

POLITECNICO DI MILANO  
Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica  
Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria



**POLITECNICO**  
**MILANO 1863**

**SVILUPPO DI UN SENSORE OTTICO PER IL  
DOSAGGIO DELLA SCHIUMA DEL LATTE**

Relatore: Prof. Michele Norgia

Tesi di Laurea Magistrale di:  
Alberto Antonini  
matricola 944545

Anno Accademico 2020-2021



# Sommario

Le macchine del caffè moderne utilizzano la schiuma del latte prodotta in modo automatico per la realizzazione di diverse bevande. La quantità e le caratteristiche di tale schiuma condizionano la qualità del prodotto finale.

Lo scopo di questa tesi è lo sviluppo di un sensore che permetta la misurazione della velocità della schiuma del latte in modo ottico, quindi senza alcun contatto tra il sensore e la schiuma stessa.

Inoltre è stato sviluppato un algoritmo di machine learning che permette di integrare il dato riguardante la velocità con le informazioni relative alla qualità della schiuma in modo da stimarne anche il volume.

In questo modo la durata dell'erogazione non sarà più fissa, bensì potrà essere automaticamente controllata dalla macchina in modo da raggiungere sempre il volume desiderato.

# Abstract

Modern coffee machines autonomously produce milk foam to make different beverages. The quantity and the characteristics of the foam directly impact the quality of the final product.

The purpose of this thesis has been to develop a sensor that is able to optically measure the speed of the foam, without any physical contact between the sensor and the foam itself.

Moreover, a machine learning algorithm has been developed to estimate the foam volume by integrating the speed data with information regarding the quality of the foam.

By doing this the dispensing duration, instead of being fixed, can be automatically controlled by the machine to reach the desired volume.



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>10</b>
<b>2 Stato dell'arte e impianti</b>	<b>13</b>
2.1 Impianto tipico . . . . .	14
2.2 Problematiche di questo impianto . . . . .	15
2.3 Banco prove di laboratorio . . . . .	16
<b>3 Strumenti di sviluppo</b>	<b>19</b>
3.1 STM32CubeIDE . . . . .	19
3.2 Scheda ST Nucleo . . . . .	20
3.3 Gnuplot . . . . .	21
3.4 Python . . . . .	22
3.5 LedSensorLog . . . . .	23
<b>4 Il sensore ottico</b>	<b>25</b>
4.1 La velocimetria . . . . .	28
4.2 Implementazione su scheda ST Nucleo . . . . .	33
4.3 La volumetria . . . . .	34

4.4	Machine Learning . . . . .	36
4.5	Test effettuati per schiuma fredda . . . . .	38
4.6	Test effettuati per schiuma calda . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Implementazione software</b>	<b>44</b>
5.1	Configurazione microcontrollore . . . . .	44
5.2	Calcolo dello shift . . . . .	50
5.3	Stima del volume erogato . . . . .	51
5.4	Protocollo di comunicazione seriale . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>55</b>

# Elenco delle figure

1	Schema della configurazione dell'impianto . . . . .	17
2	STM32CubeIDE nella schermata di configurazione del microcontrollore . . . . .	20
3	Esempio di scheda ST Nucleo . . . . .	21
4	Finestra del software Gnuplot . . . . .	22
5	Finestra del software LedSensorLog . . . . .	24
6	Tabella esemplificativa dei livelli di viscosità della schiuma	26
7	Tabella esemplificativa dei livelli di grandezza delle bolle	27
8	Schema della testina ottica . . . . .	28
9	Cross-correlazione . . . . .	29
10	Valore di shift nel tempo per erogazioni con diverse velocità di pompa . . . . .	30
11	Valori letti dal sensore di distanza durante erogazioni con diverse velocità di pompa . . . . .	31
12	Confronto tra shift e pendenza media (coeff. "m") della derivata della funzione interpolante della distanza . . .	32
13	Confronto tra valori di shift e velocità di incremento del volume . . . . .	35

14	Grafico di confronto tra volume stimato e volume misurato con valvola variabile e giri fissi . . . . .	39
15	Grafico di confronto tra volume stimato e volume misurato con valvola fissa e giri variabili . . . . .	40
16	Confronto tra volume stimato e volume misurato con valvola e giri variabili . . . . .	41
17	STM32CubeIDE: Vista globale di configurazione del processore . . . . .	45
18	STM32CubeIDE: Configurazione clock . . . . .	46
19	STM32CubeIDE: Configurazione ADC . . . . .	47
20	STM32CubeIDE: Configurazione Timer 8 . . . . .	49

# Capitolo 1

## Introduzione

Il latte è un ingrediente cruciale per molte bevande. Una delle preparazioni più comuni consiste nel montarlo con vapore per renderlo schiumoso e poi unirlo al caffè per creare il cappuccino che tutti conosciamo.

Tradizionalmente questa operazione viene effettuata manualmente da un operatore per mezzo di un ugello che emette vapore caldo ad alta pressione in un recipiente contenente il latte.

In tempi più recenti sono state sviluppate macchine automatiche che realizzano senza intervento umano varie tipologie di bevande a base di caffè e latte. Mentre l'operatore umano è in grado di elaborare un giudizio visivo sulla qualità della schiuma del latte e, se necessario, montarla ulteriormente, la macchina solitamente si limita a produrla seguendo dei parametri prefissati dai tecnici.

Ciò può essere in molti casi sufficiente per ottenere un prodotto discreto fintanto che le qualità del latte rimangono costanti e la macchina funziona alla perfezione.

Seppure il giudizio sulla qualità della schiuma può essere questione di

gusti, ci sono alcune caratteristiche valide in generale. Le bolle nella schiuma devono essere in grandi quantità e di piccole dimensioni, altrimenti la schiuma si smonterà dopo pochi secondi dall'erogazione, ritornando ad essere semplice latte liquido.

Per questo motivo, l'azienda Fluid-o-Tech di Corsico con cui ho avuto il piacere di collaborare, sta realizzando il primo sensore a basso costo per la misurazione della qualità della schiuma del latte.

Oltre a servire un prodotto di qualità al cliente, è fondamentale erogare sempre la quantità corretta. Bastano infatti piccole variazioni nelle caratteristiche del latte o della macchina per ottenere significative differenze nel volume del prodotto erogato.

Lo scopo del lavoro svolto e illustrato in questa tesi è stato testare un nuovo sensore che permetta la misurazione della velocità della schiuma del latte. Tale rilevamento viene effettuato otticamente mentre la schiuma scorre nell'impianto. In particolare appena prima della sua erogazione, senza alcun contatto tra il sensore e la schiuma stessa.

Inoltre è stato sviluppato un algoritmo di machine learning che permette di integrare il dato riguardante la velocità con le informazioni relative alla qualità della schiuma per ottenere una stima del volume erogato.

Lo stato dell'arte in termini di macchine del caffè ed impianti verrà descritto nel capitolo 2; mentre gli strumenti utilizzati nello sviluppo di questo lavoro saranno elencati, e brevemente introdotti, nel capitolo 3

Il sensore vero e proprio, i rispettivi test e l'implementazione saranno dettagliatamente raccontati nei capitoli 4 e 5 con l'ausilio di immagini,

grafici e snippet di codice.

Infine, nel capitolo 6 futuri lavori e sviluppi verranno esposti prima delle conclusioni.

## Capitolo 2

### Stato dell'arte e impianti

In questo capitolo verrà data una breve introduzione riguardo le macchine del caffè attuali e i rispettivi impianti. Lo scopo di queste righe è quello descrivere il contesto nel quale il sensore, oggetto del lavoro, andrà ad esiste.

Le macchine automatiche destinate alla realizzazione di bevande da bar possono producono caffè, latte, sia caldo che freddo, e miscele dei due (come il cappuccino) seguendo diverse ricette.

Le ricette vengono create dal produttore della macchina, ma possono essere personalizzate e modificate dal tecnico installatore, o manutentore, per soddisfare le diverse esigenze della struttura presso la quale sono installate.

A differenza delle macchine manuali che sono generalmente utilizzate da personale esperto nei tradizionali bar, i macchinari più avanzati vengono adottati frequentemente in hotel e luoghi di ristoro che permettono al cliente di servirsi in autonomia. Tali macchine infatti sono in grado di svolgere tutte le operazioni in modo automatico, dal riscaldamento alla pulizia, dalla preparazione all'erogazione del prodotto.

Di conseguenza, permettere un'autonomia della macchina anche nelle situazioni di controllo diventa cruciale. In particolare essa deve essere sia in grado di rilevare eventuali cali di qualità del prodotto o comportamenti errati dei suoi impianti, sia compensare automaticamente, se possibile, in attesa dell'intervento di un tecnico.

Attualmente le macchine eseguono le operazioni che portano all'erogazione del prodotto seguendo delle sequenze predefinite. Tali sequenze sono controllate da parametri di configurazione presenti nelle impostazioni della macchina e nelle ricette, che determinano la frequenza, il dosaggio e la durata di ogni singolo passaggio.

## 2.1 Impianto tipico

All'interno delle macchine considerate, il latte viene mantenuto a temperatura costante all'interno di una zona refrigerata.

Il circuito di montatura del latte è in grado di prelevarlo direttamente: esso viene pescato da un contenitore all'interno della zona refrigerata.

Il latte viene poi unito all'aria attraverso una valvola che ne controlla la proporzione. La miscela viene quindi pompata tramite una pompa elettrica verso l'erogatore.

Nel caso di ricette con latte caldo è necessaria una piccola aggiunta al circuito precedente: una ulteriore valvola per l'aggiunta del vapore caldo. Essa verrà posizionata subito dopo la pompa, mentre il vapore verrà prodotto in una caldaia a temperatura controllata che ne determina indirettamente anche la pressione.

La prima parte dei test è stata effettuata con una macchina di marca

Thermoplan [1] che implementa un circuito di questo tipo.

## 2.2 Problematiche di questo impianto

Stabilendo una configurazione per quanto riguarda velocità della pompa, temperatura del latte e del vapore, apertura percentuale della valvola del vapore e dell'aria e durata dell'erogazione, è possibile ottenere una schiuma di qualità e volume costante.

L'impianto tipico descritto finora non ha però alcun tipo di feedback (se non per la regolazione della temperatura della zona frigorifera e della caldaia).

La macchina non è quindi in grado di misurare in alcun modo la velocità o la qualità della schiuma che sta venendo erogata. Essa fa unicamente affidamento su di una buona calibrazione da parte del tecnico installatore.

Poiché la macchina e i suoi componenti non sono ideali, svariate situazioni e condizioni possono compromettere la qualità sia della schiuma e quindi del prodotto finale. Ecco alcuni esempi:

- Decadimento dell'efficienza della pompa dovuto al tempo.
- Variazione della temperatura del circuito in seguito a più erogazioni ravvicinate.
- Parziale otturazione di qualche tubo o della valvola
- Utilizzo di una diversa tipologia di latte

La necessità di produrre e testare di un nuovo sensore per la qualità della schiuma è dovuta alla mancanza sul mercato di una reale alter-

nativa.

I sensori di flusso disponibili, infatti, sono generalmente formati da una struttura all'interno della quale il liquido da misurare deve scorrere.

Poiché tale struttura può contenere strozzature e componenti, questi sensori non sono adatti ad un fluido bifase come la schiuma. I motivi sono principalmente due; un tale elemento andrebbe ad interferire con il fluido stesso rompendo potenzialmente le bolle e quindi degradandolo. In secondo luogo si creerebbe un problema di pulizia e igiene degli impianti della macchina.

## 2.3 Banco prove di laboratorio

Per poter effettuare le prove necessarie allo sviluppo del sensore nel modo più sistematico possibile, è stato impostato un banco prove con un impianto simile a quello descritto in precedenza.

La figura 1 illustra schematicamente la configurazione dell'impianto. I tubaggi sono colorati in blu mentre i collegamenti elettrici in colore verde.

In questo caso, la miscelazione latte-aria-vapore è stata controllata da una valvola specificamente realizzata da Dolphin Fluidics [2] per l'utilizzo in queste tipologie di circuito latte. Può essere controllata con due segnali PWM (*Pulse Width Modulation* in modo da impostare la percentuale di apertura della valvola lato aria e lato vapore in modo indipendente. Questa valvola è stata realizzata in modo da avere un comportamento più lineare possibile.

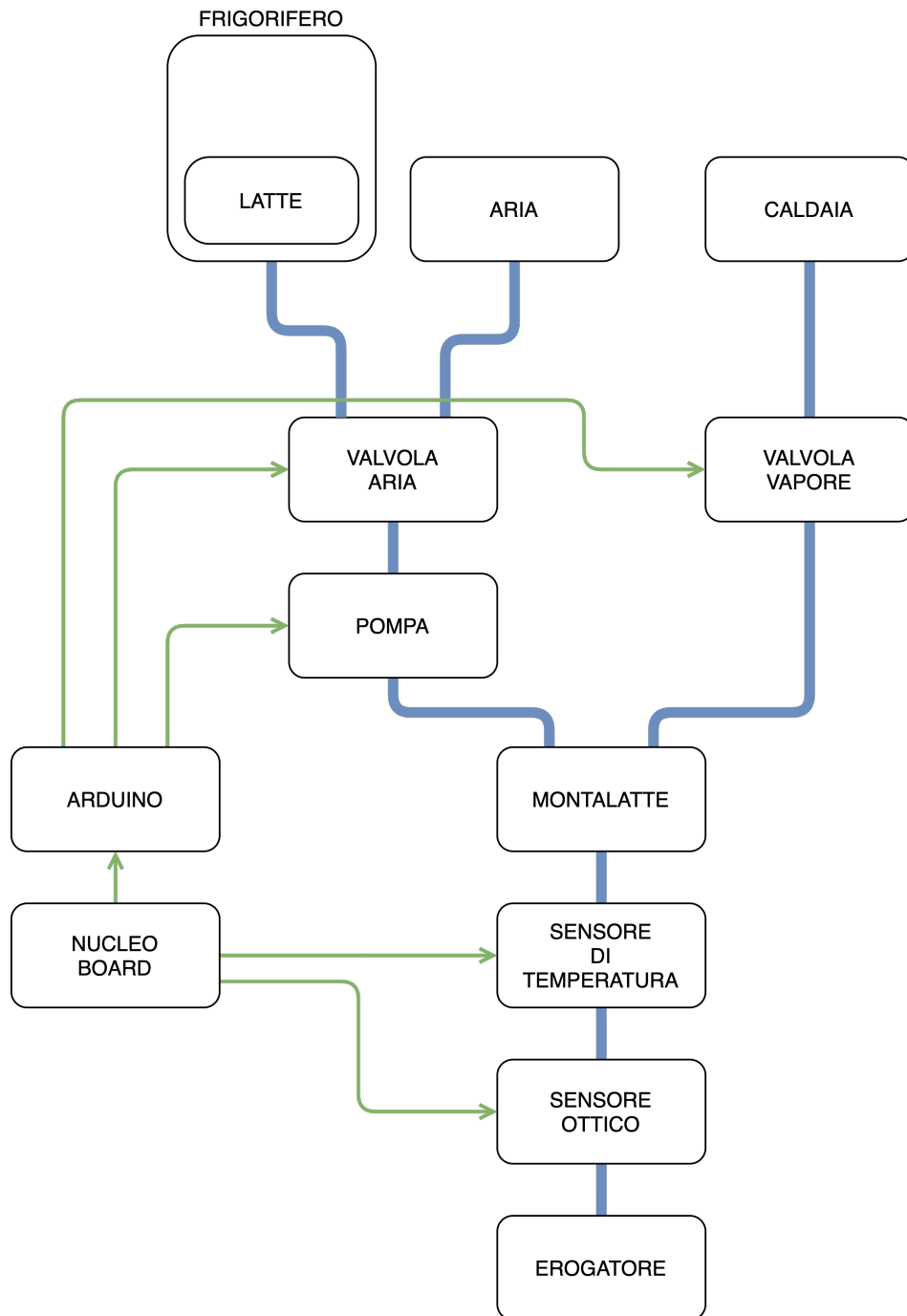


Figura 1: Schema della configurazione dell'impianto

La pompa è stata fornita invece dalla stessa Fluid-o-Tech. Essa è caratterizzata da una velocità massima di 2800 RPM (*Revolution Per Minute*) ed è stata controllata anch'essa in modo da poterne impostare la velocità come percentuale di quella massima.

L'unità di controllo, normalmente presente nella macchina, è stata simulata con una scheda Arduino. Il software è stato appositamente realizzato in modo da poter impostare la velocità della pompa e l'apertura della valvola e gestire l'avvio e il termine dell'erogazione.

A questo banco prova sono stati aggiunti i seguenti componenti:

- Una testina ottica dedicata alla lettura in contemporanea di qualità e velocità del fluido (che verrà trattata ampiamente in seguito).
- Una scheda per il pilotaggio del LED della testina ottica, in grado di alimentarlo a corrente costante in modo da poterne impostare la luminosità.
- Un sensore di temperatura, collegato sul tubo di erogazione, per la misurazione della temperatura della schiuma in uscita dal circuito.
- Una scheda ST Nucleo, collegata ai componenti precedenti, che si occupa dell'elaborazione dei segnali. Più informazioni alla sezione 3.2

# Capitolo 3

## Strumenti di sviluppo

Questo capitolo elenca e descrive brevemente gli strumenti adottati nello sviluppo del progetto.

### 3.1 STM32CubeIDE

STM32CubeIDE è l'ambiente consigliato da ST per lo sviluppo del firmware in linguaggio C per i processori della famiglia STM32 utilizzati in questo progetto [3].

Una delle sue funzionalità più utili consiste in un pratico ambiente di configurazione delle periferiche integrate nel microcontrollore; tale finestra è mostrata in figure 2. Esso permette di produrre automaticamente il codice sorgente da eseguire per inizializzare il microcontrollore stesso.

Inoltre, Cube supporta lo sviluppatore in tutti gli step dello sviluppo del firmware, dalla scrittura del codice, alla compilazione, fino al debug dello stesso durante l'esecuzione.

Cube integra la libreria HAL di ST [4], le cui funzioni facilitano note-

volmente l'utilizzo del microcontrollore e la libreria ARM CMSIS DSP [5] che implementa diverse funzioni per l'elaborazione dei segnali.

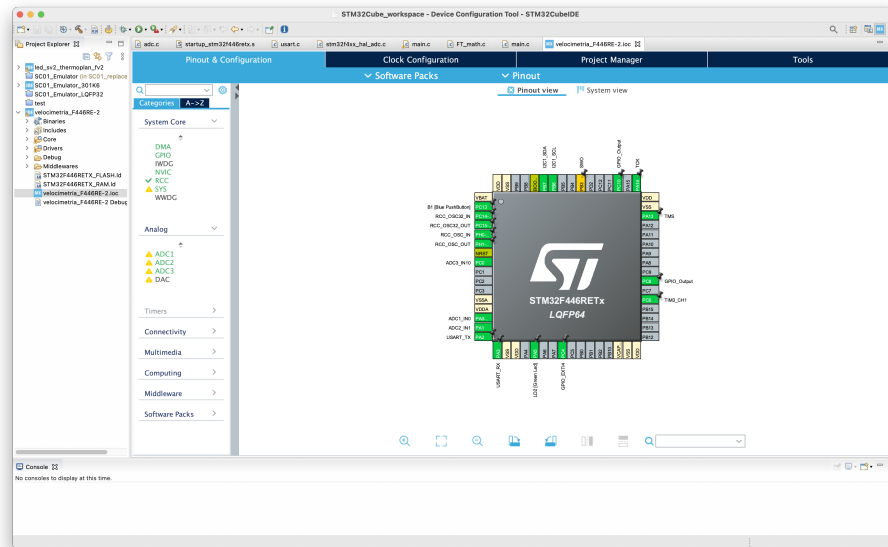


Figura 2: STM32CubeIDE nella schermata di configurazione del microcontrollore

### 3.2 Scheda ST Nucleo

La famiglia di schede ST Nucleo permette di utilizzare i processori prodotti da ST per la prototipazione di nuove soluzioni hardware [6]. Ogni modello di scheda è identificato con il modello del suo processore. Questi si differenziano gli uni dagli altri per la quantità di memoria Flash e/o RAM e per il tipo e la quantità delle periferiche che essi contengono.

I processori ST sono particolarmente apprezzati per la vasta quantità di periferiche che offrono al loro interno: Timer, ADC, DAC, I2C, UART, SPI, FPU e molte altre. Lo sviluppatore può quindi scegliere

il processore che più si avvicina alle sue necessità, in modo da ottenere le caratteristiche richieste senza spendere più del necessario.

Le schede Nucleo, oltre al set di componenti base per far funzionare il processore, hanno una parte dedicata al circuito ST-Link che permette di effettuare la programmazione e il debug del processore [7].

In figura 3 è mostrato un esempio di scheda ST nucleo. In particolare, la parte superiore è il circuito ST-Link, mentre il quadrato inferiore consiste nel processore e i componenti basi.

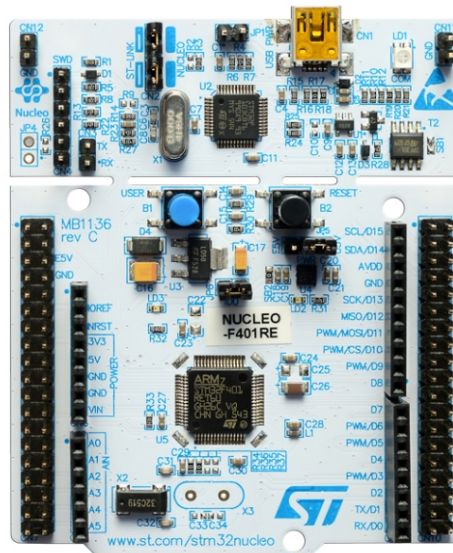


Figura 3: Esempio di scheda ST Nucleo

### 3.3 Gnuplot

Il software Gnuplot è stato utilizzato per la visualizzazione dei dati ove non fossero richieste particolari elaborazioni degli stessi [8].

In particolare, si è rivelato molto utile per le valutazioni qualitative

sui dati subito dopo la loro acquisizione e per le visualizzazioni comparative su più set di dati sovrapposti.

Gnuplot possiede un'interfaccia da linea di comando che, pur non essendo di immediata comprensione, permette dopo alcuni tentativi di ottenere il risultato desiderato e di richiamarlo successivamente qualora fosse necessario. Esempi di CLI (*Command Line Interface*) e grafico risultante sono mostrati in figura 4.

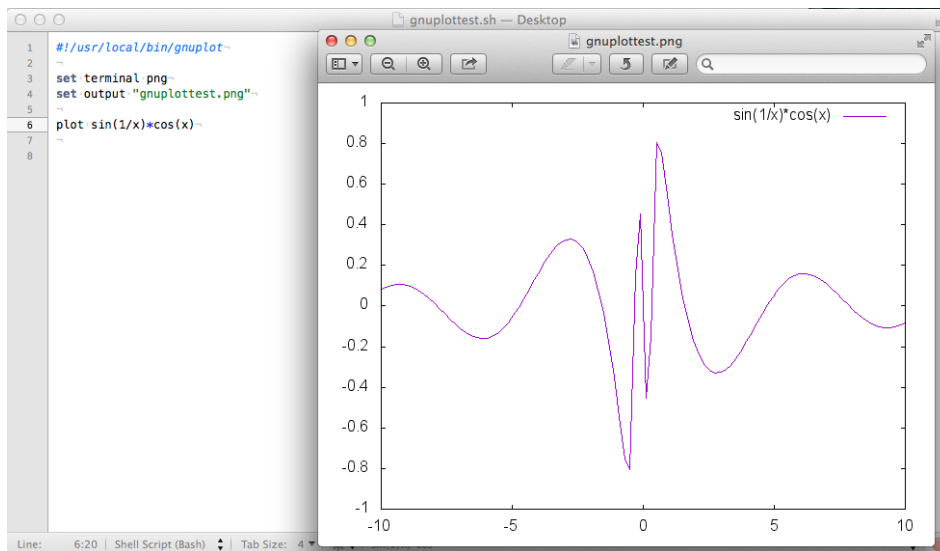


Figura 4: Finestra del software Gnuplot

### 3.4 Python

Il linguaggio di programmazione Python è stato usato per validare rapidamente modifiche sugli algoritmi che sono stati sviluppati e per effettuare analisi sui dati.

Le librerie Pandas, Numpy e Scipy si sono rivelate essere strumenti preziosi per l'elaborazione dei dati mentre la libreria Matplotlib ha

permesso la realizzazione della maggior parte dei grafici mostrati in questo documento, oltre a molti altri realizzati durante lo sviluppo del sensore.

### **3.5 LedSensorLog**

LedSensorLog è un software sviluppato in Python da Fluid-o-Tech per la comunicazione con il sensore ottico e la visualizzazione dei dati provenienti dal sensore stesso in tempo reale. Inoltre permette il salvataggio di tali dati per permettere la loro elaborazione o analisi in un secondo momento.

Il software mostra quattro grafici, come mostrato in figura 5. È possibile scegliere quale segnale si vuole visualizzare in ognuno di questi grafici, in modo da poter monitorare il funzionamento del sensore sotto più aspetti contemporaneamente.

Ho modificato parte di questo software per permettere la comunicazione, il controllo e l'acquisizione dei dati provenienti dal sensore sviluppato in questo lavoro.

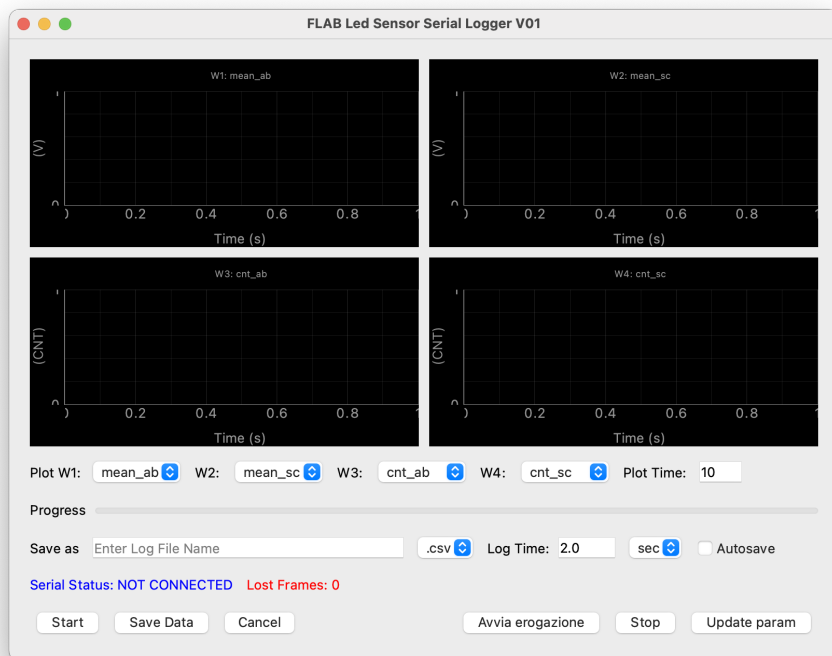


Figura 5: Finestra del software LedSensorLog

# Capitolo 4

## Il sensore ottico

La ditta Fluid-o-Tech ha sviluppato un sensore ottico che permette di misurare la qualità della schiuma del latte.

Il sensore è costituito da una testina ottica che viene posizionata intorno al tubo che collega il circuito di montaggio della schiuma all'erogatore, proprio in prossimità di quest'ultimo.

Un LED posto perpendicolarmente al tubo proietta un fascio di luce che viene rilevato da un foto-transistor (fornito dall'azienda Optoi [9]) posto in asse al LED dalla parte opposta del tubo.

Il foto-transistor rileva l'intensità della luce che lo colpisce e reagisce in modo simile a una resistenza variabile. Inserendolo in un partitore di tensione, si ottiene una tensione facilmente misurabile da un ADC, che ne permette l'analisi da parte di un microcontrollore.

Questo segnale può essere valutato inizialmente per quanto riguarda la sua intensità assoluta. Questa rappresenta l'opacità del fluido che sta percorrendo il tubo. Un fluido più opaco ostacolerà maggiormente il passaggio della luce e la tensione ai capi del foto-transistor aumenterà.

Il passaggio di fronte al sensore di una bolla d'aria da origine a variazioni repentine del valore (anche definite picchi), poiché l'aria ostacola il passaggio della luce in modo molto inferiore rispetto al latte. Questi dati vengono utilizzati per permettere al sensore di esprimere un giudizio sulla qualità della schiuma.

È infatti possibile considerare l'opacità media del latte per stimarne la densità (a sua volta fortemente legata alla viscosità), piuttosto che osservare la quantità e la dimensione delle bolle in modo da stabilire una scala di qualità del latte.

Scala viscosità schiuma					
Voto	1	2	3	4	5
Vista nel bicchiere (dopo l'erogazione)	Schiuma molto liquida, praticamente latte	Schiuma liquida ma leggermente cremosa	Schiuma solida ma molto mobile	Schiuma solida e compatta, molto difficile da muovere	Schiuma solida e compatta, impossibile da muovere, ribaltando il bicchiere non esce
Vista all'uscita dell'erogatore	Latte con qualche bolla, strato superficiale piatto	Latte con molte bolle, strato superficiale leggermente curvo	Schiuma, strato superficiale curvo	Schiuma soffice, strato superficiale conico	Schiuma molto soffice, strato superficiale ondulato, ricorda la panna montata
Legenda foto:					
Sensazioni al tatto "Test tattile" (dopo l'erogazione)	Sembra di toccare latte, estraendo il dito non rimane quasi nulla attaccato	Simile al latte ma in superficie si sentono delle bolle, estraendo il dito una leggera patina di schiuma resta attaccata	Si sente la consistenza schiumosa, estraendo cade lentamente dal dito	Molto compatta al tatto, estraendo sono necessari dei colpi sul bordo del bicchiere per farla cadere dal dito	Simile alla panna montata, anche con ripetuti colpi sul bordo del bicchiere fa fatica a staccarsi dal dito

Figura 6: Tabella esemplificativa dei livelli di viscosità della schiuma

In Figura 6 vediamo la scala dei valori che è possibile rilevare con questo tipo di sensore. Le viscosità di schiuma tipicamente utilizzate nelle ricette sono quelle che vanno da 1 a 3. I livelli 4 e 5 rappresentano una montatura eccessiva.

È possibile considerare anche un livello 0 dato dal latte completamente

liquido. Questo livello compromette il funzionamento degli algoritmi che mostreremo in seguito, in quanto non si potrà rilevare alcuna bolla tramite il sensore.

È comunque possibile rilevare quest'ultima condizione in modo da poterla riportare alla macchina come malfunzionamento della valvola a 3 vie o completa otturazione della stessa.

Scala grandezza di bolla schiuma					
Voto	1	2	3	4	5
<b>Vista nel bicchiere (dopo l'erogazione)</b>	Si osservano molte bolle grandi in superficie, scoppiano molto velocemente.	Si osservano bolle grandi, inizia la presenza di alcune bolle piccole. Le bolle grandi scoppiano rapidamente.	Si osservano solo bolle piccole, scoppiano lentamente.	Si osservano poche bolle piccole, il resto è un composto omogeneo simile ad una crema	Non si distinguono bolle, l'intera superficie è omogenea, simile ad una crema
<b>Rumore all'orecchio (dopo l'erogazione)</b>	Si ascoltano molte bolle grandi scoppiare	Si ascoltano molte bolle grandi scoppiare, raramente qualche bolla piccola	Si ascoltano solo bolle piccole scoppiare, la velocità di scoppio è minore rispetto alle bolle grandi	Si ascoltano solo poche bolle piccole scoppiare	Il suono è quasi assente

**Legenda:**

- Bolle grandi
- Bolle piccole
- Composto omogeneo

Figura 7: Tabella esemplificativa dei livelli di grandezza delle bolle

In Figura 7 invece, è possibile vedere (immaginando di guardare il tubo in sezione) alcuni esempi di grandezza di bolle rilevabili dal sensore. In questo caso, i livelli preferibili, sono quelli a 2 a 4, dove la schiuma consiste prevalentemente in piccole bolle omogenee.

Le due misure precedenti non sono completamente indipendenti tra loro. La grandezza della schiuma e la viscosità sono infatti strettamente collegate ma comunque informazioni distinte.

Questi dati sono molto importante perché permettono per la prima volta alla macchina di regolare attivamente la valvola a tre vie in modo da raggiungere una qualità della schiuma sempre soddisfacente.

## 4.1 La velocimetria

Ci si è concentrati a questo punto sul rilevamento della velocità della schiuma.

L'idea è stata di acquisire il segnale di due foto-transistor al posto di uno, posizionati parallelamente al flusso della schiuma e distanti circa mezzo centimetro. A questa distanza possiamo ragionevolmente ipotizzare che le qualità del fluido rimangano invariate.

In figura 8 possiamo vedere uno schema della configurazione della testina ottica.

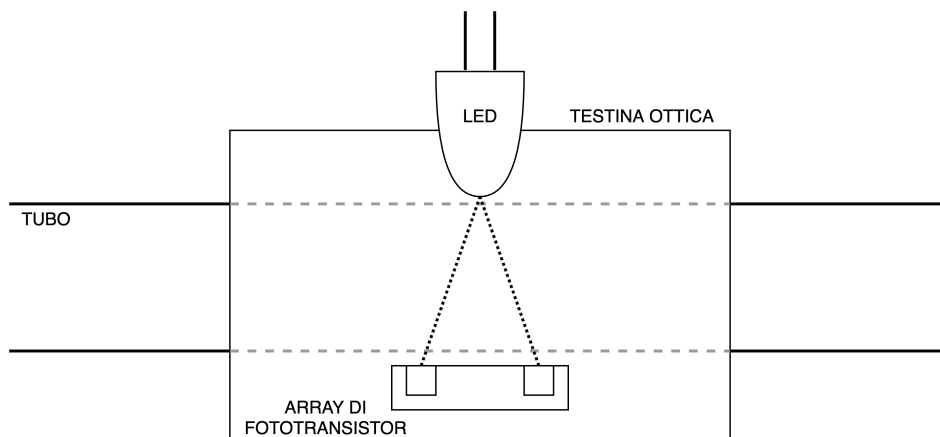


Figura 8: Schema della testina ottica

Considerando l'effetto che una bolla d'aria avrà sui segnali, possiamo immaginare la presenza di un picco nel segnale del primo fototransistor, seguita dopo un piccolo delta temporale da un picco simile nel segnale del secondo. Infatti la bolla, scorrendo lungo il tubo, darà origine allo stesso effetto sui due segnali ma con un ritardo temporale. Questo ritardo, che indicheremo con il termine *shift*, è inversamente proporzionale alla velocità del liquido che scorre all'interno del tubo. Di conseguenza, per calcolarlo è sufficiente calcolare la funzione di cross-correlazione tra i due segnali. Questa funzione avrà il punto di massimo in corrispondenza del valore di shift per il quale i due segnali sono più probabilmente in correlazione.

Figura 9 riporta due grafici che mostrano il comportamento della funzione di cross-correlazione tra due segnali: nel primo si hanno due segnali separati da un certo lasso di tempo; nel secondo grafico invece si ha la cross-correlazione.

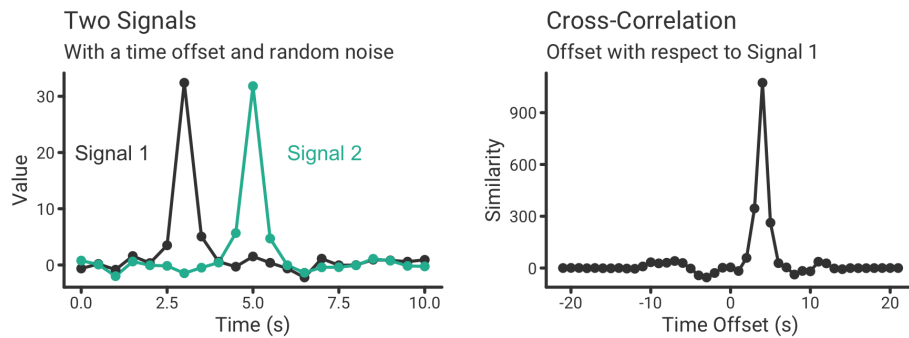


Figura 9: Cross-correlazione

Per validare questa teoria, sono state effettuate delle prove con la macchina Thermoplan. Sono state fatte inizialmente delle acquisizioni

dei segnali con una scheda Digilent [10], erogando schiuma fredda, a diversi valori di velocità della pompa della schiuma, impostata dal display della macchina.

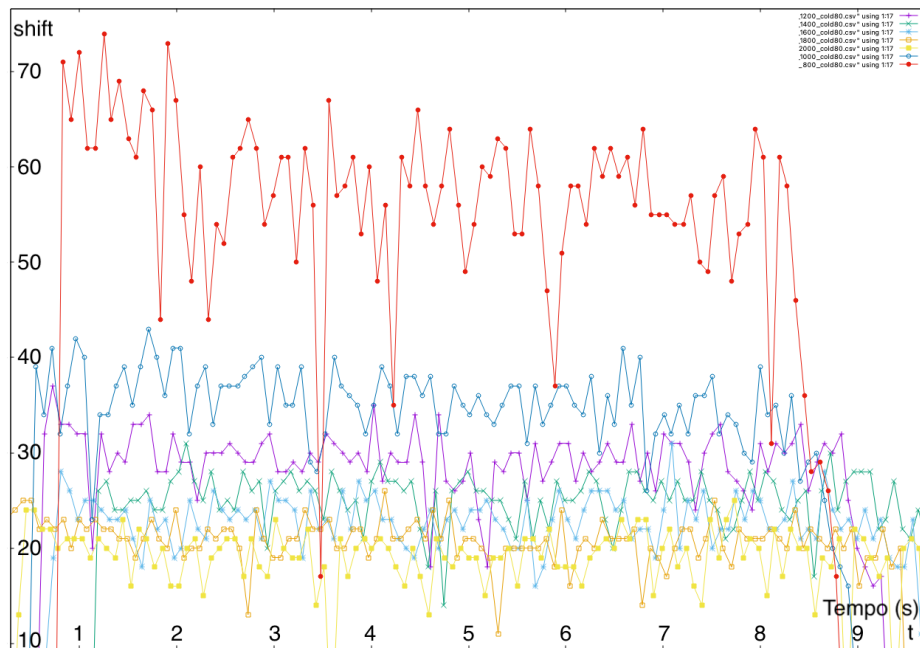


Figura 10: Valore di shift nel tempo per erogazioni con diverse velocità di pompa

Il grafico di figura 10 mostra il valore di valore dello shift durante erogazioni con diverse velocità di pompa. Le velocità vanno da 800 a 2000 RPM con uno step di 200. Velocità più elevate sono associate a valori di shift inferiori.

Tra i primi step di velocità, si nota una differenza più pronunciata, confermata da un aumento significativo nella quantità di prodotto erogato. Man mano che la velocità della pompa aumenta, la differenza di flusso diventa meno pronunciata e ciò è verificabile sia dalla quantità erogata, sia nella variazione dello shift che risulta meno evidente.

Questo ha permesso di provare in modo qualitativo che il valore dello shift effettivamente diminuisce con l'aumentare della velocità.

Per passare a una misura dimensionale della velocità del fluido, è stato montato un misuratore di distanza ToF (*Time of Flight*) sul becher graduato posto sotto l'erogatore della macchina.

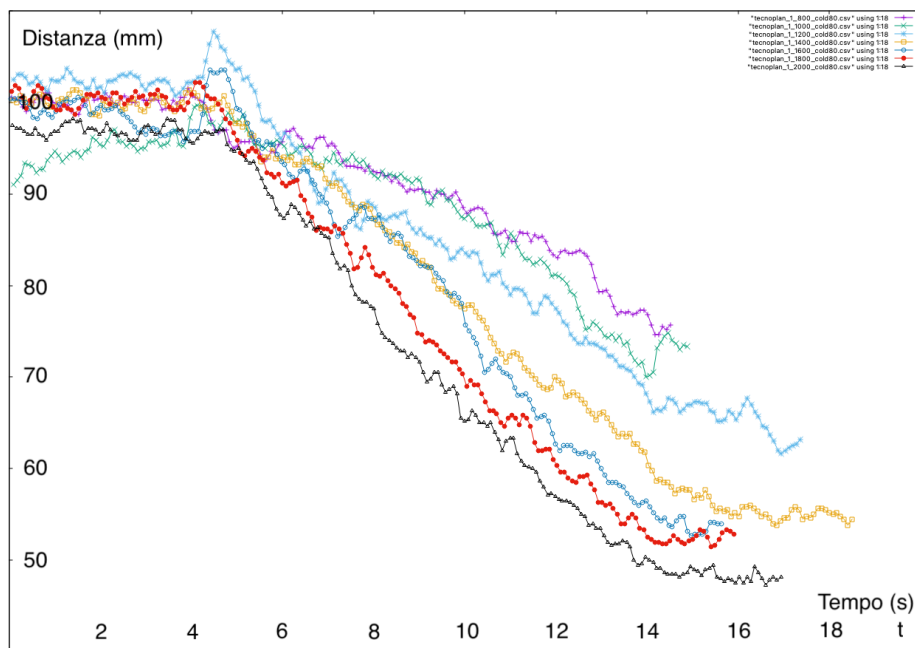


Figura 11: Valori letti dal sensore di distanza durante erogazioni con diverse velocità di pompa

Il grafico di figura 11 rappresenta i diversi valori misurati dal sensore di distanza durante varie erogazioni a velocità differenti. In questo modo è stato possibile misurare l'altezza della schiuma mentre il becher si riempiva, acquisendo questa informazione insieme al valore dello shift. Velocità di pompa superiori hanno portata superiore quindi la differenza tra il valore iniziale e finale letto dal sensore, sarà più grande. Inoltre abbiamo potuto considerare il valore della derivata della di-

stanza per misurare la velocità reale del fluido.

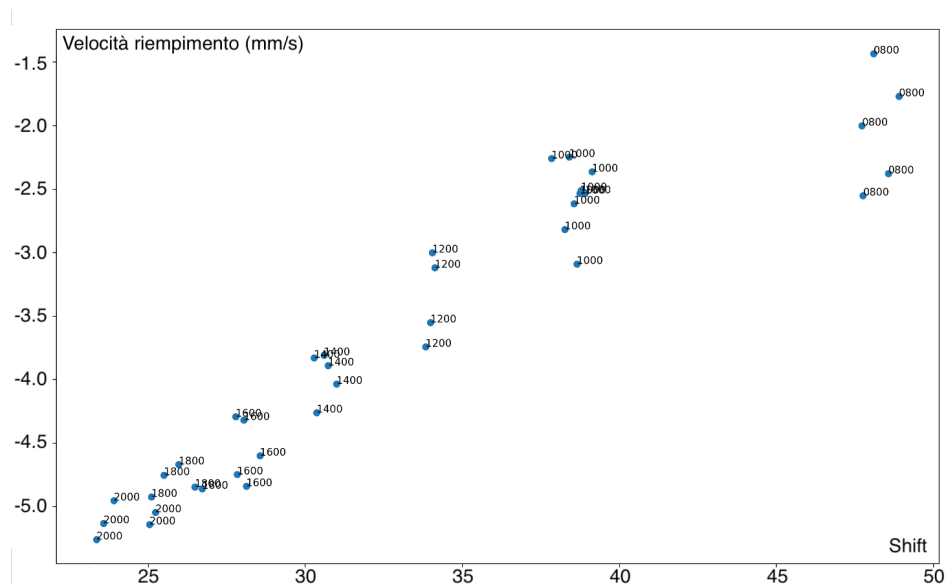


Figura 12: Confronto tra shift e pendenza media (coeff. "m") della derivata della funzione interpolante della distanza

In Figura 12 è riportato un grafico di confronto. Sull'asse delle ascisse troviamo il valore dello shift medio dell'erogazione mentre sulle ordinate la pendenza della derivata della funzione interpolante alla curva della distanza.

Si può notare che l'andamento è lineare e ciò conferma che lo shift è un'ottima stima della velocità del fluido.

Sono state effettuate più erogazioni alla medesima velocità e possiamo notare che divergono maggiormente nel valore della derivata piuttosto che in quello dello shift. Questo è causato dall'errore di misura del sensore di distanza, sia per la precisione limitata, sia per l'interferenza nella misura data dal modo in cui la schiuma si accumula nel becher. La stabilità nel valore dello shift tra più erogazioni alla medesima velocità dimostra che è un'ottima stima della velocità del flusso e ciò

conclude la validazione dello shift.

## 4.2 Implementazione su scheda ST Nucleo

Le operazioni finora svolte richiedevano l'utilizzo di un computer per l'elaborazione dei dati. Inoltre i dati venivano processati solo dopo essere stati acquisiti per intero.

Per svolgere l'elaborazione dei segnali in tempo reale si è deciso di utilizzare una scheda ST Nucleo, con processore STM32F303 [11], lo stesso che l'azienda già utilizzava per il sensore di qualità.

Dopo un primo periodo di sperimentazione, ci si è però accorti che le performance di questo microcontrollore erano insufficienti.

Per avere valori di shift con sufficiente risoluzione, è infatti necessario campionare i segnali a una velocità di almeno 100KHz. Dal momento che lo shift viene espresso in numero di *sample* (campioni) di "distanza temporale" tra i due segnali, dimezzare la velocità di campionamento significa dimezzare la risoluzione del valore dello shift.

Inoltre per avere buone probabilità che nell'intervallo di tempo considerato almeno una bolla passi davanti a entrambi i sensori in modo tale da ottenere valori significativi di cross-correlazione, è necessario calcolarla su un dataset di dimensione superiore al migliaio di *sample*. Lo sforzo computazionale per effettuare questi calcoli ha evidenziato sia i limiti di velocità del microcontrollore scelto, sia le limitazioni relative alla memoria RAM.

Ci si è quindi spostati su una scheda NUCLEO con processore STM32F446 [12], che permette di effettuare il calcolo dello shift (e degli altri para-

metri) almeno dieci volte al secondo.

In questo intervallo, il segnale non viene campionato continuamente, poiché le risorse di calcolo risulterebbero comunque insufficienti, bensì vengono adottati gli ADC. Questo microcontrollore infatti contiene ben tre ADC a 12 bit, con velocità di 2.4 MSPS (*Million Samples Per Second*) e quindi perfetti per la nostra applicazione.

Considerando però che il fluido non presenta mai cambiamenti repentini o pulsazioni della sua velocità, si è deciso di acquisire 1024 *sample*, elaborarli e poi procedere a una nuova acquisizione.

### 4.3 La volumetria

Una volta note qualità e velocità, ci si è focalizzati sulla quantificazione del volume di schiuma erogato.

In seguito a variazioni della velocità del flusso della schiuma e/o della sua qualità (a causa delle problematiche, normalmente incontrollabili, evidenziate in precedenza), il volume erogato in un dato tempo può cambiare notevolmente.

La scheda Nucleo è stata collegata alla scheda Arduino in modo che potesse inviare un comando per l'inizio dell'erogazione. Inizia quindi l'acquisizione dei dati e una volta che la stima del volume erogato supera una soglia predefinita, l'erogazione viene interrotta in modo da poter controllare il volume effettivo erogato.

Per il funzionamento dell'algoritmo di stima del volume, l'informazione fornita dallo shift è molto importante. Già dopo le prime prove è risultato però apparente come la stima del volume data basandosi

solamente su questo valore non fosse molto precisa.

Lo shift rappresenta molto bene la variazione di velocità del flusso ma non risponde bene a variazioni nelle impostazioni della valvola dell'aria, che però comunque modificano in modo significativo il livello di montatura del latte e quindi anche il volume finale.

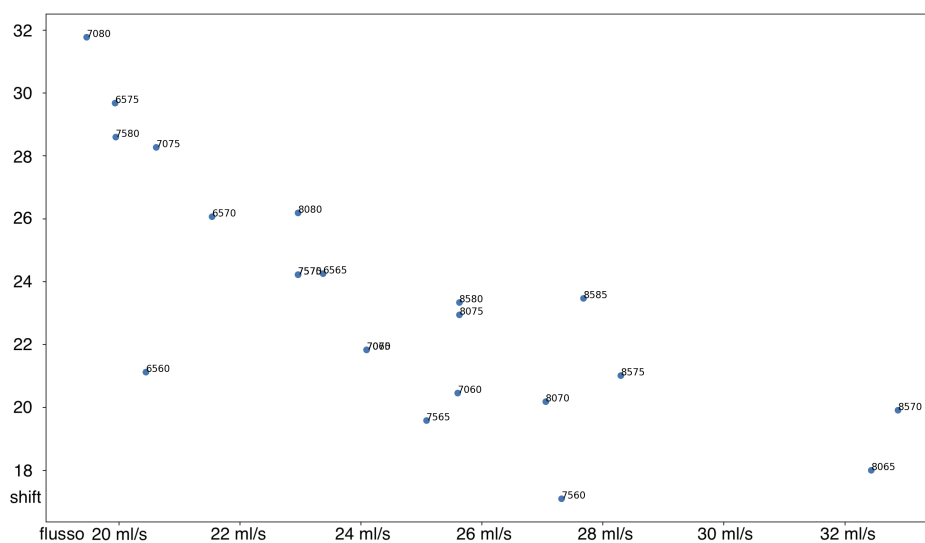


Figura 13: Confronto tra valori di shift e velocità di incremento del volume

In Figura 13 possiamo notare come valori di shift inferiori corrispondano a velocità di riempimento del becher maggiori. Il comportamento non risulta però essere lineare poiché influenzato da altri fattori.

Nel caso di queste prove, modificando l'apertura della valvola aria, sono state create schiume con densità molto diverse tra loro che hanno dato origine a volumi diversi, a prescindere dalla velocità della schiuma stessa.

Per questo motivo, si è pensato di sviluppare la funzione modello per la stima del volume come combinazione lineare multi-parametrica, inclu-

dendo sia lo shift, sia altre caratteristiche del segnale del foto-transistor che erano già state studiate per la valutazione della qualità della schiuma e già disponibili nell’algoritmo del sensore.

$$V = P \cdot t$$

$$P = C_1 + C_2 \cdot \frac{1}{Shift} + C_3 \cdot MinMax + C_4 \cdot N_{Peaks} + C_5 \cdot T$$

In particolare tre parametri sono stati utilizzati:

- La temperatura  $T$  della schiuma. Essa infatti influisce in modo significativo poiché le bolle d’aria tendono a espandersi con l’aumentare delle temperature e ciò aumenta considerevolmente il volume finale  
Tale temperatura viene acquisita mediante una termocoppia posta al di fuori del tubo e campionata mediante un ADC del microcontrollore.
- Il numero di picchi  $N_{peaks}$  nell’intervallo di tempo. Tale numero rende conto per la quantità di bolle nella schiuma.
- La differenza tra il valore del punto più alto e quello del punto più basso, detta  $MinMax$ . Tale numero indica la grandezza delle bolle presenti.

## 4.4 Machine Learning

Trovare i coefficienti per questa combinazione lineare multi-parametrica non è però banale, anche perché il comportamento della schiuma del

latte non è facilmente caratterizzabile. Si è quindi deciso di utilizzare tecniche provenienti dal mondo del machine learning per risolvere il problema.

Dopo aver raccolto un dataset contenente i dati appena menzionati e il volume totale al termine dell'erogazione, è stata eseguita un'ottimizzazione ai minimi quadrati, imponendo che la funzione modello fosse uguale al volume effettivo. Ciò ha permesso di individuare i parametri ottimi per l'equazione. Il firmware è stato aggiornato in modo che, una volta calcolato un nuovo valore per tutti i parametri necessari, calcolasse il nuovo volume stimato.

È stato inoltre aggiunto un filtro che rileva, in base al valore dello shift, se la schiuma nel tubo risulta già essere in movimento oppure se il fluido risulta ancora fermo o composto prevalentemente da aria, cosa che accade all'inizio di una erogazione. In questo caso, i dati finora raccolti vengono scartati.

Anche successivi campioni con valori di shift fuori scala vengono scartati. Ciò viene fatto in modo da non considerare, per quanto riguarda la stima del volume, campioni in cui la cross-correlazione non ha raggiunto un livello di confidenza sufficiente.

L'algoritmo di Machine Learning è stato integrato nel software Led-SensorLog in modo da permettere l'apprendimento semiautomatico dei coefficienti. Il software è stato ampliato in modo da permettere non solo la visualizzazione dei dati provenienti dal sensore, ma anche il suo controllo.

A questo punto, il sensore di distanza è stato rimosso. Non sarà ovviamente possibile averlo una volta che il sensore verrà installato su una macchina.

Si è voluto sviluppare il software in modo che il tecnico o il progettista della macchina avesse la possibilità di effettuare l'apprendimento richiesto dall'algoritmo utilizzando semplicemente il sensore e l'applicazione LedSensorLog ad esso connessa.

È stato aggiunto un pulsante nell'applicazione che permette di avviare l'erogazione di apprendimento. L'operatore ha il compito di interrompere l'erogazione quando il volume somministrato (misurato dall'operatore per mezzo di un bicchiere graduato) raggiunge un valore di taratura prestabilito (nel nostro caso 200ml).

In alternativa, l'operatore potrebbe effettuare delle erogazioni con durata costante, misurarne il volume una volta terminate e inserirlo manualmente nell'applicazione associandolo all'ultima acquisizione. Il risultato sarebbe il medesimo.

Durante la sessione di apprendimento, è necessario mostrare al sensore diverse possibili tipologie di schiuma in modo da poter effettuare una calibrazione più approfondita.

Tra un'acquisizione e l'altra, è possibile inviare al sensore i parametri aggiornati ed effettuare un'erogazione di prova per verificare che il volume stimato dal sensore corrisponda con quello effettivo.

## **4.5 Test effettuati per schiuma fredda**

In una prima fase di prove, si è voluto verificare che la stima volumetrica fosse stabile al variare dell'apertura della valvola aria.

I test sono stati eseguiti per valori di apertura valvola aria che permettono un'adeguata montatura del latte. Con valori troppo bassi, la montatura del latte non incide in modo significativo sul volume. Oltre

una certa soglia invece, il latte si monta così tanto da formare una schiuma densa con volume non facilmente misurabile in quanto non si adagia nel giro di qualche secondo nel becher. In ogni caso questo livello di montatura non viene utilizzato nella pratica.

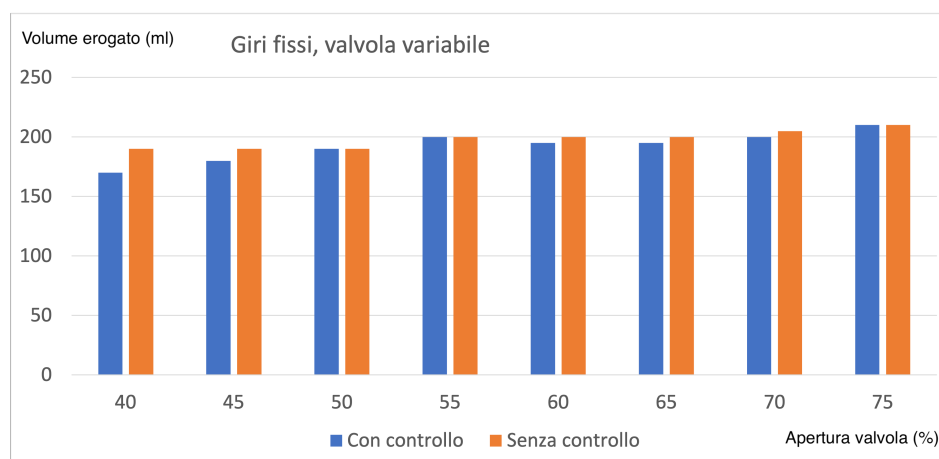


Figura 14: Grafico di confronto tra volume stimato e volume misurato con valvola variabile e giri fissi

In Figura 14 è possibile confrontare le erogazioni con e senza il controllo. Sull'asse orizzontale abbiamo l'apertura percentuale della valvola aria mentre sull'asse verticale il volume effettivamente erogato. L'apprendimento è stato effettuato in questo caso con 5 acquisizioni per ogni valore da 55% a 65% di apertura della valvola aria (per un totale di 15 acquisizioni).

Possiamo notare che l'algoritmo controlla perfettamente il tempo di erogazione nelle condizioni per le quali è stato addestrato. Al di fuori di questo intervallo, la precisione decade progressivamente.

È stato inoltre verificato che, incrementando la quantità delle acquisizioni di addestramento e/o effettuandole su un intervallo più ampio,

l'affidabilità e la precisione del controllo aumentano.

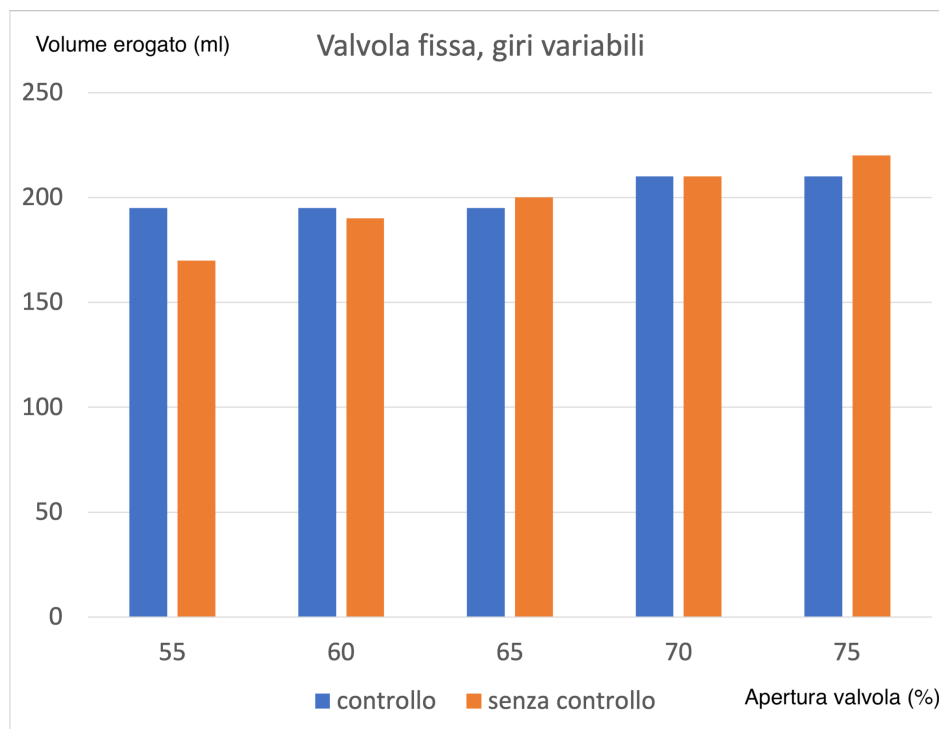


Figura 15: Grafico di confronto tra volume stimato e volume misurato con valvola fissa e giri variabili

In Figura 15 possiamo invece vedere il comportamento del controllo quando consideriamo schiume con velocità diverse da quella di riferimento (in questo caso 65%).

Questo è il caso più importante, dal momento che simula l'effetto del decadimento dell'efficienza della pompa nel tempo o una parziale ostruzione dei tubi del circuito latte. Questi sono infatti i casi più frequenti di inefficienza della macchina.

Con valvola costante e senza alcun controllo, una diminuzione di giri della pompa riduce la portata di schiuma, e quindi il volume finale, in modo lineare.

Il controllo in questo caso interviene in modo significativo e va a compensare la perdita di portata incrementando il tempo di erogazione.

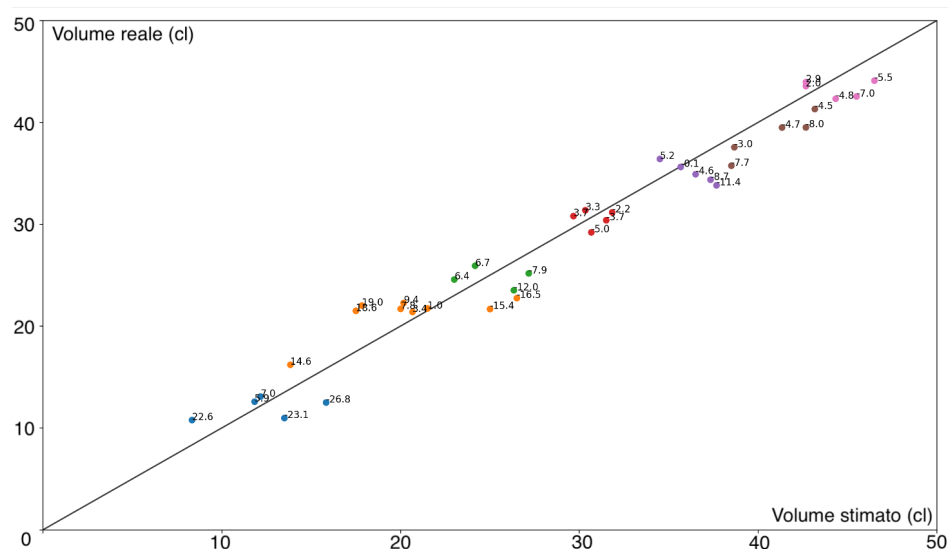


Figura 16: Confronto tra volume stimato e volume misurato con valvola e giri variabili

In Figura 16 vediamo invece i risultati di una serie di prove svolte fissando un tempo di erogazione fisso e variando, tra un'erogazione e la successiva, la velocità della pompa e l'apertura della valvola aria.

Il grafico confronta anche in questo caso il volume stimato con il volume effettivo, riportando in colore differente le diverse velocità della pompa e mostrando l'errore percentuale accanto ai singoli punti.

Anche in questo caso si voleva verificare la stabilità del sensore lungo l'intero range di configurazioni possibili al banco prove. Il sensore si è dimostrato lineare e l'errore di stima del volume è risultato essere di 10 ml, su erogazioni da 200ml.

## 4.6 Test effettuati per schiuma calda

Una volta verificato il funzionamento del sensore con la schiuma fredda, si è passati ad effettuare i test con la schiuma calda, quindi utilizzando anche il vapore.

La caldaia è stata impostata a una temperatura di 135°C che ha permesso di ottenere vapore alla pressione di 2,5 bar.

La configurazione di velocità della pompa e apertura della valvola aria-vapore è cruciale dal momento che varie configurazioni non sono valide.

Esiste infatti un ristretto range di valori per il quale il dispositivo monta-latte utilizzato al banco prove riesce a incorporare con successo il vapore nella miscela aria-latte.

Nel caso di aperture di valvola vapore troppo basse, la pressione del vapore è insufficiente a causare l'unione del vapore con il latte, quindi questo rimane freddo. Nel caso di aperture troppo alte, il vapore porta il latte a temperature troppo elevate per garantire una buona qualità di schiuma. Si è cercato di mantenere la temperatura del prodotto intorno ai 60-65°C. Questo intervallo è quello che viene utilizzato solitamente nelle macchine che producono schiuma calda.

Per le configurazioni ammesse, è stata effettuata una serie di acquisizioni che ha permesso di creare, mediante gli algoritmi di machine learning descritti in precedenza, una calibrazione del modello valida per le schiume calde.

La differenza di volume erogato al secondo tra le varie configurazioni in questo caso è stata molto significativa. Durante la batteria di test effettuati, il controllo è passato da erogazioni della durata di 10s ad

oltre di 30s, con un errore massimo di 20ml su un volume bersaglio di 200ml.

# Capitolo 5

## Implementazione software

In questo capitolo analizzeremo i dettagli implementativi e i frammenti di codice più rilevanti dal punto di vista del software relativo al sensore.

### 5.1 Configurazione microcontrollore

Lo sviluppo del firmware per la scheda ST Nucleo inizia dalla configurazione del progetto nell'ambiente di sviluppo STM32CubeIDE. Dopo aver selezionato il microcontrollore che si desidera utilizzare, si andranno impostare le configurazioni delle periferiche necessarie.

In figura 17 vediamo la vista riepilogativa della configurazione. È stata attiva la configurazione di default per la scheda Nucleo in questione. Ciò attiva i due oscillatori al quarzo esterni, i pin relativi alla programmazione e al debug (TMS, TCK), il pulsante B1 (presente sulla scheda) e la porta seriale USART per la comunicazione con il PC.

La periferica I2C è stata attivata e configurata per la comunicazione

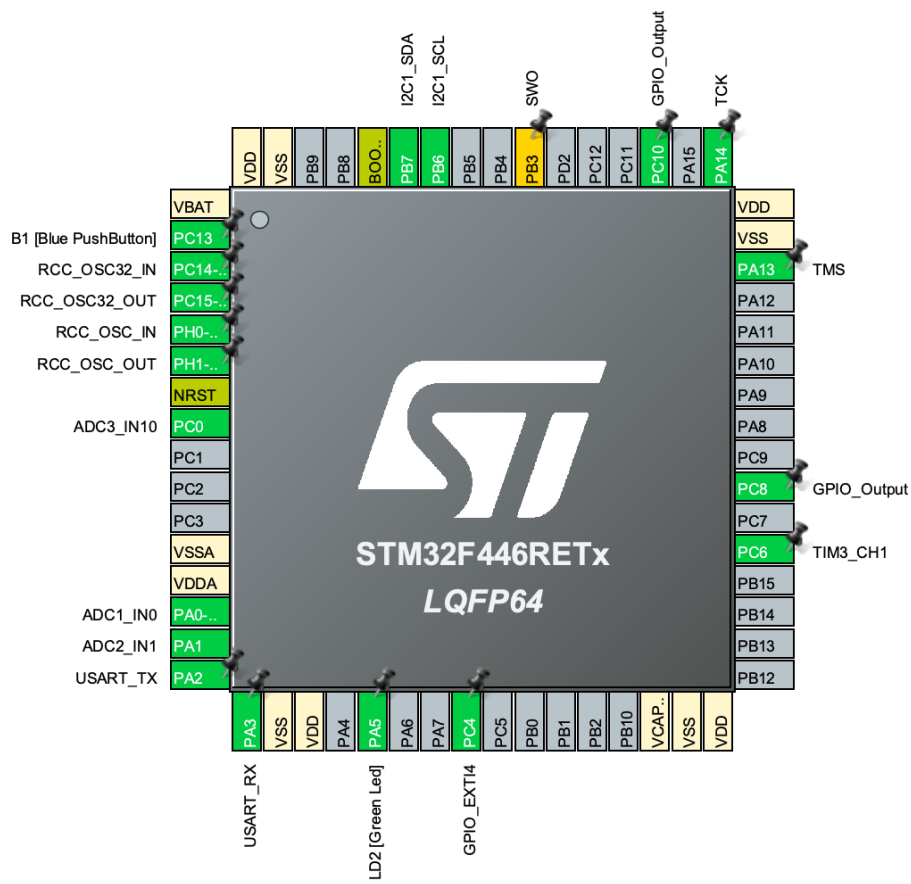


Figura 17: STM32CubeIDE: Vista globale di configurazione del processore

con il sensore di distanza utilizzato durante i primi test. Sono stati inoltre attivati i tre ADC, per l'acquisizione dei segnali provenienti dai fototransistor e dal sensore di temperatura.

È stato inoltre abilitato un pin per l'avviamento automatico dell'erogazione.

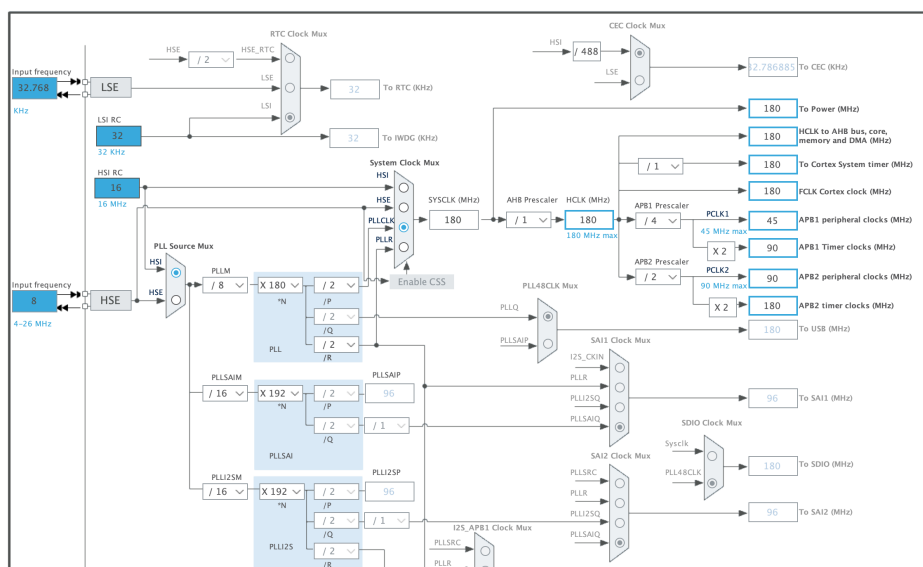


Figura 18: STM32CubeIDE: Configurazione clock

In figura 18 è presente la mappatura della distribuzione dei segnali di clock all'interno del processore stesso. Il segnale di clock viene generato dall'oscillatore interno che è abbinato a un cristallo di quarzo esterno con frequenza caratteristica 8MHz.

Questo segnale viene moltiplicato dalla periferica PLL presente nel chip per produrre un segnale con frequenza 180MHz. Questo segnale viene utilizzato per stabilire la velocità di funzionamento del core di calcolo del processore. Vista la notevole mole di calcoli da effettuare,

questa frequenza è stata impostata alla massima possibile per questo componente.

Il clock viene poi distribuito con le regole descritte in questa sezione della configurazione alle varie periferiche interne al processore.

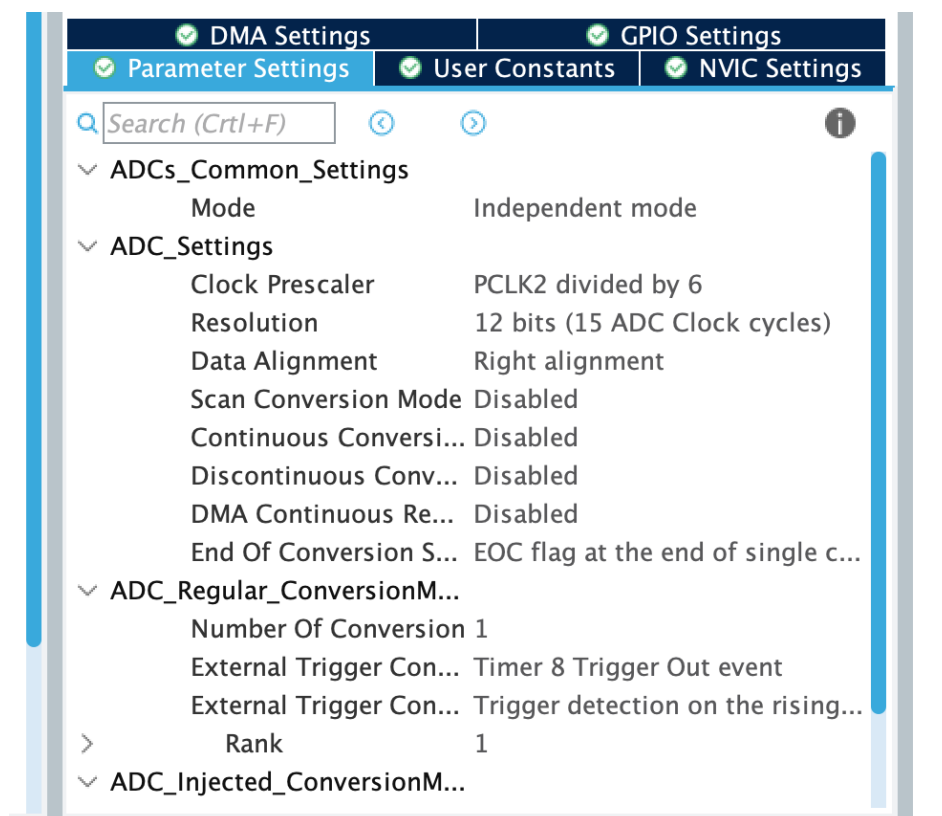


Figura 19: STM32CubeIDE: Configurazione ADC

Gli ADC di questo componente utilizzano il clock PCLK2 (90MHz) per il loro funzionamento. In figura 19 vediamo la configurazione dell'ADC1. Le altre risultano essere sostanzialmente equivalenti.

Dal momento che si desidera che gli ADC acquisiscano i segnali in contemporanea, si è deciso di impostarli in modo che effettuino il sampling

in corrispondenza della transizione da basso ad alto del segnale generato dal Timer 8 del microprocessore.

Questo timer deciderà quindi la frequenza di acquisizione dei segnali. In figura 20 ne vediamo la configurazione. Questo timer è impostato per inviare un impulso in uscita, ogni volta che il suo contatore raggiunge il valore 1800.

Il contatore ha come input il segnale di clock APB2 di 180Mhz. La frequenza del segnale in uscita sarà quindi  $180\text{Mhz}/1800=100\text{Khz}$ . Questa è la frequenza di campionamento desiderata.

Gli ADC sono collegati alla periferica DMA2 del microcontrollore che si occupa dell'accumulo di tutti i dati acquisiti dagli ADC in memoria RAM, in modo che possano essere elaborati.

Ogni volta che l'ADC termina il sampling del valore attuale del segnale, invece che generare un interrupt al processore per il suo salvataggio in memoria, questa operazione viene effettuata dalla periferica DMA, in modo da liberare capacità computazionale.

Sarà sufficiente avviare l'acquisizione impostando la quantità di sample da acquisire in modo autonomo. Un interrupt verrà generato una volta che l'ultimo valore richiesto è stato trasferito in memoria. Quando il processore riceve questo segnale, si procede con l'analisi dei dati acquisiti.

Per la memorizzazione dei dati, è stato creato un buffer per ognuno dei due segnali grande  $1024*16\text{bit}$ . Gli ADC hanno una risoluzione di 12bit. Dal momento che la memoria è indirizzata a byte, vengono riservati due byte per ogni valore.

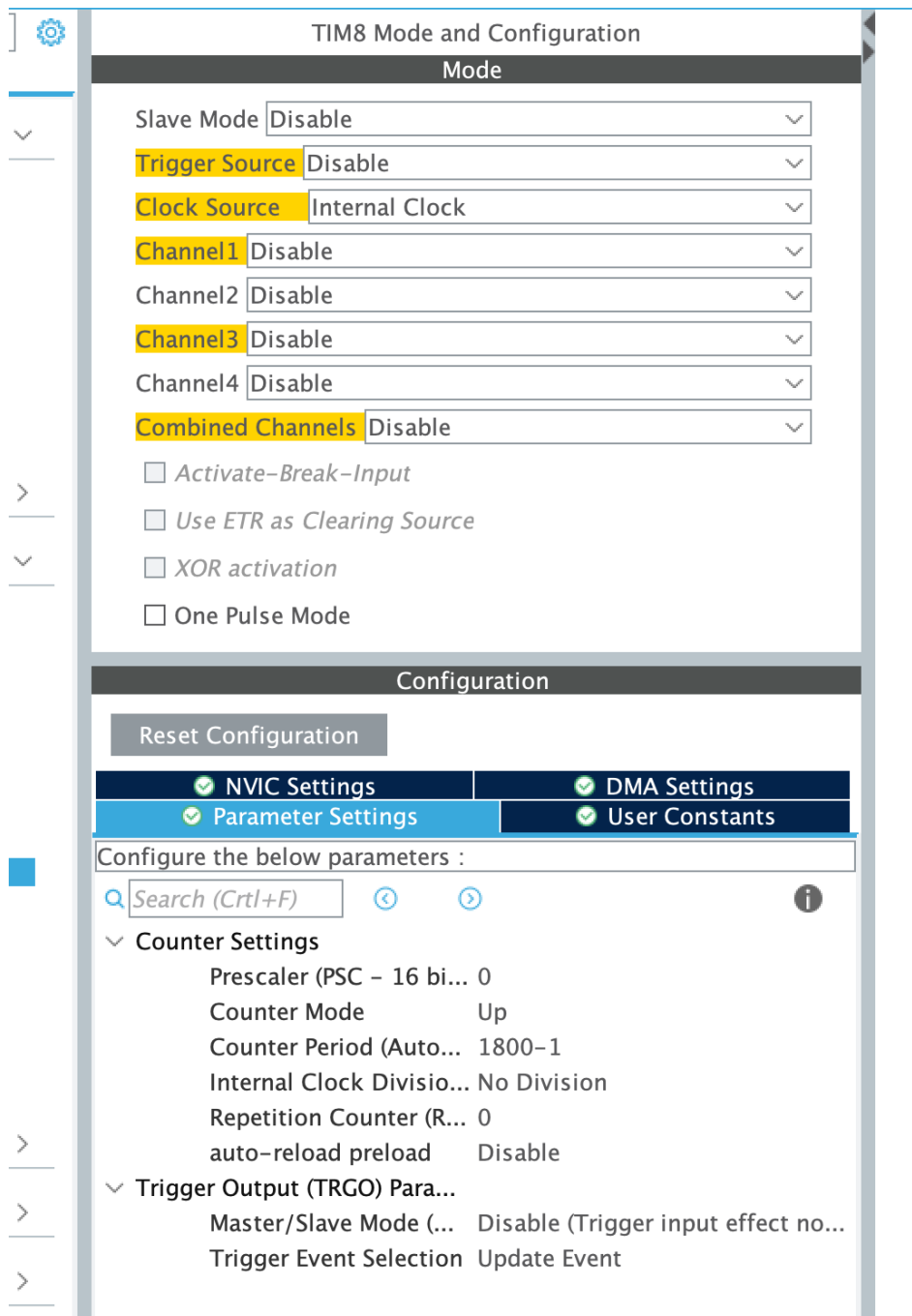


Figura 20: STM32CubeIDE: Configurazione Timer 8

## 5.2 Calcolo dello shift

Dopo aver calcolato i parametri di qualità della schiuma con i dati provenienti da solo uno dei due foto-transistor, utilizzando gli algoritmi già sviluppati in precedenza da Fluid-o-Tech, si passa al calcolo dello shift.

Per permettere ai calcoli di avere la necessaria risoluzione, si è deciso di convertire i valori interi a 12bit forniti dagli ADC, in valori in virgola mobile a singola precisione. Il processore contiene un'unità FPU in grado di operare su questi valori senza rilevanti penalità in termini prestazionali.

Per svolgere questa operazione è necessario effettuare una copia del buffer di interi in un nuovo buffer di tipo float, effettuando le conversioni di tipo richieste.

A questo punto i dati vengono normalizzati, sottraendo puntualmente il valore medio di ogni segnale e dividendo puntualmente per la deviazione standard.

Si può a questo punto calcolare la correlazione tra i due segnali, utilizzando la funzione fornita dalla libreria CMSIS DSP. Il risultato di questa operazione è un buffer con dimensione pari al doppio della dimensione dei buffer contenenti i valori dei segnali in ingresso.

Viene quindi trovato l'indice del punto con valore massimo del buffer. La distanza di questo indice dalla metà del buffer indica lo shift; valori inferiori alla metà indicano valori di shift negativi. Ciò può avvenire nel caso in cui la direzione nel flusso nella testina ottica sia invertita rispetto a quella corretta.

### 5.3 Stima del volume erogato

Il processo di stima del volume erogato viene avviato alla pressione del pulsante blu presente sulla scheda Nucleo. Questo è configurato per generare un interrupt che avvia l'operazione.

I valori dei parametri del modello vengono azzerati e viene attivato il pin che segnala la richiesta di avvio erogazione alla scheda Arduino che controlla il banco prove. Viene inoltre impostato l'avvio del calcolo del volume erogato dopo 500ms per non considerare il periodo iniziale in cui il circuito non è ancora pieno di schiuma.

Dopo aver calcolato lo shift, il processore controlla se la stima volumetrica è stata attivata. In questo caso, si verifica che il valore di shift risulti essere inferiore a un limite di riferimento per alcuni sample. Se ciò non accade, significa che c'è ancora aria nell'impianto e l'erogazione non è ancora iniziata; i parametri del modello vengono azzerati.

Si verifica inoltre che il valore di shift sia in una banda di valori accettabili, in caso contrario il campione viene scartato in quanto non significativo ai fini della stima.

Superata questa fase si procede all'aggiornamento dei valori medi dei parametri del modello e al calcolo del volume stimato. Se questo risulta superiore alla soglia impostata, il pin collegato alla scheda Arduino viene disattivato in modo da interrompere l'erogazione.

Il volume di schiuma richiesto si trova ora nel bicchiere.

## 5.4 Protocollo di comunicazione seriale

I dati acquisiti dal sensore vengono trasmessi tramite la porta seriale USART codificati in formato COBS. Questo formato consente il trasferimento dei dati a pacchetti, in modo da poterli ricevere in modo semplice ed efficiente.

Per quanto riguarda la ricezione dei comandi provenienti dal PC, il microcontrollore configura la periferica DMA in modo che trasferisca automaticamente in memoria il primo carattere ricevuto.

Il carattere identificherà il comando da eseguire. Se il comando prevede dei parametri, la periferica DMA verrà impostata per trasferire la corretta quantità di byte necessaria a leggerli tutti.

Dopo aver svolto questa operazione o nel caso in cui il comando non accetti parametri, si ritorna alla situazione iniziale in modo da poter gestire ulteriori comandi.

I comandi attualmente implementati sono i seguenti:

- "s" -> avvia l'erogazione.
- "x" -> interrompe l'erogazione.
- "l" -> imposta il volume da erogare, espresso in ml. È seguito dal valore desiderato, espresso in formato uint16.
- "p" -> imposta i parametri del modello. È seguito dai valori dei 5 parametri del modello, espressi in formato float.

## Capitolo 6

### Conclusioni e sviluppi futuri

I test e i dati raccolti dimostrano come un sensore ottico del tipo sviluppato possa essere utilizzato non solamente per la valutazione della qualità e della viscosità della schiuma del latte, ma anche per la stima della sua velocità nell'impianto. Si è inoltre dimostrato che l'utilizzo del machine learning permette di effettuare una calibrazione automatica del sensore una volta inserito in un nuovo circuito latte.

Poiché la stima del volume si riveli sufficientemente stabile e affidabile, è necessario avere un dataset piuttosto ampio, formato da erogazioni effettuate sia in situazioni di normale funzionamento dell'impianto (acquisendo i dati durante l'esecuzione di tutte le ricette disponibili) sia in situazioni di possibile anomalia.

Spesso simulare diverse problematiche non è particolarmente complesso anche se può richiedere tempo. Resta da verificare se la calibrazione possa essere effettuata una sola volta per ogni modello di macchina dalla casa madre (di fatto caratterizzandone il comportamento) o se debba essere effettuata su ogni singola unità o ripetuta ad intervalli regolari.

La precisione nella stima del volume, in particolare di quello relativo alla schiuma calda, può essere probabilmente migliorata con tecniche di filtering dei dati più avanzate. Un campionamento più frequente, utilizzando un processore ancora più rapido, potrebbe permettere di smorzare l'errore dato dall'insufficienza di campioni utilizzati durante il calcolo.

La stima viene inoltre effettuata utilizzando i valori medi dei parametri necessari durante l'intero intervallo di erogazione. Per considerare al meglio eventuali variazioni di qualità durante il corso dell'erogazione, l'algoritmo potrebbe essere eseguito sui valori medi calcolati su intervalli di alcuni secondi.

È inoltre possibile lo sviluppo di un algoritmo per il controllo in retroazione della velocità della pompa allo scopo di raggiungere un valore di shift prestabilito in base alla velocità effettivamente rilevata, ove questo fosse ritenuto utile al raggiungimento di una determinata tipologia di schiuma.

# Bibliografia

- [1] Thermoplan. *Macchina da caffè Black&White 4*. URL: <https://www.thermoplan.ch/en/products/black-white-4>. (ultimo accesso: 02.07.2021).
- [2] Dolphin Fluidics. *Valvole proporzionali*. URL: <https://www.fluidotech.it/en/products/technologies/electronic-valves/df-smart-on-off-and-proportional-valves/>. (ultimo accesso: 04.07.2021).
- [3] ST. *Integrated Development Environment for STM32*. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>. (ultimo accesso: 01.07.2021).
- [4] ST. *Description of STM32F4 HAL and low-layer drivers*. URL: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00105879-description-of-stm32f4-hal-and-ll-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105879-description-of-stm32f4-hal-and-ll-drivers-stmicroelectronics.pdf). (ultimo accesso: 01.07.2021).
- [5] CMSIS. *CMSIS DSP Software Library*. URL: [https://arm-software.github.io/CMSIS\\_5/DSP/html/index.html](https://arm-software.github.io/CMSIS_5/DSP/html/index.html). (ultimo accesso: 01.07.2021).

- [6] ST. *STM32 Nucleo Boards*. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-nucleo-boards.html>. (ultimo accesso: 01.07.2021).
- [7] ST Wiki. *ST-LINK*. URL: <https://wiki.st.com/stm32mpu/wiki/ST-LINK>. (ultimo accesso: 01.07.2021).
- [8] Gnuplot. *gnuplot homepage*. URL: <http://www.gnuplot.info>. (ultimo accesso: 01.07.2021).
- [9] Optoi. *Optoi Home*. URL: <https://optoi.com/it/home>. (ultimo accesso: 01.07.2021).
- [10] DBeaver. *DBeaver Web*. URL: <https://dbeaver.com>. (ultimo accesso: 31.05.2021).
- [11] ST. *STM32F303 Datasheet*. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f303vc.pdf>. (ultimo accesso: 01.07.2021).
- [12] ST. *STM32F446 Datasheet*. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f446re.pdf>. (ultimo accesso: 01.07.2021).