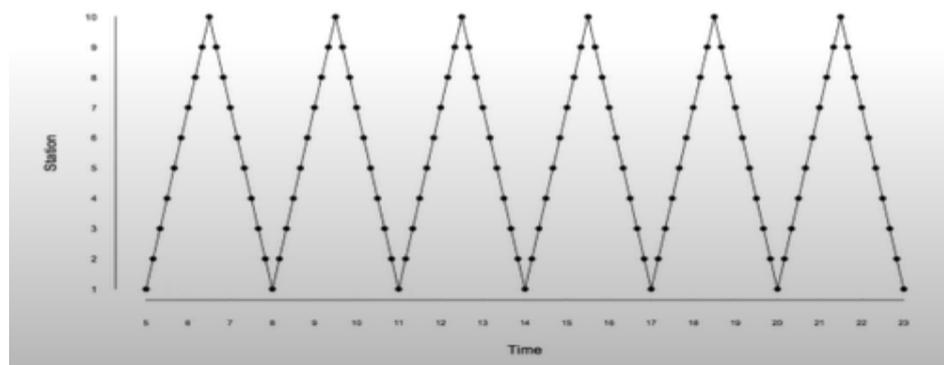


Figura 4: Serie temporale esemplificativa di un treno che esegue la stessa tratta per 10 stazioni.

Il grafico di ricorrenza che si ottiene è il seguente:

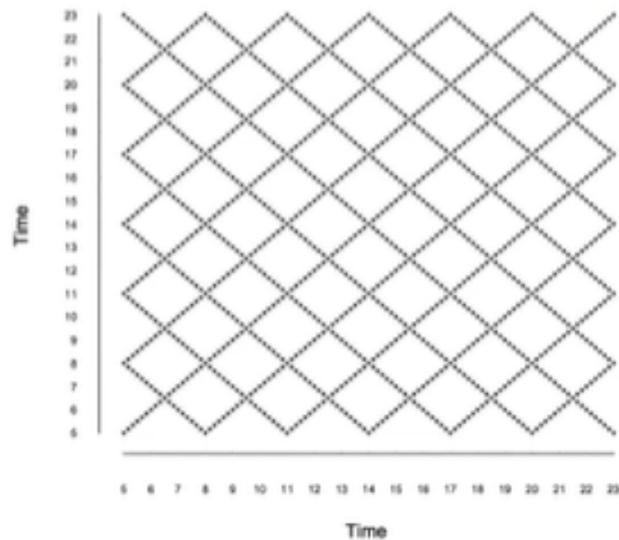


Figura 5: Recurrence plot associata alla serie temporale di un treno che esegue la stessa tratta per 10 stazioni.

Come si può notare si genera una figura simmetrica. Prendendo ad esempio la stazione 1 possiamo tracciare che il treno la raggiunge alle 5-8-11-14-1-20-23. Proseguendo con tutte le stazioni otteniamo il “Recurrence Plot” in figura 5.

4. Quantificare i Modelli di Ricorrenza

Una volta definita la matrice ed il grafico di ricorrenza possiamo valutare degli indici che permettono di descrivere più approfonditamente il sistema:

- Recurrence Rate : Misura quanto intensamente un sistema visita gli stessi stati nel tempo. E' evidente in “Recurrence Plot (RP)” molto pieni. Viene calcolato come il rapporto tra i punti di ricorrenze ed il numero totale dei punti marcabili [11].
- Determinism : Calcola il grado di prevedibilità del sistema. E' notevole in grafici con molte linee diagonali parallele alla diagonale principale. Viene calcolato come la proporzione dei punti del grafico che formano le linee diagonali. In questo caso risulta necessario definire quanti punti servono a costituire una linea [11].
- Lunghezza Massima e Media della Linea Diagonale: Fornisce informazioni aggiuntive sulla prevedibilità del sistema. Un RP che ha molte linee diagonali più lunghe indica che tende a rimanere prevedibile per certi periodi di tempo [11].
- Entropia: Calcola la complessità delle strutture deterministiche del sistema. Viene calcolata come l'entropia di Shannon del sistema. Un sistema con alta entropia avrà un RP con tante diagonali di lunghezza diversa. Viceversa, un sistema con bassa entropia tenderà ad avere diagonali della stessa lunghezza [11].

3.2 Applicazione

3.2.1.1 Ricostruzione dello spazio di fase

Per ottenere i Recurrence plots la pseudofase è stata prima di tutto ricostruita utilizzando il “delay embedding method” [8] [9] dove i vettori ritardo sono dati dall’equazione:

$$y_i(d) = (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(d-1)\tau})$$

dove $i=1,2,\dots,N_0-(d-1)\tau$, N_0 è la lunghezza della serie temporale, x_i è la serie temporale, y_i è i-esimo vettore ricostruito, d è la dimensione di embedding e τ è il tempo di ritardo.

3.2.1.2 Average Mutual Information (AMI)

Per prima cosa è stato determinato il tempo di ritardo ottimale τ_{opt} usando l’algoritmo AMI attraverso l’equazione :

$$I(X, Y) = \sum_{k=1}^{N_X} \sum_{l=1}^{N_Y} p_{XY}(k, l) \ln \left[\frac{p_{XY}(k, l)}{p_{XY}(k) p_Y(l)} \right]$$

Dove $X=x_i$ rappresenta la serie temporale originale

$Y = x_i + \tau$ corrisponde al ritardo delle serie temporali

p_X e p_Y sono le probabilità marginali e p_{XY} è la probabilità congiunta

N_X e N_Y sono i numeri di rettangoli degli istogrammi X e Y precedentemente calcolati per calcolare le probabilità dividendo il numero di elementi in ogni rettangolo degli istogrammi per il numero totale degli elementi dell’intero istogramma.

Per quanto riguarda p_{XY} , la matrice è creata prima con le colonne N_X e le righe N_Y .

In ogni colonna poi l’elemento del vettore X viene cercato lungo il vettore Y e viene calcolato un nuovo istogramma con i rettangoli di N_Y ed eventualmente diviso per il numero totale degli elementi del nuovo istogramma.

Questa procedura si ripete fino a riempire la matrice $N_X \times N_Y$.

Finalmente ora possiamo applicare l’equazione per calcolare il valore AMI incrementando gradualmente il tempo di ritardo tau nel vettore Y.

Quindi la misura AMI condivide informazioni tra due vettori casuali X e Y basandosi sulle informazioni trasmesse di un vettore dando informazioni all’altro, infatti se il vettore X e Y sono indipendenti AMI=0.

Per quanto riguarda il ritardo, se troppo piccolo non darà nuove informazioni perché i vettori sono quasi gli stessi mentre un ritardo troppo lungo mostrerà che i vettori sono indipendenti.

Il ritardo ottimale τ_{opt} è stato selezionato ritardando gradualmente il vettore Y e scegliendo il primo minimo valore di AMI.

3.2.1.3 Averaged False Nearest Neighbor (AFNN)

Tramite l’AFNN è stata stimata una dimensione di incorporamento appropriata d_0 .

Questo metodo [10] calcola il cambiamento medio nelle distanze tra un punto ed il suo vicino più vicino, nel frattempo la dimensione d viene aumentata.

Quando l’attrattore viene calcolato qualunque due punti che sono vicini nella dimensione d saranno vicini nella dimensione d+1 altrimenti sono falsi vicini.

Così il d_0 viene scelto ed i falsi vicini vengono esclusi, essenzialmente l’AFNN inizia con l’equazione :

$$a(i, d) = \frac{||y_i(d + 1) - y_{n(i,d)}(d + 1)||}{||y_i(d) - y_{n(i,d)}(d)||}$$

dove $i=1,2,\dots,N_0 - d\tau$

$||\cdot||$ rappresenta la misura della distanza euclidea

$y_i(d + 1)$ è l'i-esimo vettore ricostruito dello spazio di fase con dimensione di embedding

$d+1$, $n(i,d)$ è un numero intero

$y_{n(i,d)}(d)$ è il vicino più vicino

$y_i(d)$ nella dimensione d dello spazio di fase ricostruito.

Dopodiché la quantità $a(i,d)$ è mediata come :

$$E(d) = \frac{1}{N_0 - d\tau} \sum_{i=1}^{N_0 - d\tau} a(i, d)$$

Per studiare la variazione da d a $d+1$, $E1(d)$ è descritta come :

$$E1(d) = E(d + 1)/E(d)$$

La dimensione minima di incorporamento d_0 viene selezionata quando $E1(d)$ smette di cambiare mentre la dimensione d viene ancora fatta aumentare, così $d_0 = d + 1$ dove d è la dimensione alla quale $E1(d)$ ha smesso di cambiare.

3.2.1.4 Recurrence Plots

Dopo aver calcolato d_0 e τ_{opt} le ricorrenze delle traiettorie nello spazio della pseudofase viene calcolato tramite RP basato sull'equazione:

$$R_{i,j} = \theta(\epsilon - ||y_i - y_j||)$$

Dove $i,j=1,2,\dots, N_1$, N_1 è definito come $N_0 - (d_0 - 1)\tau_{opt}$;

R è la matrice di ricorrenza binaria;

ϵ è la soglia di distanza;

θ è la funzione di Heaviside;

$||\cdot||$ è la normale rappresentata come distanza euclidea.

Durante una ricorrenza la distanza tra due punti non deve eccedere la soglia e la funzione di Heaviside è pari a 1, al contrario se non c'è ricorrenza la funzione ha valore 0.

Nella matrice di ricorrenza la ricorrenza è denotata con $R_{i,j} = 1$, la non ricorrenza con $R_{i,j} = 0$.

3.2.1.5 Recurrence quantification analysis

La quantificazione dei RPs è stata portata avanti tramite misurazioni diagonali [7]. Con questo metodo tutte le diagonali parallele alla diagonale principale sono quantificate separatamente. (la diagonale principale della matrice di ricorrenza è definita come la linea che attraversa la matrice dall'angolo in basso a sinistra a quello in alto a destra).

La distanza dalla diagonale dalla diagonale principale è chiamata τ , quindi per $\tau = 0$ la diagonale è la diagonale principale, per $\tau > 0$ le diagonali sono quelle sopra la principale, per $\tau < 0$ le diagonali sono quelle sotto la principale.

La quantificazione dei RPs viene prima svolta calcolando il numero di diagonali nere $P_\tau(l)$ di lunghezza l su ogni diagonale attraverso l'equazione:

$$P_\tau(l) = \sum_{i,j}^{N_1-\tau} (1 - R_{i-1,j-1})(1 - R_{i+l,j+l}) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k}$$

Segue poi il calcolo degli indici citati precedentemente.

- τ Recurrence Rate index RR_τ
Misura la densità di punti neri per ogni linea diagonale [11].

$$RR_\tau = \frac{1}{N_1 - \tau} \sum_{l=1}^{N_1-\tau} l P_\tau(l)$$

- τ Determinism index DET_τ
Misura il rapporto di punti neri che forma la linea diagonale con tutti i punti neri per ogni linea diagonale in analisi [11].

$$DET_\tau = \frac{\sum_{l=l_{min}}^{N_1} l P_\tau(l)}{\sum_{l=1}^{N_1} l P_\tau(l)}$$

- τ average diagonal line length index L_τ
Misura la lunghezza media delle strutture diagonali nere trovata sulla linea diagonale in analisi [11].

$$L_\tau = \frac{\sum_{l=l_{min}}^{N_1-\tau} l P_\tau(l)}{\sum_{l=1}^{N_1-\tau} P_\tau(l)}$$

- τ entropy index s_τ
Misura l'entropia di Shannon per ogni linea diagonale sotto analisi [11].

$$s_\tau = - \sum_{l=l_{min}}^{N_1-\tau} p(l) \ln p(l)$$

Dove la probabilità $p(l)$ di trovare una linea diagonale di lunghezza l è data da $P(l) = P_\tau(l)/N_l$ e N_l è la somma di tutte le diagonali

3.3 Il codice LabVIEW

Il questo capitolo viene descritta l'implementazione e la validazione del codice per l'analisi caotica. Il software utilizzato per la progettazione del software è il LabVIEW il quale permette di generare un eseguibile con un'interfaccia interattiva che svolga il compito per il quale è stato progettato. Il codice che è stato implementato permette di svolgere un'analisi caotica di segnali generando mappe e matrici di ricorrenza per poi calcolare gli indici e gli indicatori già introdotti nel background teorico. Il codice si fonda su blocchi ognuno

dei quali ha un compito specifico da svolgere, un insieme di blocchi in sequenza, quindi svolge le operazioni e produce i risultati desiderati. Il codice di analisi caotica che è stato sviluppato è costituito da vari macroblocchi chiamati subVI i quali contengono i blocchi delle singole operazioni. L'insieme di questi macroblocchi, chiamato VI, rappresenta il software per l'analisi. LabVIEW permette la programmazione parallela, sfruttando appieno le risorse della CPU (core), sia in modalità nativa che, ove possibile, sui cicli "for loop"; per questi ultimi è stata attivata la modalità "Enable Loop Iteration Parallelism" ove immediatamente fattibile, mentre è stato adattato il codice dove era possibile eliminare dipendenze dai cicli precedenti.

Analizziamo ora nel dettaglio i vari macroblocchi.

3.3.1 SubVI Resample

Quando si affronta l'analisi di un segnale caotico è importante considerare principalmente due fattori: in un'acquisizione con strumenti performanti il segnale potrebbe essere costituito da un numero molto elevato di campioni e lo stesso potrebbe essere affetto da rumore. Per questo motivo il segnale viene prima di tutto ricampionato. Tale procedura permette la reiezione del rumore ad alta frequenza che tipicamente è causa di variazioni topologiche dell'attrattore e la riduzione del costo computazionale che nella RQA è molto elevato. In analogia con l'analisi in frequenza dei processi stocastici (es. Pweltsch) quindi i segnali da dare in pasto al software devono essere scomposti in piccole finestre temporali per evitare saturazioni della memoria (N.B. il software non è in grado di processare più di 4000 campioni).

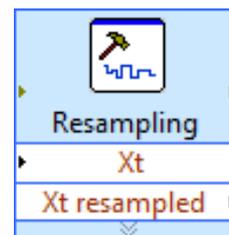


Figura 6: Blocco Resampling

3.3.2 SubVI Tau - Ricerca tempo correlazione

Il secondo blocco del codice è quello che implementa la ricerca del tempo di correlazione. Questa funzione è stata svolta implementando un algoritmo che ricerca il tempo di attraversamento dell'asse delle y nel segnale di autocorrelazione. Questa routine è un blocco che prende in input il vettore segnale e restituisce in output il tempo di correlazione espresso in campioni. Per questo algoritmo è stata svolta una validazione mediante l'impiego di una sinusoida. In questo caso il tempo di correlazione atteso è pari ad un quarto del periodo di oscillazione come da dati presenti in letteratura.

La validazione è stata svolta a diverse frequenze (espresse in cicli nel dominio dei campioni). Di seguito vengono riportati tre grafici di sinusoidi a valori crescenti della frequenza e un grafico rosso che presenta un picco in corrispondenza del tempo di correlazione calcolato da "Tau". I risultati mostrano come da attese il picco in corrispondenza del valore pari ad un quarto del periodo.



Figura 7: Blocco TAU

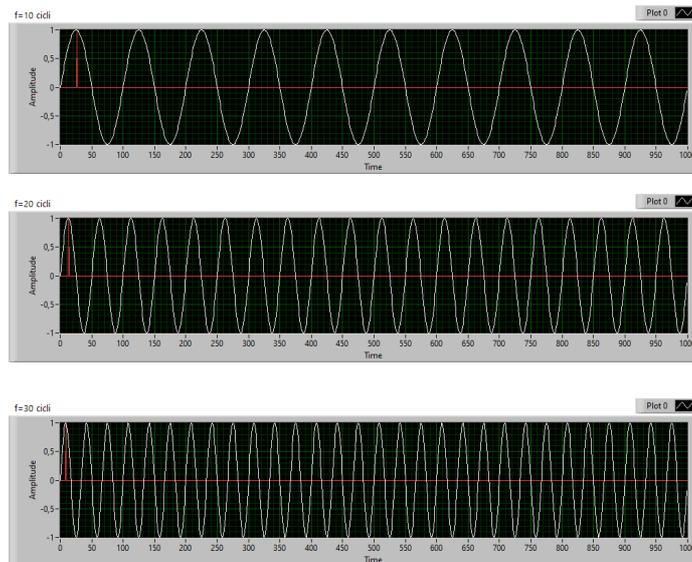


Figura 8: di sinusoidi a valori crescenti della frequenza

3.3.3 SubVI Generazione spazio delle fasi

Entrando nel merito dell'analisi caotica, il primo passo principale è rappresentato dall'implementazione dello spazio delle fasi, ovvero lo spazio in cui poi verrà prodotto l'attrattore relativo al segnale. La routine "Pseudo-phase space generator" genera quindi lo spazio delle fasi a partire da un segnale, il tempo di correlazione e la dimensione di incorporamento.



Figura 9: Blocco Phase space

3.3.4 SubVI 1st_NN

Questo blocco calcola il vicino di un punto dell'attrattore di dimensione $d=15$. Questa routine si ripete per tutti i punti dell'attrattore, identificando così tutti i primi vicini. Segue a questa operazione il calcolo delle distanze Euclidee tra i primi vicini identificati facendo variare la dimensione dell'attrattore da 1 a 15. Se l'attrattore è descritto in modo corretto, ovvero la dimensione scelta è "giusta", la distanza tra i primi vicini è invariante rispetto alla dimensione di incorporamento.

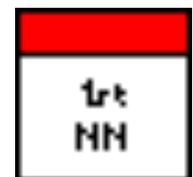


Figura 10: Blocco attrattore

3.3.5 AFNN SubVI

Proseguiamo quindi nel codice procedendo con il calcolo degli "Average False Nearest Neighbor" e della dimensione minima di incorporamento dell'attrattore denominata "d".



Figura 11: Blocco AFNN

3.3.6 Diagonals SubVI

A seguito della generazione della matrice e della mappa di ricorrenza il blocco “Diagonals” permette di identificare tutte le diagonali del recurrence plot, le estrae e le ordina in un unico vettore composto da valori pari a 1 o a 0. Questo vettore quindi permette di identificare la lunghezza delle diagonali basandosi su 4 scenari.

- Due valori unitari successivi (11) che identifica la posizione all’interno di una diagonale
- Due valori nulli successivi (00) che identifica una posizione esterna ad una diagonale
- Un valore unitario seguito da uno nullo (10) che identifica l’inizio di una diagonale
- Un valore nullo seguito da uno unitario (01) che identifica la fine di una diagonale



Figura 12: Blocco Diagonal

3.3.7 Diagonal IP(l) SubVI

A questo punto ottenute le lunghezze delle diagonali è possibile calcolare il valore $P(l)$ relativo al numero delle diagonali di lunghezza l . Con questa grandezza a disposizione sarà poi possibile calcolare gli indicatori descritti precedentemente.



Figura 13: Blocco Diagonal IP

3.3.8 Interfaccia del software

L’interfaccia del codice di calcolo è composta da:

- Grafico del Segnale importato
- Grafico del segnale ricampionato
- Andamento del parametro $E1(d)$ in funzione della dimensione di incorporamento dell’attrattore
- Rappresentazione del segnale nello spazio delle pseudo-fasi

Le informazioni che il software richiede come input sono:

- ☐ Il percorso file del segnale in formato .lvm
- ☐ L’intervallo temporale del ricampionamento in caso si renda necessaria la riduzione del numero di campioni
- ☐ La soglia di discriminazione relativa alla mappa di ricorrenza “ ϵ ”
- ☐ La lunghezza minima di ricorrenza diagonale “ L_{min} ” sulla base della quale vengono calcolati gli indici RR_{τ} , DET e L_{τ} .

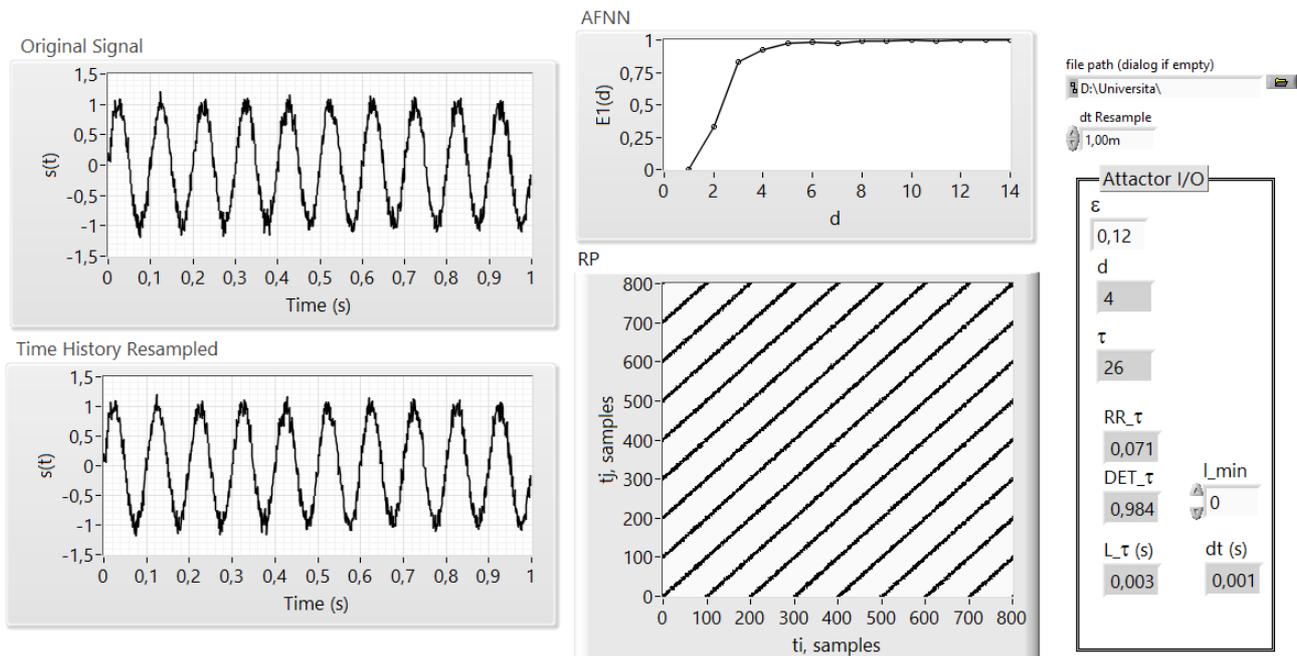


Figura 14: Interfaccia del primo software di analisi caotica.

3.3.9 Codice a blocchi

Il codice, come detto precedentemente, è organizzato in SubVI ognuna delle quali ha una specifica funzione. Il diagramma è commentato in ogni suo punto.

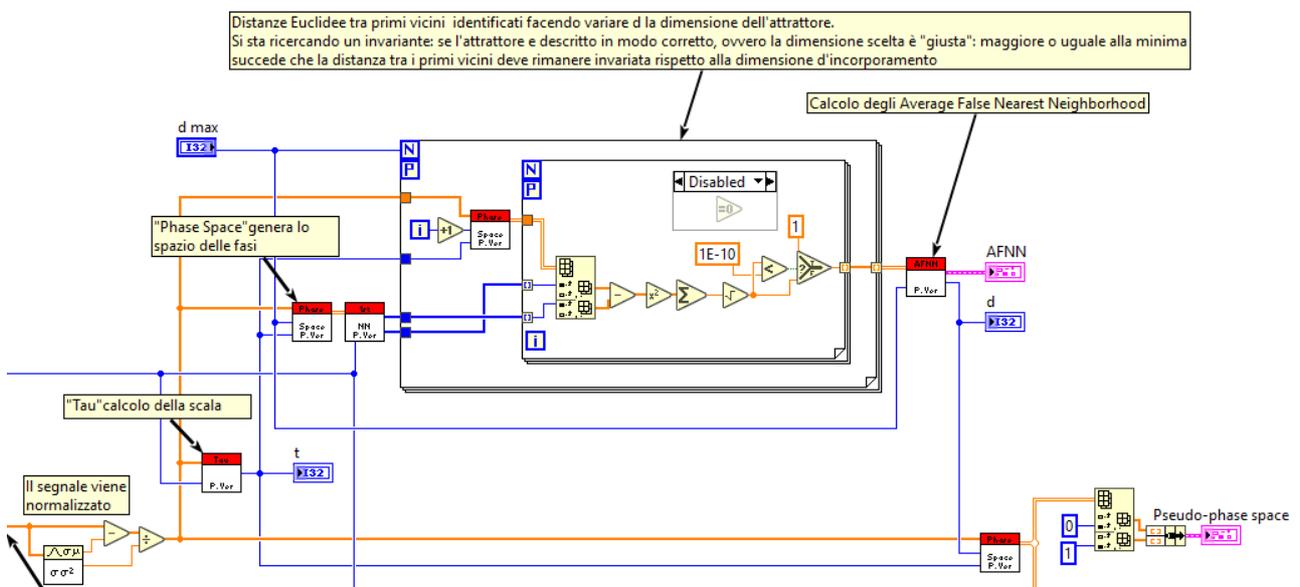


Figura 15: Particolare del Block Diagram del codice LabVIEW per l'analisi caotica.

Per assicurare la validità e stabilità del codice sono stati eseguiti alcuni test su segnali di prova.

3.3.9.1 Primo Test

Il primo test di validazione del codice è legato ad un segnale generato mediante risoluzione di un sistema dinamico classico: il sistema di Lorentz:

$$\begin{aligned} dx/dt &= \sigma(y - x) \\ dy/dt &= \rho x - y + xz \\ dz/dt &= -\beta z + xz \end{aligned}$$

ponendo $\sigma = 10$, $\beta = 8/3$ e $\rho = 28$ si ottengono i tre andamenti temporali riportati di seguito:

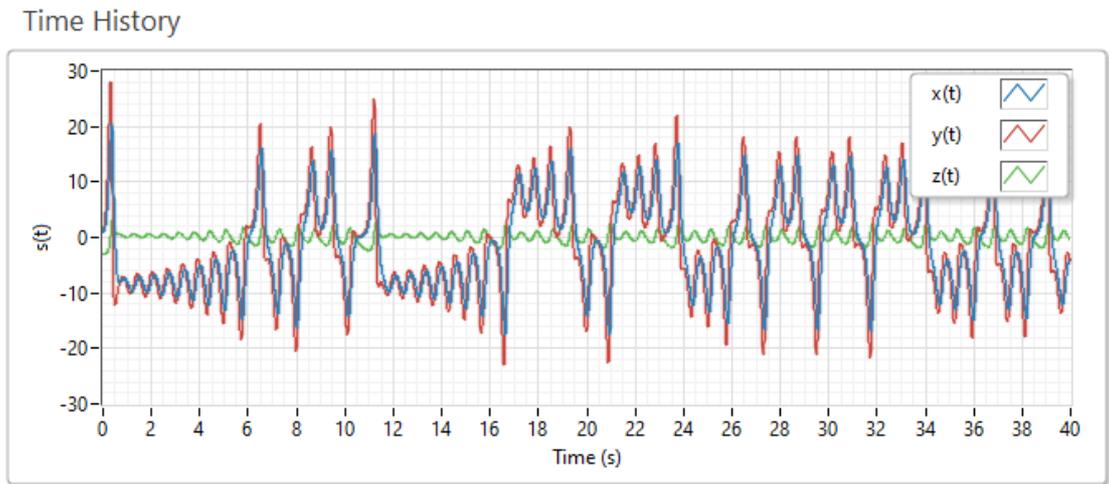


Figura 16: Serie temporale dei segnali generati da un sistema di Lorentz.

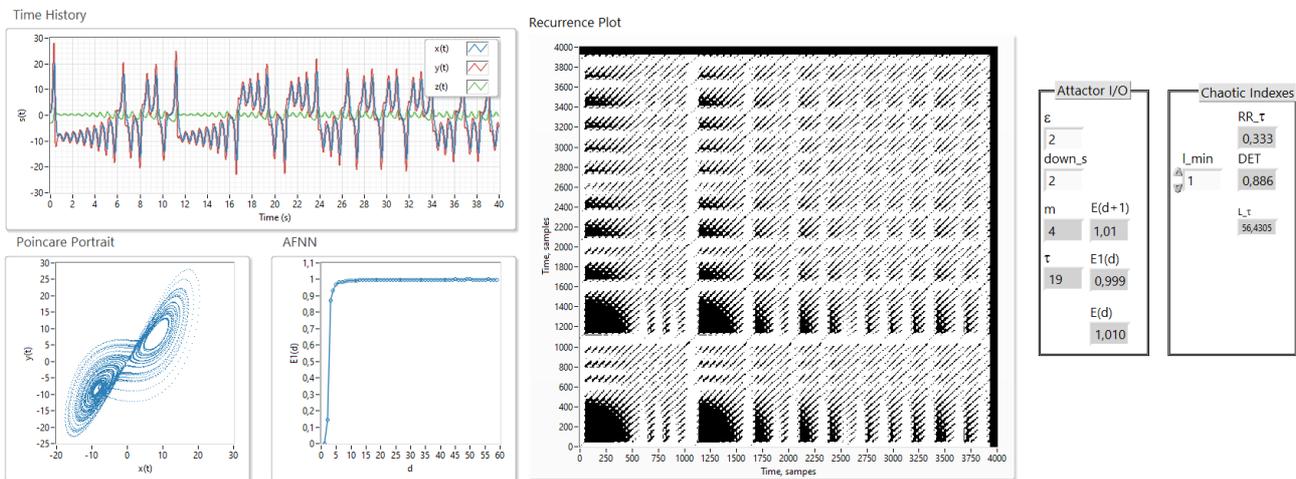


Figura 17: Interfaccia del primo software con i risultati dell'analisi applicata al sistema di Lorentz.

Il software fornisce un valore di "d" uguale a 4 ovvero una dimensione di incorporamento dell'attrattore di una unità superiore alla dimensione dell'attrattore di Lorentz (tale dimensione viene calcolata attraverso il metodo illustrato in [7]).

La rappresentazione dell'attrattore di Lorentz nello spazio delle pseudo-fasi prodotta dal software sviluppato è la seguente:

Poincare Portrait

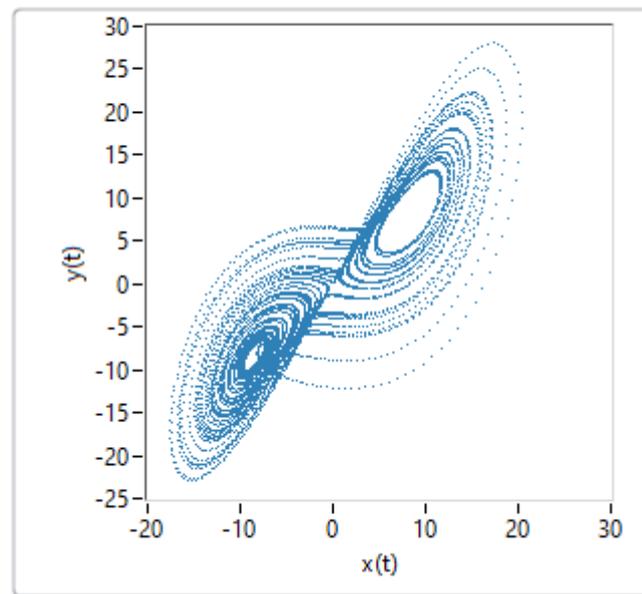


Figura 18: Attrattore rappresentato nello spazio delle fasi generato dal sistema dinamico di Lorenz.

In ultimo viene rappresentata la mappa di ricorrenza:

Recurrence Plot

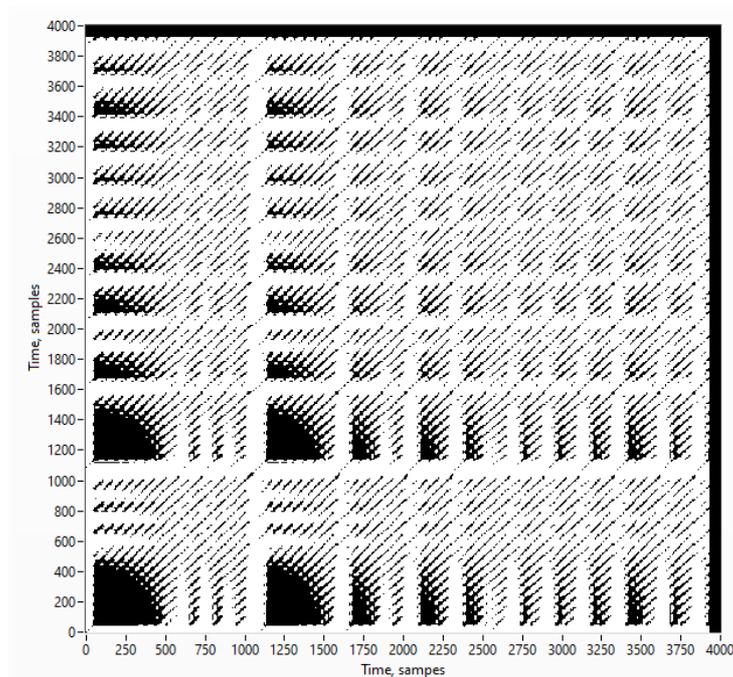


Figura 19: Mappa di ricorrenza associata al sistema dinamico di Lorenz.

Le caratteristiche topologiche della mappa sono del tutto simili a quelle presenti in letteratura in un lavoro che calcola la medesima mappa per gli stessi segnali generati dalla soluzione del medesimo problema [12]:

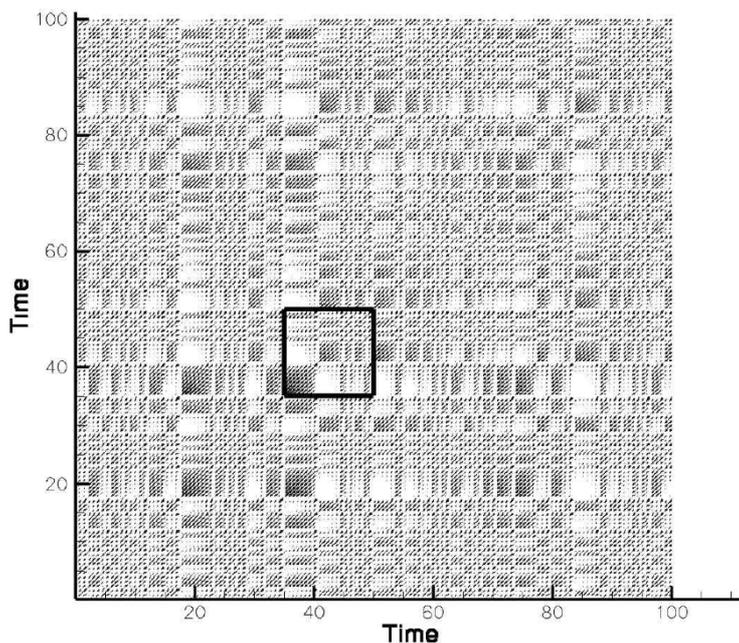


Figura 20: Mappa di ricorrenza associata al sistema dinamico di Lorenz prodotta da [12].

3.3.9.2 Secondo test

Con il medesimo software un altro test fatto è stato quello di calcolare le mappe di ricorrenza per un segnale sinusoidale a diverse frequenze. Questa prova ha previsto la generazione di un segnale sinusoidale a frequenze diverse e sono state prodotte le mappe di ricorrenze per tre casi.

- Sinusoide 10 cicli di frequenza
- Sinusoide 20 cicli di frequenza
- Sinusoide 30 cicli di frequenza

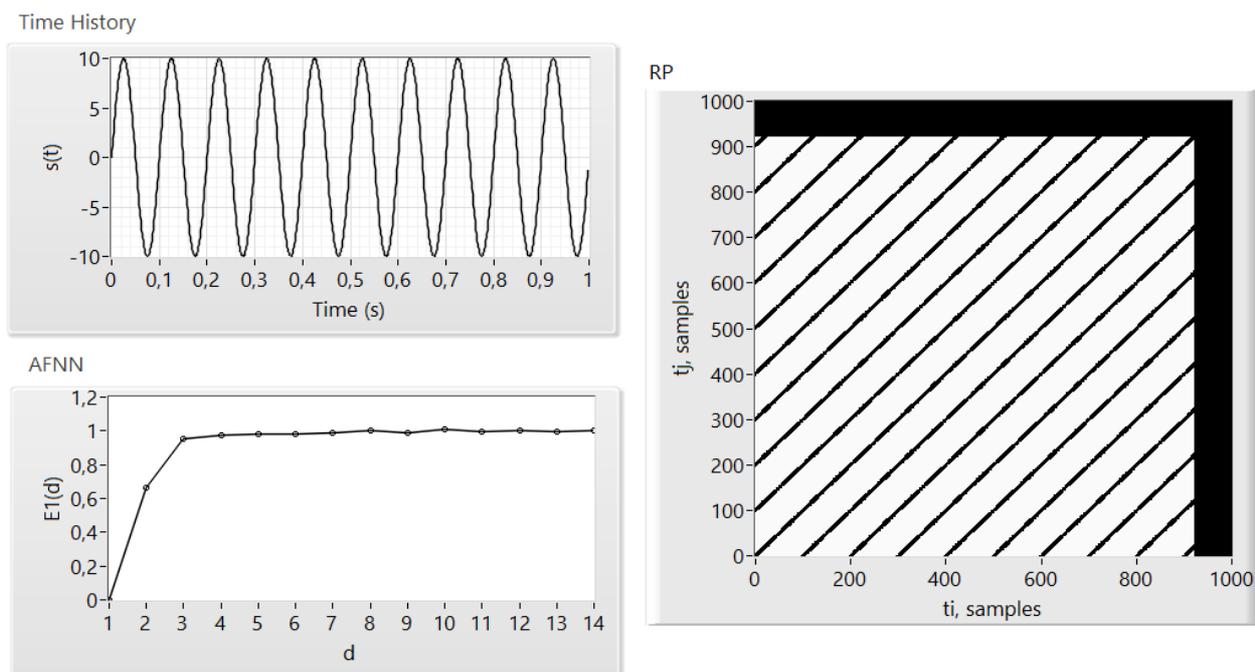


Figura 21: Risultati dell'analisi caotica applicata ad una sinusoide.

Si nota come, aumentando la frequenza, la mappa di ricorrenza risulti avere delle strisce diagonali sempre più vicine. Questo fenomeno descrive un aumento della ricorrenza nel tempo. Il risultato è in perfetto accordo con la letteratura.

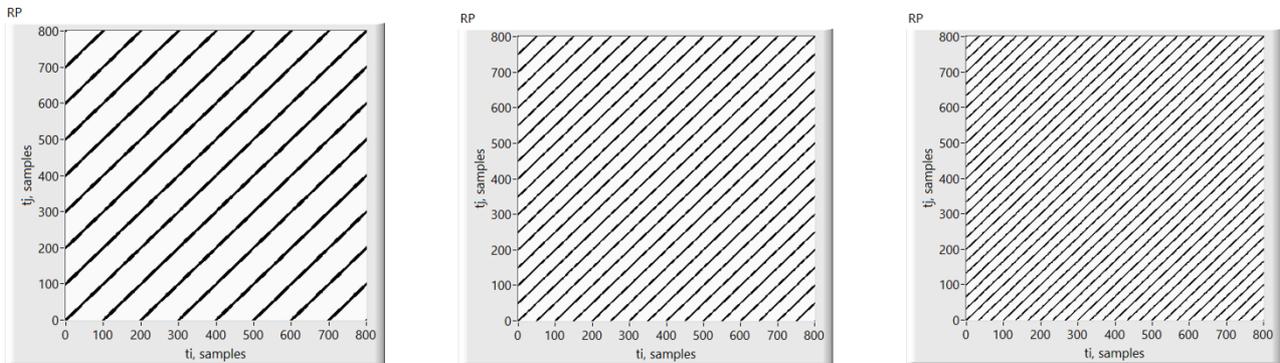


Figura 22: Mappe di ricorrenza applicate a tre sinusoidi con diversa frequenza.

3.3.9.3 Altri test

Seguono test successivi effettuati aggiungendo del rumore bianco al segnale di prova.

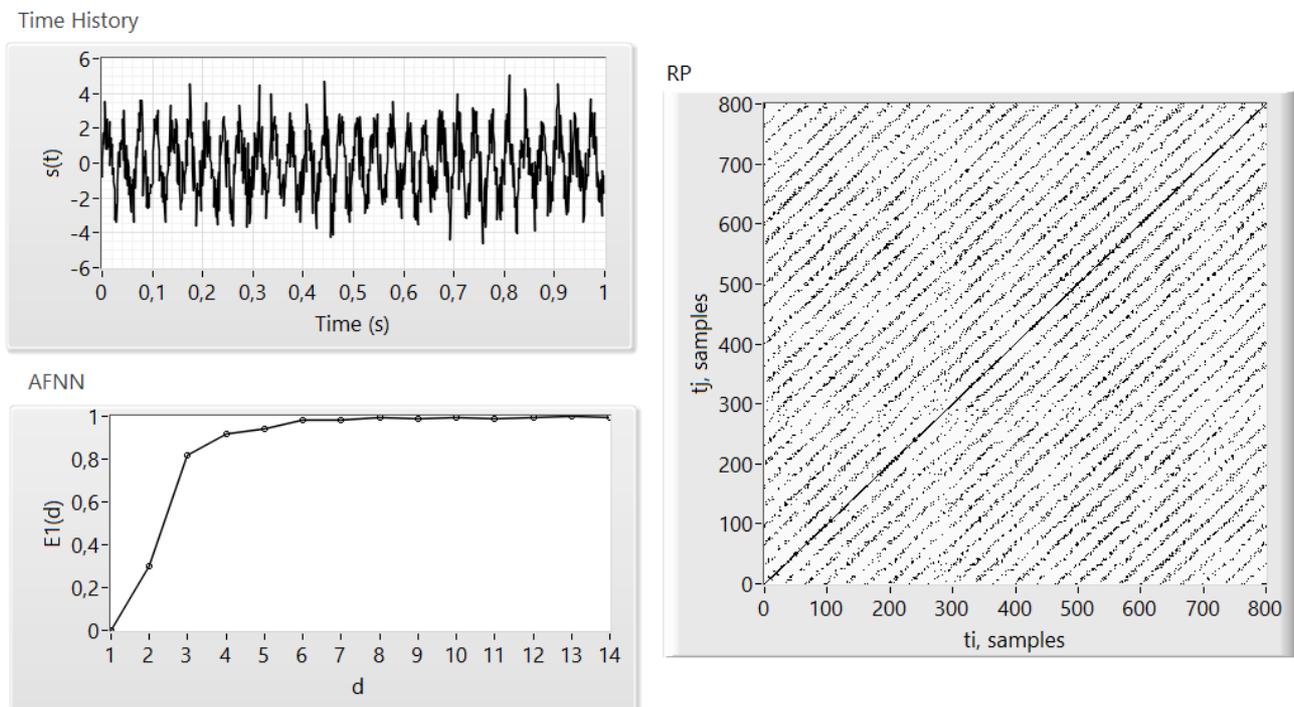


Figura 23: Risultati dell'analisi caotica applicata ad una sinusoide con rumore bianco.

Dai risultati è evidente che in base al livello del rumore si ha una perdita di ricorrenza. Nello specifico all'aumentare del rumore la ricorrenza temporale diminuisce. Con una quantità di rumore variabile (4 casi) descrivibile come :

$$A = 1 \text{ std} = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$$

Otteniamo le seguenti mappe di ricorrenza:

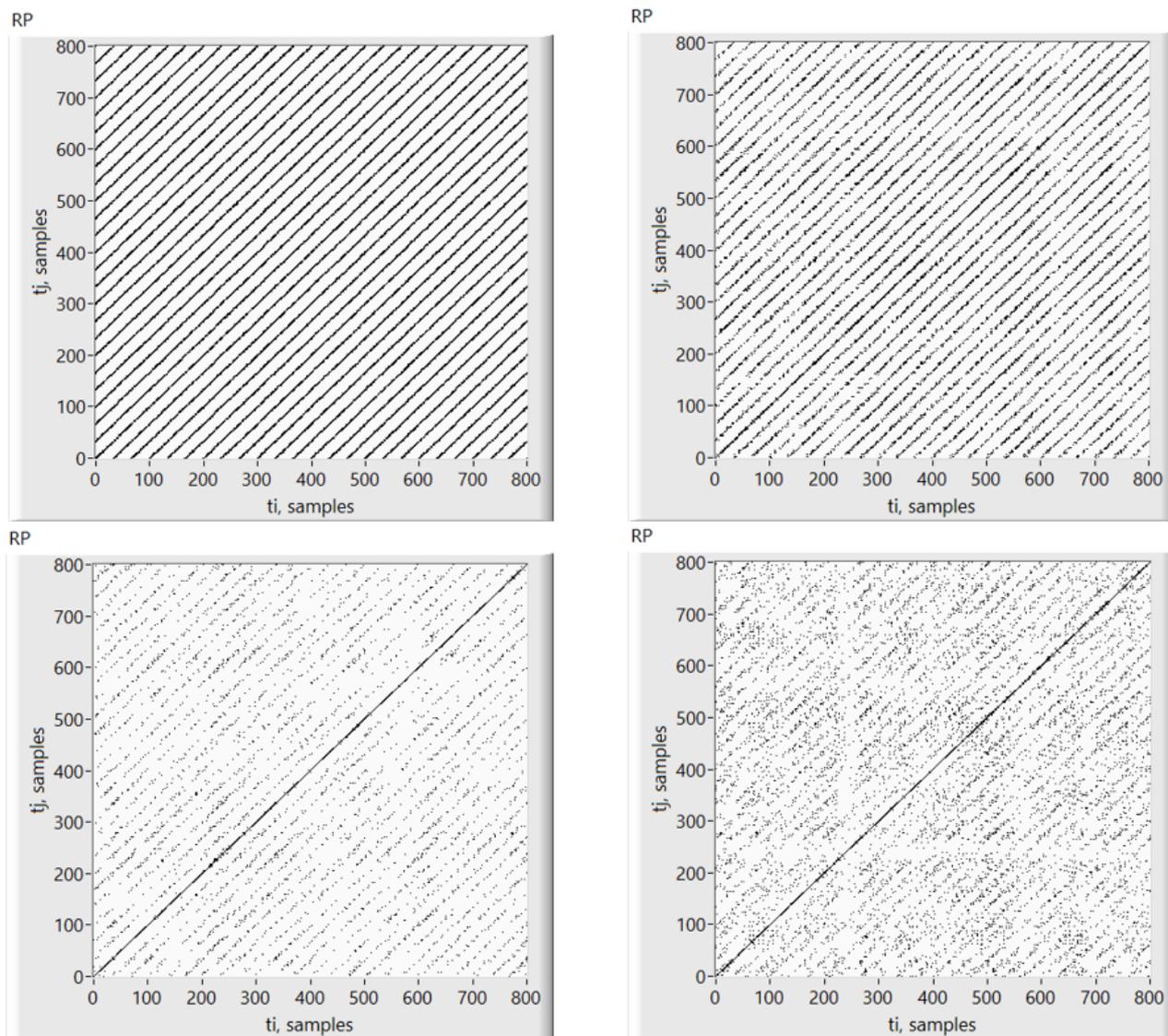


Figura 24: Mappe di ricorrenza associate ad una sinusoide con quantità di rumore variabile.

3.3.9.4 Validazione indicatori caotici

Un'ulteriore verifica eseguita sul codice è stata basata su gli indicatori caotici, l'obiettivo è quello di ottenere dei valori coerenti con quelli presenti in letteratura.

Dato un segnale sinusoidale di frequenza $f = 30$ cicli e ampiezza $A = 1$ aggiungendo rumore bianco con una ampiezza $\sigma = 0-0.9$ passo 0.1 si ottengono dei trend degli indicatori caotici coerenti con la letteratura.

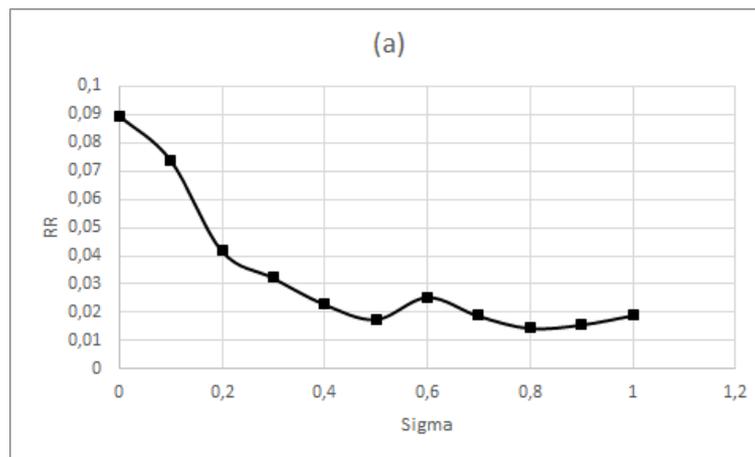


Figura 25: Andamento dell'indicatore Recurrence Rate al variare dell'ampiezza del rumore.

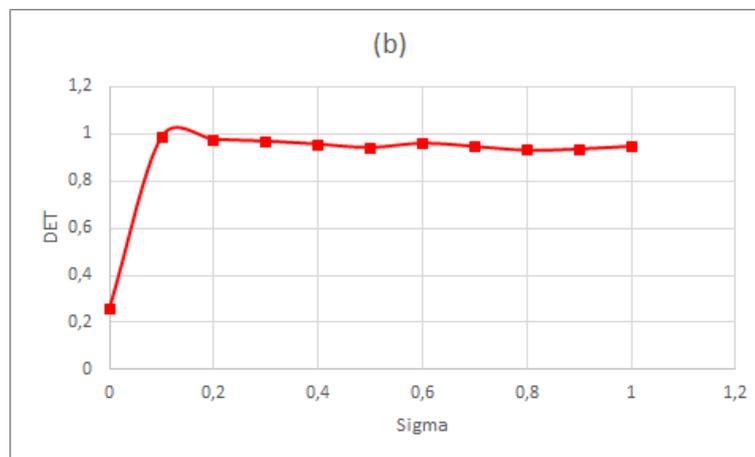


Figura 26: Andamento dell'indicatore "Determinism" al variare dell'ampiezza del rumore.

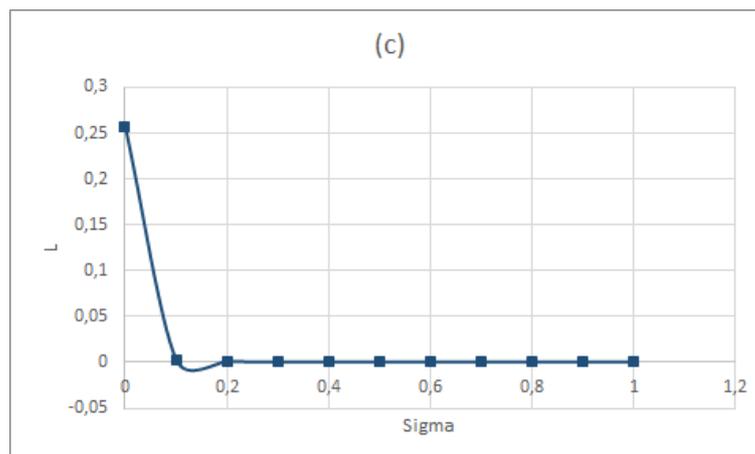


Figura 27: Andamento del parametro "L" al variare dell'ampiezza del rumore.

E' interessante notare come DET per sigma=0.1 assuma subito un valore prossimo a quello unitario mentre gli altri due indicatori decadono più o meno rapidamente.

3.4 Interfaccia Generale del Software

Il codice di analisi caotica viene integrato ad uno già prodotto precedentemente per l'analisi wavelet. L'utente, in questo modo, ha la possibilità di scegliere quale tipo di analisi svolgere. Un'ulteriore ottimizzazione del codice è stata fatta introducendo la possibilità di elaborare dati in formato .tdms adatti per acquisizioni di serie temporali molto lunghe ed onerose.

Le prime informazioni da fornire al software come input sono: il percorso del file .tdms, il tipo di analisi da svolgere, quale canale del file analizzare (quale variabile).

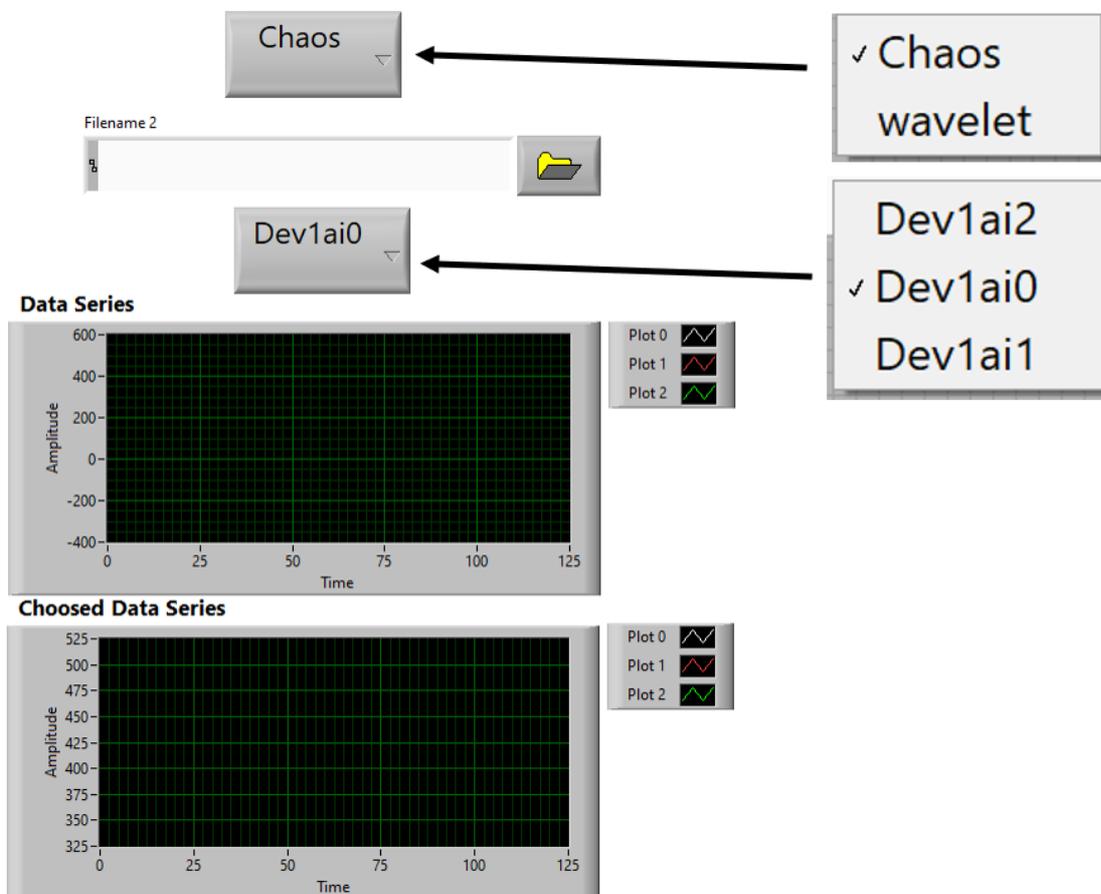


Figura 28: Interfaccia del software definitivo relativa agli input da inserire.

Una volta forniti gli input l'algorithmo fornirà un grafico contenente tutti i segnali acquisiti ed uno del segnale scelto. Successivamente in autonomia eseguirà l'analisi richiesta.

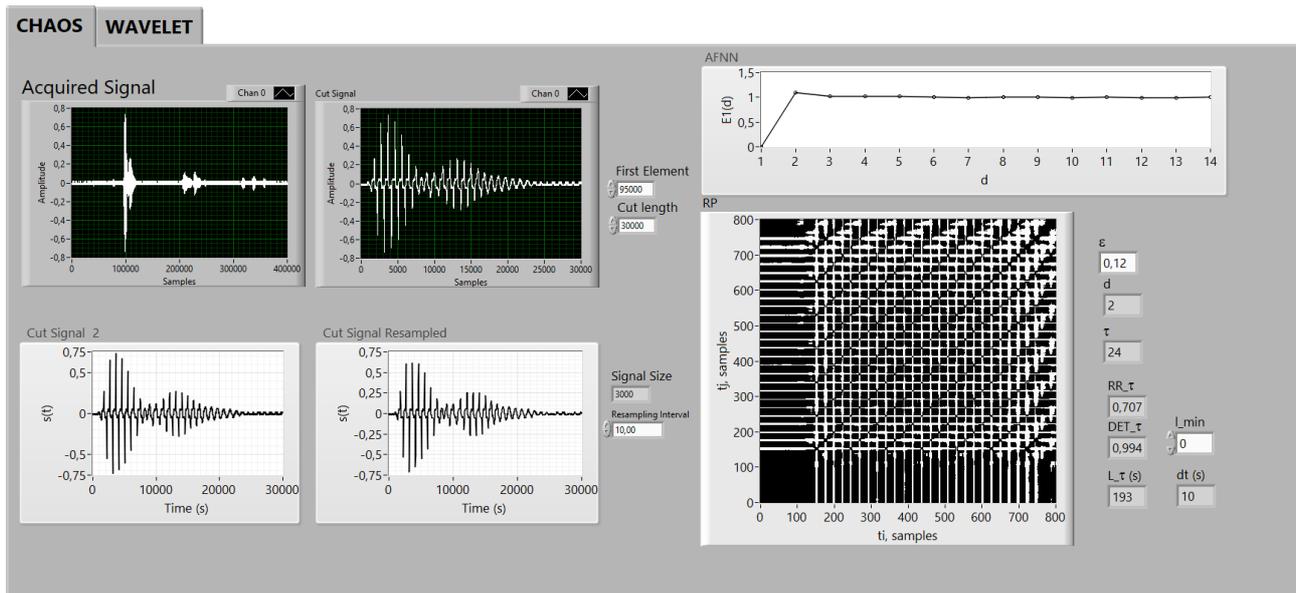


Figura 29: Interfaccia del software relativa ai risultati dell'analisi caotica.

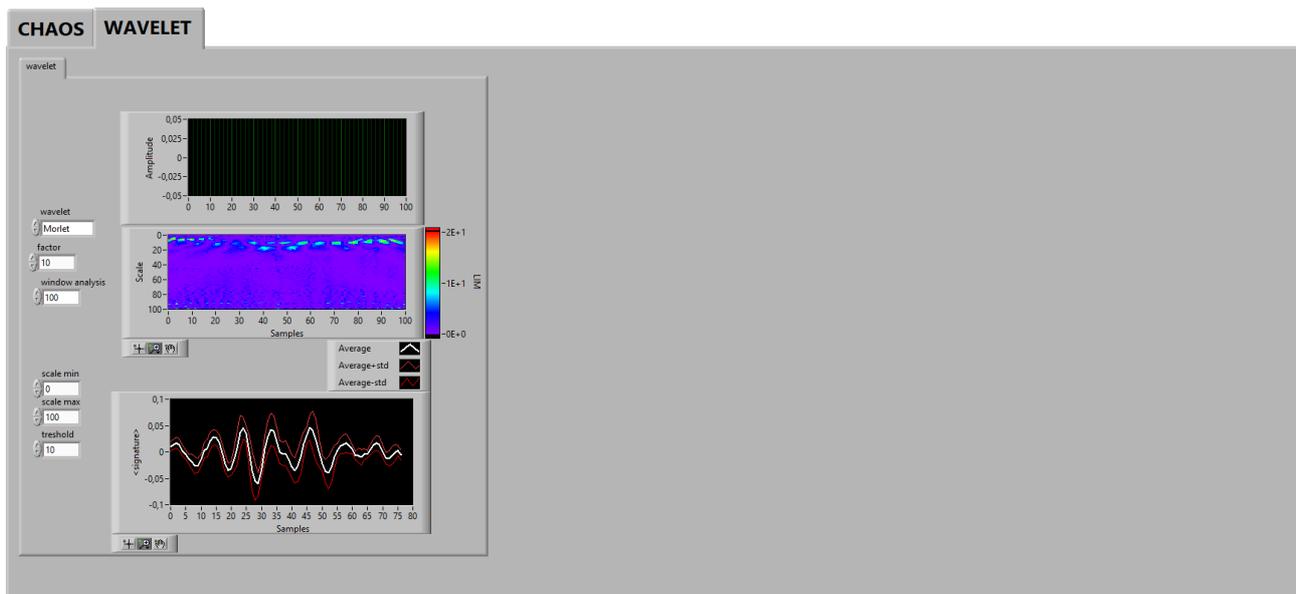


Figura 30: Interfaccia del software relativa ai risultati dell'analisi wavelet.

3.5 Applicazione del software a dati sperimentali

Nei paragrafi precedenti si è mostrata la validazione del software Labview su segnali sintetici. Si è proceduto quindi all'applicazione del software a serie temporali acquisite sperimentalmente nel bruciatore ROMULUS, oggetto dell'attività in questione.

Fornendo il percorso del file in formato .tdms e gli altri input descritti nelle sezioni precedenti possiamo quindi svolgere le analisi per le quali l'algoritmo è stato progettato scegliendo appunto tra analisi caotica o analisi wavelet. Ogni file di acquisizione contiene i segnali relativi a due microfoni ed all'energia radiante emessa dalla combustione. La prima interfaccia del software quindi, dopo la scelta del file di acquisizione, si presenta quindi come in figura 31.

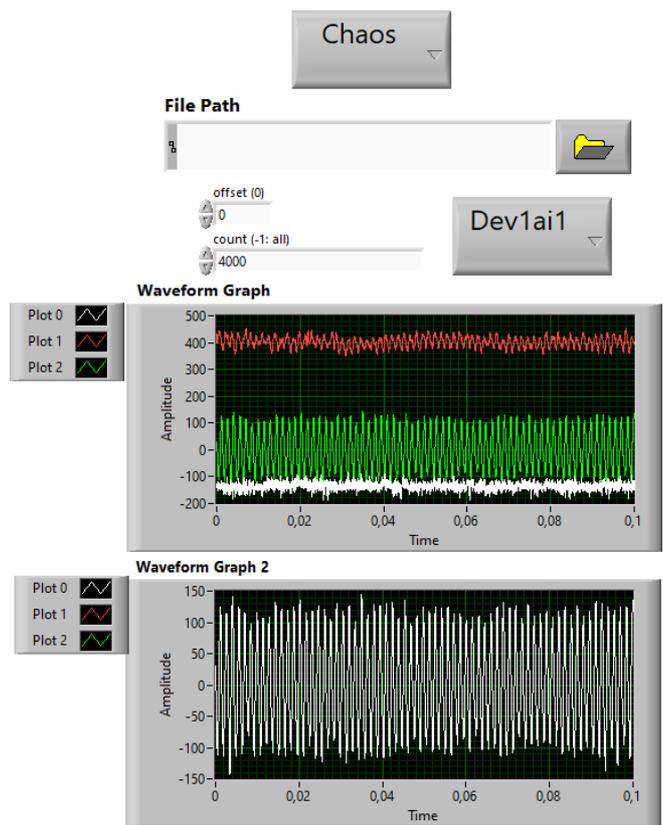


Figura 31: Interfaccia software con input dei file .tdms del bruciatore che mostra i 3 segnali acquisiti e quello scelto per l'analisi.

Procediamo quindi con l'analisi caotica dei tre segnali per due dei file di acquisizione in formato .tdms. I segnali acquisiti relativi al primo file sono mostrati nelle figure 32 e 33.

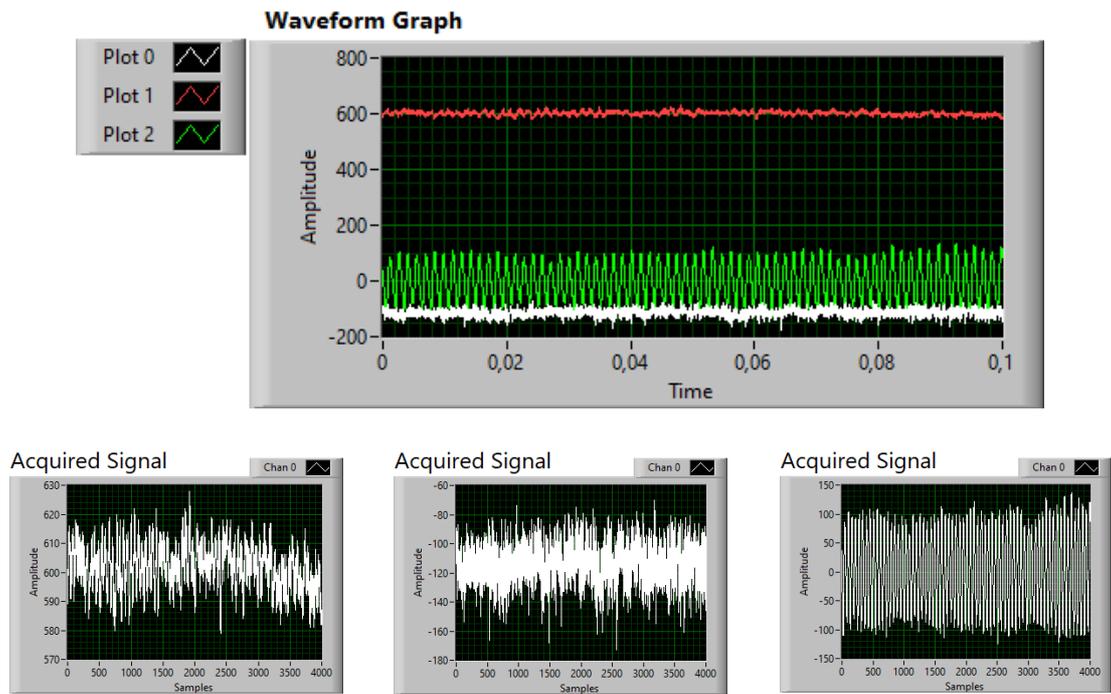


Figura 32: Segnali acquisiti contenuti nel primo file

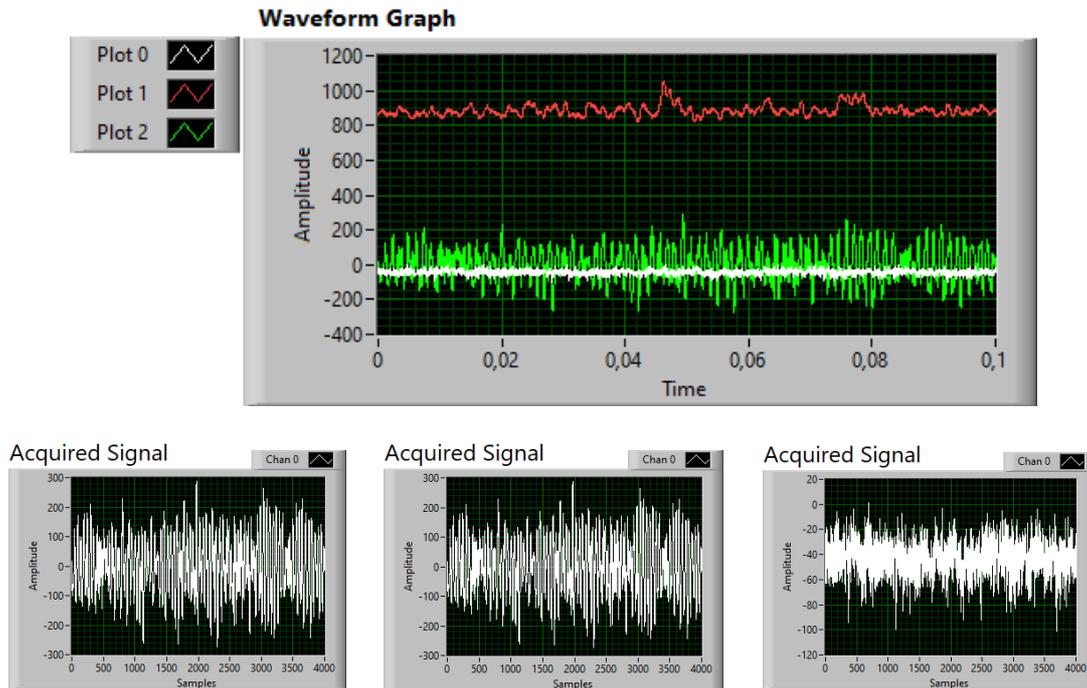


Figura 33: Segnali acquisiti contenuti nel secondo file

Abbiamo quindi 6 segnali sui quali svolgere analisi caotica che produce le mappe di ricorrenza mostrate in figura 34.

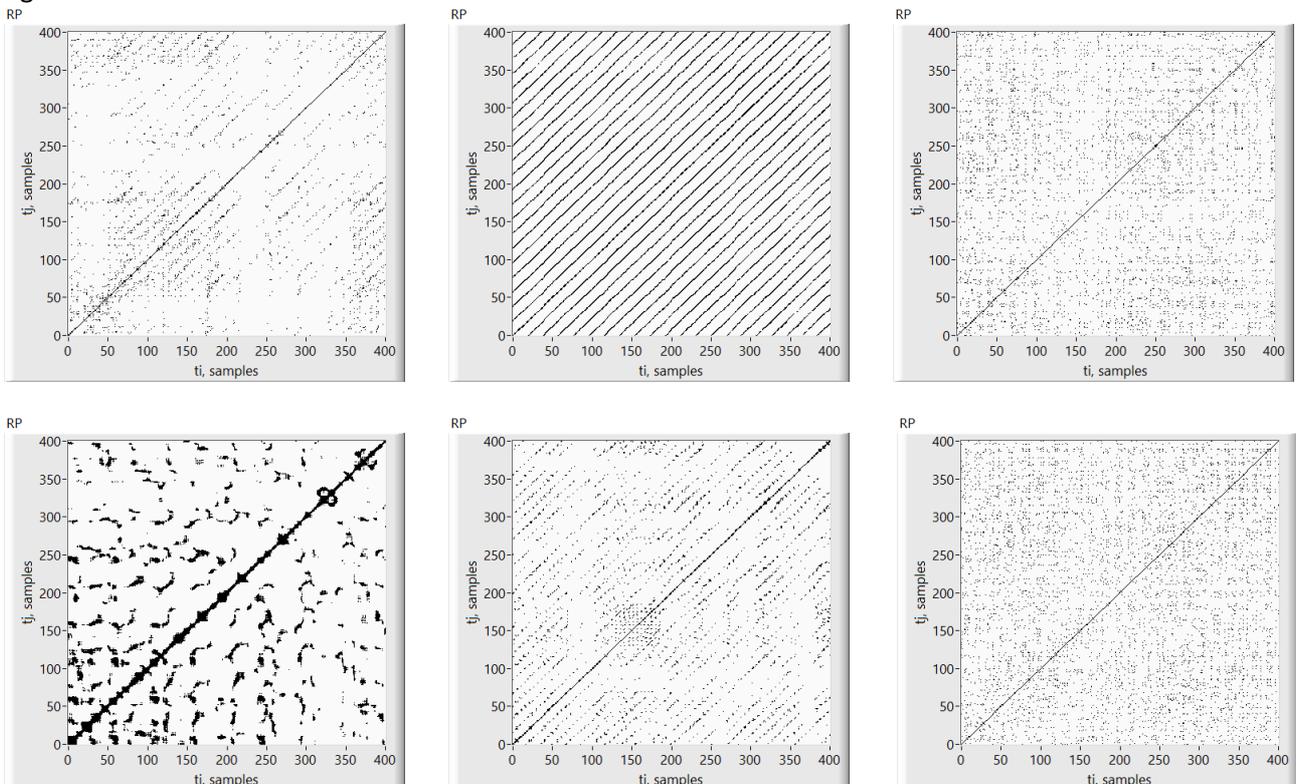


Figura 34: Mappe di ricorrenza

Dalle mappe di ricorrenza appare evidente quando il fenomeno caotico stabile passa ad un regime di instabilità termoacustica che produce lunghe diagonali nere nelle mappe di ricorrenza. E' interessante

osservare il risultato grafico del metodo “Average False Nearest Neighbor” (AFNN) per confermare la validità dell’analisi. Come mostrato in figura 35 infatti l’andamento del parametro raggiunge una stabilità come previsto dalla teoria.

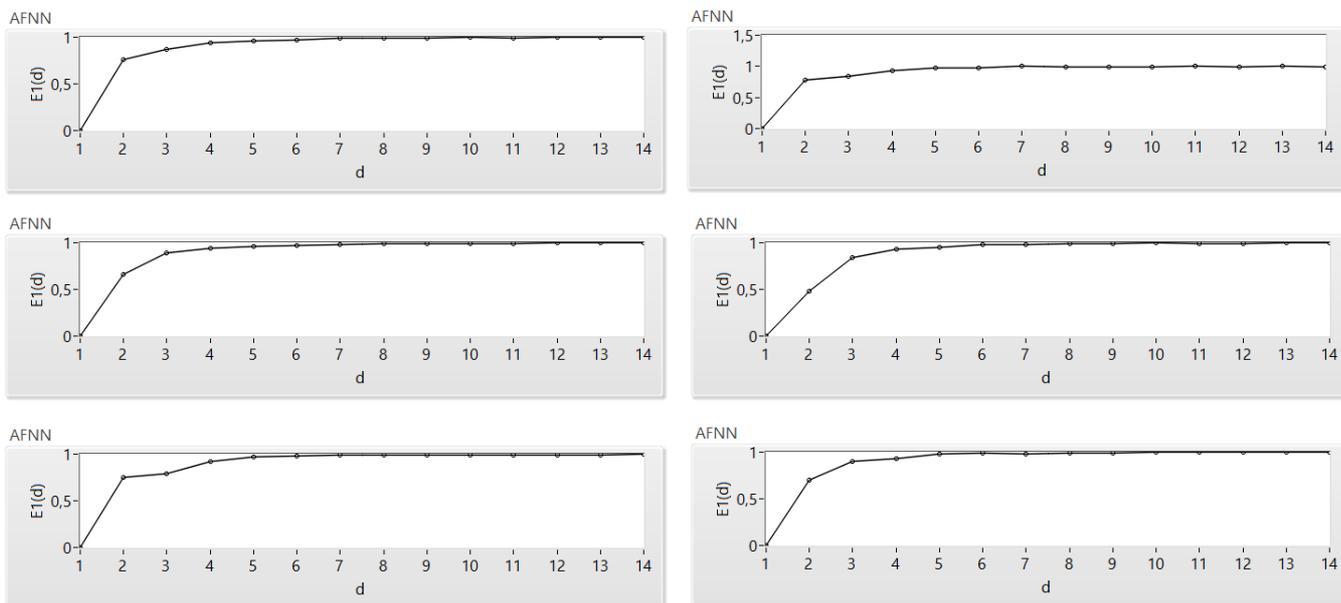


Figura 34: Andamento del parametro AFNN

4 Conclusioni

Con riferimento all’attività sperimentale sul bruciatore ROMULUS [13] è stato prodotto il codice per lo studio dell’influenza dell’idrogeno su comportamenti di instabilità termoacustica, finalizzato alla ricerca di precursori dell’instabilità che consentano di predire con sufficiente anticipo l’insorgenza di tali fenomeni indesiderati [7]. Tramite il software LabVIEW è stato quindi implementato un algoritmo che produce autonomamente, se necessario anche in tempo reale, gli indici di instabilità.

E’ stato inoltre prodotto un software di autocondizionamento basato sull’analisi wavelet, integrato con il codice per l’analisi caotica, per la ricerca di eventi intermittenti ad alto contenuto di energia e che quantifichi la loro ricorrenza nel tempo.

L’interfaccia del software presenta la possibilità di scelta tra analisi caotica o wavelet. Nel caso dell’analisi caotica, il codice mostra il segnale importato, il segnale campionato (nel caso in cui sia necessaria una riduzione del numero di dati per abbassare il costo computazionale), l’andamento di un parametro matematico funzione della dimensione di incorporamento e la rappresentazione del segnale nello spazio delle pseudo-fasi. Nel caso dell’analisi wavelet, il software mostra l’ampiezza e la scala delle firme degli eventi altamente energetici intermittenti. Fornendo al software alcuni input quali: il percorso file del segnale in formato .lvm o .tdms, l’intervallo temporale del ricampionamento (se necessario), la soglia di discriminazione relativa alla mappa di ricorrenza “ ϵ ” e la lunghezza minima di ricorrenza diagonale “ L_{min} ”, vengono calcolati automaticamente gli indici RR_τ , DET e L_τ e graficate le mappe di ricorrenza e le firme dei segnali intermittenti.

5 Bibliografia

- [1] S. S. T. D. D. & C. S. Ducruix, «Combustion dynamics and instabilities: elementary coupling and driving mechanisms» *Journal of propulsion and power*, pp. 722-734., (2003).
- [2] B. T. & L. T. C. Zinn, «Combustion instabilities: basic concepts. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling» pp. 210, 3-26., (2005).
- [3] L. Rayleigh, «The explanation of certain acoustical phenomena» *Roy. Inst. Proc.*, pp. 8, 536-542., (1878).
- [4] J. W. Strutt, «The theory of sound (Vol. 1),» *Macmillan and Company*, (1877).
- [5] T. C. Lieuwen, «Experimental investigation of limit-cycle oscillations in an unstable gas turbine combustor» *Journal of Propulsion and Power*, pp. 18(1), 61-67., (2002).
- [6] F. E. & K. P. Culick, «Unsteady motions in combustion chambers for propulsion system» *NATO Research and Technology Organization Neuilly-Sur-Seine (France)*, (2006).
- [7] R. T. G. P. T. & H.-G. A. Hernandez-Rivera, «Detection of the thermoacoustic combustion instabilities of a slot burner based on a diagonal-wise recurrence quantification» *Physics of Fluid*, pp. 31(12), 124105., (2019).
- [8] F. Takens, «Detecting strange attractors in turbulence. In Dynamical systems and turbulence» *Warwick, Springer, Berlin, Heidelberg.*, pp. (pp. 366-381)., (1981).
- [9] H. D. B. R. S. J. J. & T. L. S. Abarbanel, «The analysis of observed chaotic data in physical systems» *Reviews of modern physics*, pp. 65(4), 1331., (1993).
- [10] L. Cao, «Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series» *Physica D: Nonlinear Phenomena*, pp. 110(1-2), 43-50., (1997).
- [11] N. R. M. C. T. M. & K. J. Marwan, «Recurrence plots for the analysis of complex systems» *Physics reports*, pp. 438(5-6), 237-329., (2007).
- [12] F. L. S. & L. M. TESSICINI, «Complex Dynamical System Analysis.».
- [13] T. & T. G. Pagliaroli, «Wavelet intermittent blowout detection in thermoacoustic instability of trapped vortex combustor» *Journal of Physics*, pp. (Vol. 1589, No. 1, p. 012005)., (2020, July).