



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

**SISTEMA DI AUTOIRRIGAZIONE  
MECCANICA  
MECHANICAL SELF WATERING SYSTEM**

TIPO TESI: sperimentale

Studente:

MARCO APPICCIUTOLI

Relatore:

DR. ADRIAN MANESCU

ANNO ACCADEMICO 2018-2019

# INDICE

<b>CAPITOLO 1: INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO</b> .....	3
<b>CAPITOLO 2 QUADRO TEORICO:</b> .....	5
2.1 IL SUOLO E L'ACQUA:.....	5
2.2 LA FISICA DEL MACCHINARIO: .....	9
2.2.1 FISICA DELLA COMPONENTE MECCANICA:.....	10
2.2.1.1 LE FORZE: .....	10
2.2.1.2 TENSIONI: .....	12
2.2.1.3 LE LEVE:.....	13
2.2.1.4 LE BILANCE:.....	15
2.2.2 FISICA DELLA COMPONENTE IDRAULICA E FLUIDODINAMICA: .....	16
2.2.2.1 PRESSIONE IDROSTATICA:.....	16
2.2.2.2 SIFONI:.....	17
<b>CAPITOLO 3: MATERIALI E METODI:</b> .....	20
3.1 MATERIALI:.....	21
3.2 METODI: .....	26
3.2.1 SPIEGAZIONE CICLO D'IRRIGAZIONE: .....	26
3.2.2 SPIEGAZIONE CICLO D'AUTOREGOLAZIONE: .....	30
<b>CAPITOLO 4 RISULTATI E DISCUSSIONE:</b> .....	34
CONCLUSIONE.....	37
Bibliografia .....	38

## **CAPITOLO 1: INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO**

**Il contenuto idrico** di un substrato di crescita *influenza notevolmente lo sviluppo e la produzione di una coltura* ed è pertanto importante avere *un sistema in grado di saper irrigare il substrato di crescita in maniera semplice ma efficiente nel momento giusto*, in modo da evitare stress idrici negativi che possono compromettere il risultato della coltivazione riducendone la biomassa ottenuta (Ohashi Y. et al., 1994).

Per poter rilevare il quantitativo di acqua presente nel suolo sono stati ideati diversi sistemi che sfruttano **le proprietà fisiche** del substrato di crescita (peso, tensione capillare, resistenza al passaggio di corrente, costante dielettrica etc).

*Alcuni di questi sistemi risultano facili da inserire nel campo della sensoristica* permettendo la produzione di sensori piccoli, facili da utilizzare, in grado di leggere il contenuto di acqua nel suolo e, allo stesso tempo, di interfacciarsi direttamente con altri mezzi elettronici permettendone un'automatizzazione.

Uno studio condotto da Zaueta et al., (1994) analizza i diversi metodi per rivelare il contenuto idrico del terreno evidenziando gli aspetti positivi e negativi di ognuno di questi.

Alcuni di questi metodi si prestano bene per l'applicazione nel campo della **sensoristica**, tra questi, hanno maggiore rilevanza *i sensori di rilevazione del contenuto idrico mediante: resistenza elettrica, costante dielettrica del suolo (capacitori elettrici) e infine la rilevazione del tempo di percorrenza di un impulso elettromagnetico (sensori TDR).*

Esistono altre grandezze fisiche che vengono utilizzate per rilevare il contenuto di acqua dal substrato, sempre nel campo della sensoristica, ma vengono meno utilizzate per molteplici ragioni (es. praticità, affidabilità, durata, etc).

Sono stati sviluppati altri sistemi che permettono la **stima** del contenuto d'acqua invece del rilevamento. Questi sistemi sono stati ritenuti vantaggiosi poiché permettono una stima ottimale del quantitativo di acqua utilizzando relativamente poche informazioni (temperatura, velocità vento, stadio fenologico della pianta, albedo) (Zazueta S. F. e Xin J. 1994).

Sia i metodi di misura che di stima possono essere applicati per ottenere informazioni sul momento migliore per effettuare l'irrigazione e sull'intensità di quest'ultima. Per questo vengono

utilizzati in agricoltura, in associazione con altri macchinari in grado di correggere automaticamente lo stato idrico del terreno mediante irrigazione.

Questi sistemi presentano oltre gli aspetti positivi, che li rendono idonei per l'applicazione in campo agricolo, anche aspetti negativi, quali soprattutto: **costi d'impianto, di manutenzione e del personale tecnico** che avrà il compito di montare ed effettuare la manutenzione delle centraline elettroniche (Zazueta S. F. e Xin J. 1994).

È dunque necessario trovare un'alternativa semplice, affidabile ed economica da applicare in contesti in cui le spese d'impianto risultino proibitive, oppure in realtà in cui manca un'adeguata presenza di tecnologie e di personale tecnico preparato.

Questa tesi si inserisce in questo ambito con lo scopo di costruire e valutare l'efficacia di un macchinario in grado di eseguire rilevazioni automatiche sullo stato idrico del terreno e di effettuarne un'eventuale correzione. Il prototipo sarà in grado operare su qualsiasi tipologia di pianta (annuale, poliennale, arbustiva etc), unicamente ridimensionando alcune componenti senza la necessità di aggiungere nuove parti o sottrarne altre già esistenti.

Questo macchinario opererà unicamente tramite **componenti meccaniche** facili da reperire, montare e mantenere nel tempo. Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che, eseguendo una serie di ricerche sul web, è emerso che al giorno d'oggi sono pochi i sistemi in grado di irrigare, nel momento giusto e in maniera autonoma, utilizzando solo componenti meccaniche.

L'utilizzo di sole componenti meccaniche si ripercuote direttamente sul prezzo del macchinario, considerato che le macchine che utilizzano i sensori hanno un prezzo maggiore dovuta alla presenza di una centralina elettronica (o scheda programmabile) che dovrà essere necessariamente collegata al resto dell'impianto d'irrigazione.

Il costo dei sensori e della centralina incidono molto sulla scelta dell'utilizzo di un sistema d'irrigazione automatizzato; inoltre, questi suddetti elementi sono reperibili solo in paesi sviluppati e devono essere montati ed eventualmente riparati solo da personale specializzato. Pertanto, in ambienti rurali debolmente sviluppati risulta difficile l'utilizzo di sistemi d'irrigazione automatizzato, per questo che è necessario affidarsi a macchinari più economici e semplificati come quelli meccanici.

## CAPITOLO 2

### QUADRO TEORICO:

#### 2.1 IL SUOLO E L'ACQUA:

Il **suolo** è un mezzo costituito da una **matrice solida non compatta** e pertanto ricca di spazi vuoti con dimensioni differenti che andranno a costituire la **porosità** (USDA-NRCS 1999).

Quest'ultima è definita come il rapporto tra il volume dei vuoti ed il volume totale:

$$\text{porosità } (\eta) = \frac{V \text{ cavità}}{V \text{ totale}}$$

*Formula 1: Formula porosità del suolo. Fonte: Ns elaborazione*

dove  $\eta$  può assumere valori compresi tra  $0.25 \leq \eta \leq 0.75$  in campo.

Un'altra caratteristica fondamentale di un suolo è la sua **densità apparente**, direttamente correlata con la porosità poiché ne permette il calcolo utilizzando questa formula:

$$\text{porosità } (\eta) = 1 - \frac{\text{Densità apparente}}{\text{Densità media delle particelle}}$$

*Formula 2: Formula per ricavare la porosità del suolo partendo dalla densità apparente. Fonte: Ns elaborazione*

La densità apparente è ricavata dividendo la massa di un campione di suolo, opportunamente seccato in stufa, per il suo volume mentre la **densità media delle particelle** rappresenta la media delle densità dei principali elementi che compongono un suolo tenendo conto di quanto ognuno di quest'ultimi incide sulla densità totale, in genere si assume come valore di riferimento una densità media compresa tra  $2 \div 2,7 \text{ gr/cm}^3$ .

Densità medie maggiori si riscontrano in terreni con un alto tenore di silicati mentre densità medie minori si ritrovano in terreni con un alto tenore di sostanza organica come per esempio nei suoli torbosi (Donahue et al., 1977).

Tornando alle **cavità presenti nella matrice suolo**, quest'ultime possono essere **riempite sia di aria** oppure da **una certa quantità d'acqua ( $\theta$ )**, capace di occupare un

volume compreso tra  $0 \leq \vartheta < \eta$  .

L'acqua non è in grado di occupare totalmente la porosità ( $\eta$ ) del terreno poiché una minima parte d'aria resterà sempre intrappolata nella matrice suolo andando ad occupare un 10-30% della porosità totale.

L'acqua presente nel suolo ( $\vartheta$ ) non si troverà tutta allo stesso **livello di energia potenziale**, pertanto esisterà una certa percentuale di **acqua facilmente estraibile** dalla matrice-suolo e un'altra parte più difficile da estrarre.

L'energia necessaria per allontanare un'unità di volume di acqua dalla matrice-suolo è definita come **potenziale idrico** (espresso come  $\Psi$ ) (Formula 3) e viene espresso come un parametro differenziale composto da (Luigi Giardini,1986):

$$\text{potenziale idrico } (\Psi) = \psi_0 - \psi_m - \psi_\pi - \psi_g + \psi_s \pm \psi_x$$

*Formula 3: Potenziale idrico di un suolo. Fonte: Ns elaborazione*

In cui:

- $\Psi$  = potenziale idrico;
- $\psi_0$  = potenziale di riferimento, convenzionalmente uguale a 0;
- $\psi_m$  = potenziale matriciale o di matrice, dato dal trattenimento di acqua ad opera della capillarità e dall'adsorbimento sui colloidi, assume sempre valori negativi;
- $\psi_\pi$  = potenziale osmotico o di soluto, determinato dalla pressione osmotica generata dalla presenza di sostanze disciolte nell'acqua stessa (nell'acqua pura assume un valore pari a 0) che assume sempre valori negativi;
- $\psi_g$  = potenziale gravitazionale, dato dalla forza esercitata dalla gravità sull'acqua, assume sempre valori negativi;
- $\psi_s$  = potenziale idraulico o piezometrico o di sommersione, dato dalla pressione esercitata dall'acqua quando il suolo è saturo, assumerà sempre valori positivi;
- $\psi_x$  = altri componenti.

**Il potenziale idrico** assumerà **sempre valori negativi** nei suoli non saturi poiché tutte le forze qui presenti si addizioneranno per trattenere l'acqua nel terreno.

Il potenziale idrico può essere espresso in Bar oppure in **pF**, ovvero il cologaritmo del modulo del potenziale idrico espresso come l'altezza, in cm, di una colonna d'acqua (Formula 4):

$$pF = - \log | \Psi |$$

*Formula 4: Formula pF. Fonte: Ns elaborazione*

pF	0	1	2	3	4	5	6	7
$\Psi$ (bar)	-0,001	-0,010	-0,098	-0,981	-9,806	-98,06	-980,6	-9806

Tabella 1: Relazione tra potenziale idrico espresso in pF e in bar. Fonte: Wikipedia

Come precedentemente anticipato, non tutta l'acqua presente nel suolo si troverà allo stesso livello di energia potenziale ma, bensì, sarà presente acqua con un **potenziale idrico prossimo allo 0** (e pertanto facilmente estraibile) e acqua con un **potenziale idrico molto negativo** (estraibile soltanto mettendo in stufa il terreno a 105 °C per 48 ore).

Pertanto, il contenuto idrico di un suolo può essere differenziato come:

- “**Acqua gravitazionale**”, ovvero la frazione di umidità compresa fra la **capacità di campo (CC)** e la **capacità idrica massima (CIM)**, ovvero il punto in cui l'acqua occupa, momentaneamente, quasi tutti i macropori (cavità del suolo con diametro maggiore di 30  $\mu\text{m}$ , Rattan L., 2006) del terreno. Questa frazione dell'umidità del suolo ha un potenziale idrico compreso tra i 0 e i -0,1 ÷ -0,3 bar di pressione, rendendola **facile da assorbire** dalle radici delle piante ma allo stesso tempo **incapace di essere trattenuta dalla matrice-suolo** poiché verrà allontanata dalla forza di gravità.

Di notevole interesse è la “**CC**”, ovvero la **capacità di campo**; in questo punto tutti i micropori del terreno (cavità con diametro inferiore ai 30  $\mu\text{m}$ , Rattan L., 2006) sono saturi d'acqua mentre i macropori sono saturi d'aria

- “**Acqua capillare disponibile**”, frazione di acqua, trattenuta per capillarità, compresa tra il **coefficiente di avvizzimento (CA)**, punto in cui le piante coltivate subiscono danni irreparabili da stress idrico) e la capacità di campo (CC), il potenziale idrico dell'acqua capillare disponibile è compreso tra i -15 ÷ -25 bar e i -0,1 ÷ -0,3 bar. È la **frazione d'interesse agronomico maggiore** poiché quest'acqua è trattenuta per capillarità e **non può essere allontanata attraverso la forza di gravità**, pertanto questa frazione dell'acqua del terreno resta disponibile per le radici o l'evaporazione diretta.

- “**Acqua capillare non disponibile**”, è l'acqua trattenuta per capillarità con potenziali idrici molto inferiori ai precedenti, consiste nella frazione di umidità compresa tra il coefficiente igroscopico (CI) e il coefficiente di avvizzimento (CA). Quest'acqua è trattenuta con potenziali idrici che oscillano tra i -15 ÷ -25 bar ai -100 ÷ -1000 bar, rendendola effettivamente **utilizzata solo da alcune piante con un forte adattamento ad un'ambiente xerofitico** ed è pertanto non d'interesse agronomico.

- “Acqua igroscopica”, comprende tutta la frazione di acqua mantenuta dall’igroscopicità del terreno con potenziali idrici inferiori a quelli del coefficiente igroscopico (CI), quest’acqua può essere allontanata solo con evaporazione diretta e **non può essere estratta da piante con forte adattamento xerofitico**.

La relazione empirica che lega l’umidità del terreno, espressa in % di umidità sul peso secco, al rispettivo potenziale idrico è rappresentabile con un grafico in cui è tracciata **una curva di ritenzione idrica**.

**Ogni terreno ha una propria curva** che può essere fabbricata su scala logaritmica utilizzando il potenziale idrico (espresso in bar) oppure su scala lineare utilizzando il pF.

Queste curve sono molto utili per mettere in relazione le caratteristiche dei vari suoli in funzione della loro tessitura poiché sarà quest’ultima che determinerà il numero e rapporto di micro e macropori.

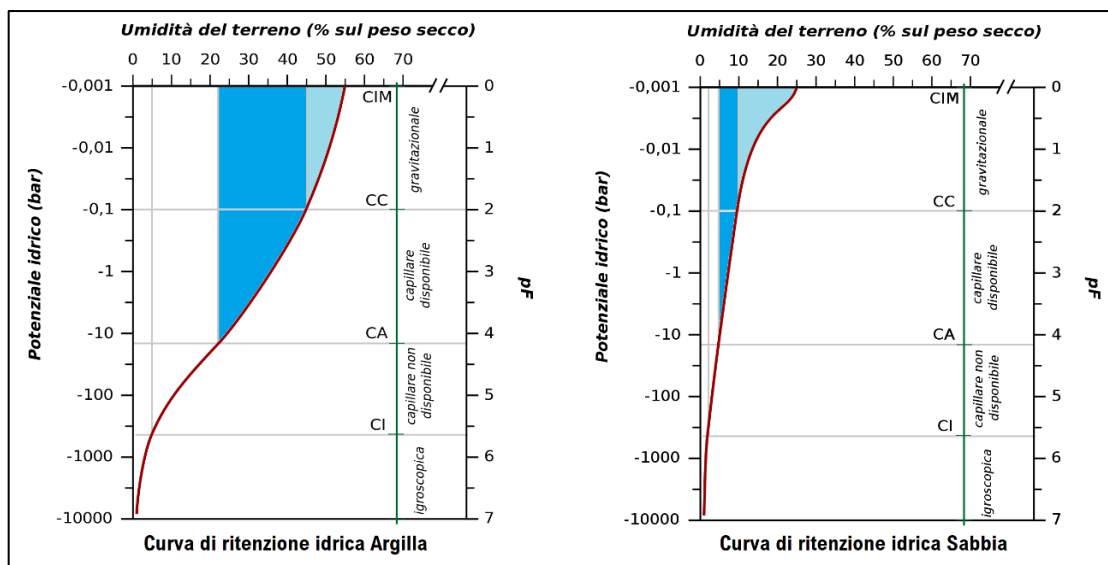


Figura 1: Curve di ritenzione idrica di suolo argilloso e sabbioso. Fonte: Wikipedia Ns rielaborazione

Ne consegue che un terreno con una porosità data principalmente da micropori (come un suolo argilloso) tratterrà molta acqua per capillarità rendendone una buona parte disponibile per le colture.

Viceversa, un suolo con una porosità data principalmente da macropori (come un suolo sabbioso) riterrà pochissima acqua per capillarità rendendo questo tipo di terreno incapace d’immagazzinare molta acqua per una coltura.

I due grafici sovrastanti (Figura 1) mostrano due curve di ritenzione idrica, la prima di un suolo argilloso mentre la seconda curva è quella di un suolo sabbioso.

Le frazioni di **acqua gravitazionale e capillare disponibile sono le più importanti** per la costruzione del macchinario poiché quest’ultimo ha il compito di irrigare il substrato solo quando



l'umidità del terreno si troverà con un potenziale idrico pari a  $-12 \div -15$  bar, quindi subito prima che l'acqua disponibile raggiunga un potenziale pari a quello del coefficiente d'avvizzimento.

## 2.2 LA FISICA DEL MACCHINARIO:

Il macchinario è composto da **diverse parti**, ognuna con una funzione specifica che consente il corretto funzionamento del sistema.

Nella figura sottostante (Figura 2) sono illustrate le varie componenti che costituiscono l'oggetto di studio di questa tesi

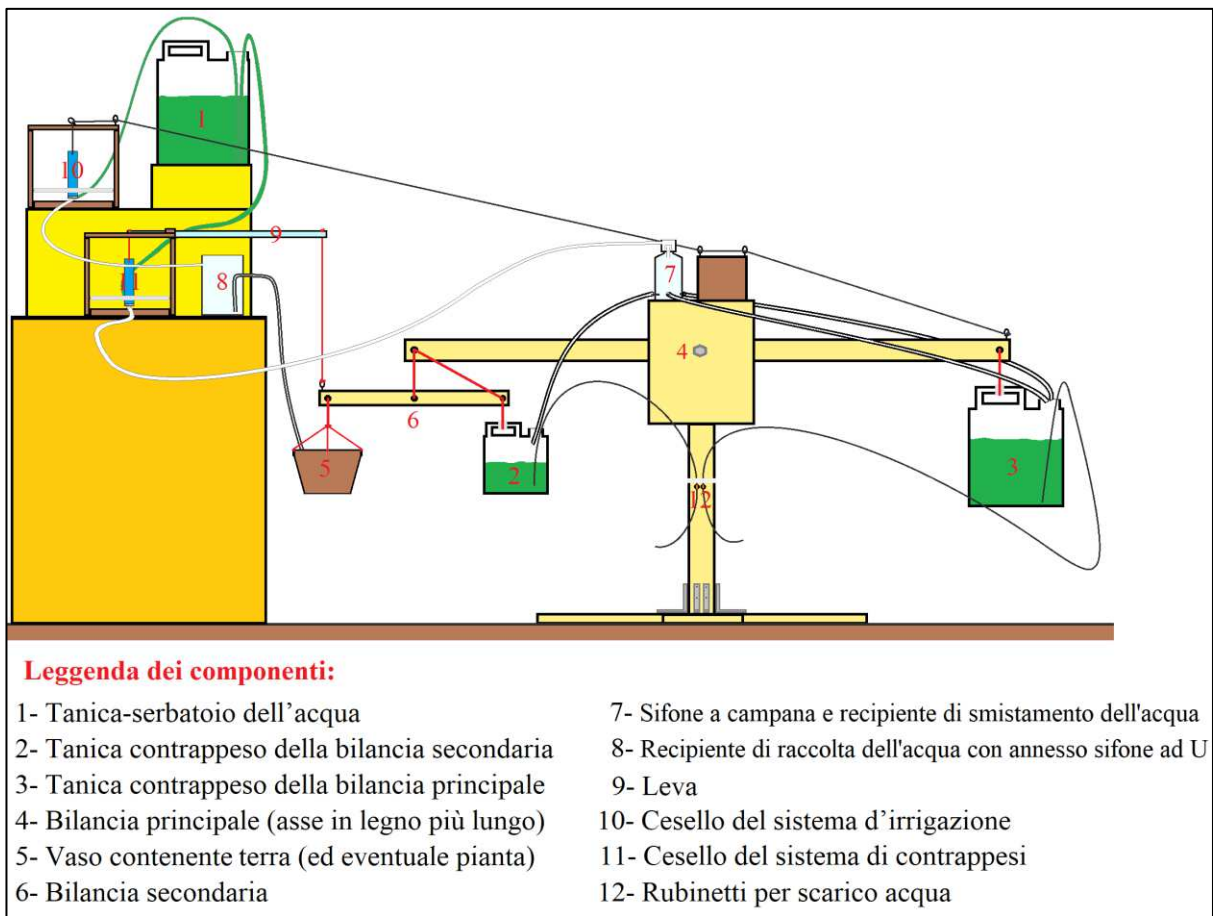


Figura 2: Schema illustrativo del macchinario. Fonte: Ns elaborazione

## 2.2.1 FISICA DELLA COMPONENTE MECCANICA:

### 2.2.1.1 LE FORZE:

Le forze (unità di misura Newton, N) sono **grandezze fisiche vettoriali** che si manifestano nell'interazione di due o più corpi (Giambattista A. Et all, 2012).

Le forze vengono definite matematicamente come se fossero **vettori**, pertanto avranno un **modulo** (rappresentante l'intensità di una forza), un **punto di applicazione**, una **direzione** (l'asse su cui la forza viene applicata) e un **verso** (l'orientamento della forza proprio il lungo asse).

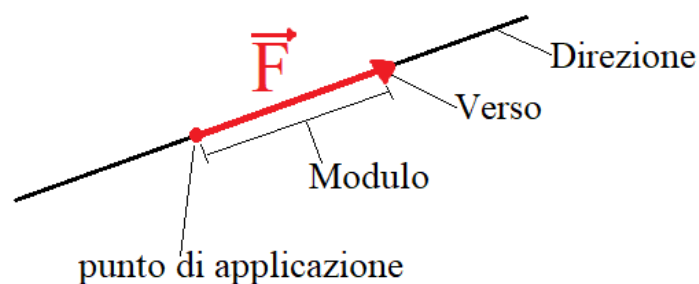


Figura 3: Illustrazione di una forza generica. Fonte: Ns elaborazione

La formula per calcolare una forza generica è  $\mathbf{F} = m_c * \mathbf{a}$  (enunciato del II principio della dinamica), dove  $\mathbf{F}$  rappresenta la forza risultante,  $m_c$  la massa del corpo dove viene applicata la forza mentre  $\mathbf{a}$  rappresenta l'accelerazione che il corpo  $m_c$  subisce.

Un tipo di forza importante per il funzionamento del macchinario è la **forza peso**, quest'ultima nascerà dall'**attrazione gravitazionale** tra un corpo e, nel caso studiato in questa tesi, il pianeta Terra e avrà come direzione e verso l'asse di collegamento tra il **baricentro** (centro di massa) del corpo e il centro della Terra.

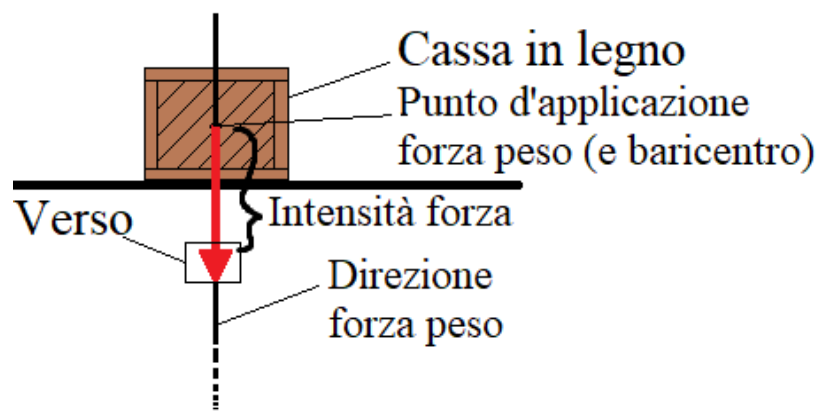


Figura 4: Rappresentazione di una generica forza peso. Fonte: Ns elaborazione

La forza peso viene calcolata come  $F_p = m_c * g$ , ovvero il prodotto della massa del corpo studiato ( $m_c$ ) e l'accelerazione di gravità ( $g$ ), una costante pari a  $9,81 \text{ m/s}^2$  sul pianeta Terra. Nella figura 5 è mostrata un'applicazione della forza peso nel macchinario studiato in questa tesi, in questo caso la forza peso è generata da un cesello che servirà a comprimere un tubo flessibile permettendo di bloccare il flusso d'acqua.

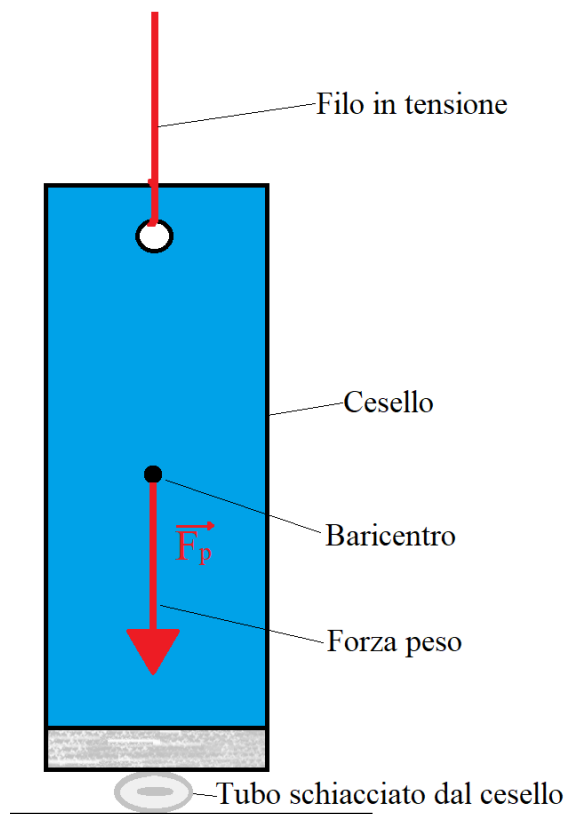


Figura 5. Cesello che schiaccia tramite forza peso un tubo impedendo il passaggio di acqua. Fonte: Ns elaborazione

Nella figura 6 è mostrato un altro esempio di forza peso presente nel progetto, ovvero quella generata dalla massa di un vaso; in questo caso la forza peso cambierà in funzione del contenuto idrico del terreno presente nel vaso e alla presenza o assenza di una pianta.

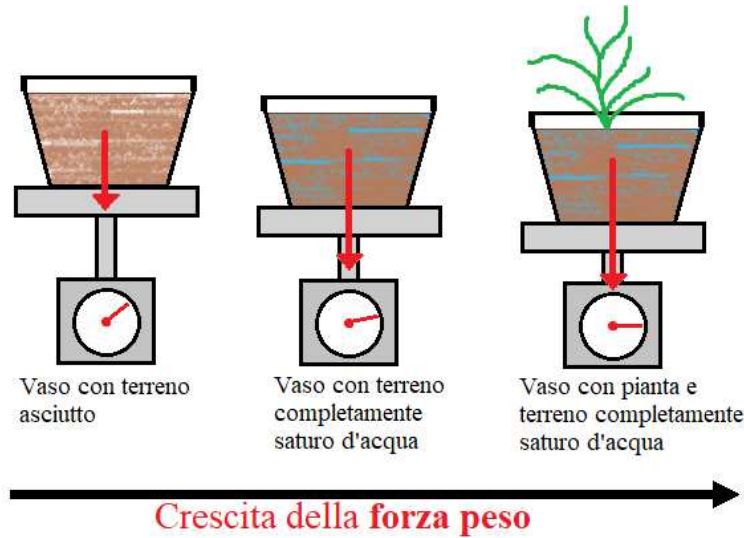


Figura 6: Forza peso esercitata da un vaso in relazione al suo contenuto idrico e alla possibile presenza di una pianta. Fonte: Ns elaborazione

### 2.2.1.2 TENSIONI:

La tensione è un tipo di **forza vincolare** presente nei fili posti sotto trazione; viene definita *vincolare* poiché presenterà un modulo identico alla forza che viene applicata sul filo per metterlo in tensione mentre il verso e la direzione della tensione saranno opposti alla forza di trazione applicata (Giambattista A. Et all, 2012).

Le tensioni possono essere utilizzate per **applicare forze in punti distanti** dal corpo che le generano, come mostrato in Figura 7.

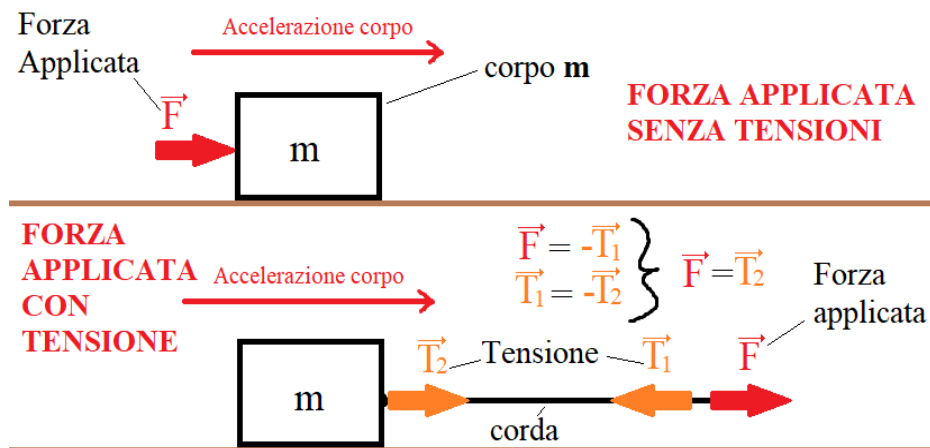


Figura 7: Differenza tra applicazione diretta di una forza su un corpo e di applicazione della stessa forza tramite una corda, il risultato è lo stesso. Fonte: Ns elaborazione

### 2.2.1.3 LE LEVE:

Le leve sono macchine semplici costituite da *un'asse rigido* capace di muoversi intorno ad un punto fisso chiamato *fulcro* e sono capaci di **reindirizzare le forze esercitate** su di esse trasformandole in **momenti (M)** (Giambattista A. Et all, 2012).

**Il momento di una forza (M)** rispetto ad un punto O (figura 8) rappresenta l'attitudine di una forza ad imprimere una rotazione ad un corpo rigido e viene definito come il prodotto vettoriale tra il vettore posizione che individua il punto di applicazione della forza ( $\vec{r}$ ) e la forza applicata ( $\vec{F}$ ), come mostrato in Figura 8.

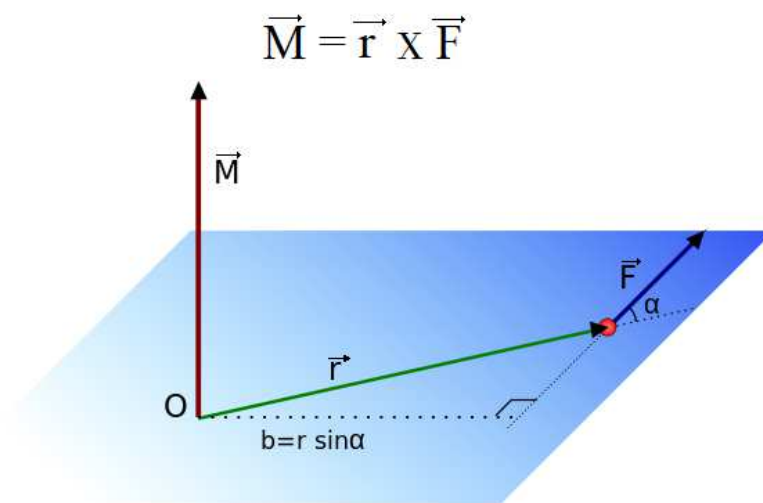


Figura 8: Formula e rappresentazione grafica del momento di una forza. Fonte: Wikipedia, Ns rielaborazione

Nella sua forma scalare, il **momento di una forza** è espresso come  $M = r * F \text{ sen}(\alpha)$  dove “ $\alpha$ ” rappresenta l'angolo tra il vettore  $r$  e il vettore  $F$  (figura 8).

Considerando che  $b = r \text{ sen}(\alpha)$ , il **momento della forza** si può scrivere anche

come  $M = F * b$

La legge che governa le leve è quella **dell'equilibrio meccanico**, rappresentante un sistema in cui *la risultante delle forze e dei momenti è nulla*, come mostrato nella Figura 9.

In questa immagine è anche rappresentata una leva *di primo genere* in cui il fulcro si trova tra le due forze peso  $F_1$  e  $F_2$ , in questo caso l'equilibrio (ovvero assenza di rotazioni) di questa leva si manifesterà quando  $F_1 * b_1 = F_2 * b_2$ .

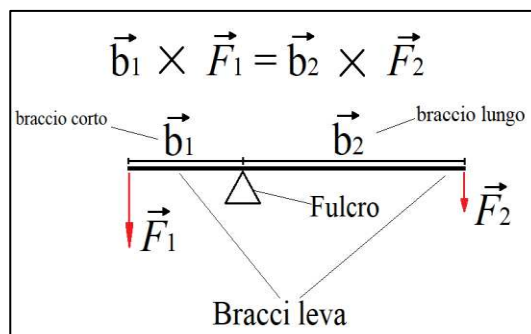


Figura 9: Rappresentazione di una leva e il suo rispettivo equilibrio meccanico. Fonte: Ns elaborazione

Una caratteristica interessante delle leve è quella di generare un **vantaggio meccanico** (o *guadagno meccanico*), definito come il rapporto fra la forza resistente e la forza motrice.

Nel caso della leva in figura 9, il vantaggio meccanico potrà essere espresso come il rapporto tra il braccio della leva dove viene applicata la forza interessata (in questo caso, il braccio **b2**) e l'altro braccio (**b1**). Se il rapporto tra il **braccio b2** e il **braccio b1** risultasse maggiore di "1", allora sarà presente un vantaggio meccanico poiché la forza **F2** (forza motrice) verrà moltiplicata per il rapporto **b2/b1** e, essendo questo maggiore di "1", risulterà in un'amplificazione della forza motrice; in questo modo, applicando una forza motrice **F2**, si ottiene una forza resistente (**utile**) **F1** che sarà maggiore della **F2**.

Se il rapporto tra **b2/b1** risultasse inferiore di "1", allora si potrà parlare di **svantaggio meccanico**: la forza applicata sul **braccio b2** sarà moltiplicata per un fattore minore di "1" e quindi diminuita. In base al rapporto tra forza resistente e forza applicata (forza motrice o potenza), si distingueranno tre diversi tipi di leve:

- **“Leve vantaggiose”**, quando il braccio della forza resistente è più corto dell'altro e, pertanto, la forza applicata sarà minore della forza resistente;
- **“Leve svantaggiose”**, dove il braccio della forza applicata è più corto di quella resistente, pertanto la forza applicata sarà maggiore della forza resistente;
- **“Leve indifferenti”**, se la forza applicata è uguale a quella resistente e dunque i bracci della leva saranno di uguale dimensione.

Un'altra distinzione delle varie tipologie di leva può essere effettuata in base al *posizionamento della forza resistente e forza applicata rispetto al fulcro*, si distingueranno pertanto altre tre tipologie di leve rappresentate nella figura sottostante (Figura 10).

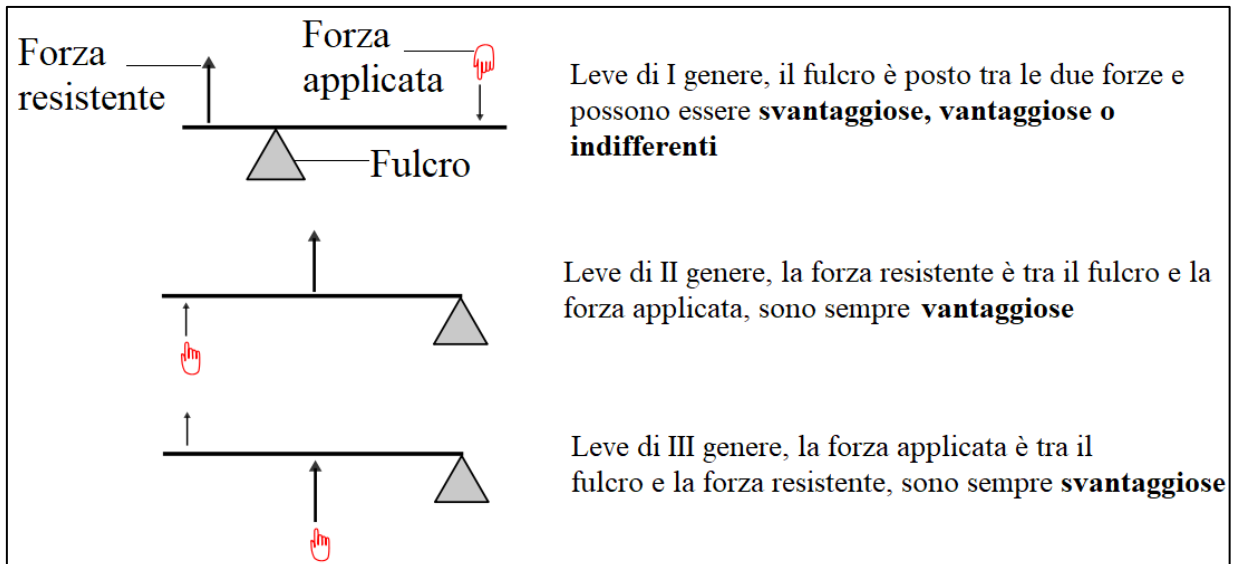


Figura 10: Rappresentazione grafica dei vari tipi di leva. Fonte: Wikipedia, Ns rielaborazione

#### 2.2.1.4 LE BILANCE:

**Le bilance** sono *strumenti di misura della massa di un oggetto* e possono essere di tipo analogico e digitale (Giambattista A. Et all, 2012).

Una bilancia *può essere considerata come una leva particolare che non ha il compito di effettuare un reindirizzamento di una forza* ma, piuttosto, di eseguire una misura mettendo in correlazione la forza peso applicata su un braccio con l'altra forza applicata su l'altro braccio. *Anche le bilance analogiche obbediscono alla legge dell'equilibrio meccanico*, pertanto una bilancia si troverà in equilibrio solo se la risultante dei momenti di quest'ultima risulti nulla. Le bilance descritte in questa tesi sono di tipo **analogico** e consistono in due bilance a braccia uguali con "*piatti sospesi*" che non hanno la finalità di effettuare misure in senso diretto ma, piuttosto, di comportarsi da "**interruttori**" **meccanici** indiretti che permetteranno di "*aprire*" o "*chiudere*" l'erogazione di acqua tramite un filo collegato ai bracci delle bilance. In particolare, la bilancia principale (4) sarà quella che controllerà il flusso d'acqua per poter irrigare il vaso mentre la bilancia secondaria (6) servirà a controllare l'autoregolazione dei contrappesi della bilancia.

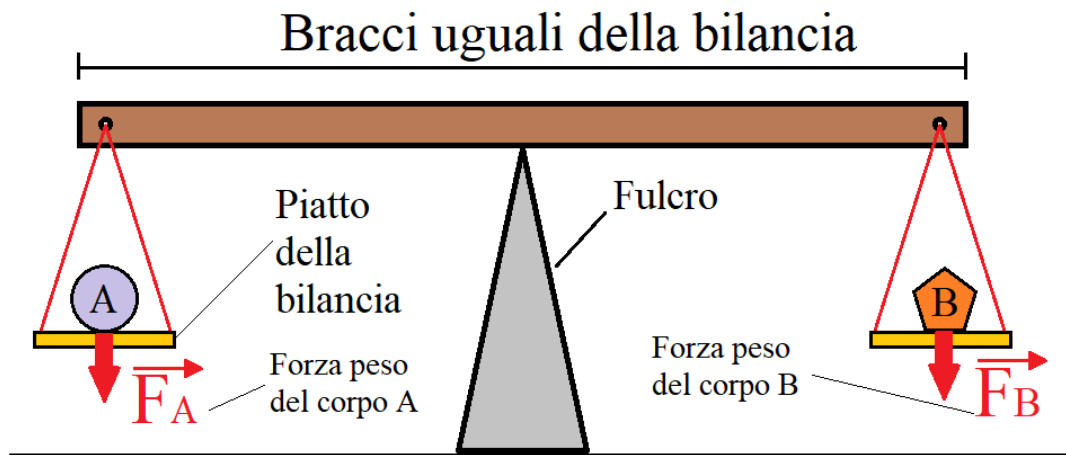


Figura 11: Rappresentazione di una bilancia in equilibrio poiché le forze peso  $F_A$  e  $F_B$  avranno il medesimo modulo. Fonte: Ns elaborazione

La tipologia di bilancia a *piatti sospesi*, illustrata in figura 11, ha il pregio di essere di **facile costruzione** e, allo stesso tempo, di *riuscire a mantenere i “piatti” della bilancia sempre paralleli al suolo* e con essi anche il loro contenuto, evitando possibili rovesciamenti dei piatti in seguito agli eventuali movimenti dei bracci della bilancia.

## 2.2.2 FISICA DELLA COMPONENTE IDRAULICA E FLUIDODINAMICA:

### 2.2.2.1 PRESSIONE IDROSTATICA:

*Il corretto funzionamento del macchinario necessita anche di applicazioni di concetti e formule d'idraulica, il primo di questi è la **pressione idrostatica**.*

Quest'ultima è definita come *la forza esercitata da un fluido in quiete sulle pareti del recipiente che lo contiene* e il suo valore dipende esclusivamente dalla densità del fluido e dall'affondamento del punto considerato dal pelo libero (Giambattista A. Et all, 2012).

La formula che descrive la pressione idrostatica è  $P = \rho gh$ , dove :

- **P** rappresenta la *pressione idrostatica*, espressa in Pascal (pa)
- **$\rho$**  rappresenta la **densità del fluido** ed espressa come kg su metro cubo ( $\text{kg/m}^3$ )
- **g** rappresenta l'**accelerazione di gravità**, nel caso della terra sarà uguale a  $9,81 \text{ m/s}^2$
- **h** rappresenta la **profondità del punto considerato**, espresso in metri (m)



E' **la pressione idrostatica** che permette all'acqua di muoversi da un punto più alto (e quindi con energia potenziale maggiore) ad un punto più in basso, come in figura 12.

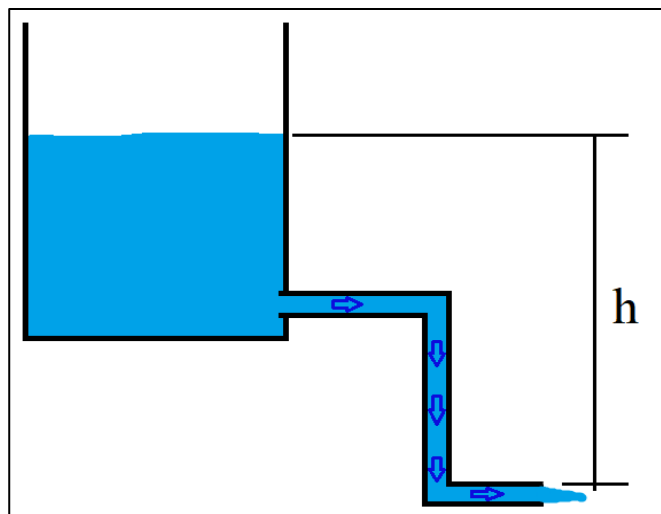


Figura 12: Illustrazione di un recipiente pieno di acqua collegato ad un tubo con sbocco più in basso, da notare il flusso d'acqua reso possibile dal dislivello ( $h$ ). Fonte: Ns elaborazione

#### 2.2.2.2 SIFONI:

**I sifoni**, in idraulica, sono dispositivi in grado di far fluire al suo interno del liquido, *anche verticalmente e senza l'ausilio di pompe*, sfruttando solamente **l'energia potenziale gravitazionale** e il principio dei vasi comunicanti (Giambattista A. Et all, 2012).

In questo progetto saranno presenti due tipologie di sifoni: **i sifoni ad U** e **i sifoni a campana**.

**I sifoni ad U** sono composti da *un tubo piegato ad U rovesciata* avente l'estremità del tubo più alta immersa nel liquido che si vuole "pescare" mentre l'altra estremità dovrà necessariamente essere posta più in basso (Figura 13).

Per il suo funzionamento, **un sifone ad U** *necessiterà di un'aspirazione iniziale da parte dell'estremità più bassa o un aumento iniziale di pressione nella parte più alta*; questa variazione di pressione aspirerà/spingerà il liquido all'interno del sifone andandolo poi a veicolare, grazie alla pressione atmosferica e alle forze di coesione delle molecole del liquido, verso l'estremità più bassa fino a quando non resterà più liquido da aspirare dall'estremità più alta.

Nel macchinario studiato in questo progetto, questa tipologia di sifoni servirà per permettere il passaggio di acqua tra **la tanica serbatoio** (numero 1 in figura 2) e le tubazioni che permettono d'irrigare il vaso e di regolare il quantitativo di acqua delle **taniche contrappeso** (numero 4 e 6).

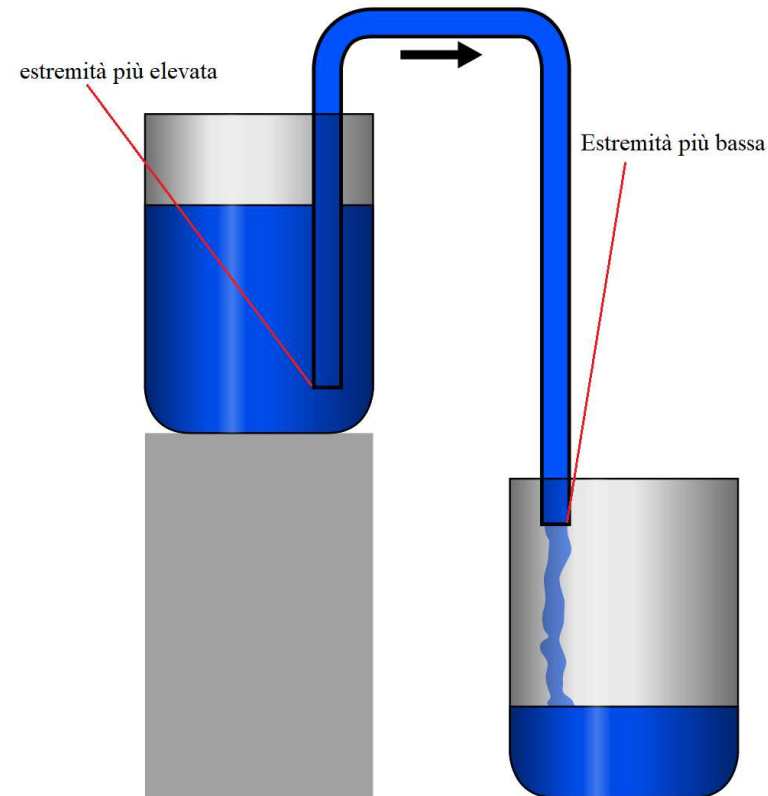


Figura 13: Illustrazione di un sifone ad U. Fonte: Wikipedia, Ns rielaborazione

I sifoni a campana sfruttano lo stesso principio di un sifone ad U ma differiscono da quest'ultima tipologia poiché saranno composti da un tubo e da una struttura a "campana", ovvero un tubo in grado di accogliere l'altro tubo e che sarà allo stesso tempo aperto nell'estremità più bassa e chiuso nell'estremità più alta.

Un esempio di un sifone a campana è rappresentato nella figura 14, in questa illustrazione viene rappresentato un sifone in due distinti momenti; nel primo momento (parte di sinistra) è presente un sifone che si sta "caricando" riempiendosi di acqua mentre nel secondo momento è rappresentato lo stesso sifone durante uno "scarico". Quest'ultimo inizierà automaticamente quando il livello dell'acqua supererà il livello del tubo posto dentro la campana del sifone.

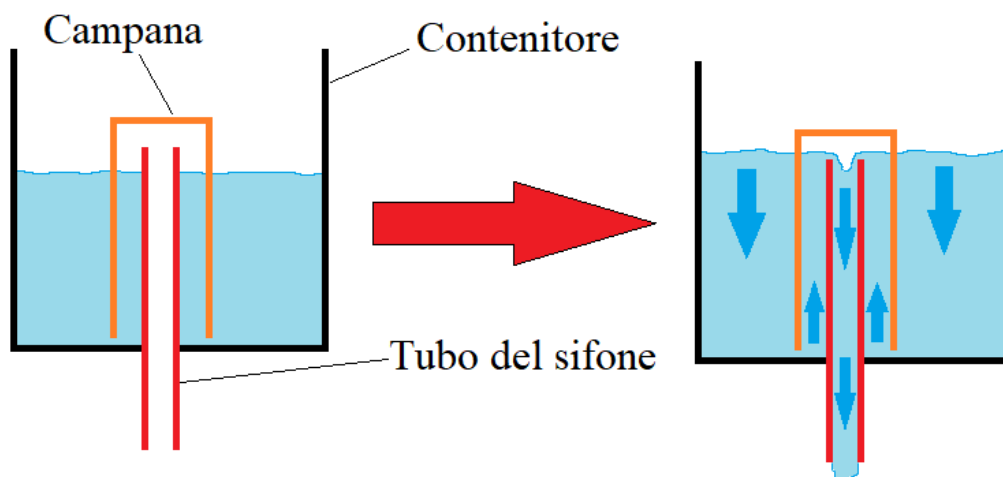


Figura 14: Illustrazione di un sifone a campana durante il suo caricamento e il suo scarico. Fonte: Ns elaborazione

Questa tipologia di sifone è presente nel macchinario e andrà a comporre **il recipiente di smistamento dell'acqua** (Figura 15), il suo ruolo è quello di “scaricare” in un'unica soluzione il quantitativo di acqua dentro il recipiente di smistamento, come mostrato nella figura 15.

Entrambe le tipologie di sifone (ad U e a campana) possono essere controllate tramite l'utilizzo di un rubinetto, questo permette di aprire e chiudere l'erogazione di acqua dal sifone anche mentre sta scaricando dando la possibilità di non interrompere il processo di scarico in corso.

Questo principio è applicato a livello dei rubinetti, rappresentati dal numero 12 nella figura sottostante (Figura 2), per permettere l'allontanamento d'acqua dalle taniche numero 2 e 3 (Figura 2) senza la necessità di applicare pressioni e/o aspirazioni ogni volta che il rubinetto viene aperto.

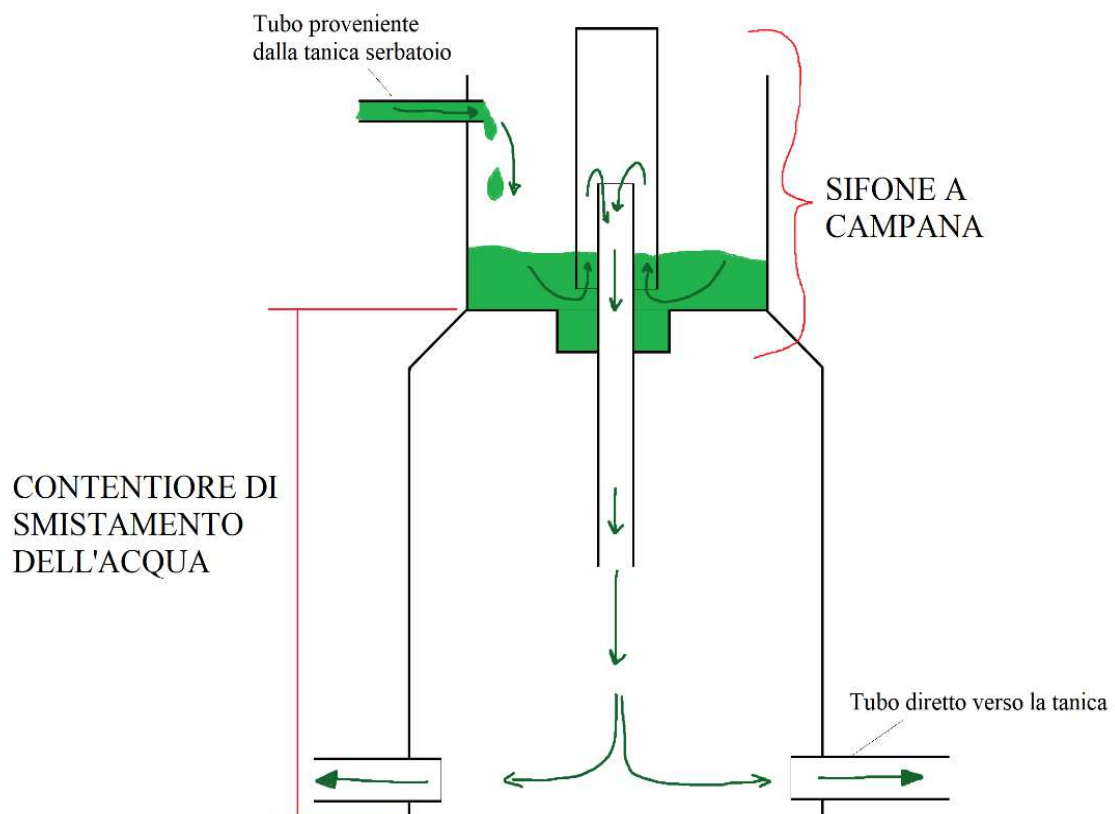
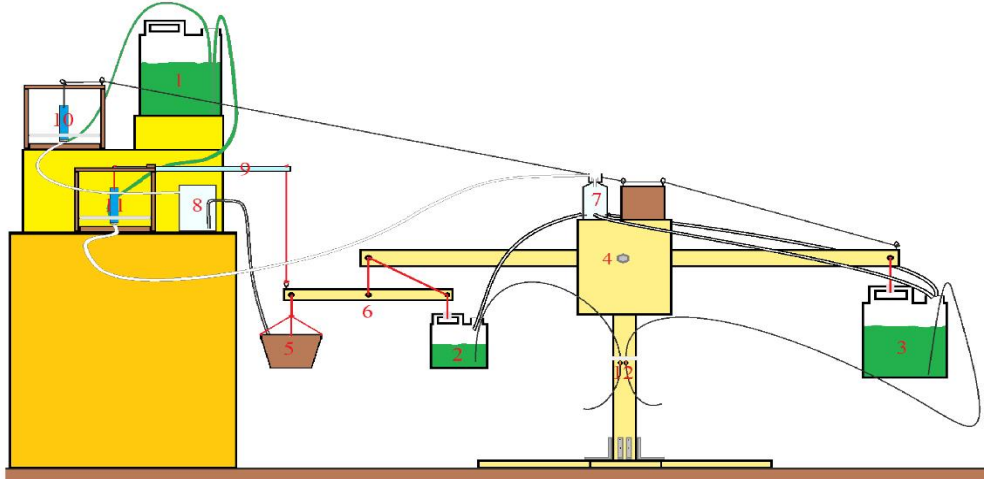


Figura 15: Illustrazione del sifone posto sopra il recipiente di smistamento dell'acqua. Fonte: Ns elaborazione

## CAPITOLO 3: MATERIALI E METODI:



**Leggenda dei componenti:**

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1- Tanica-serbatoio dell'acqua</li> <li>2- Tanica contrappeso della bilancia secondaria</li> <li>3- Tanica contrappeso della bilancia principale</li> <li>4- Bilancia principale (asse in legno più lungo)</li> <li>5- Vaso contenente terra (ed eventuale pianta)</li> <li>6- Bilancia secondaria</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>7- Sifone a campana e recipiente di smistamento dell'acqua</li> <li>8- Recipiente di raccolta dell'acqua con annesso sifone ad U</li> <li>9- Leva</li> <li>10- Cesello del sistema d'irrigazione</li> <li>11- Cesello del sistema di contrappesi</li> <li>12- Rubinetti per scarico acqua</li> </ul> |
|--|---|

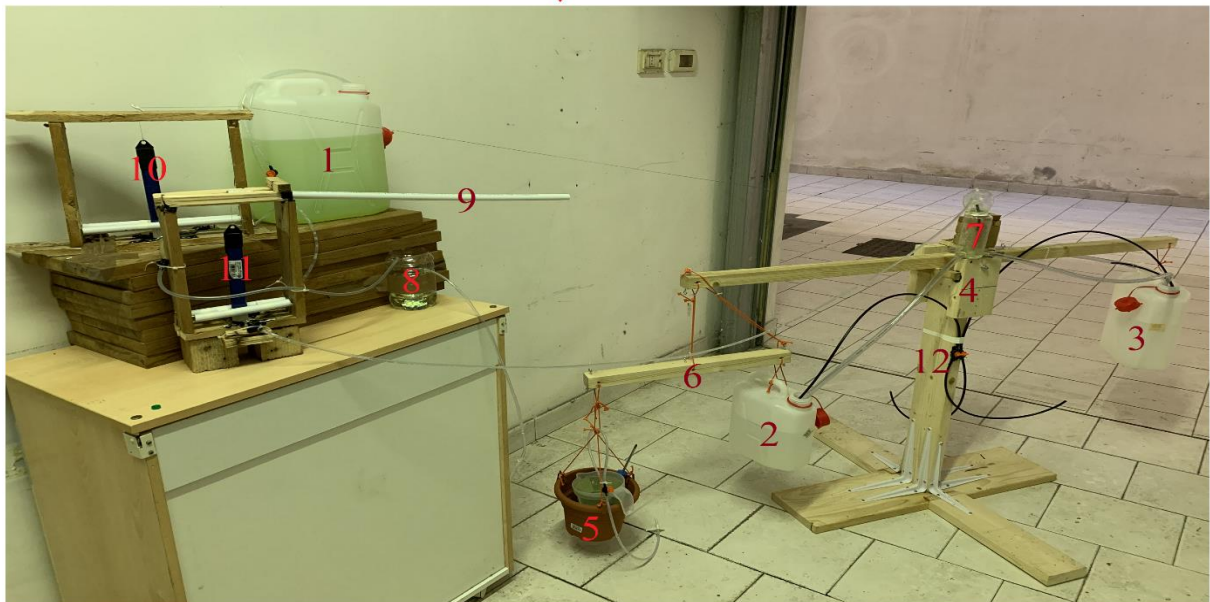


Figura 16: Illustrazione del macchinario ultimato e completo. Fonte: Ns elaborazione

Il **macchinario** rappresentato in Figura 16 rappresenta *un prototipo di un sistema in grado di irrigare un vaso* tenendo conto della **forza peso esercitata dall'acqua contenuta nel terreno** e tenendo anche conto **dell'eventuale peso della pianta** che crescerà qui sopra.

Una *forma definitiva del macchinario* studiato in questa tesi (Figura 16) potrà occupare **dimensioni molto più contenute** (andando a modificare le dimensioni e il rapporto tra i bracci della bilancia) ed utilizzare *un sistema di blocco del flusso idrico alternativo*; inoltre, *tutte le componenti che costituiranno il sistema potranno anche essere eventualmente prodotte da una stampante 3D* rendendole **economiche e facili da produrre**.

### 3.1 MATERIALI:

Il **macchinario** è costituito da diverse componenti *facili da reperire ed economiche*:

- **La bilancia principale (4)** è costituita da *un lungo asse in legno (2 m)* robusto e forato nelle sue estremità e al centro; nel foro centrale è presente un *perno in ferro che funge da fulcro* per la rotazione dell'asse in legno e qui vicino sarà presente *un pezzo in legno che impedirà alla bilancia di ruotare in senso antiorario* una volta raggiunto la posizione di equilibrio (Figura 17).

Il **“blocco antiorario”** (mostrato in Figura 17) ha un ruolo importante poiché *impedisce alla bilancia di sbilanciarsi troppo verso sinistra inseguito alla crescita della pianta nel vaso* (numero 5 in figura 16) permettendo al sistema di funzionare senza interferenze.

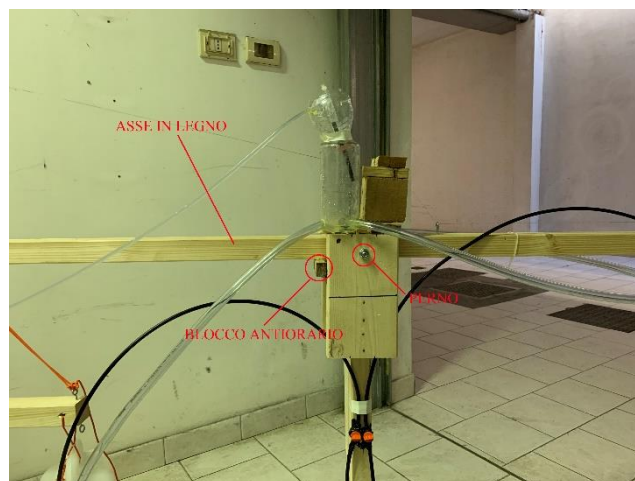


Figura 17: Foto illustrativa della bilancia principale. Fonte: Ns elaborazione

L'**estremità destra** dell'asse sostiene **una tanica** (una grande tanica da 10 litri) *tramite una corda* (numero 3 nella figura 16), e allo stesso tempo, ospita anche *l'attacco del filo che collega la bilancia principale ad un cesello* (numero 10 in figura 16).

L'estremità sinistra della bilancia principale sostiene la **bilancia secondaria (6)** tramite un filo che si comporterà da fulcro della bilancia secondaria.

Tutto l'asse principale poggia su una struttura in legno terminante con 4 piedi saldamente uniti all'asse centrale.

- La **bilancia secondaria (6)** è formata da un'asse in legno di uguale spessore a quello precedente ma di dimensioni ridotte (0,5 m), anche quest'asse presenta 3 fori: in quello centrale passa un filo che funge da **fulcro** della bilancia mentre nel foro situato sul braccio destro della bilancia è collegata una corda che sostiene una **piccola tanica** 5 litri (tanica 2 nella figura 16).

Sempre nel medesimo foro passa **un'altra corda** che va a collegarsi con il foro sinistro della bilancia principale; questa corda serve a **non far girare in senso orario la bilancia secondaria** quando quest'ultima si troverà in **posizione di equilibrio** (rappresentato in Figura 18).

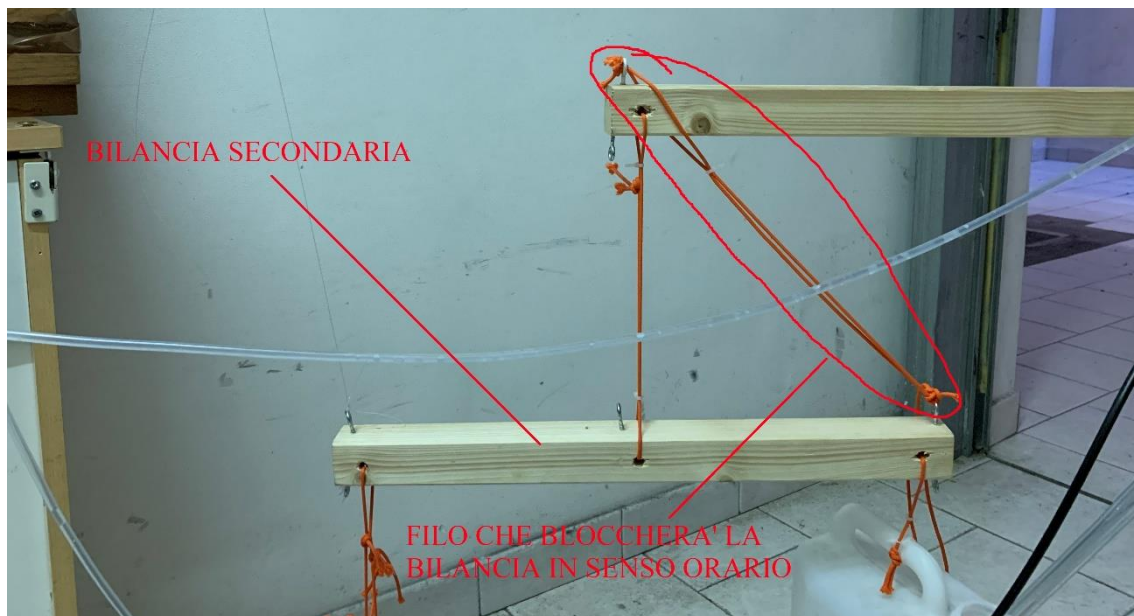


Figura 18: Foto rappresentante la bilancia secondaria. Fonte: Ns elaborazione

Il sistema di blocco in senso orario della bilancia secondaria impedirà a quest'ultima di ruotare in senso orario oltre la posizione di equilibrio quando il peso del vaso si ridurrà in seguito all'evaporazione di acqua.

Nel foro dell'altro braccio, invece, passa un **filo** che sostiene un **vaso** (numero 5 nella figura 16) mentre è anche presente su questo braccio un **perno** a cui è legato un **altro filo** che ha la funzione di **mettere in comunicazione la bilancia secondaria con una leva** (numero 9 nella figura 16).

- Una **leva** (numero 9 in figura 16) di **I genere con fulcro molto vicino alla forza resistente**, lo scopo di questa leva è quello di **amplificare la forza esercitata dalla bilancia secondaria (4)**.

- **Delle taniche**, la tanica posta più in alto (numero 1 nella figura 16) rappresenta il “**serbatoio**” del sistema e contiene **due tubi che sifonano costantemente l’acqua** sia per il **sistema d’irrigazione** e sia per il **sistema di auto regolazione**. Le altre taniche (numero 2 e 3 in figura 16) fungono da **contrappesi** e sono poste nelle estremità della bilancia; *queste taniche possono ricevere acqua in maniera autonoma* permettendo al macchinario di *compensare l’influenza esercitata dalla crescita della pianta* nel vaso (numero 5 in Figura 16).

- **I ceselli** (numero 10 e 11 in Figura 16), ovvero **2 scalpelli identici** pesanti ognuno all’incirca **300 grammi**; *entrambi sono ospitati da una struttura simile a quella di una ghigliottina francese* e hanno la funzione di **comprimere i tubi che portano acqua dalla tanica serbatoio in modo da bloccare lo scorrimento dell’acqua**.

Questi *due ceselli* sono collegati alla bilancia principale (cesello 10) e alla leva (cesello 11) tramite un filo in nylon collegato nella loro estremità più alta.

- **Un contenitore di smistamento dell’acqua** (numero 7 in figura 16), quest’ultimo è costituito da un **sifone a campana** nella parte sovrastante che riceve acqua dalla tanica principale tramite un tubo e, nella parte sottostante, *una bottiglia contenente tre uscite poste alla stessa altezza e fatte da tubi dello stesso spessore*. La funzione di questo contenitore è quella di **dividere uniformemente l’acqua** che proviene, *inseguito al movimento della bilancia secondaria*, dalla **tanica serbatoio** per permettere al sistema di **calibrarsi in maniera autonoma** (Figura 19).

- **Un recipiente di raccolta dell’acqua** (numero 8 nella Figura 16) che contiene *un tubo in entrata* proveniente dalla tanica serbatoio sovrastante e *un altro tubo piegato ad U* che funge da **sifone** per irrigare il vaso sottostante (5)

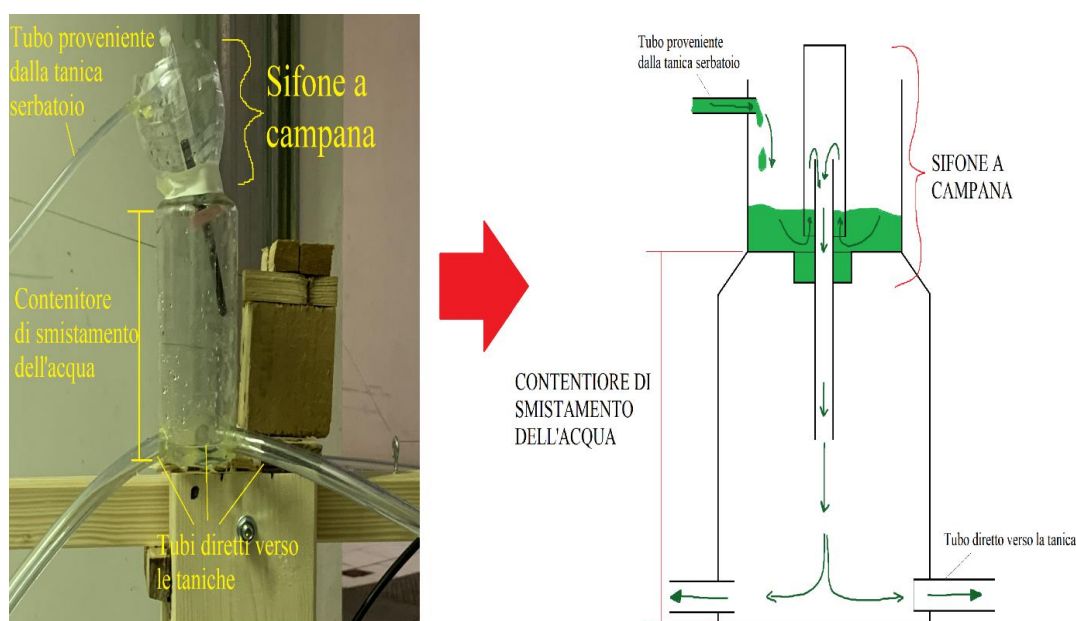


Figura 19: Foto rappresentante il contenitore di smistamento e la sua schematizzazione. Fonte: Ns elaborazione

- Dei tubi con annessi rubinetti (numero 12 in Figura 16) che permettono il drenaggio dell'acqua contenuta nelle taniche 2 e 3; i tubi qui presenti si comportano come dei sifoni ad U identici a quelli presenti nella tanica serbatoio.

- **Un vaso** da 3 litri (numero 5 in Figura 16) *riempito di elementi metallici che simula il peso di un analogo vaso riempito da 2 l di terriccio.*

Questo vaso contiene delle **zavorre metalliche** e anche **un recipiente capace di raccogliere acqua** in modo da rendere *il vaso* capace di simulare il peso di un altro riempito da terriccio con una **densità relativa di 1,2 gr/cm<sup>3</sup>** e una **porosità pari al 50%** (Figura 20).

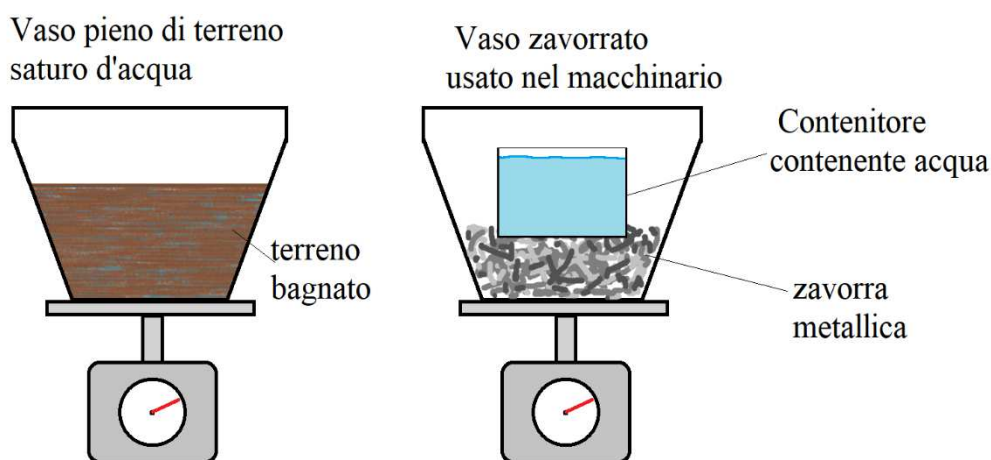


Figura 20: Immagine rappresentante un vaso riempito con 2 litri di terriccio bagnato (sinistra) e un vaso di peso analogo usato nel macchinario. Fonte: Ns elaborazione

*Inoltre, è stato ipotizzato che un 15% della totale porosità del terreno sarà sempre occupata da aria mentre un 10% della porosità conterrà acqua gravitazionale e, invece, un 30% conterrà acqua capillare disponibile; tutta la restante parte (45%) ospiterà acqua capillare non disponibile e acqua igroscopica.*

*Per zavorrare il peso del vaso usato nel macchinario sono stati aggiunti pesi metallici fino ad arrivare ad un totale di 3.25 kg in modo da simulare 2.4 kg di terra (massa ottenuta moltiplicando la densità relativa del terriccio per 2 litri), 0.45 kg di acqua non disponibile per le piante (volume di acqua pari al 45% della porosità totale, conterrà acqua capillare non disponibile e acqua igroscopica), 0.10 kg di acqua gravitazionale e 0.30 kg di acqua capillare disponibile per l'assorbimento delle piante (tutto rappresentato in Figura 21).*



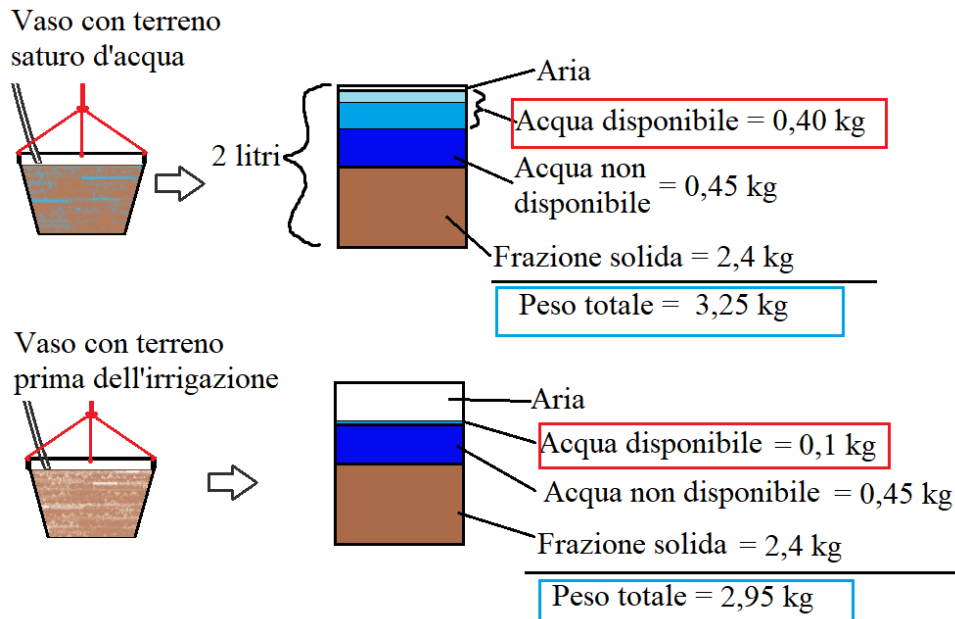


Figura 21: Schematizzazione delle componenti che compongono i 2 litri di terriccio e la loro incidenza in peso in un substrato saturo e nel medesimo ma asciutto. Fonte: Ns elaborazione

*Il contenitore che è posto dentro il vaso è capace di accogliere soltanto circa 300 grammi di acqua (Figura 21) che andranno a costituire sia l'acqua gravitazionale (rappresentante il 10% del volume della porosità totale, quindi 100 grammi) e sia una buona parte di acqua capillare disponibile (su 300 grammi di acqua disponibile, solo 200 grammi verranno contenuti nel contenitore).*

*La restante parte di acqua capillare disponibile (100 grammi) è aggiunta come zavorra metallica dentro il vaso (come mostrato in Figura 22), questo perché il terriccio dovrà sempre essere annaffiato prima che l'umidità raggiunga il punto di appassimento in modo da evitare sofferenze e stress alla pianta.*

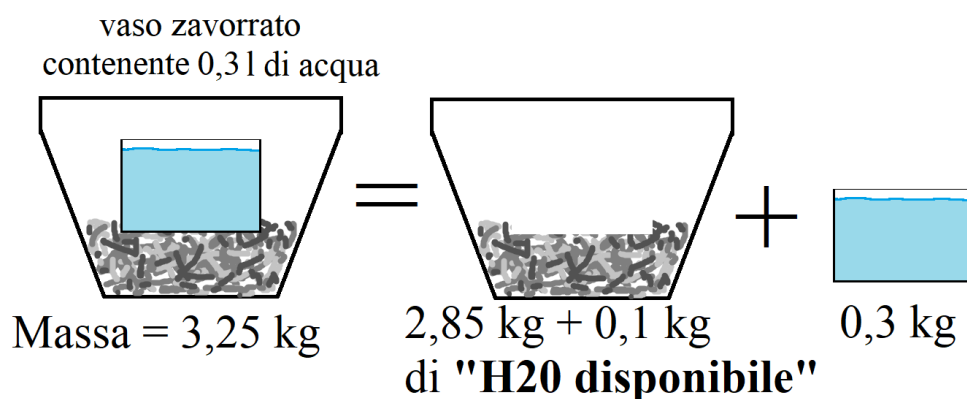


Figura 22: Illustrazione delle componenti di che costituiscono un vaso zavorrato. Fonte: Ns elaborazione

### 3.2 METODI:

Il **macchinario** riportato in questa tesi è capace di eseguire due tipologie di cicli indipendenti: il **ciclo d'irrigazione** e il **ciclo d'autoregolazione**.

#### 3.2.1 SPIEGAZIONE CICLO D'IRRIGAZIONE:

Il **ciclo d'irrigazione** ha lo scopo di rilevare **il peso del vaso** e, tramite quest'ultimo, di ricavare **il contenuto idrico del suolo** ed eventualmente **modificarlo** tramite irrigazione.

Le **componenti della macchina** coinvolte in questo ciclo sono **la bilancia principale, la grande tanica da 15 litri, il vaso** (collegato alla bilancia secondaria che è a sua volta collegata al braccio sinistro della bilancia principale), **il cesello numero 10** (Figura 17) e **il filo in nylon** che collega quest'ultimo con la stessa bilancia principale.

La figura 23 rappresenta la schematizzazione della bilancia principale e delle rispettive forze che entrano in gioco in quest'ultima:

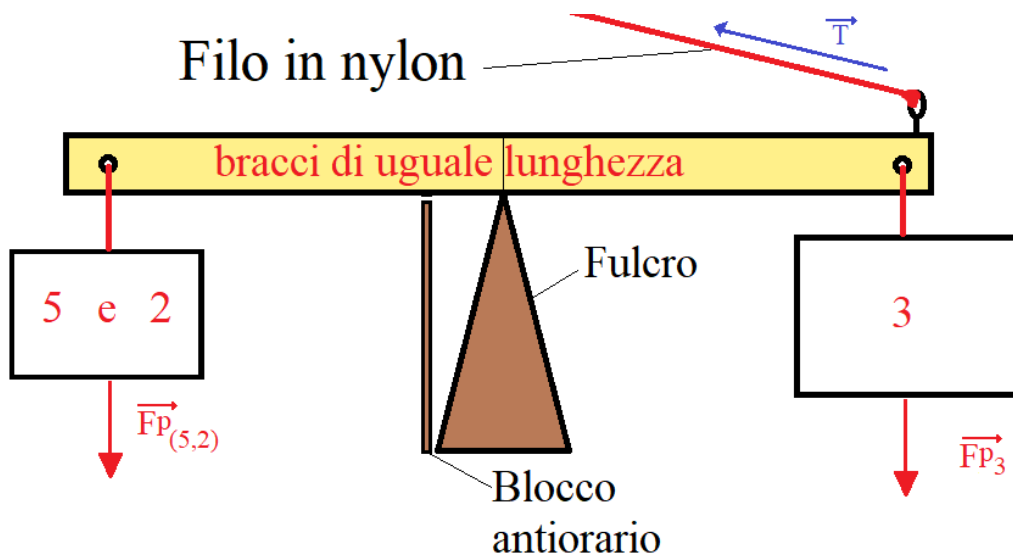


Figura 23: Illustrazione semplificata delle componenti e delle forze presenti nella bilancia principale. Fonte: Ns elaborazione

-Il corpo **“5 e 2”** rappresenta la **bilancia secondaria** che contiene i corpi 5 e 2, ovvero il **vaso 5** (saturo d'acqua in questa immagine) e la **piccola tanica 2** e la loro forza peso combinata  $F_{p(5,2)}$  che sarà applicata perpendicolarmente al braccio sinistro della bilancia.

-Il corpo **3** rappresenta la **grande tanica** che fa da **contrappeso** della bilancia principale e ha **massa pari a “5 e 2” con il vaso saturo di acqua**, pertanto la sua forza peso  $F_{p3}$  (perpendicolare

al braccio destro della bilancia) sarà uguale alla forza peso  $F_{p5,2}$  (con vaso 5 saturo d'acqua) solo quando la bilancia principale sarà “a riposo”, ovvero quando la tensione del filo  $T$  sarà nulla.

-Il filo in nylon che collega il braccio destro della bilancia principale con il cesello 10 (numero 10 in figura 16), la tensione qui presente è definita come  $T$  e ha modulo variabile in funzione della posizione della bilancia (Figura 24).

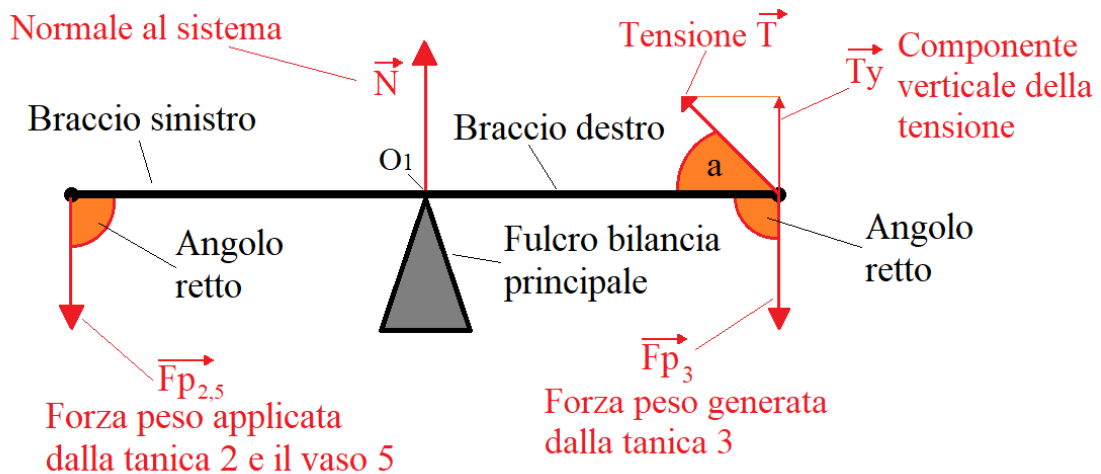


Figura 24 Illustrazione delle forze che entrano in gioco nella bilancia principale. Fonte: Ns elaborazione

L'equazione che governa l'equilibrio meccanico della bilancia principale nel suo fulcro è espressa come:

$$\sum \vec{M} = 0 \Rightarrow \vec{M}_{F_{p5,2}} + \vec{M}_{F_{p3}} + \vec{M}_T + \vec{M}_N = 0$$

Formula 5: Equazione dell'equilibrio meccanico della bilancia principale. Fonte: Ns elaborazione

Nella formula 5 è rappresentato l'equilibrio meccanico della bilancia principale rispetto al fulcro  $O_1$  (figura 24), i termini che compongono l'equazione sono:

- $M_{F_{p5,2}}$  ovvero il momento generato dalla forza  $F_{p5,2}$  nella figura 24
- $M_{F_{p3}}$  ovvero il momento generato dalla forza  $F_{p3}$  nella figura 24
- $M_T$  ovvero il momento generato dalla componente verticale della tensione  $T$  ( $T_y$  in figura 24)
- $M_N$  ovvero il momento generato dalla forza normale ( $N$  in figura 24)

E' possibile riscrivere ogni momento della formula 5 in chiave scalare sfruttando la relazione tra momento e forza ( $M = F \cdot r$ ):

- $M_{Fp_{5,2}}$  può essere scritto come il prodotto tra la forza peso  $Fp_{5,2}$  e il braccio della bilancia "r", pertanto risulterà  $M_{Fp_{5,2}} = Fp_{5,2} \cdot r$
- Essendo i bracci della bilancia uguali, potremmo scrivere  $M_{Fp_3}$  come  $M_{Fp_3} = Fp_3 \cdot r$
- Stesso discorso per  $M_T$ , solo in questo caso viene usata la componente verticale della tensione ( $T_y$ ), pertanto  $M_T = T_y \cdot r$
- $M_N$  rappresenta il momento generato dalla normale N, questo momento sarà nullo poiché il punto di applicazione della forza Normale (N in figura 24) coincide con lo stesso fulcro  $O_1$ , risultando in un raggio nullo e di conseguenza anche un momento  $M_N$  nullo

Ogni momento viene calcolato utilizzando la *componente verticale della forza rispetto al braccio* della bilancia; in quasi tutti i casi le forze applicate sono perpendicolari alle braccia della bilancia, l'unica eccezione è la tensione T in cui la componente verticale sarà la tensione  $T_y$  che viene calcolata come  $T_y = T \cdot \text{sen}(\alpha)$ , dove  $\text{sen}()$  rappresenta la funzione matematica seno e " $\alpha$ " rappresenta l'angolo mostrato nella figura 24.

La formula 5 potrà dunque essere riscritta in chiave scalare utilizzando le componenti che costituiscono i vari momenti, e pertanto otterremo  $Fp_{5,2} \cdot r + T_y \cdot r - Fp_3 \cdot r + F_N \cdot 0 = 0$ . Eliminando  $F_N \cdot 0$  poiché uguale a 0 (è una forza applicata su un punto e non un braccio) e dividendo tutto per il medesimo raggio "r", verrà fuori questa equazione:  $Fp_{5,2} + T_y - Fp_3 = 0$  che descriverà l'equilibrio della bilancia principale.

**Fino a quando questa equazione risulterà vera, la bilancia principale resterà in equilibrio e non avverrà nessuna irrigazione.**

**Questa equazione risulterà falsa nel momento** in cui verranno allontanati circa **300 grammi di acqua dal vaso**, ovvero il quantitativo necessario di acqua da allontanare dal terreno saturo

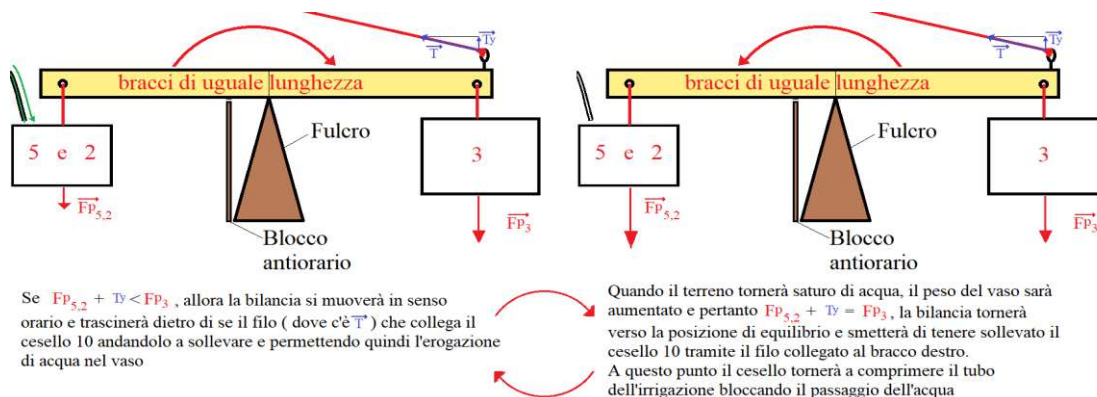


Figura 25: Illustrazione della dinamica della bilancia principale: Fonte: Ns elaborazione

(Figura 21) per portarlo ad un livello di umidità critica. Mentre si arriverà a questo livello, **la bilancia principale** altererà *il suo equilibrio* e inizierà a *rotare in senso orario* (Figura 25).

*Il risultato di questa rotazione è l'applicazione di una forza sul cesello 10* (attraverso la tensione del filo) che permetterà a quest'ultimo di *sollevarsi* e di far fluire l'acqua dalla tanica serbatoio fin verso il vaso da irrigare.

L'acqua diretta verso il vaso 5 verrà *prima accumulata nel recipiente di raccolta dell'acqua* (numero 8 in figura 16) e sarà poi quest'ultimo, tramite **un sifone ad U** e dopo aver accumulato circa **300 grammi di acqua** (quantitativo tarato appositamente), a veicolarla fin verso il vaso (figura 26) ripristinando **sia lo stato idrico del terreno** del vaso (*il terriccio tornerà saturo di acqua*) e **sia l'equilibrio della bilancia principale** (*l'equazione della formula 5 tornerà ad essere vera*).

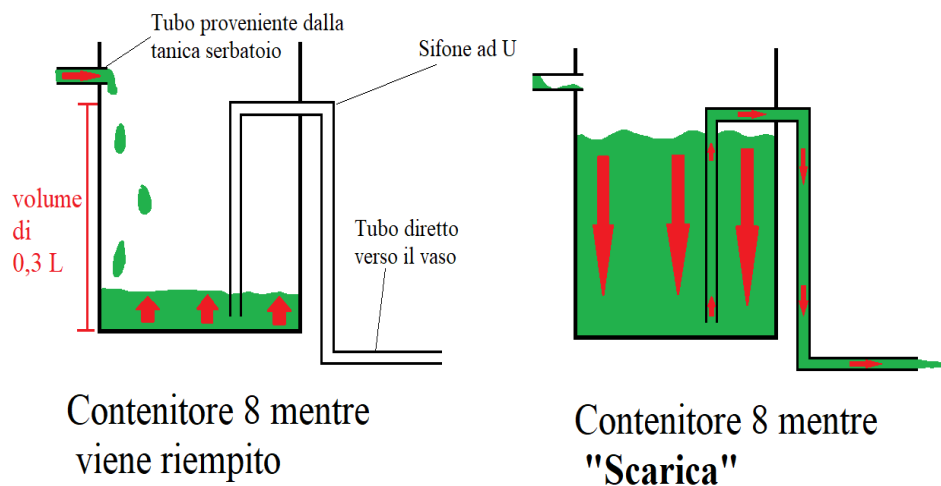


Figura 26: Illustrazione del caricamento e scaricamento del contenitore di raccolta 8. Fonte: Ns elaborazione

### 3.2.2 SPIEGAZIONE CICLO D'AUTOREGOLAZIONE:

**Il ciclo di autoregolazione** ha il compito di *compensare alla crescita di una pianta* evitando che **il peso** di quest'ultima possa *inficiare sulla performance del macchinario*.

Difatti, *la massa della pianta "ingannerà" il sistema* poiché quest'ultimo non riesce distinguere *la forza peso derivante dalla massa del terriccio con acqua e la forza peso proveniente dalla massa della pianta stessa* (Figura 27).

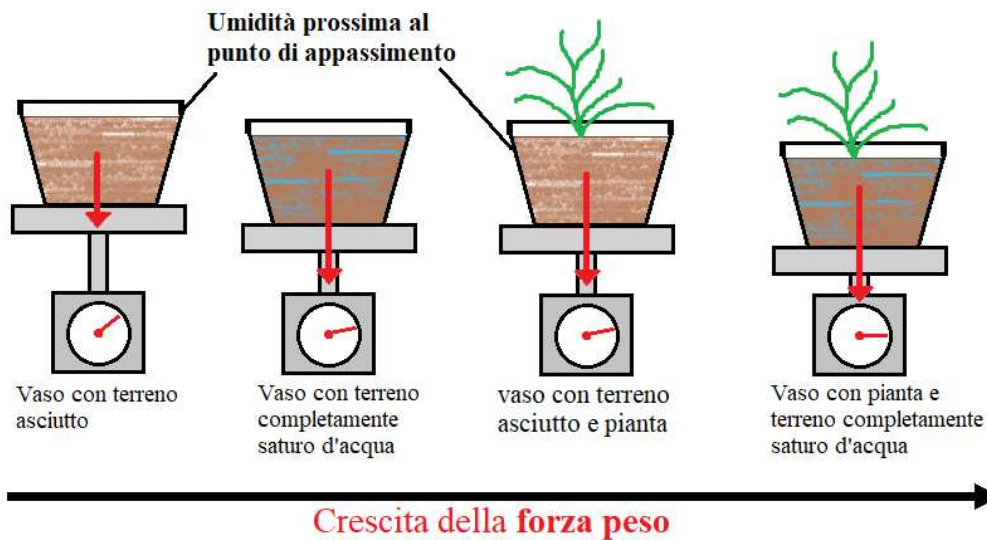


Figura 27: Relazione della forza peso generata da un vaso in funzione dell'umidità del terreno e della presenza/assenza di una pianta. Fonte: Ns elaborazione

Così facendo, **il sistema reagirà** come se nel vaso fosse presente più acqua del dovuto ottenendo come risultato quello *d'irrigare il vaso quando l'umidità presente risulta inferiore a quella del punto di appassimento*, provocando danni ed eventuale morte della pianta (Figura 27).

**Il sistema di autoregolazione** rimedia a questo problema attraverso **la bilancia secondaria**; quest'ultima reagisce *all'aumento di massa della pianta ruotando in senso antiorario* permettendo **di alzare il cesello 11** (numero 11 in figura 28) *consentendo l'erogazione di acqua sia alla tanica piccola e sia a quella grande*.

La figura 28 rappresenta **le componenti** che permettono il funzionamento del ciclo di autoregolazione; le più importanti sono **la bilancia secondaria** (numero 6 in figura 28), **il vaso** (numero 5 in figura), **la piccola tanica contrappeso** (numero 2 in figura 28), **una leva di II genere** (numero 9), **un cesello** (numero 11) e un particolare **contenitore capace di smistare l'acqua** che riceve (numero 7).

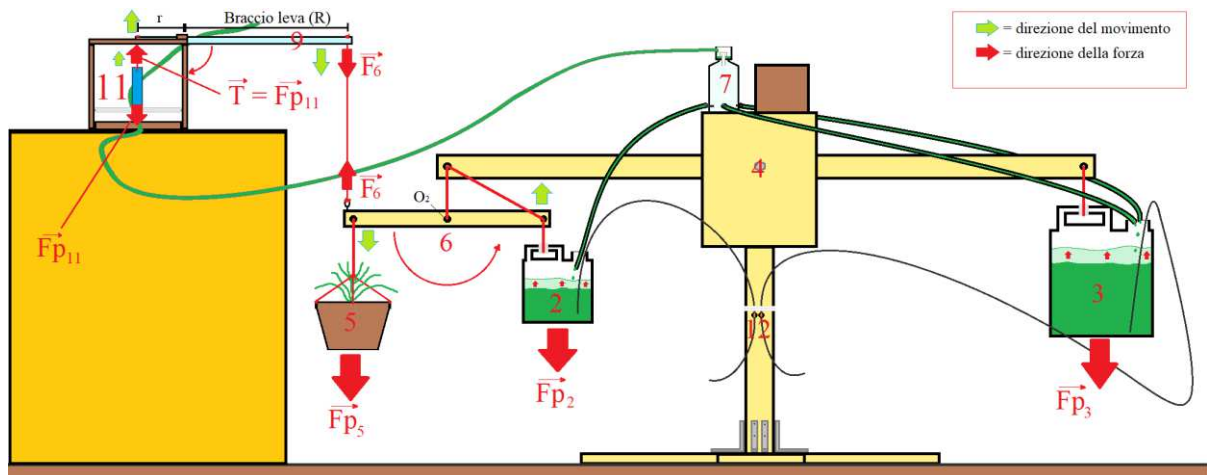


Figura 28: Illustrazione del sistema di autoregolazione della macchina durante un "ciclo". Fonte: Ns produzione.

La figura 29 posta qui sotto schematizza ulteriormente la figura 28 sotto il profilo delle forze della bilancia secondaria:

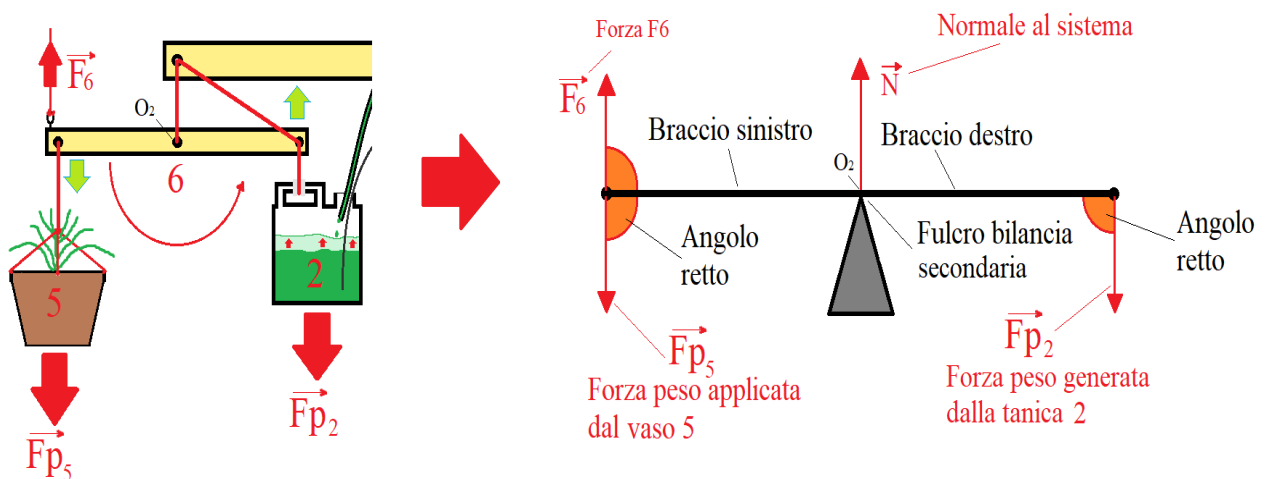


Figura 29: Illustrazione più approfondita della bilancia secondaria. Fonte: Ns elaborazione

La formula che governa l'**equilibrio meccanico della bilancia secondaria (6)** espressa in funzione del fulcro  $O_2$ , è questa:

$$\sum \vec{M} = 0 \Rightarrow \vec{M}_{Fp5} + \vec{M}_{Fp2} + \vec{M}_{F6} + \vec{M}_N = 0$$

*Formula 6: Equazione che descrive l'equilibrio meccanico della bilancia secondaria*

Quest'ultima (formula 6) è composta da:

- $M_{Fp5}$ , ovvero il *Momento generato dalla Forza peso del vaso ( $Fp_5$  nella figura 28)*.
- $M_{Fp2}$ , ovvero il *Momento generato dalla Forza peso della tanica 2 ( $Fp_2$  nella figura 28)*.
- $M_N$ , ovvero il *Momento generato dalla Forza Normale (N) alla bilancia nel fulcro  $O_2$* .
- $M_{F6}$ , ovvero il *Momento generato dalla componente verticale della Tensione del filo che collega la bilancia secondaria (numero 6 in figura 28) e la leva 9 (numero 9 in figura 28), coincide con la forza  $F_6$* .

Anche la formula 6 potrà essere riscritta con un procedimento analogo alla formula 5, ottenendo come risultato:

$$F_6 = Fp_5 - Fp_2$$

*Formula 7: semplificazione della formula 6. Fonte: Ns elaborazione*

La formula 7 è composta da diverse forze che sono:

- $Fp_5$ , ovvero la forza peso generata dalla massa del vaso con l'annessa pianta
- $Fp_2$ , ovvero la forza peso generata dalla massa della tanica 2
- $F_6$ , ovvero la tensione del filo che collega la bilancia secondaria con la leva soprastante (numero 9 in figura 28). Grazie all'azione di quest'ultima, la forza  $F_6$  riesce a vincere una forza più grande esercitata sulla medesima leva che corrisponde alla forza peso del cesello ( $Fp_{11}$  nella figura 28) permettendo il sollevamento del cesello e, di conseguenza, il passaggio di acqua dal tubo.

L'equazione mostrata nella formula 7 rappresenta una condizione per l'**equilibrio della bilancia secondaria**; quest'ultima resterà **in equilibrio fino a quando questa condizione risulta rispettata**.

In particolare, durante l'**equilibrio della bilancia secondaria** si ha che  $Fp_5 = Fp_2$  e pertanto  $F_6$  sarà uguale a  $0$ , ovvero non verrà esercitata nessuna tensione sul filo che collega la bilancia secondaria con la leva 9.



L'equazione nella formula 7 risulterà **non rispettata** quando **Fp5** diverrà maggiore di **Fp2** ovvero quando la forza peso del vaso (**Fp5**) sarà aumentata in seguito alla crescita della pianta.

A questo punto la bilancia secondaria **si sbilancerà verso sinistra** e con la sua rotazione andrà ad imprimere **una forza sulla leva (F6)** a cui è collegata tramite filo; quest'ultima eserciterà a sua volta **una forza sul cesello 11** (sempre tramite filo) *permettendo a quest'ultimo di alzarsi e far veicolare l'acqua.*

Quest'ultima arriverà **nel contenitore di smistamento (7)** dove verrà divisa in tre parti; una parte di acqua si dirigerà verso la piccola tanica (2) mentre le restanti 2 parti si dirigeranno verso la grande tanica (3).

Questa “**Spartizione**” è importante poiché se l'acqua dovesse andare a rifornire solo la piccola tanica provocherebbe un'alterazione dell'equilibrio della bilancia principale e **una compromissione del sistema.**

Pertanto, **alla fine di un ciclo di autoregolazione**, l'incremento in peso del vaso dovuto alla crescita della pianta causerà un analogo incremento in **peso della piccola tanica** e di un **incremento in peso doppio** rispetto a quest'ultimo per la grande tanica (Figura 29) andando a ricostituire un nuovo equilibrio della bilancia secondaria senza alterare l'equilibrio della bilancia principale.

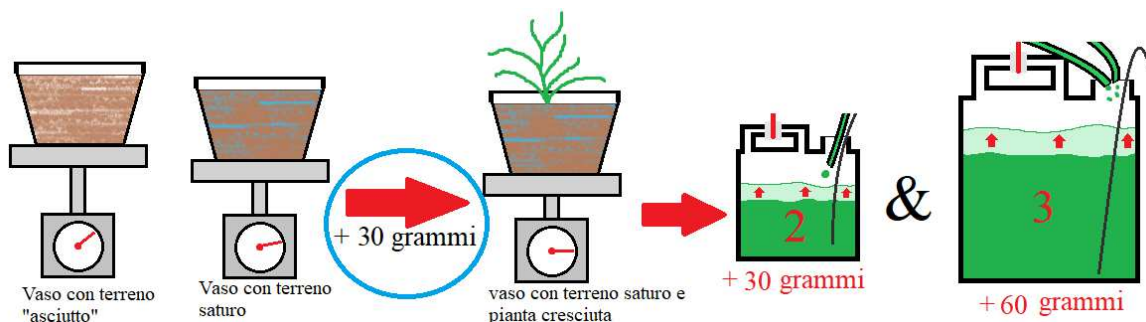


Figura 29: Rappresentazione grafica dell'incremento in peso delle taniche 2 e 3 in seguito all'aumento di peso di una pianta in un vaso. Fonte: Ns elaborazione

## **CAPITOLO 4**

### **RISULTATI E DISCUSSIONE:**

Sono state eseguite diverse prove sul macchinario per valutarne **la funzionalità e l'efficacia**. Per simulare il comportamento del contenuto idrico in un suolo è stato usato un contenitore contenente circa 300 grammi di acqua (Figura 22) posto dentro il vaso (numero 5 in figura 28) e, tramite un sifone, quest'acqua è stata lentamente allontanata.

Durante l'allontanamento dell'acqua dal vaso, *la bilancia principale ha reagito ruotando in senso orario* (Figura 24) permettendo il sollevamento del cesello (numero 10 in Figura 16) *consentendo una prima lenta erogazione di acqua* dalla tanica serbatoio fino al recipiente di raccolta (numero 8 in Figura 16).

*Nel momento in cui l'acqua dentro il vaso 5 è stata completamente allontanata, la bilancia principale si è ritrovata ruotata in senso orario* fino a permettere l'erogazione di un adeguato flusso di acqua dalla tanica serbatoio fin al contenitore 8 che, pochi istanti dopo, *andrà a riversare tramite un sifone tutto il liquido accumulato* (circa 300 grammi di acqua) riempiendo il contenitore dentro il vaso 5.

Successivamente, **la bilancia principale ha reagito all'aumento di peso del suo braccio sinistro** andandosi a *riassestare nella sua posizione di equilibrio*; così facendo, *il cesello 10 si sarà spostato andando ad occludere il tubo di erogazione dell'acqua* fermando l'irrigazione del vaso e segnalando così che **il ciclo d'irrigazione è stato svolto con successo**.

**Il ciclo di autoregolazione è molto più sensibile all'aumento di peso risultante dalla crescita della pianta rispetto al ciclo d'irrigazione** ed è per questo motivo che *quest'ultimo non è influenzato dal ciclo di autoregolazione*.

*Per simulare invece la crescita di una pianta, è stato aggiunto un peso dentro il vaso (5) pari a circa 60 grammi.*

*L'aggiunta di questo peso ha subito fatto avviare il ciclo di autoregolazione del sistema* (figura 28) permettendo alla bilancia secondaria (6) di ruotare in senso antiorario.

*Il movimento della bilancia ha causato a sua volta una rotazione in senso orario della leva 9 portando ad erogare acqua dalla tanica serbatoio verso il contenitore di smistamento dell'acqua* (8).

Da qui, *il sifone contenuto sopra il contenitore ha permesso, in breve tempo, di "scaricare" l'acqua nella regione sottostante permettendo ad 1/3 del liquido di raggiungere la tanica 2 e, allo stesso tempo, di spingere la restante parte di liquido verso la tanica 3.*

**Bilancia secondaria e sifone sono regolati in modo da funzionare assieme: la bilancia secondaria inizierà a muoversi quando la pianta sarà cresciuta di circa 30 grammi (rappresentanti la sensibilità del sistema alla crescita della pianta) e, allo stesso modo, ogni scarico del sifone a campana comporterà l'aggiunta di circa 30 grammi d'acqua alla piccola tanica; in questo modo il sistema è capace di compensare alla crescita della pianta ricostituendo l'equilibrio della bilancia secondaria senza alterare quello della bilancia principale.**

In breve tempo *il peso della tanica 2 sarà tornato ad essere uguale a quello del vaso 5* contenete anche la massa della pianta mentre *il peso della tanica 3 è tornato ad essere uguale alla somma dei pesi di quest'ultimi*; a questo punto *la bilancia secondaria sarà tornata in posizione di equilibrio permettendo la chiusura del cesello 11* e, di conseguenza, *l'erogazione di acqua.*

Un punto di forza di questo sistema risiede nella sensibilità del ciclo di autoregolazione che può essere modificata andando a variare la lunghezza dei bracci della leva 9 rendendo il macchinario facile da configurare.

Per allontanare l'eventuale acqua dalle taniche contrappeso sono stati usati 2 tubi che fungono da sifoni ad U capaci di essere chiusi tramite rubinetti (numero 12 in figura 27); l'operazione stessa di allontanamento di acqua in eccesso è stata condotta in maniera manuale andando ad allontanare una parte di acqua dalla piccola tanica e una doppia parte di acqua dalla grande tanica fino a quando entrambe le bilance non sono ritornate in equilibrio

**Il macchinario descritto in questa tesi si è rivelato efficiente nello svolgere il suo compito: è riuscito a rispondere in maniera pronta sia alla riduzione di umidità dentro il vaso e sia all'eventuale crescita di una pianta in quest'ultimo.**

**Sono presenti però alcune caratteristiche costruttive** dello stesso macchinario che *potrebbero essere modificate per migliorarne l'efficacia e facilitarne la costruzione.*

**Una di queste migliorie può essere nei materiali usati;** è stato deciso di usare *un filo in nylon per permettere di collegare i bracci delle bilance con i rispettivi ceselli.*

*Questa tipologia di materiale si è rivelata leggermente estensibile* comportandosi **come una molla** capace di ridurre la tensione generata sulla corda e, di conseguenza, di ridurre la forza che veniva applicata a livello di ceselli.

*Questo difetto è risultato completamente trascurabile per il sistema di autoregolazione* poiché il filo usato era di dimensioni contenute mentre *nel sistema d'irrigazione il filo in nylon si è rivelato capace d'influire, se pure in maniera ridotta, sulla forza applicata sul cesello 10.*

*La soluzione per questo difetto è stata ottenuta pretensionando il filo* durante la posizione di equilibrio della bilancia principale; in questo modo quest'ultima è stata capace di imprimere adeguata forza al cesello 10 permettendo la corretta esecuzione del ciclo d'irrigazione.

*Un'altra parte del macchinario che può essere migliorata è **quella riguardante l'apertura e chiusura dei flussi idrici**; quest'ultimi sono controllati da dei pesi (ceselli) che hanno una massa fissa.*

*Un possibile miglioramento su questo aspetto della macchina è quello di usare un altro sistema in grado di chiudere e aprire il flusso idrico senza comprimere il tubo, come ad esempio **utilizzando una valvola**.*

*Tutte queste imperfezioni del sistema sono **"fisiologiche"** in un macchinario che funge da **prototipo** come il soggetto di questa tesi e, pertanto, *saranno facilmente risolte lavorando e migliorando ulteriormente il macchinario stesso.**

Un ulteriore aspetto che potrebbe essere migliorato riguarda il sistema di allontanamento di acqua dalle taniche 2 e 3 (numero 12 in figura 27) in seguito alla riduzione di peso del vaso 5 (causato dalla raccolta di frutti o potature della pianta); l'attuale sistema necessita di un operatore che allontana acqua dalle taniche aprendo i rispettivi rubinetti (numero 12 in figura 27). Questo aspetto non rappresenta un grosso problema poiché l'intervento manuale necessario per allontanare acqua dalle taniche può essere facilmente svolto dallo stesso operatore che andrà a condurre le operazioni di potatura e/o raccolta frutti senza troppe difficoltà.

*Un'ultima caratteristica del macchinario consiste nel fatto che quest'ultimo **potrà essere usato solo per irrigare piante in vaso simili fra di loro** e non piante coltivate direttamente nel suolo. Questo perché lo sviluppo di una pianta e l'alterazione del contenuto idrico del terreno si comporteranno in maniera diversa a seconda se dovessimo trovarci in campo oppure dentro un vaso (Weeradej M. Et all, 2012). Nonostante questo, il macchinario può essere tranquillamente usato sia in serra che all'esterno, esposto anche a fenomeni metereologici (es. pioggia), poiché sarà capace di autoregolarsi.*

Inoltre, apportando minime modifiche al macchinario sarà possibile controllare il momento dell'irrigazione ad un numero di piante maggiore contemporaneamente.

Da tutto questo si evince come **il macchinario** (e i suoi futuri aggiornamenti) *sarà capace di espletare a pieno la sua funzione in contesti dove sono presenti colture fuori suolo rendendolo una valida alternativa ai sistemi d'irrigazione automatizzata elettronici.*

Link immagini e video <https://www.mediafire.com/folder/33ufj3tlrexnz/>

## CONCLUSIONE

Il **fine** di questa tesi è stata la realizzazione e l'annesso studio della performance di un macchinario in grado di garantire **l'irrigazione automatica** di un vaso in funzione del suo stato idrico sfruttando solo componenti meccaniche **facili da reperire, montare e mantenere**.

Il macchinario, una volta ultimato, è stato testato per valutarne l'efficacia sia nel veicolare acqua ad un substrato con un contenuto idrico critico e sia nel regolare lo stesso sistema in funzione della crescita della pianta.

In entrambi i casi, il macchinario si è mostrato capace di reagire in maniera adeguata alle variazioni di peso del vaso dimostrando come questo prototipo di sistema possa effettivamente essere un'alternativa economica e valida rispetto a sistemi che sfruttano sensori elettronici.

Il macchinario potrà infine essere ulteriormente migliorato riducendone le dimensioni, automatizzando lo scarico dell'acqua dalle taniche e utilizzando materiali preparati ad-hoc tramite stampanti 3D per renderlo più efficiente, adattabile ed economico.

Tutto questo per rendere il macchinario riproducibile anche nei Paesi meno sviluppati, dove i contesti socio-economici marginali non permettono l'utilizzo di tecnologie costose e avanzate, ottenendo il miglioramento e un'automatizzazione delle tecniche d'irrigazione.

## Bibliografia

Donahue R.L., Miller R.W., Shickluna J.C. (1977). Soils: An Introduction to Soils and Plant Growth. *Englewood, Cliffs, N.J. : Prentice-Hall*

Giambattista A., Richardson B.M., Richardson C.R., Fisica generale. Principi e applicazioni, *McGraw-Hill Education*, 2012

Luigi Giardini, *Agronomia generale*, 3<sup>a</sup> ed., Bologna, Pàtron, 1986

Ohashi Y., Nakayama N., Saneoka H., Fujita K. (1994). Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. *Biologia Plantarum*, March 2006, Volume 50, Issue 1, pp 138-141

Rattan L. (2006). Encyclopedia of Soil Science. *CRC Press*, pp 1350

USDA - NRCS. Soil Taxonomy, 2<sup>nd</sup> Edition (1999). *Agricultural Handbook n. 436*

Weeradej M., Prayad P., Maleeya K., Phanwimol T. (2012). Phytostabilization of a Pb-contaminated mine tailing by various tree species in pot and field trial experiments. *International Journal of Phytoremediation, PubMed*

Zazueta S.F., Xin J. (1994). Soil Moisture Sensors. *Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida*