

# UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI SALERNO

Dipartimento di ingegneria dell'informazione ed elettrica e  
matematica applicata



## Report Sensori e Attuatori

### Progetto smart meter

**Docenti:**

Giovanni Petrone - gpetrone@unisa.it  
Patrizia Lamberti - plamberti@unisa.it

**Gruppo:**

**Lorenzo Pagliara**  
**Francesco Avallone**

0622701576 - l.pagliara5@studenti.unisa.it  
0622701488 - f.avallone20@studenti.unisa.it

Anno Accademico 2021-2022

## Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Circuito di interfacciamento</b>	<b>2</b>
2.1	Sensore di Corrente (ZMCT103C) . . . . .	2
2.2	Sensore di Tensione (ZMPT101B) . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Schema elettrico smart meter</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Simulazione sorgente delle grandezze elettriche</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Acquisizione delle grandezze elettriche e preelaborazione angolo di fase</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Elaborazione dei dati mediante Raspberry</b>	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>Analisi e calcolo delle incertezze</b>	<b>7</b>
7.1	Legge di propagazione . . . . .	7
7.2	Calcolo dell'incertezza per tensione e corrente . . . . .	8
7.3	Calcolo dell'incertezza per l'angolo di sfasamento fra tensione e corrente . . . . .	9
7.4	Calcolo dell'incertezza della potenza . . . . .	9
<b>8</b>	<b>Visualizzazione grandezze elettriche e archiviazione</b>	<b>10</b>
<b>9</b>	<b>Codice</b>	<b>10</b>

# 1 Introduzione

Il progetto si propone di sviluppare un sistema di misura delle grandezze elettriche su una linea AC per il monitoraggio dei consumi energetici di un'utenza residenziale.

Per il perseguimento di tale obiettivo, sono state utilizzate due schede differenti:

1. STM32 Nucleo F401RE: dispositivo adottato per il campionamento dei segnali di tensione e corrente, provenienti da un circuito di interfacciamento (composto da sensori di tensione e corrente), e per la stima dell'angolo di sfasamento fra le due sinusoidi;
2. Raspberry Pi 3B+: dispositivo adottato per l'elaborazione dei dati acquisiti dalla scheda STM32 e per la stima dei consumi energetici.

L'interfacciamento fra le due schede è stato definito mediante una comunicazione seriale, attraverso il protocollo USART, gestita direttamente dalla Raspberry la quale, con un opportuno segnale, richiede alla STM32 di campionare nuovi dati dalla sorgente elettrica per poi poterli elaborare.

## 2 Circuito di interfacciamento

### 2.1 Sensore di Corrente (ZMCT103C)

Per la lettura del segnale di corrente è stato utilizzato un sensore open loop basato sull'effetto Hall.

Un sensore di questo tipo si basa sul principio che le cariche elettriche dei materiali semiconduttori costitutivi del sensore, se soggette ad un campo magnetico, generato ad esempio da un filo percorso da corrente, si distribuiscono lungo le estremità del materiale, per effetto della forza di Lorentz, generando una tensione di uscita. Tale tensione è caratterizzata da un ordine di grandezza piuttosto piccolo, anche quando il sensore è soggetto ad un forte campo magnetico esterno. Pertanto, la maggior parte dei sensori a effetto Hall disponibili in commercio sono costruiti con un amplificatore di tensione integrato e regolatori di tensione per migliorare la sensibilità del sensore e l'ampiezza della tensione di uscita.

Il sensore utilizzato è un micro trasformatore di corrente in grado di generare in uscita una tensione pari a:

$$V = \frac{R}{1000} I$$

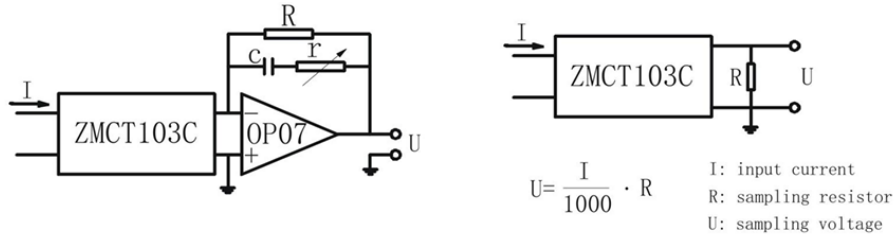


Figura 1: Schema ZMCT103C

Il sensore è in grado di misurare correnti in modulo fino a  $5A$  con accuratezza del 2% per valori di resistenza di campionamento minori di  $10\Omega$ . Il sensore in questione ha una resistenza di  $1\Omega$ , generando un rapporto tra corrente e tensione di 1 a 1000.

## 2.2 Sensore di Tensione (ZMPT101B)

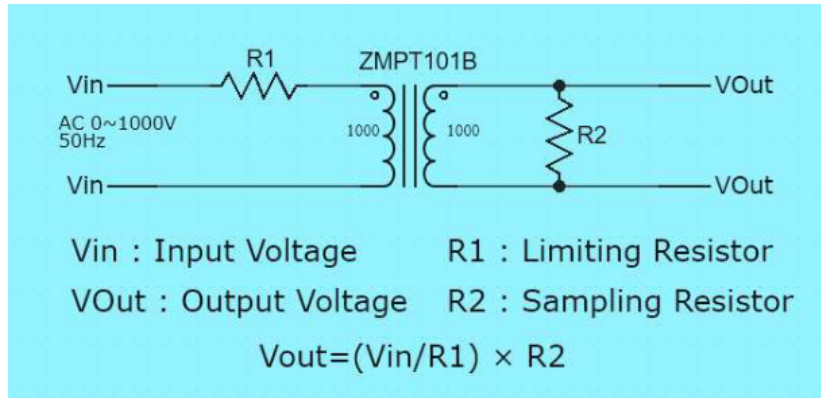


Figura 2: Schema ZMPT101

Il sensore di tensione ZMPT101B, basato sul principio di funzionamento del trasformatore, riesce a misurare segnali di tensione compresi fra i 0 e i  $1000V$ . Nell'ottica della corrente, questo è un trasformatore di corrente di  $2mA:2mA$ . La resistenza  $R1$  è scelta in modo che la corrente sulla linea non superi i  $2mA$ , sebbene possano essere trattate correnti fino a  $10mA$ , così da mantenere una curva caratteristica lineare. D'altro canto, la resistenza  $R2$  viene scelta in base alla  $V_{out}$  desiderata da cui ne consegue:

$$R2 = \frac{V_{out_{max}}}{V_{in}} R1$$

### 3 Schema elettrico smart meter

Il sistema di misura delle grandezze elettriche è composto principalmente da due schede opportunamente interconnesse (come mostrato in Figura 3):

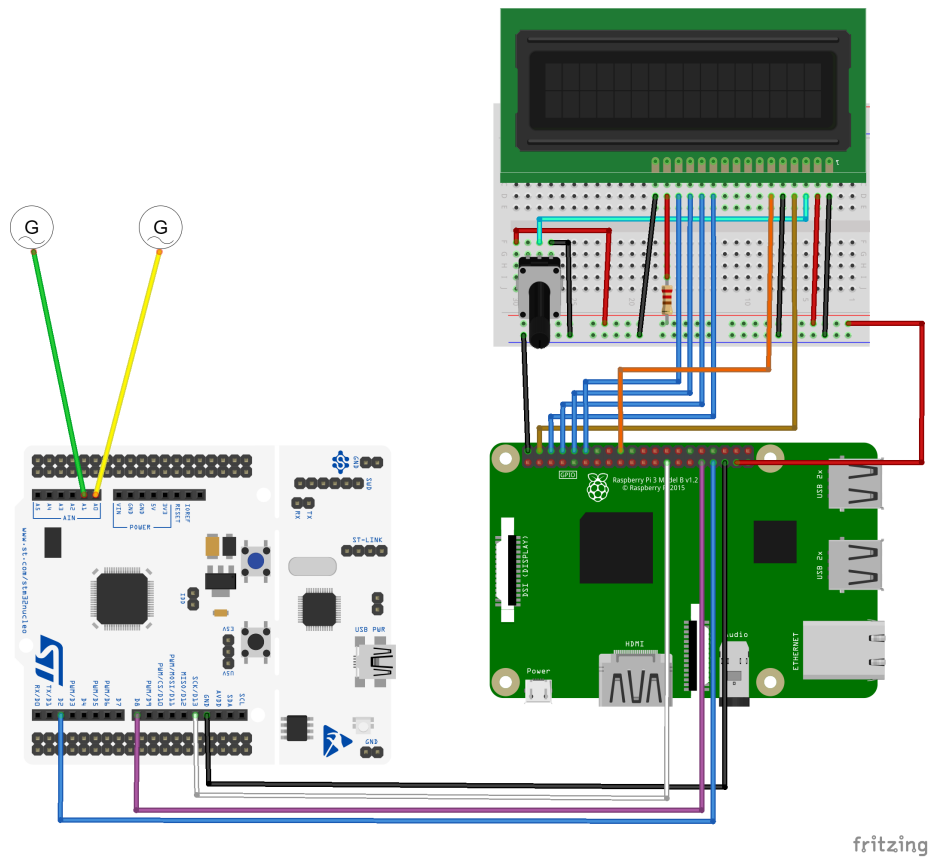


Figura 3: Schema elettrico smart meter

- STM32: adoperata principalmente per l'acquisizione e la digitalizzazione dei segnali analogici, in ingresso al sistema, mediante l'utilizzo dell'ADC integrato in quest'ultima.
- Raspberry: adoperata principalmente per l'elaborazione dei dati e per fornire in output le varie grandezze elettriche richieste analizzabili mediante un sistema di archiviazione dati o dal vivo mediante LCD.

## 4 Simulazione sorgente delle grandezze elettriche

In assenza di sensori collegati all'impianto elettrico, le sinusoidi della tensione e della corrente sono state simulate utilizzando una scheda STM32 aggiuntiva. Lo schema elettrico per la generazione dei segnali sinusoidali è mostrato in Figura 4.

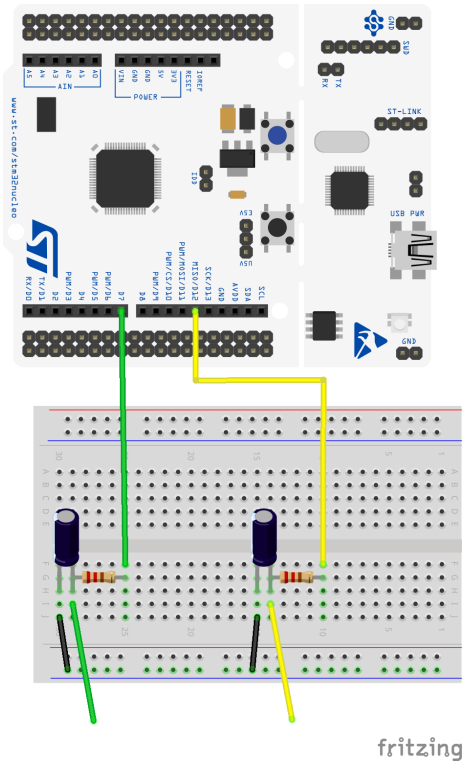


Figura 4: Schema di generazione sinusoidi.

Sulla STM32 sono stati settati due timer in grado di generare due segnali PWM, il cui duty cycle viene modificato sulla base dei valori assunti dal seno al variare degli angoli da 0 a  $2\pi$ . I valori iniziali delle funzioni sono stati scelti in modo tale da generare due sinusoidi sfasate di  $\pi/2$ . In accordo a ciò che avviene con la rete elettrica, la sinusoide in anticipo è la sinusoide relativa alla tensione, mentre l'altra sinusoide, in ritardo, è la sinusoide relativa alla corrente.

L'effettiva generazione della sinusoide avviene facendo passare il segnale PWM attraverso un filtro passa basso, realizzato mediante una serie RC, con frequenza di taglio pari a:

$$f_t = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 330 \cdot 6.7 \times 10^{-6}} \approx 70Hz$$

Il filtro ha il compito di computare il valor medio del segnale PWM e generare così un'onda continua.

## 5 Acquisizione delle grandezze elettriche e pre-elaborazione angolo di fase

Come già detto in precedenza la scheda STM32 si occupa dell'acquisizione delle grandezze in ingresso mediante l'ADC integrato. Tale ADC è unipolare, con tensione minima pari a  $0V$  e tensione di riferimento pari a  $3.3V$ , concordi con i valori di uscita delle tensioni dei due sensori, motivo per cui non è stato introdotto alcun circuito di condizionamento.

L'ADC è stato configurato in modo tale da avere un periodo di campionamento di  $95\mu s$ , che nel periodo delle grandezze sinusoidali di  $20ms$ , consente di acquisire all'incirca 210 campioni e con modalità di accesso in DMA, in modo tale da ridurre il carico della CPU.

Ottenuti i campioni di entrambe le sinusoidi è stata effettuata una stima dell'angolo di sfasamento tra le stesse, secondo la legge:

$$phase = \frac{t_d * 360}{p}$$

dove  $t_d$  è la differenza tra il tempo impiegato dalla corrente e quello impiegato dalla tensione per annullarsi e  $p$  il periodo delle sinusoidi. Poiché è noto il periodo di campionamento, è stato possibile calcolare questi due tempi semplicemente conoscendo l'indice del primo valore nullo di ciascun segnale e moltiplicandolo per tale periodo.

Tali informazioni sono state poi trasmesse alla Raspberry mediante protocollo seriale USART.

## 6 Elaborazione dei dati mediante Raspberry

Per una più facile elaborazione dei dati e delle loro incertezze è stata utilizzata una scheda Raspberry. Nel codice sviluppato è prevista l'acquisizione di un intero periodo delle sinusoidi di tensione e di corrente, attraverso i cui campioni, vengono elaborate le grandezze elettriche di interesse, quali potenza attiva, reattiva, apparente e il fattore di potenza. Per ridurre al minimo gli errori e aumentare l'accuratezza delle misurazioni è stata prevista l'acquisizione di più periodi, il cui numero è definito mediante la variabile *REPETITION*, prima di fornire l'output mediato all'utente.

In questa fase il Raspberry abilita la lettura dei segnali sulla STM32, alzando un pin di output collegato ad uno di input sull'altra scheda, e si mette in ascolto dei campioni. Prima di effettuare le elaborazioni, la scheda si occupa di normalizzare il valore dell'angolo di fase ricevuto. Di fatti, potrebbe succedere che risulti un angolo di fase negativo anche con segnale di corrente in ritardo rispetto a quello di tensione. Ciò dipende dal fatto che la lettura dei segnali può avvenire in un istante arbitrario e quindi, nel calcolo dell'angolo di fase, potrebbero risultare valori negativi nella differenza temporale tra istante di annullamento della corrente e quello della tensione, semplicemente perché si inizia a leggere da valori in cui la tensione già si è annullata e la corrente non ancora.

Ottenuto lo sfasamento  $\varphi$  si procede poi con il calcolo delle grandezze di interesse, secondo le formule:

$$\begin{aligned} P_{avg} &= \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{2} \cos \varphi \\ P_{app} &= \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{2} \\ Q &= \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{2} \sin \varphi \\ \cos \varphi &= \frac{P_{avg}}{P_{app}} \end{aligned}$$

## 7 Analisi e calcolo delle incertezze

Secondo la teoria della misurazione, l'errore di una grandezza misurata è la differenza fra il valore veritiero e il valore misurato. Sebbene questa terminologia viene utilizzata in molti contesti, nella teoria delle misurazioni non si conosce il valore "vero" di una misura e quindi è difficile identificare il conseguente errore. Per tale motivazione, si introduce il concetto di incertezza.

Nel caso dell'incertezza non esiste un unico valore vero, ma un insieme di valori veri, sebbene anche questi non conoscibili. In particolare, si fa riferimento all'incertezza standard ovvero l'incertezza del risultato di una misurazione espressa come deviazione standard e si indica solitamente con  $u$ .

### 7.1 Legge di propagazione

Nel caso delle misure indirette, come per il calcolo della potenza in questo progetto, l'incertezza della misura si calcola mediante la legge di propagazione delle incertezze:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N-1} \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial F}{\partial x_j} \right) u(x_i, x_j)$$



nell'ipotesi in cui la stima della covarianza tra  $x_i$  e  $x_j$  è nulla allora  $u(x_i, x_j)$  risulta essere pari a 0 e l'equazione precedente si semplifica in:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

## 7.2 Calcolo dell'incertezza per tensione e corrente



Figura 5: Catena di misura

Per misurare tensione/corrente bisogna attraversare vari elementi nella catena di misurazione prima che il valore misurato venga convertito in digitale. Per tale motivo, nel calcolare l'incertezza complessiva della tensione e della corrente, bisogna considerare le incertezze di tutti gli stadi e la propagazione di queste ultime lungo tutta la catena di misurazione:

- sensore di corrente e tensione: si considera la precisione dei due sensori pari al 0.2% (**datasheet sensore di tensione, datasheet sensore di corrente**);
- circuiteria di interfacciamento: si suppone che la precisione della circuiteria di interfacciamento dei due sensori sia pari al 1%;
- errore ADC: l'errore dell'adc è pari a  $0.5 * Q$  dove  $Q = \frac{(V_{ref} - V_{min})}{2^{n.bit}} = \frac{3.3-0}{2^{12}} = 0.805mV$ . Da ciò ne consegue che, l'errore dell'adc è pari a  $0.402mV$ .

Avendo queste informazioni è possibile definire le varie incertezze (dove  $v$  è la tensione misurata):

- $u_{ADC} = 0.402mV$
- $u_{sensore} = v * 0.2\%$
- $u_{interfaccia} = v * 1\%$

Analogo discorso può essere fatto per la corrente.

Come noto dalla teoria della legge di propagazione delle incertezze, l'incertezza complessiva è:

$$u_{v,i} = \sqrt{u_{ADC}^2 + u_{sensore}^2 + u_{interfaccia}^2}$$

dove  $v$  e  $i$  sono tensione e corrente.

### 7.3 Calcolo dell'incertezza per l'angolo di sfasamento fra tensione e corrente

Avendo adottato una procedura algoritmica per il calcolo dell'angolo di sfasamento, l'incertezza di quest'ultimo è stata calcolata considerando più misurazioni da cui è stata ricavata la varianza sperimentale. Di conseguenza, l'incertezza  $u_{phase} = \sqrt{\frac{s^2}{k}}$ , dove  $s^2$  è la varianza sperimentale mentre  $k$  è il numero di misurazioni effettuate. Analoga procedura è stata adottata per il calcolo dell'incertezza del  $\cos(\varphi)$ . A run-time, queste incertezze vengono aggiornate considerando tutte le misurazioni effettuate dall'avvio del sistema.

### 7.4 Calcolo dell'incertezza della potenza

Come noto dalla teoria dell'elettrotecnica, la potenza si divide in potenza apparente, potenza attiva e potenza reattiva:

- $P_{app} = \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{2}$
- $P_{avg} = \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{2} \cos \varphi$
- $Q = \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{2} \sin \varphi$

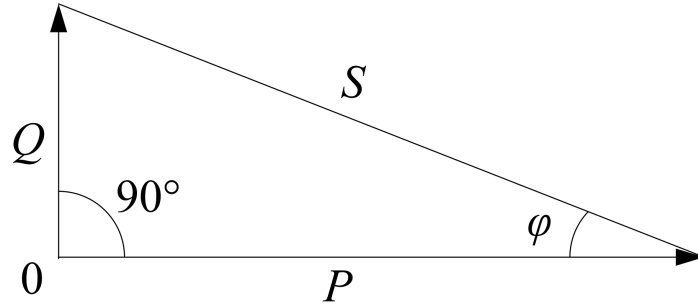


Figura 6: Grafico rappresentante il fattore di potenza

Da ciò ne consegue, che le relative incertezze, in accordo alla legge di propagazione delle incertezze per misure indirette, sono:

- $u_{app} = \sqrt{\frac{\partial P^2}{\partial i} u_i^2 + \frac{\partial P^2}{\partial v} u_v^2}$
- $u_{active} = \sqrt{\frac{\partial P^2}{\partial i} u_i^2 + \frac{\partial P^2}{\partial v} u_v^2 + \frac{\partial P^2}{\partial \varphi} u_{\cos(\varphi)}^2}$
- $u_{reactive} = \sqrt{\frac{\partial P^2}{\partial i} u_i^2 + \frac{\partial P^2}{\partial v} u_v^2 + \frac{\partial P^2}{\partial \varphi} u_{\sin(\varphi)}^2}$

## 8 Visualizzazione grandezze elettriche e archiviazione

Le grandezze elettriche elaborate dalla Raspberry sono rese visibili all'utente sia mediante il terminale integrato della scheda, sia mediante un display LCD a cristalli liquidi (1602). Tale display è in grado di visualizzare contemporaneamente 2 stringhe da 16 caratteri ciascuna, ricevute mediante 8 data bus, configurabili per lavorare in modalità 4 o 8 bit.

Le grandezze misurate sono poi archiviate in un file insieme alle informazioni relative alla data e ora della misura e all'intervallo di tempo, in ore, per cui è stata fatta la stima.

## 9 Codice

Si rimanda al repository GitHub per ulteriori dettagli implementativi **qui**.