



UNIVERSITÀ
di **VERONA**

Dipartimento
di **INFORMATICA**

Relazione progetto SIS

Bottacini Luca (VR474339)

Lecini Rustem (VR471559)

Roin Giovanni (VR471473)

21/02/2022

Indice

| | |
|---|----------|
| Circuito FSM + D | 3 |
| Traccia | 3 |
| Interfaccia del circuito | 3 |
| Architettura generale | 4 |
| Segnali interni | 4 |
| Macchina a stati finiti (FSM) | 5 |
| Transizioni | 5 |
| Grafo delle transizioni (STG) | 5 |
| Unità di elaborazione (Data path) | 7 |
| Contatore dei cicli | 7 |
| Corpo principale | 8 |
| Simulazioni di esempio | 10 |
| Esempio 1 | 10 |
| Esempio 2 | 10 |
| Statistiche | 11 |
| Ottimizzazione | 11 |
| Mappatura tecnologica | 12 |
| Scelte progettuali | 13 |

Circuito FSM + D

Abbiamo sviluppato un circuito che controlla un meccanismo chimico, il cui scopo è portare una soluzione con un pH iniziale noto ad un valore di neutralità.

Traccia

Il valore del pH viene espresso in valori compresi tra 0,00 e 14,0: nell'intervallo [0,00, 7,00) si trovano i valori acidi, mentre in quello (8,00, 14,0] si trovano i valori basici, infine i valori inclusi in [7,00, 8,00] sono considerati neutrali. Tutti gli altri valori non sono accettabili e comportano un errore.

Il sistema è quindi dotato di due valvole: la prima può *decrementare* il valore del pH di 0.50 in un singolo ciclo di clock, mentre la seconda lo può *incrementare* di 0.25 nello stesso periodo di tempo.

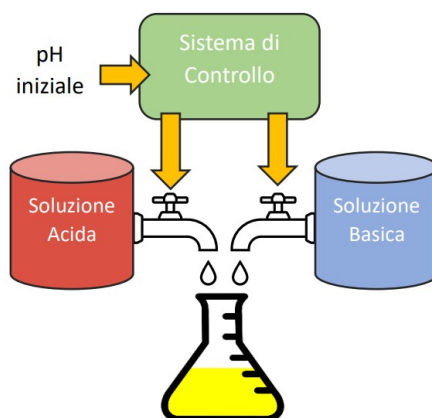


Figura 1: Illustrazione del circuito

Interfaccia del circuito

Il circuito accetta i seguenti segnali di ingresso:

| Nome | Descrizione |
|----------------|--|
| RST | Ordina al circuito di tornare allo stato iniziale. |
| START | Ordina al circuito di leggere il segnale PH_INIZIALE[8]. |
| PH_INIZIALE[8] | Rappresenta il valore iniziale del pH. |

L'ingresso PH_INIZIALE[8] è un byte codificato in **virgola fissa** con 4 bit dedicati alla parte intera.

Il circuito produce i seguenti segnali di uscita:

| Nome | Descrizione |
|-----------------|---|
| FINE_OPERAZIONE | Indica che il sistema ha completato i calcoli. |
| ERRORE_SENSORE | Indica che il sistema ha ricevuto un pH invalido. |
| VALVOLA_ACIDO | Richiede il decremento del pH. |
| VALVOLA_BASICCO | Richiede l'incremento del pH. |
| PH_FINALE[8] | Rappresenta il valore finale del pH. |
| NCLK[8] | Rappresenta il numero di cicli impiegati. |

L'uscita PH_FINALE[8] è un byte codificato esattamente come l'ingresso PH_INIZIALE[8], mentre il byte NCLK[8] viene codificato in **modulo**.

Architettura generale

Il sistema implementa il modello **FSMD**, cioè collega una *macchina a stati finiti* (detta **FSM**) con un'*unità di elaborazione* (chiamata **Data path**).

Il compito della macchina a stati è quello di contestualizzare i calcoli eseguiti dall'unità di elaborazione, viceversa quest'ultima ha il ruolo di aiutare la macchina a determinare in che stato transitare.

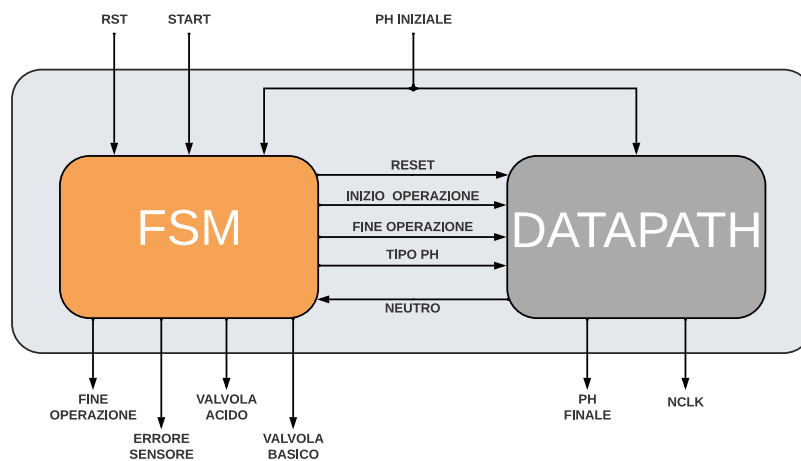


Figura 2: Diagramma del circuito

Segnali interni

Il collegamento tra i due sottosistemi avviene grazie allo scambio di segnali di controllo e stato; i primi vengono emessi dalla macchina a stati verso l'elaboratore, i secondi seguono il percorso inverso.

I segnali di controllo utilizzati sono i seguenti:

| Nome | Descrizione |
|--------------|---|
| RESET | Ordina all'elaboratore di inizializzare i valori. |
| INIZIO_OPER. | Comunica all'elaboratore che è iniziata un'operazione. |
| FINE_OPER. | Comunica all'elaboratore che è finita l'operazione. |
| TIPO_PH | Permette all'elaboratore di modificare il pH correttamente. |

I segnali di stato utilizzati sono i seguenti:

| Nome | Descrizione |
|--------|--|
| NEUTRO | Comunica alla macchina che il pH ha raggiunto la neutralità. |

Macchina a stati finiti (FSM)

Abbiamo progettato una macchina a stati di tipo *Mealy* e ne abbiamo individuato cinque stati, cioè:

1. **Reset**: stato iniziale nel quale il circuito attende il pH in ingresso;
2. **Errore**: il valore del pH appena inserito non è valido;
3. **Acido**: il valore del pH attuale è inferiore a 7,00;
4. **Basico**: il valore del pH attuale è superiore a 8,00;
5. **Neutro**: il valore del pH ha raggiunto un valore incluso in $[7,00, 8,00]$.

Transizioni

Lo stato iniziale della macchina è quello di *Reset*, da questo può spostarsi solamente quando riceve il segnale $START = 1$, in quel caso:

- quando il pH è superiore a 14,0 transita nello stato di *Errore*;
- quando il pH è minore stretto di 7,00 transita nello stato di *Acido*;
- quando il pH è maggiore stretto di 8,00 transita nello stato di *Basico*;
- quando il pH è già compreso nell'intervallo $[7,00, 8,00]$ transita nello stato di *Neutro*.

Da ognuno degli stati può tornare a quello iniziale solo quando riceve il segnale $RST = 1$, altrimenti si sposta da *Acido* e *Basico* verso *Neutro* quando il segnale di controllo $NEUTRO = 1$.

Il segnale RST ha la precedenza su $START$, in altre parole: quando entrambi equivalgono ad 1, il secondo viene semplicemente ignorato.

Grafo delle transizioni (STG)

Implementando il comportamento sopra descritto, abbiamo costruito il grafo delle transizioni utilizzando i seguenti segnali:

| Segnali | D'ingresso | D'uscita |
|---------|----------------|----------------------------------|
| Esterni | RST | FINE_OPER. |
| | START | ERRORE_SENSORE |
| | PH_INIZIALE[8] | VALVOLA_ACIDO VALVOLA_BASICCO |
| Interni | NEUTRO | RESET |
| | | INIZIO_OPER. |
| | | TIPO_PH |

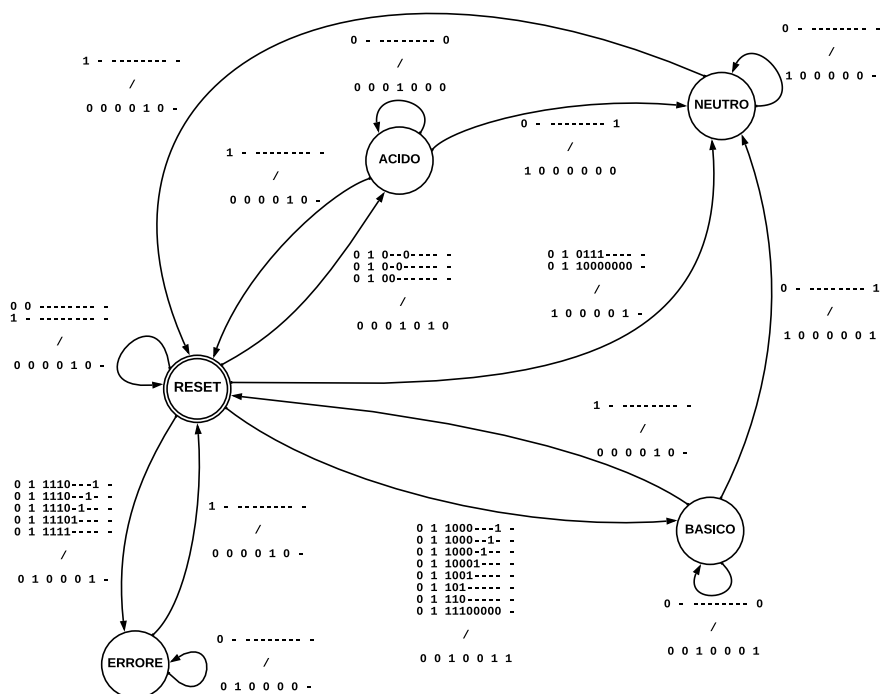


Figura 3: Macchina a stati

Transizione di esempio La transizione dallo stato *Reset* verso *Acido* avviene quando riceve:

- i segnali $RST = 0$ e $START = 1$;
- i segnale $PH_INIZIALE[8]$ interno a $[0, 7)$.

Il segnale *NEUTRO* viene ignorato perché l'unità di elaborazione non ha ancora memorizzato il pH: viene memorizzato solamente dopo la prima transizione verso uno stato diverso da *Reset*.

Nel codice sorgente tale transizione viene descritta come:

```
010--0----- Reset Acido 0001010
010-0----- Reset Acido 0001010
0100----- Reset Acido 0001010
```

Unità di elaborazione (Data path)

Abbiamo suddiviso l'unità di elaborazione in più sottoproblemi risolti da delle parti specifiche:

1. *Contatore dei cicli*: memorizza ed incrementa il numero di cicli impiegati;
2. *Corpo principale*: si occupa della modifica del pH.

Contatore dei cicli

Il contatore è composto da: una or, un registro, tre multiplexer da 2 ingressi ed un sommatore ad 8 bit.

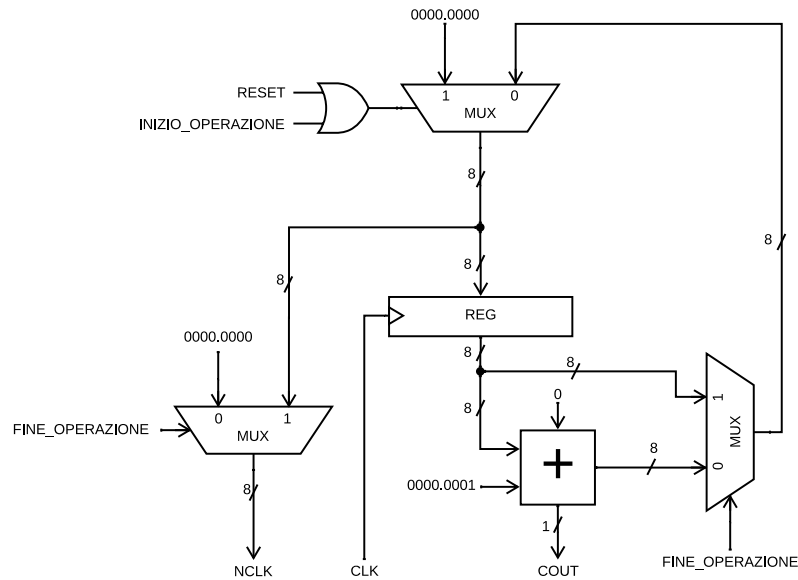


Figura 4: Contatore dei cicli

È il componente dedicato esclusivamente al calcolo dell'uscita `NCLK[8]`.

Ad ogni ciclo incrementa il valore memorizzato di un'unità. Quando riceve i segnali `RESET = 1` o `INIZIO_OPERAZIONE = 1` azzerà il conteggio, mentre quando il segnale `FINE_OPERAZIONE = 1` non incrementa il valore e lo mostra in uscita.

Corpo principale

Il corpo principale è composto da: cinque multiplexer da 2 ingressi, un sommatore, un sottrattore, una xor, un minore, un maggiore, un registro ad 8 bit e un registro a 1 bit.

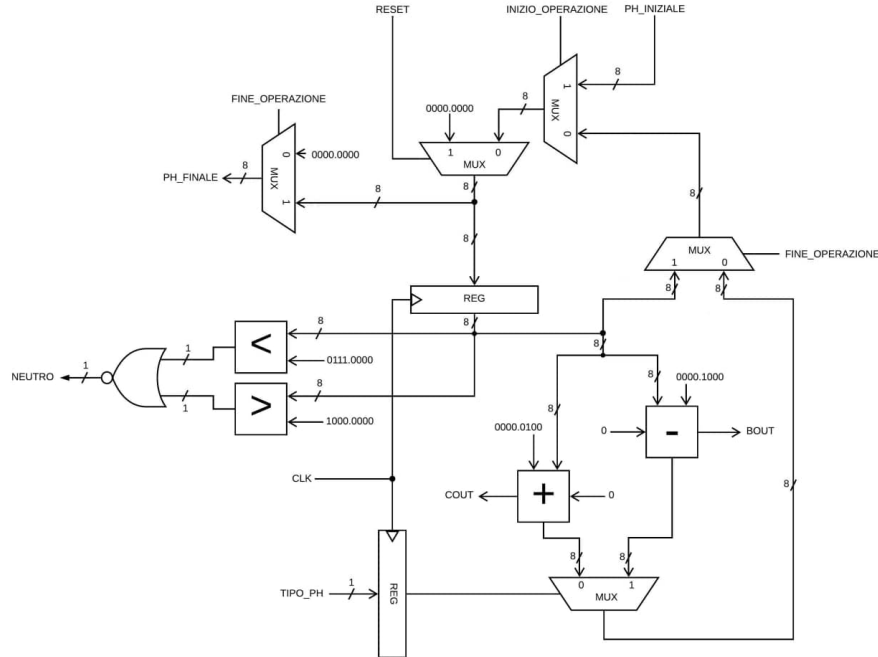


Figura 5: Unità principale

Quando il segnale **RESET** = 1 il circuito inizializza il registro, invece quando equivale a 0 e **INIZIO_OPERAZIONE** = 1 l'elaboratore legge **PH_INIZIALE**[8].

Il segnale **RESET** ha la precedenza su **INIZIO_OPERAZIONE**, in altre parole: quando entrambi equivalgono ad 1, il secondo viene semplicemente ignorato.

Il byte che giunge dai multiplexer viene memorizzato nel registro. Nel ciclo di clock successivo viene fornito il valore al *Verificatore di neutralità* ed al *Modificatore del pH*, infine:

- se il valore del segnale **FINE_OPERAZIONE** equivale a 0 memorizza il valore modificato;
- altrimenti lo lascia intatto e mostra l'uscita **PH_FINALE**[8].

Modifica del pH Il modificatore è composto da: un sommatore, un sottrattore ed un multiplexer da 2 ingressi ad 8 bit.

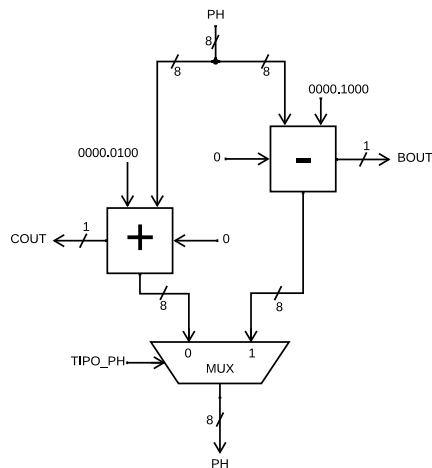


Figura 6: Modificatore del pH

Modifica il valore dell'ingresso PH[8] in funzione del segnale TIPO_PH, cioè:

- quando TIPO_PH equivale a 0 incrementa il pH di 0,25;
- quando TIPO_PH equivale ad 1 decrementa il pH di 0,50.

Verifica della neutralità Il componente è composto da: un maggiore ed un minore ad 8 bit e una porta NOR.

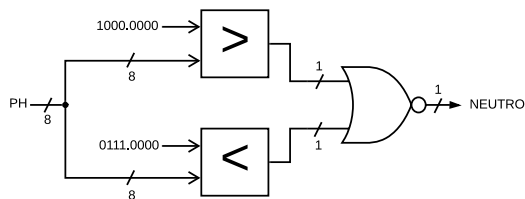


Figura 7: Verificatore di neutralità

Verifica il valore dell'ingresso PH_INIZIALE[8], cioè:

- se questo è incluso in [7,00, 8,00] allora restituisce 1, cioè *vero*;
- altrimenti restituisce 0 cioè *falso*.

Simulazioni di esempio

Ecco due esempi di esecuzione del circuito.

Esempio 1

Inserendo un pH pari a 9,25 e specificando il segnale `START = 1` otteniamo come risultato semplicemente `VALVOLA_ACIDO = 1`.

```
sis> simulate 0 1 1 0 0 1 0 1 0 0
```

Network simulation:

```
Outputs: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Non fornendo altri spunti al sistema per tre volte otteniamo sempre `VALVOLA_ACIDO = 1`, infatti:

$$9,25 - 0,50 = 8,75$$

$$8,75 - 0,50 = 8,25$$

$$8,25 - 0,50 = 7,75$$

```
sis> simulate 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Network simulation:

```
Outputs: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Infine dopo aver raggiunto un pH neutro, otteniamo `FINE_OPERAZIONE = 1`, un pH finale pari a 7,75 ed esattamente tre cicli impiegati per completare il calcolo.

```
sis> simulate 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Network simulation:

```
Outputs: 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1
```

Esempio 2

Inserendo un pH pari a 15,9375 e specificando il segnale `START = 1` otteniamo come risultato giustamente `ERRORE_SENSORE = 1`.

```
sis> simulate 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1
```

Network simulation:

```
Outputs: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Non fornendo altri spunti al sistema otteniamo sempre `ERRORE_SENSORE = 1`.

```
sis> simulate 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Network simulation:

```
Outputs: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Statistiche

Prima dell'ottimizzazione, la macchina a stati presenta: 10 nodi, 593 letterali e 5 stati come si può vedere dal comando sottostante.

```
sis> print_stats

FSM                pi=11   po= 7   nodes= 10       latches= 3
lits(sop)= 593    #states(STG)= 5
```

Al contrario l'unità di elaborazione presenta 163 nodi e 755 letterali.

```
sis> print_stats

DATAPATH           pi=12   po=17   nodes=163       latches=17
lits(sop)= 755
```

Infine unendo i due sottosistemi in un unico circuito otteniamo 173 nodi e 1348 letterali, ovvero la somma dei due.

```
sis> print_stats

FSMD               pi=10   po=20   nodes=173       latches=20
lits(sop)=1348
```

In risposta si ottiene anche il numero di input ed output: rispettivamente `pi` e `po` e anche il numero di registri presenti, ovvero `latches`.

Ottimizzazione

Per convertire la macchina a stati in un circuito abbiamo utilizzato i seguenti comandi:

```
sis> state_minimize stamina
sis> state_assign   jedi
```

Il numero degli stati è rimasto identico anche dopo il comando `state_minimize stamina`.

Abbiamo quindi ottimizzato la macchina a stati tramite i comandi:

```
sis> full_simplify
sis> source script.rugged
sis> fx
```

Al contrario, per l'unità di elaborazione:

```
sis> eliminate -1
sis> full_simplify
sis> source script.rugged
sis> source script.rugged
sis> fx
```

Infine, per il circuito completo:

```
sis> source script.rugged
sis> fx
```

Risultati Dopo l'ottimizzazione, la macchina a stati presenta: 13 nodi, 54 letterali e 5 stati.

```
sis> print_stats

FSM                pi=11  po= 7  nodes= 13      latches= 3
lits(sop)= 54  #states(STG)= 5
```

Al contrario l'unità di elaborazione presenta 48 nodi e 220 letterali.

```
sis> print_stats

DATAPATH           pi=12  po=17  nodes= 48      latches=17
lits(sop)= 220
```

Infine unendo i due sottosistemi già ottimizzati in un unico circuito e lo ottimizziamo nuovamente otteniamo 62 nodi e 272 letterali.

```
sis> print_stats

FSMD               pi=10  po=20  nodes= 62      latches=20
lits(sop)= 272
```

Mappatura tecnologica

Dopo l'ottimizzazione abbiamo eseguito la mappatura tecnologica che consiste nell'associare ad ogni componente la sua rappresentazione reale.

Abbiamo mappato il circuito utilizzando la libreria `synch.genlib` ed il comando `map -m 0` che cerca di ridurre al minimo l'area occupata a discapito del ritardo.

Eseguendo il comando `print_map_stats`, possiamo notare che l'area totale occupata dal circuito è pari a 6024,00 celle standard della libreria ed il cammino critico, cioè il numero massimo di nodi che deve percorrere per raggiungere l'uscita, è pari a 40, infatti:

```
sis> print_map_stats

Total Area          = 6024.00
Gate Count          = 169
Buffer Count        = 20
Inverter Count      = 39
Most Negative Slack = -35.60
Sum of Negative Slacks = -1005.60
Number of Critical PO = 40
```

Il comando `map -s` mostra le seguenti statistiche:

```
sis> map -s

>>> before removing serial inverters <<<
# of outputs:      40
total gate area:    6360.00
maximum arrival time: (38.60,38.60)
maximum po slack:   (-10.00,-10.00)
minimum po slack:   (-38.60,-38.60)
total neg slack:    (-1053.40,-1053.40)
# of failing outputs: 40
>>> before removing parallel inverters <<<
# of outputs:      40
total gate area:    6216.00
maximum arrival time: (36.20,36.20)
maximum po slack:   (-7.80,-7.80)
minimum po slack:   (-36.20,-36.20)
total neg slack:    (-1026.80,-1026.80)
# of failing outputs: 40
# of outputs:      40
total gate area:    6024.00
maximum arrival time: (35.60,35.60)
maximum po slack:   (-7.60,-7.60)
minimum po slack:   (-35.60,-35.60)
total neg slack:    (-1005.60,-1005.60)
# of failing outputs: 40
```

Abbiamo verificato il ritardo segnalato dalla libreria come `maximum arrival time` che è pari a 35,60.

Scelte progettuali

Durante la progettazione abbiamo preso le seguenti scelte progettuali:

1. Durante l'inserimento può essere presente un pH inaccettabile o già neutro e l'elaboratore lo memorizza solo il ciclo dopo. Perciò è la macchina a stati a decidere in totale autonomia in quale stato transitare in base al valore;
2. Dopo che la macchina ha raggiunto gli stati *Acido* e *Basico* utilizza un bit di controllo chiamato *NEUTRO* per decidere se raggiungere lo stato *Neutro*;
3. Abbiamo usufruito di un registro ad un bit in più nell'elaboratore per evitare di causare un ciclo all'interno del circuito;
4. Per semplificare l'implementazione dell'unità di elaborazione, abbiamo suddiviso il codice sorgente in più modelli distinti in base al problema che risolvono: ad esempio il file "*counter.blif*" si occupa esclusivamente dell'uscita *NCLK*[8] e viene poi utilizzato dentro il file "*DATA-PATH.blif*";

5. Il contatore viene inizializzato sia quando il circuito riceve $RST = 1$ sia quando riceve $START = 1$;
6. In qualsiasi stato diverso da *Reset* anche se giunge il segnale $START = 1$, il circuito continua l'elaborazione, l'unico modo per interromperla è inviare il segnale $RST = 1$;
7. Quando viene inserito un pH inaccettabile, il circuito risponde semplicemente con $ERRORE_SENSORE = 1$, invece quando viene inserito un valore già neutro dapprima solo con $FINE_OPERAZIONE = 1$ e dal ciclo successivo in poi anche con la codifica inserita e $NCLK[8] = 0$.