



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN  
INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

**Automobili elettriche e sicurezza.  
Un modello sonoro basato sulla sintesi  
granulare.**

*Relatore:*

PROF. SERGIO CANAZZA TARGON

*Laureando:*

ANDREA LUNARDI

1216510

*Correlatrici:*

DOTT.SSA ANNA ZUCCANTE

DOTT.SSA GIADA ZUCCOLO

Anno Accademico 2023/2024



## **Abstract**

Le automobili elettriche (EV, Electric Vehicles) e ibride (HEV, Hybrid Electric Vehicles) sono una delle soluzioni più importanti al problema dell'inquinamento atmosferico, tuttavia la loro capacità di muoversi silenziosamente è una minaccia per la sicurezza stradale. Questo elaborato svolge un'analisi della letteratura esistente ed esamina come tale problema sia stato affrontato finora a livello globale, evidenziando le diverse contromisure adottate dagli stati.

Particolare attenzione viene dedicata all'approccio innovativo della sintesi granulare come soluzione per produrre un modello sonoro per le automobili elettriche. Questa tecnica avanzata consente di generare suoni riconoscibili che migliorano la percezione acustica senza compromettere l'efficienza energetica o l'ambiente sonoro urbano.

In conclusione, questa ricerca fornisce una panoramica approfondita del problema della scarsa percettibilità delle automobili elettriche e propone la sintesi granulare del suono come una promettente soluzione per affrontare questa sfida in un modo nuovo ed efficace, contribuendo così a un ambiente urbano più sicuro, sostenibile e armonioso.



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stato dell'arte</b>	<b>3</b>
2.1	Parole chiave . . . . .	3
2.2	I primi studi . . . . .	3
2.3	Legislazioni nel mondo . . . . .	4
2.3.1	Stati Uniti . . . . .	4
2.3.2	Unione Europea . . . . .	5
2.4	Dati e statistiche . . . . .	6
2.4.1	Dati su incidenti e situazioni pericolose . . . . .	6
2.4.2	Livelli di rumore dei veicoli silenziosi - confronto con i veicoli convenzionali . . . . .	7
2.5	Sintesi audio . . . . .	8
2.5.1	Sintesi sottrattiva . . . . .	9
2.5.2	Sintesi additiva . . . . .	9
2.5.3	Modulazione di frequenza . . . . .	9
2.5.4	Campionamento . . . . .	9
2.5.5	Sintesi wave-table . . . . .	10
2.5.6	Sintesi granulare . . . . .	10
<b>3</b>	<b>La sintesi granulare</b>	<b>11</b>
3.1	Progettazione del suono utilizzando la sintesi granulare . . . . .	12
3.1.1	Granulazione di suoni . . . . .	12
3.1.2	Sintesi . . . . .	12
3.2	Sintesi granulare: un modello sonoro per le auto elettriche . . . . .	14
3.2.1	Progetto Engine Sound Enhancement And Customization Based On Granular Synthesis . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Sviluppo della sintesi granulare in simulink</b>	<b>21</b>

**5 Conclusioni**

**27**

**Bibliografia**

**29**

# Elenco delle figure

2.1	Illustrazione delle traiettorie nell'incrocio a T secondo il rapporto di Ashmead . . . . .	7
2.2	Livelli di rumore di un HEV a confronto con due veicoli con motore a combustione [11]. . . . .	7
2.3	Risultati di uno studio sulla percezione del suono di un HEV in avvicinamento, comparato con due veicoli con motore a combustione interna, con diversi livelli di rumore di sottofondo. . . . .	8
3.1	Struttura di un involuppo con la fase di inizio (Attack) e fine (Release) [13]. . . . .	13
3.2	Rappresentazione grafica di sintesi granulare. I grani sono presi da sorgenti diverse, sovrapposti in modo aleatorio e con caratteristiche di frequenza diverse [14]. . . . .	13
3.3	Schema a blocchi delle fasi della sintesi granulare svolte nel progetto [13]. . . . .	14
3.4	Spettrogramma del segnale originale registrato [13]. . . . .	16
3.5	Spettrogramma del segnale ottenuto in uscita dal filtro VBIIR [13].	16
3.6	Struttura del <i>database</i> dei grani. Ad ognuno è associato un insieme caratterizzante di variabili di stato del veicolo [13]. . . . .	17
3.7	Esempio di risultato di sintesi granulare quasi-sincrona svolta nel progetto riportato come esempio [13]. Il veicolo in questo caso è stato guidato appositamente in progressione, con numerosi cambi di marce, per evidenziare il lavoro svolto. . . . .	19
4.1	Schema di lavoro del progetto FIAMM. . . . .	22

- 4.2 Esempio di risultato di sintesi granulare svolta seguendo il metodo del paragrafo 3.2.2; per ogni thread è riportata una serie di grani ad estrazione casuale dal buffer, e nella riga *output* è riportato il risultato della sovrapposizione di tali thread. L'involuppo applicato ai grani è triangolare, uguale per tutti. . . . . 25

# Acronimi

**AVAS** Acoustic Vehicle Alerting System. 5

**DSP** Digital Signal Processing. 11

**EV** Electric Vehicle. 1

**HEV** Hybrid Electric Vehicle. 1

**NHTSA** National Highway Traffic Safety Administration. 4

**OLA** OverLap and Add. 12

**RPM** Revolutions Per Minute. 15

**STFT** Short Time Fourier Transform. 13

**UNECE** United Nations Economic Commission for Europe. 5



# Capitolo 1

## Introduzione

Il settore automobilistico è in continua evoluzione, e le case produttrici devono affrontare sfide sempre nuove. Al giorno d'oggi, sono numerosi i problemi che vanno fronteggiati in tale ambito: le emissioni inquinanti, la sicurezza stradale, le performance dei veicoli e le richieste da parte della clientela.

Una questione importante è rappresentata dai veicoli elettrici, la cui diffusione è in crescita soprattutto per l'impatto ambientale ridotto rispetto ai veicoli con motore termico. Tale diffusione deve fronteggiare gli obblighi di legge che impongono l'equipaggiamento di sistemi acustici che le rendano percettibili per gli utenti della strada, dato che il rumore emesso dal motore elettrico non è talvolta udibile. Le leggi in questione sono state introdotte con lo scopo di ridurre la probabilità di incidenti e potenziare la sicurezza stradale.

Inoltre, le case automobilistiche mirano ad ampliare le opzioni di personalizzazione dei veicoli, dato che molto spesso gli utenti applicano modifiche ai propri mezzi per renderli unici e conformi alle proprie aspettative.

Questo elaborato ha due obiettivi principali: sensibilizzare il lettore sul problema che i veicoli elettrici rappresentano per la sicurezza stradale, e proporre una soluzione rappresentata da un modello sonoro per il motore degli EV e HEV basato sulla sintesi granulare.



# Capitolo 2

## Stato dell'arte

### 2.1 Parole chiave

Per lo svolgimento dello stato dell'arte, la ricerca si è basata sulle parole chiave "EV" (Electric Vehicle), "Sound" (Suono) e "Granular Synthesis" (Sintesi Granulare). In particolare, dapprima sono stati raccolti studi e fatti storici che hanno spinto verso la sonorizzazione dei veicoli elettrici e ibridi, e successivamente si è riposta la concentrazione sul Sound Design e la Sintesi Granulare.

### 2.2 I primi studi

La consapevolezza che le automobili elettriche, in quanto veicoli silenziosi, possano rappresentare un rischio per i pedoni e i ciclisti, nasce negli anni recenti. L'importanza dei caratteristici suoni emessi dalle vetture con motore a combustione inizia a essere analizzata già nel ventesimo secolo. Nel 1970 Leonard Evans trattò l'argomento per la prima volta e svolse una ricerca che indica tutt'ora come i conducenti con disabilità uditive non effettuino stime corrette della velocità del veicolo. Il suono del motore e la sua intensità, infatti, ne sono importanti indicatori per chi è al volante, e aiutano anche nel cambiare marcia. La loro assenza si traduce in una mancanza di consapevolezza che influenza negativamente i guidatori [3].

Parallelamente, e in parte come conseguenza, si sviluppa tra la popolazione la consapevolezza del problema della minaccia rappresentata dagli EV per la sicurezza dei pedoni, i quali si affidano molto alla sfera uditiva quando sono sulla strada. Uno studio del 2001 svolto da Michael Wogalter et al. esaminò le attitudini nei confronti dei veicoli ibridi ed elettrici, inclusa la questione della sicurezza

associata all'assenza di rumore. Su 380 persone, il 70% disse che tale mancanza è una potenziale minaccia per i pedoni, mentre il 73% ammise di aver usufruito dei suoni circostanti prima di attraversare le strisce pedonali in più di un'occasione [4]. Inoltre, l'86% fu d'accordo con una dichiarazione che diceva che il suono emesso da un veicolo in movimento è stato per loro fonte di informazione riguardo il suo avvicinamento. Nonostante la scarsa diffusione dei mezzi a propulsione elettrica (meno di 25mila HEV vendute nel 2001 negli Stati Uniti [5]), i dati evidenziano come già nei primi anni Duemila la popolazione avesse contezza dell'argomento e della necessità di poter fare affidamento sul panorama sonoro della strada, nonché preoccupazione per i risconti negativi che tali mezzi potevano avere sulla loro incolumità.

Una voce importante in quegli anni la ebbero le comunità di persone non vedenti: nel 2007 quella statunitense dichiarò che i veicoli ibridi ed elettrici possono essere un pericolo serio nelle aree molto popolate, soprattutto per coloro che fanno parte del gruppo. In tale contesto, le automobili elettriche non forniscono gli stimoli uditivi essenziali alle persone non vedenti per riconoscere la loro presenza o il loro avvicinamento, rendendole più vulnerabili [5].

Infine, nella seconda metà del decennio 2000-2010 numerosi stati si occuparono di risolvere i problemi finora presentati, con nuove legislazioni e regole che impongono alle case produttrici di equipaggiare le auto elettriche e ibride con dispositivi che ne garantiscano la rilevabilità in un ambiente urbano.

## 2.3 Legislazioni nel mondo

Stati Uniti, Unione Europea e Giappone furono i primi ad affrontare il problema presentando una soluzione comune: le auto elettriche devono emettere un suono artificiale regolamentato, in modo che pedoni, soggetti più vulnerabili e ciclisti possano sentirne l'avvicinamento e la direzione. La scelta del suono da parte delle case produttrici va fatta rispettando dei limiti, per motivi di tollerabilità: è opportuno introdurre un aiuto, ma senza creare problemi di inquinamento acustico e senza compromettere la quiete pubblica.

### 2.3.1 Stati Uniti

Negli Stati Uniti le discussioni e le legislazioni sono state portate avanti dal Dipartimento dei Trasporti e dalla National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Inizialmente, il Senato e la Camera dei Rappresentanti approvarono il

Pedestrian Safety Enhancement Act nel 2010, e adottarono assieme alle Nazioni Unite delle linee guida volontarie nel 2012. Queste linee guida furono trascritte in specifiche nel 2016, e nel 2017 le introdusse anche l'Unione Europea. [6]

### 2.3.2 Unione Europea

La Regolamentazione delegata della Commissione EU 2017/157 stabilisce che ogni nuovo veicolo dal 1 Luglio 2019 deve essere disposto di un AVAS, acronimo di Acoustic Vehicle Alerting System. Dal 1 Luglio 2021 è obbligatorio per tutte le auto elettriche o ibride. La normativa definisce alcune caratteristiche che ogni AVAS deve avere per poter essere messo in circolazione:

- Il dispositivo deve generare suono quando il veicolo si mette in moto e si muove fino alla velocità di 20 km/h, anche in retromarcia.
- l'AVAS può essere munito di un interruttore per attivare e disattivare la riproduzione del suono. Quanto il veicolo parte, lo switch deve essere impostato su ON (acceso). Se presente, l'interruttore deve essere posizionato in modo da essere facilmente azionabile dal conducente nella normale posizione di guida. Inoltre, il costruttore deve indicare al proprietario del veicolo che la funzione di pausa per l'AVAS non deve essere utilizzata a meno che non si è certi che non vi siano pedoni nelle vicinanze.
- Il livello del suono deve poter essere attenuato quando il veicolo è in funzione. Il suono attenuato deve comunque stare sopra il livello minimo specificato dal Regolamento n.138 della UNECE.
- Il suono deve essere continuo e deve riflettere il comportamento dinamico del veicolo. Inoltre deve essere simile a quello di un veicolo con motore a combustione interna appartenente alla stessa categoria. Quando il veicolo è fermo, può emettere suono. Possono essere previsti diversi suoni selezionabili dal conducente, purché siano tutti conformi alle normative.
- Il livello sonoro complessivo dell'AVAS non deve eccedere i 75 dB (A) se il veicolo procede nella direzione di marcia. Questo valore deve essere rispettato quando si misura il suono dell'AVAS a 2 metri di distanza dal suono stesso, nelle modalità specificate dalla Regolamentazione n.138 della Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite.

## 2.4 Dati e statistiche

Con le prime legislazioni, nacquero anche i primi malumori. Durante il ventesimo Congresso Internazionale di Acustica (2010, anno in cui venne approvato il Pedestrian Safety Enhancement Act), Ulf Sandberg, Luc Goubert e Piotr Mioduszewski espressero forti dubbi nei confronti della sonorizzazione artificiale obbligatoria per gli EV e HEV [8]. C'è davvero tutta questa differenza tra il rumore emesso da veicoli ibridi, e quello emesso da veicoli convenzionali? In quali situazioni specifiche? Ci sono dati che evidenziano che i veicoli "silenziosi" causano più incidenti rispetto ad altri? Non si possono studiare altre soluzioni?

Per sottolineare l'importanza decisioni prese e per confutare l'antitesi sostenuta da Sandberg, vengono di seguito riportati alcuni dati inerenti.

### 2.4.1 Dati su incidenti e situazioni pericolose

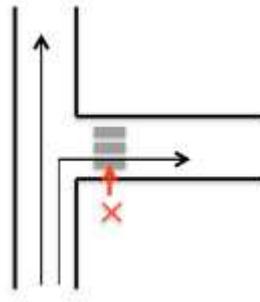
Un importante resoconto del NHTSA del 2009 analizza il problema delle collisioni tra pedoni e auto. Dal 2000 al 2009 il tasso di scontro pedone-veicolo elettrico negli Stati Uniti risulta dello 0.9%, mentre per i veicoli a combustione interna è solo dello 0.6% [6]. Va riportato anche che gli stessi autori raccomandano di interpretare i suddetti numeri con un certo grado di cautela, data la piccola dimensione del campione analizzato. La conclusione del verbale, infatti, recita [9]:

*«In conclusion, this study found that HEVs have a higher incidence rate of pedestrian and bicyclist crashes than do ICE vehicles in certain vehicle maneuvers. These results should serve as a guide when designing future HEVs' pedestrian and bicyclist crash prevention programs. NHTSA will continue monitoring the incidence of pedestrian and bicyclist crashes involving HEVs. In future, a larger sample size would allow us to perform a more detailed analysis, such as limiting the entire analysis to lowspeed crashes, analysing different vehicle maneuvers individually, etc. Data findings on this study will be updated when new State Data System and other data sources become available.»*

Il rapporto rimane un ottimo punto di riferimento, nonché uno degli unici sull'argomento.

Un'analisi utile al fine di evidenziare le situazioni più particolari in cui le automobili elettriche e ibride rappresentano un pericolo per i pedoni, viene fatta da

Daniel Ashmead et al [10]. L'articolo considera, ad esempio, un incrocio a T, con il veicolo che passa di fronte al pedone da destra a sinistra, di fianco al pedone sulla sinistra, e infine la situazione di passaggio e svolta a destra (Figura 2.1).

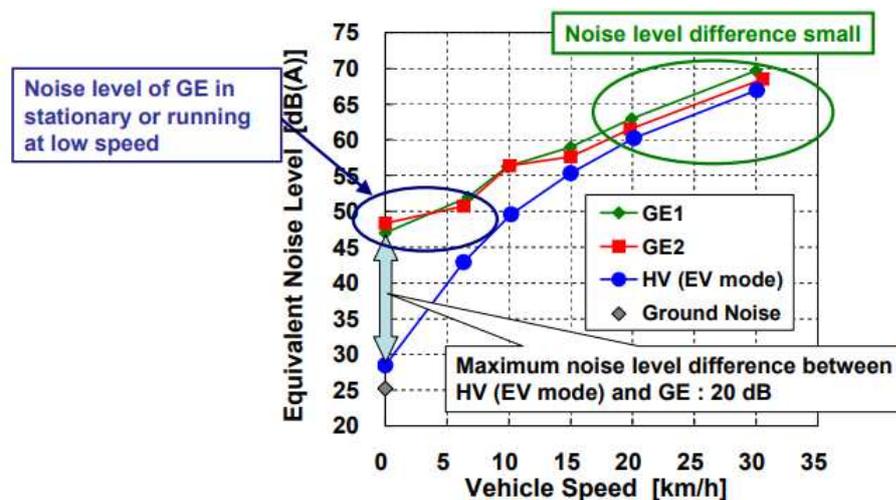


**Figura 2.1:** Illustrazione delle traiettorie nell'incrocio a T secondo il rapporto di Ashmead

Il pedone dovrebbe decidere se attraversare o meno, basandosi sulla percezione del traffico di fronte a sé e di potenziali veicoli sulla sinistra intenti a svoltare a destra. Non poter fare affidamento sulla sfera uditiva, specialmente per le persone non vedenti, si rivela molto pericoloso [6] [10].

### 2.4.2 Livelli di rumore dei veicoli silenziosi - confronto con i veicoli convenzionali

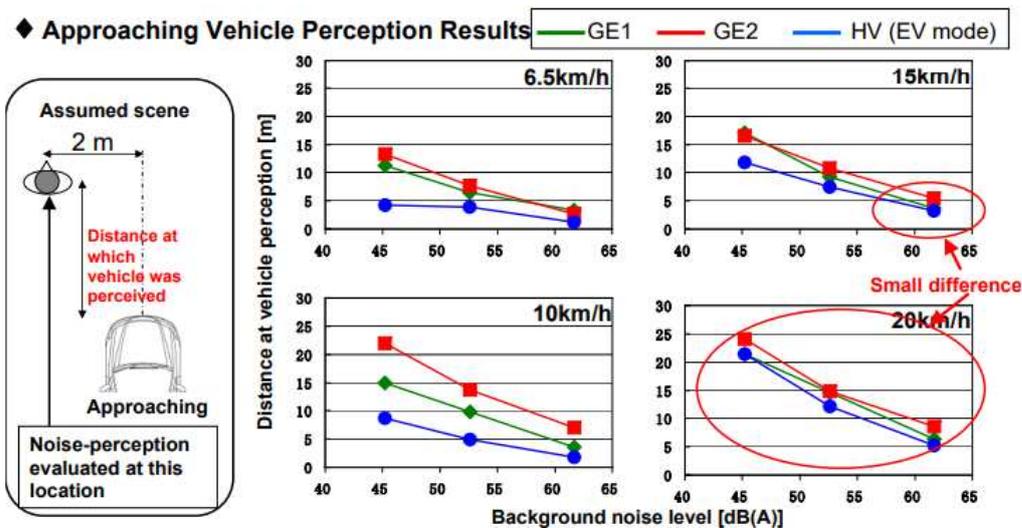
Uno studio giapponese del 2009 [11] riporta le misurazioni su un'automobile ibrida guidata in modalità elettrica in un range di velocità 0-35 km/h e le compara a quelle di due auto a combustione interna (GE1, GE2). I risultati sono riportati nella Figura 2.2. Dalla figura si evince che, con un rumore di sottofondo fissato



**Figura 2.2:** Livelli di rumore di un HEV a confronto con due veicoli con motore a combustione [11].

a 25 dB, le differenze significative tra livelli di emissioni di rumore le troviamo a velocità inferiori a 20 km/h, esattamente la soglia di legge sotto la quale è obbligatorio il funzionamento dell'AVAS.

Nello studio viene descritto anche un esperimento sulla percezione del suono da parte di 20 individui per gli stessi veicoli presentati nella Figura 2.2, in una situazione di avvicinamento, con tre diversi rumori di sottofondo (Figura 2.3).



**Figura 2.3:** Risultati di uno studio sulla percezione del suono di un HEV in avvicinamento, comparato con due veicoli con motore a combustione interna, con diversi livelli di rumore di sottofondo.

In conclusione, le contestazioni fatte al Congresso Internazionale di Acustica del 2010 devono fare i conti con quanto provato su carta: non solo le auto elettriche e ibride sono evidentemente più silenziose di quelle a combustione interna, fatto contestualizzato anche in un ambiente urbano rumoroso, ma sono oltretutto protagoniste di un numero maggiore di scontri con i pedoni. La soluzione della sonorizzazione obbligatoria adottata da UE, Stati Uniti e Giappone risulta dunque pienamente giustificata, soprattutto per i soggetti non vedenti che possono fare affidamento su una fonte di informazione efficace e veloce.

## 2.5 Sintesi audio

Con l'introduzione delle leggi riportate in precedenza, il suono emesso dagli EV e HEV diventa un fattore di design importante, come ad esempio lo è l'aspetto dell'automobile: influenza concretamente la scelta del veicolo al momento dell'acquisto, l'esperienza di guida del conducente, le sue emozioni e l'immagine di un marchio [12]. Grandi case produttrici come BMW, Audi, Ford e Jaguar stanno

tuttora svolgendo ricerche su come stimolare le emozioni dei guidatori e esprimere l'identità del brand attraverso il suono emesso dalle loro automobili. Vengono di seguito analizzati i principali metodi di sintesi audio utilizzati nei tempi più recenti.

### 2.5.1 Sintesi sottrattiva

Metodo di sintesi che inizia da una forma d'onda a banda larga, la quale viene filtrata mediante, appunto, filtri tempo varianti e altri processi. Queste forme d'onda armoniche sono forme semplici come onde a dente di sega e onde quadre, facili da produrre elettronicamente con un oscillatore, ma non molto interessanti da sole. Per ottenere la traccia desiderata è necessario modellare la loro dinamica, il bilanciamento della frequenza e la trama; è qui che entra in gioco il resto dei processi di sintesi sottrattiva [13].

### 2.5.2 Sintesi additiva

Nella sintesi additiva, suoni complessi sono prodotti mediante la sovrapposizione di suoni elementari, spesso sinusoidali. In certe condizioni (ad esempio se le frequenze sono multiple tra loro) i suoni costituenti si fondono insieme e il risultato è percepito come un unico suono. Questo procedimento è usato anche in alcuni strumenti musicali tradizionali. Ad esempio nell'organo, le canne producono suoni relativamente semplici. Per ottenere suoni più ricchi, sono usate più canne che suonano contemporaneamente a differenti altezze, tipicamente multiple della fondamentale [14].

### 2.5.3 Modulazione di frequenza

La sintesi per modulazione di frequenza è la più utilizzata tra i metodi di sintesi non lineare. Questo nome raggruppa tutti i metodi che svolgono una modulazione della fase o frequenza istantanea di una senoide (portante) secondo l'andamento di un altro segnale (modulante), spesso sinusoidale [14].

### 2.5.4 Campionamento

Questa tecnica usa, come suggerisce il nome, una collezione di campioni di suoni che vengono uniti per creare una traccia audio nuova. Richiede molto meno

sforzo di processo rispetto agli altri metodi, ma è necessario un database di campioni grande. La ricombinazione avviene senza, o con molto poche, modifiche dei campioni [13].

### 2.5.5 Sintesi wave-table

Nella sintesi wave-table viene diviso il periodo di un'onda in piccoli frammenti, i quali sono salvati in celle che vengono unite e sistemate nella tabella di ricerca delle forme d'onda. Per ogni onda sonora viene ripetuta la stessa procedura e vengono create altre tabelle. Successivamente, per creare il suono, si cercano i vari "blocchi sonori" nelle tabelle, si determina come riprodurli (direzione, velocità ecc...) e li si incatena per ottenere il timbro sonoro finale [13].

### 2.5.6 Sintesi granulare

Anche la sintesi granulare, come la sintesi additiva, si basa sull'idea di creare suoni più complessi a partire da suoni più semplici. Se nella sintesi additiva si lavora con le sinusoidi, però, nella sintesi granulare si lavora con forme d'onda di breve durata (intervalli dell'ordine del millisecondo) chiamate grani: questi vengono modellati e ricombinati per produrre la texture desiderata.

Quest'ultimo metodo, in particolare, sembra essere molto promettente nello sviluppo di suoni emessi dai motori delle auto elettriche. Potrebbe infatti avere un impatto molto positivo sull'esperienza uditiva dei guidatori e delle persone circostanti il veicolo. Ne è dimostrazione uno studio del 2018 svolto da Dongki Min, Buhum Park e Junhong Park: vengono riportati i risultati di un sondaggio sull'apprezzamento di due diversi suoni per il motore di un Volvo FM, uno generato tramite sintesi granulare e l'altro registrato da un motore a combustione interna. Il suono virtuale ha ottenuto risultati ottimi, al contrario di quello registrato, con livelli di soddisfazione sorprendenti [19]. Per tali motivi questo elaborato si propone di presentare la sintesi granulare come metodo preferibile per la generazione di modelli sonori per i motori delle auto elettriche, riportandone nel prossimo capitolo un'analisi dettagliata e degli esempi rilevanti.

## Capitolo 3

### La sintesi granulare

I primi riferimenti a un approccio granulare per la sintesi del suono risalgono al 1947, quando Dennis Gabor pubblicò il suo articolo "Acoustical Quanta and the Theory of Hearing", mentre la prima teoria sulla composizione tramite grani è datata 1971 e la si trova nel libro "Formalized Music" di Iannis Xenakis [15, 16]. In quegli anni però, la sintesi granulare venne utilizzata unicamente nella composizione musicale e, a causa dell'elevata complessità dei calcoli, non ebbe successo. È con l'avvento del Digital Signal Processing (DSP) che questo metodo diventa popolare, trovando spazio non solo nella composizione musicale ma anche nelle performance dal vivo e nella creazione di suoni virtuali. Nel 1988 Barry Truax pubblica un articolo in cui viene per la prima volta presentata un'implementazione in tempo reale di sintesi granulare e signal processing che faceva uso di strumenti di recentissima invenzione: il DMX 1000 programmabile, un Digital Signal Processor, controllato da un PDP micro 11, computer con architettura a 16 bit [17]. Nel 1990 lo stesso Truax completa il precedente lavoro riportando per iscritto la possibilità di impiegare la sua implementazione nella composizione dal vivo [18].

In seguito a questi primi studi, sono stati presentati numerosi progetti di sintesi granulare del suono; nei prossimi paragrafi verranno analizzate le fasi previste da tale metodo, e successivamente riportato un lavoro interessante di modello sonoro per le auto elettriche creato con la sintesi granulare.

## 3.1 Progettazione del suono utilizzando la sintesi granulare

Come anticipato nella Sezione 2.5.6, la sintesi granulare lavora con forme d'onda di breve durata chiamate grani. Non esiste uno scritto che illustri i passi da compiere con tali eventi acustici per lo svolgimento della sintesi, essendo un metodo aperto all'innovazione, ma è possibile analizzare gli studi fatti finora e osservare che esistono due casi principali intrapresi a seconda della forma d'onda del grano.

### 3.1.1 Granulazione di suoni

Nel primo viene utilizzato l'OverLap and Add (OLA) [14]: forme d'onda complesse, prese da suoni reali o descritte come spettri, si susseguono in parte sovrapponendosi. Si possono così sia riprodurre fedelmente suoni, che modificarli nelle caratteristiche dinamiche. In questo metodo di lavoro è importante la cura dell'allineamento temporale dei grani, per prevenire fenomeni di discontinuità di fase e conseguenti effetti acustici poco gradevoli.

Un esempio d'utilizzo è la sintesi della componente stocastica del segnale: per ogni grano si ricorre alla trasformata di Fourier inversa di uno spettro il cui modulo è definito dall'inviluppo<sup>1</sup> spettrale (vedi figura 3.1) e la fase viene creata da un generatore di numeri casuali. Ogni grano viene poi moltiplicato per una finestra prima di fare l'Overlap and Add.

Oppure, come ulteriore esempio, si può usare questo approccio per la trasformazione di suoni campionati. I grani vengono generati come piccole parti di suoni precedentemente registrati, e successivamente ad ognuno viene applicato un inviluppo di ampiezza. Vengono poi riprodotti in ordine casuale, o con velocità variabili (Figura 3.2).

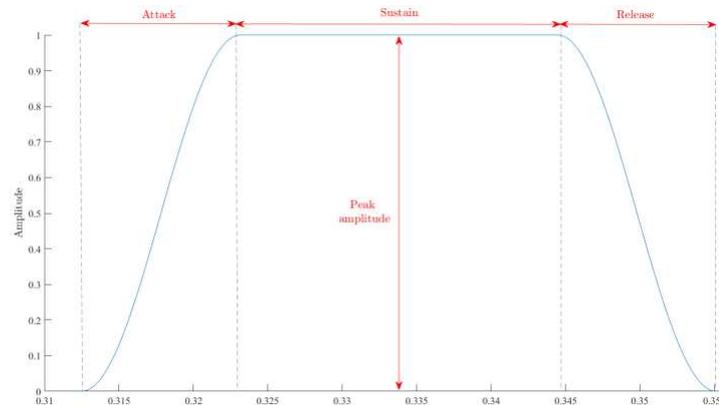
### 3.1.2 Sintesi

Nel secondo tipo [14] i grani sono funzioni gaussiane o, più generalmente, di tipo passabasso, modulate in frequenza. La forma d'onda dell' $i$ -esimo grano è data da:

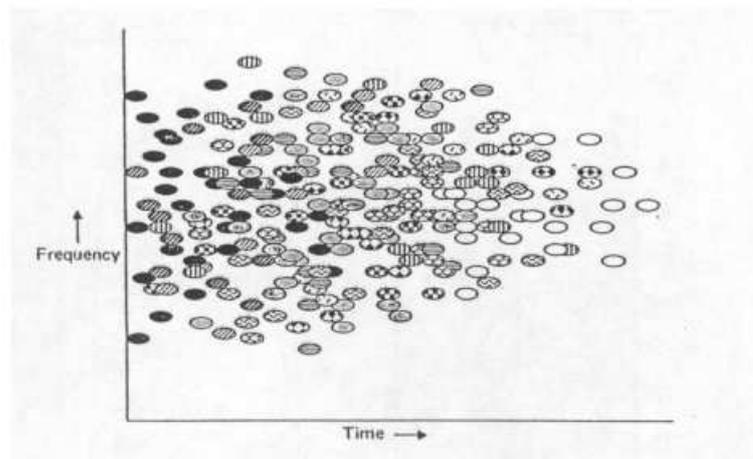
$$g_i(n) = w_i(n) \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_i}{F_s} n + \phi_i\right) \quad (3.1)$$

---

<sup>1</sup>L'inviluppo fa riferimento alla modifica dell'ampiezza dei grani, influenzandone la forma. Dopo che un grano è stato estratto, viene "finestrato", ovvero viene applicato un inviluppo.



**Figura 3.1:** Struttura di un inviluppo con la fase di inizio (Attack) e fine (Release) [13].



**Figura 3.2:** Rappresentazione grafica di sintesi granulare. I grani sono presi da sorgenti diverse, sovrapposti in modo aleatorio e con caratteristiche di frequenza diverse [14].

dove  $w_i(n)$  è una finestra di durata  $N_i$  campioni. La formula di sintesi è:

$$s(n) = \sum_i a_i \cdot g_i(n - n_i) \quad (3.2)$$

dove  $a_i$  è il coefficiente di ampiezza del grano  $i$ -esimo e  $n_i$  il suo riferimento temporale.

I grani possono poi essere disposti in modo ordinato su una griglia nel piano tempo-frequenza, realizzando una sintesi con metodo Short Time Fourier Transform (STFT, contenuto in frequenza a banda stretta). In alternativa, si possono disporre i grani in maniera sincrona col periodo del segnale, realizzando la cosiddetta sintesi granulare sincrona. Più comunemente, invece, i grani sono distribuiti in modo irregolare in regioni specifiche del piano tempo-frequenza-ampiezza, realizzando una tessitura musicale (*texture*, figura 3.2). Quest'ultimo metodo risparmia i controlli dettagliati sulle caratteristiche temporali dei grani, permettendo

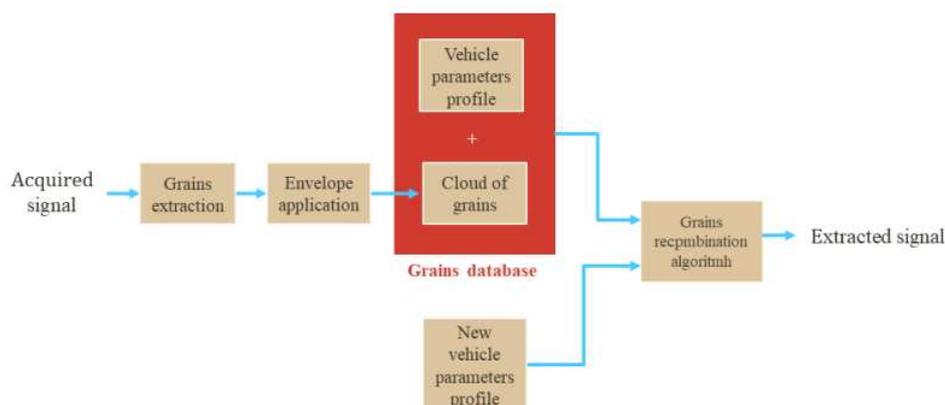
un'analisi più semplice su, per esempio, durata dei grani, oppure sulla densità dei grani nella regione occupata, o ancora sulla dimensione della regione stessa; parametri che, se modellati, modificano il carattere del suono finale (sintesi granulare asincrona).

## 3.2 Sintesi granulare: un modello sonoro per le auto elettriche

Recentemente sono stati presentati i primi progetti in cui viene utilizzata la sintesi granulare per generare suoni emessi dalle auto elettriche, allo scopo di risolvere i problemi presentati nel Capitolo 2. Di seguito viene riportato un esempio, il quale può aiutare a capire come è possibile applicare quanto appreso finora in questo particolare ambito.

### 3.2.1 Progetto Engine Sound Enhancement And Customization Based On Granular Synthesis

In questo progetto di tesi sviluppato da una studentessa dell'Università di Torino [13], in collaborazione con la S.p.A. Electronics division of Marelli, viene proposta una soluzione per enfatizzare il suono del motore dei veicoli o per crearlo da zero, nel caso di quelli elettrici.



**Figura 3.3:** Schema a blocchi delle fasi della sintesi granulare svolte nel progetto [13].

Le fasi del lavoro sono riassunte nella figura 3.3 e vengono di seguito analizzate.

Per prima cosa è stata modificata una registrazione del suono di un motore a combustione interna, allo scopo di eliminarne il contenuto rumoroso ed estrarne

quello armonico. Questo passo è necessario perché, se il rumore fosse incluso nella generazione del segnale, al momento della riproduzione dell'audio nel veicolo il rumore percepito sarebbe doppio: una parte proveniente dallo stesso segnale, e un'altra dovuta all'hardware installato nella macchina. È dunque prevista una prima ricerca delle frequenze delle armoniche fondamentali basata sulla velocità del motore, la quale è a sua volta associata alla registrazione analizzata. Il legame tra RPM e frequenza fondamentale è descritto dall'Equazione 3.3:

$$f_{H_k}(t) = k \cdot N_{cyl} \cdot \frac{RPM(t)}{60} \quad (3.3)$$

dove:

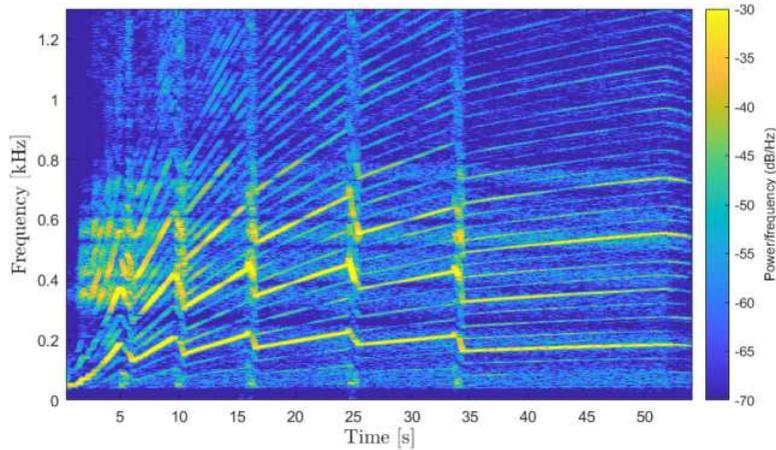
- $N_{cyl}$  è il numero di cilindri del veicolo considerato;
- $RPM(t)$  sono i giri del motore al minuto all'istante  $t$ ;
- $k$  è l'indice di riferimento dell'armonica considerata;
- $f_{H_k}(t)$  è la frequenza, espressa in Hertz, all'istante  $t$ , che caratterizza la  $k$ -esima armonica.

Conoscendo il comportamento degli RPM è dunque possibile ricavare quello delle frequenze fondamentali, e da queste vengono ricostruiti i profili delle altre subarmoniche con l'Equazione 3.4:

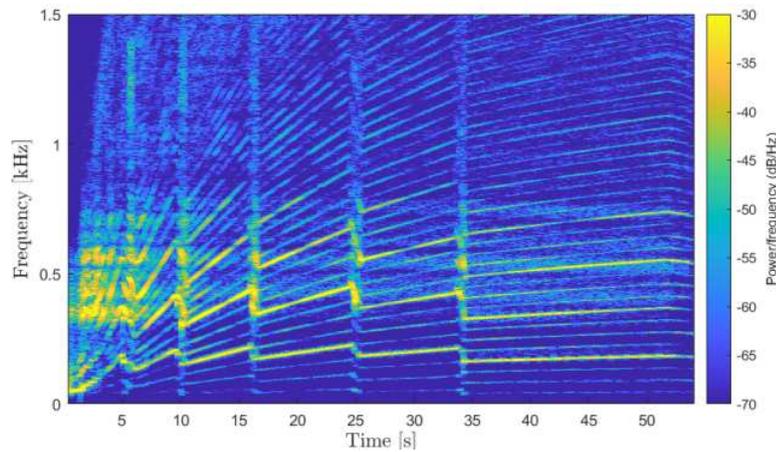
$$f_n = n \cdot f_1 \quad (3.4)$$

con  $n$  numero positivo che definisce l'ordine della subarmonica,  $f_1$  frequenza fondamentale dell'armonica e  $f_n$  frequenza dell' $n$ -esima subarmonica. Tali andamenti servono a definire i parametri di un Filtro a Larghezza di Banda Variabile con Risposta Impulsiva Infinita (Filtro VBIIR), il quale permette l'estrazione delle armoniche stesse a partire dal segnale iniziale. In questo elaborato viene omessa la caratterizzazione dettagliata del filtro perché fuorviante. Infine, dopo il filtraggio, al segnale viene aggiunta una componente stocastica utile a rendere la caratterizzazione del timbro più omogenea possibile a quella originale. È possibile apprezzare il risultato del processo nella Figura 3.4 e nella Figura 3.5.

L'audio risultante è molto simile a quello originale al momento della riproduzione, con l'unica differenza della minimizzazione del disturbo esterno proveniente dall'ambiente circostante il veicolo. Ottenuto così quello che nella Figura 3.3 è



**Figura 3.4:** Spettrogramma del segnale originale registrato [13].



**Figura 3.5:** Spettrogramma del segnale ottenuto in uscita dal filtro VBIIR [13].

indicato col nome *Acquired signal*, è possibile procedere con l'estrazione dei grani e l'applicazione dell'involuppo o finestra.

Le equazioni matematiche fondamentali utilizzate in questa fase sono:

$$Grains = \sum_{i=1}^N g_i \quad (3.5)$$

$$g_i = x((i-1) \cdot L + 1 : i \cdot L) \cdot win(L) \quad (3.6)$$

dove:

- $Grains$  è la matrice dei grani. Appartiene all'insieme  $\mathbb{R}^{L \times N}$ , con i grani disposti lungo le colonne:  $N$  grani di  $L$  componenti;
- $g_i$  è l' $i$ -esimo grano estratto, con  $i = 1, 2, \dots, N$ ;

- $x$  è l'input da cui vengono estratti i grani, nonché il risultato della precedente fase;
- $win$  è l'involuppo applicato, che può essere, ad esempio, quello nella figura 3.1;

Il risultato di questa fase è una collezione di grani, e ad ognuno è associato il grafico dell'ampiezza e il corrispondente insieme di variabili indicanti lo stato del veicolo. Ogni grano è univocamente identificato da tale insieme: più è ricco, più è accurata la successiva sintesi del segnale e più è grande il numero di combinazioni possibili di grani. D'altro canto, più è grande la collezione, più è grande lo spazio richiesto per memorizzarla. È possibile trovare un punto di equilibrio considerando che, anche se non sono riportate tutte le condizioni operative del veicolo e tra due grani c'è un *gap*, ovvero ne manca uno con valori intermedi delle variabili, è possibile utilizzare il grano più simile a quello necessario, senza ottenere gravi errori. In alternativa, è possibile creare un nuovo grano a partire da quelli esistenti utilizzando la modulazione di frequenza. Il *database* risultante sarà il seguente:

Grains database						
	Grain #1	Grain #2	Grain #3	Grain #4	Grain #5	...
Sonic content						...
Engine speed [rpm]	2200	2201	2203	2204	2205	...
Gear	4	4	4	4	4	...
Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	1.21	1.21	1.22	1.22	1.22	...

**Figura 3.6:** Struttura del *database* dei grani. Ad ognuno è associato un insieme caratterizzante di variabili di stato del veicolo [13].

In questo esempio, l'insieme di variabili associato a ciascun grano è composto da RPM, accelerazione e marcia. Tramite un collegamento con la rete CAN del veicolo, ciascuno di questi parametri viene istantaneamente comunicato, permettendo la ricerca nella matrice menzionata nell'equazione 3.5 del grano corrispondente. Esso viene così riprodotto, svolgendo il metodo di Sintesi Granulare Quasi-Sincrona.

Per quanto riguarda il susseguirsi dei grani, questi vengono disposti uno dopo l'altro con una parziale sovrapposizione. Il metodo utilizzato è il Waveform

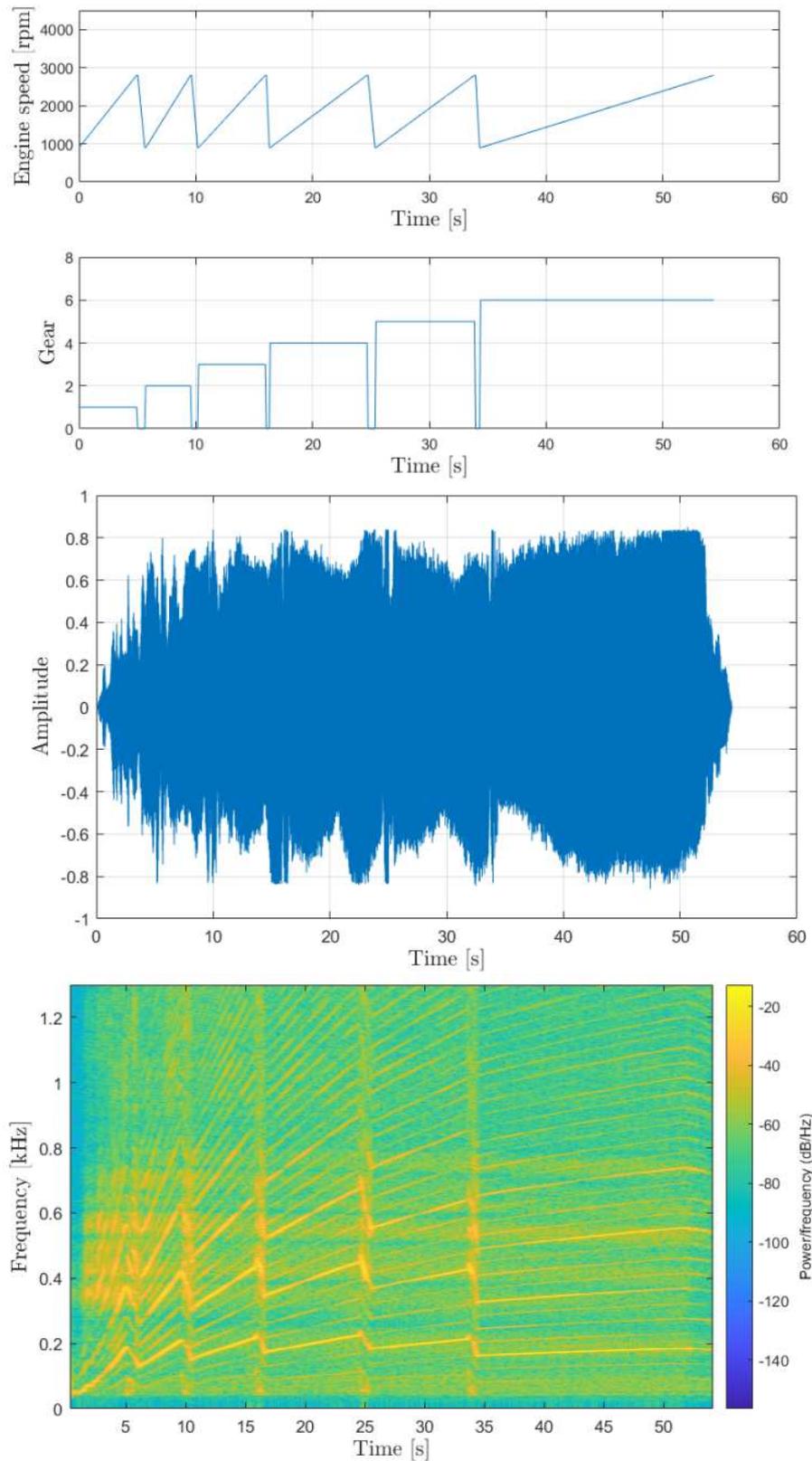
Similarity OverLap and Add (WSOLA), che aggiunge alla dissolvenza incrociata dell'Overlap and Add anche la minimizzazione delle discontinuità di ampiezza tra un grano e l'altro. Questo metodo è utile al fine di evitare sgradevoli effetti sonori al momento della riproduzione continua. Il WSOLA prevede che il punto di giunzione tra due grani venga trovato massimizzando la loro correlazione incrociata, definita dalla formula 3.7:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y^*(t - \tau)dt \quad (3.7)$$

dove

- \* è il simbolo dell'operatore coniugato;
- $y(t)$  e  $x(t)$  rappresentano i due grani;
- $\tau$  indica il passo temporale.

È importante osservare che la computazione non viene effettivamente svolta in un intervallo infinito: il periodo di tempo in cui va trovata la giunzione è stabilito a priori. Un esempio del risultato della sintesi è riportato nella figura 3.7.



**Figura 3.7:** Esempio di risultato di sintesi granulare quasi-sincrona svolta nel progetto riportato come esempio [13]. Il veicolo in questo caso è stato guidato appositamente in progressione, con numerosi cambi di marce, per evidenziare il lavoro svolto.



## Capitolo 4

# Sviluppo della sintesi granulare in simulink

Il seguente è un progetto di cui si occupa un gruppo di studenti e dottorandi dell'Università di Padova, in collaborazione con l'azienda FIAMM, attiva nella produzione e distribuzione di accumulatori per l'avviamento di autoveicoli e per uso industriale. La richiesta è sviluppare un modello sonoro per il motore delle auto elettriche basato sulla sintesi granulare. Lo schema di lavoro è riportato nella figura 4.1.

Appreso quanto fatto nell'esempio del Capitolo 3, è possibile analizzare le differenze tra le procedure. Il punto di partenza è, anche in questo caso, un file audio registrato, caratterizzato da un numero di campioni  $L$  e una frequenza di campionamento  $sr$ .

L'estrazione dei grani è svolta in modo diverso: ogni thread calcola due valori casuali,  $cue$  e  $L_g$ , che sono rispettivamente il punto di partenza del grano all'interno del file, e il suo numero di campioni.  $Cue$  sarà un valore tra 0 e  $L$ , mentre  $L_g$ , a seconda di  $cue$ , sarà limitato tra un  $l_{gmin}$  e un  $l_{gmax}$ .

Al grano risultante viene poi applicato l'involuppo, con associata la velocità di riproduzione  $V$ , la quale può avere un qualsiasi valore maggiore di 0. Il valore 1 rappresenta la velocità di riproduzione normale, mentre aumentandola e diminuendola si influisce anche sul pitch.

Per implementare una procedura basata su thread come questa, è stata realizzata un'apposita classe *granular\_thread* su Matlab che fa uso di una serie di proprietà (Codice 4.2).

```
1 classdef granular_thread < matlab.System
```

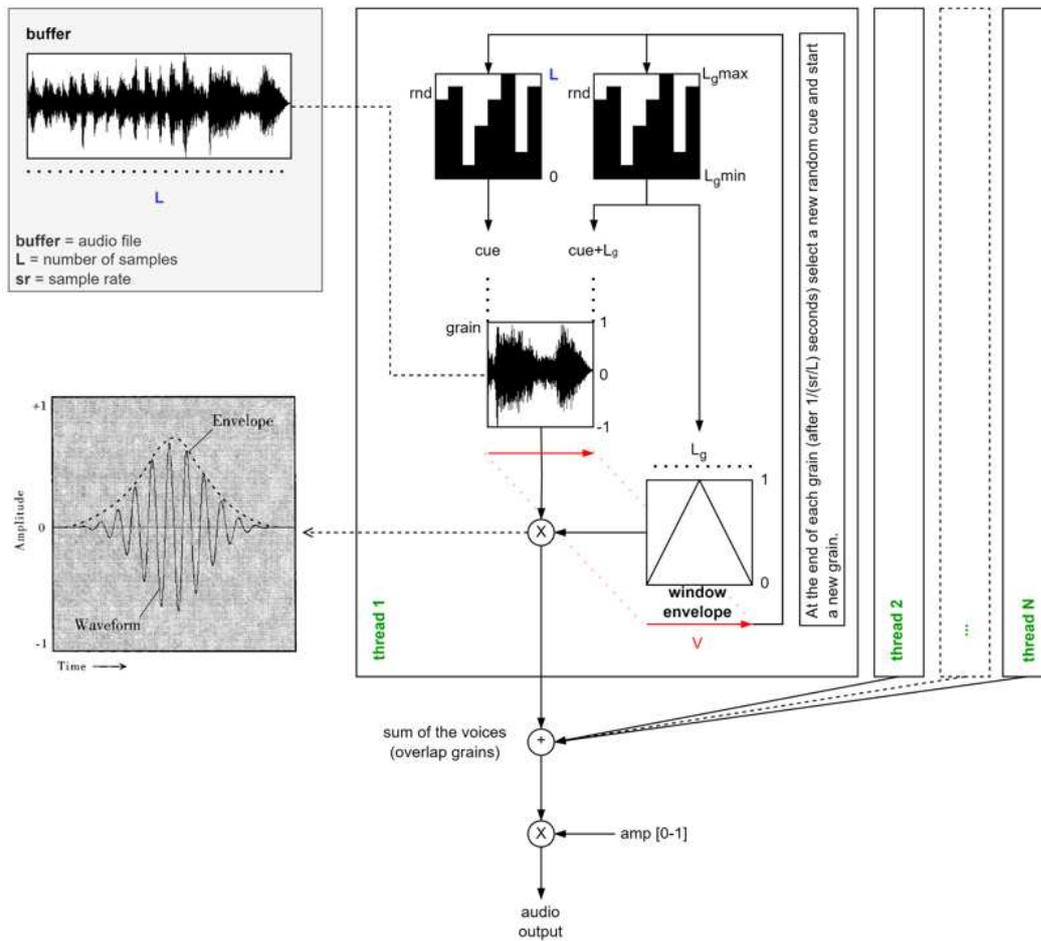


Figura 4.1: Schema di lavoro del progetto FIAMM.

```

2  %
3  properties
4      % audio buffer (matlab workspace)
5      buffer = [];
6      % sample rate of buffer
7      sr = 48000;
8      % minimum length (in millisec) of each grain
9      glen_min_ms = 200;
10     % maximum length (in millisec) of each grain
11     glen_max_ms = 500;
12     % samples per frame
13     spf = 1024;
14     end
15
16     % Pre-computed constants or internal states
17     properties (Access = private)
18         % buffer length (in samples)

```

```

19     len
20     % minimum length (in samples) of each grain
21     glen_min
22     % maximumlength (in samples) of each grain
23     glen_max
24     % reading iteration
25     i
26     % grain length
27     glen
28     % grain cue
29     cue
30     % grain window
31     window
32 end

```

**Listing 4.1:** Codice Matlab che implementa la classe *granular\_thread* e inizializza le proprietà.

È possibile osservare che sono state inserite tutte le variabili precedentemente menzionate, a partire dal buffer definito come array contenente l'audio da processare. La proprietà ad accesso privato chiamata *it* viene utilizzata per iterare la lettura di ciascun grano all'interno dei metodi principali. Questi sono riportati nel codice 4.2.

```

1 % BEGINNING FUNCTION
2     function setupImpl(obj)
3         %-----
4         % INITIALIZE THREAD
5         %-----
6         obj.len = size(obj.buffer, 1);
7         obj.glen_min = floor(obj.glen_min_ms/1000 * obj.sr);
8         obj.glen_max = floor(obj.glen_max_ms/1000 * obj.sr);
9
10        obj.update_grain()
11
12        % set iteration to 1
13        obj.i = 0;
14    end
15
16    % FRAME FUNCTION
17    function out = stepImpl(obj, u)
18        % check if the grain has been completely read
19        % frame beginning
20        if0 = obj.i * obj.spf;
21        if1 = (obj.i+1) * obj.spf;
22        if if1 > obj.glen

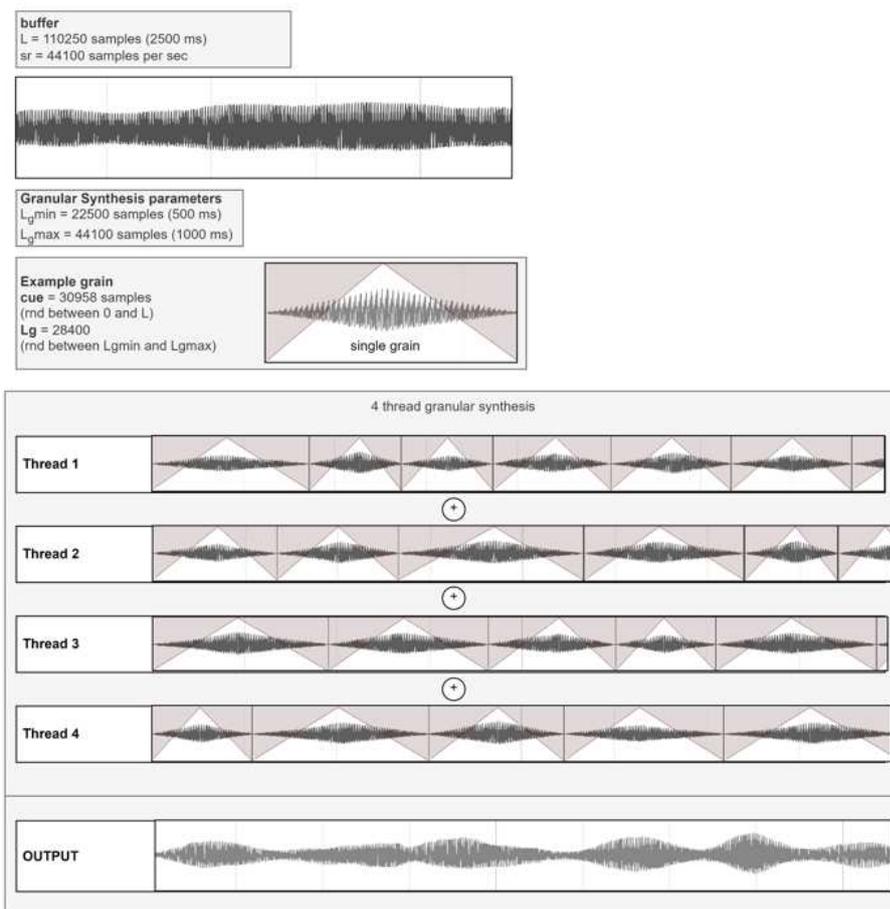
```

```
23         obj.update_grain();
24
25         % set iteration to 1
26         obj.i = 0;
27
28         % frame beginning
29         if0 = obj.i * obj.spf;
30         % frame end
31         if1 = (obj.i+1) * obj.spf;
32         out = obj.get_frame(if0, if1);
33     else
34         out = obj.get_frame(if0, if1);
35         % increment
36         obj.i = obj.i+1;
37     end
38 end
```

**Listing 4.2:** Codice Matlab che implementa i metodi per la generazione e la lettura dei grani.

Il metodo `setupImpl` inizializza i valori del thread, calcolando la lunghezza del buffer e la lunghezza minima e massima dei grani in campioni, e aggiorna il grano corrente tramite il metodo `update_grain`. Quest'ultimo genera una nuova lunghezza, un nuovo punto di inizio casuali all'interno del buffer e una nuova finestra di campionamento per ciascun nuovo grano.

La funzione `stepImpl` viene chiamata per ogni frame: se il grano corrente è stato completamente letto, genera un nuovo grano e resetta il contatore delle iterazioni. Altrimenti estrae il frame corrente del grano e incrementa il contatore delle iterazioni. Una grafica del risultato è riportata nella figura 4.2.



**Figura 4.2:** Esempio di risultato di sintesi granulare svolta seguendo il metodo del paragrafo 3.2.2; per ogni thread è riportata una serie di grani ad estrazione casuale dal buffer, e nella riga *output* è riportato il risultato della sovrapposizione di tali thread. L'involuppo applicato ai grani è triangolare, uguale per tutti.



# Capitolo 5

## Conclusioni

L'analisi della letteratura svolta in questo elaborato vuole sensibilizzare il lettore su un argomento cruciale di sicurezza stradale: la scarsa rilevabilità delle auto elettriche e ibride. Con l'introduzione delle leggi sui sistemi di avviso acustico, volte a garantire l'incolumità di pedoni, soprattutto non vedenti, ciclisti e utenti della strada in generale, nasce la necessità di trovare metodi di sintesi sonora in tempo reale che siano il più possibile efficaci e rispettosi dell'ambiente acustico circostante.

La sintesi granulare del suono, proposta da questo elaborato come metodo prediletto, presenta numerosi punti di forza: la flessibilità nella progettazione e la capacità di adattamento alle preferenze e necessità sia del guidatore sia dell'ambiente circostante. Sulla base dell'esempio di implementazione sviluppata dai dottorandi dell'Università di Padova, è evidente che gli strumenti per la realizzazione di un modello sonoro con tale procedimento siano accessibili. Tuttavia, essendo un metodo giovane e versatile, non esiste un percorso da seguire definito, tantomeno una buona quantità di esempi da cui prendere spunto. È perciò necessario, in futuro, uno studio più approfondito sui dettagli di realizzazione, tra cui la comunicazione veicolo-sintetizzatore, gli impianti audio, l'eventuale riproduzione simultanea nell'abitacolo e gli ambienti di programmazione più efficaci.



# Bibliografia

- [1] Buitinck L., Louppe G., Blondel M., Pedregosa F., Mueller A., Grisel O., Niculae V., Prettenhofer P., Gramfort A., Grobler J., Layton R., Vanderplas J., Joly A., Holt B., Varoquaux G., *API design for machine learning software: Experiences from the scikit-learn project*, 2013.
- [2] *Convolutional Neural Networks*, <http://deeplearning.net/tutorial/lenet.html>, last consultation: 07/01/2020.
- [3] Evans, L. (1970). Speed estimation from a moving automobile. *Ergonomics*, 13, 219-230.
- [4] Wogalter, M. S., Ornan, R. N., Lim, R. W., and Chipley, M. R. (2001). On the Risk of Quiet Vehicles to Pedestrians and Drivers. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 45,(23), 1685-1688.
- [5] Lorencki, Jakub. "Warning sounds in electric and hybrid-electric vehicles." *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 109.5 (2016).
- [6] Misdariis, Nicolas, and Louis-Ferdinand Pardo. "The sound of silence of electric vehicles—Issues and answers." *InterNoise*. 2017.
- [7] Greco, Andrea. *PROGETTAZIONE DI UN SUONO PILOTATO DA UN SISTEMA AVANZATO PER SONORIZZARE I VEICOLI ELETTRIFICATI= DESIGN OF A SOUND DRIVEN BY AN ADVANCED SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES*. Diss. Politecnico di Torino, 2021.
- [8] Sandberg, Ulf, Luc Goubert, and Piotr Mioduszewski. "Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals." *20th International Congress on Acoustics*. sn, 2010.
- [9] NHTSA, 2009: "Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles". NHTSA Technical Report DOT HS 811 204.

- May be downloaded at <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/811204.PDF> ,  
Sept. 2009.
- [10] Ashmead, D. H., Grantham, D. W., Maloff, E. S., Hornsby, B., Nakamura, T., Davis, T. J., ... & Rushing, E. G. (2012). Auditory perception of motor vehicle travel paths. *Human factors*, 54(3), 437-453.
- [11] Jasic, 2009: "A Study on Approach Warning Systems for hybrid vehicle in motor mode". Informal document No. GRB-49-10 (49th GRB, 16-18 February 2009), GRB, WP29, ECE, Geneva, Switzerland.
- [12] M.G. Helander, H.M. Khalid, T.Y. Lim, H. Peng, and X. Yang, "Emotional Needs of Car Buyers and Emotional Intent of Car Designers," *Theor. Issues Ergon. Sci.*, vol. 14, no. 5, pp. 455–474 (2013, Sep.).
- [13] Falchi, Silvia. *Engine sound enhancement and customization based on granular synthesis*. Diss. Politecnico di Torino, 2020.
- [14] De Poli, Giovanni, Carlo Drioli, and Federico Avanzini. "Sintesi dei segnali audio." (1999).
- [15] Gabor, D. (1947) "Acoustical Quanta and the Theory of Hearing", *Nature*, Vol. 159, No. 4044
- [16] Xenakis, I. (1971) *Formalized Music*, Indiana U. Press, Bloomington
- [17] Truax, B. (1988). Real-Time Granular Synthesis with a Digital Signal Processor. *Computer Music Journal*, 12, 14.
- [18] B. Truax, "Composing with Real-time Granular Sound" *Perspect. New Music*, vol. 28, no. 2, pp. 120-134 (1990 Jul.).
- [19] Min, Dongki, Buhm Park, and Junhong Park. "Artificial engine sound synthesis method for modification of the acoustic characteristics of electric vehicles." *Shock and Vibration* 2018.1 (2018): 5209207.