

Capitolo 1

Generazione di WebAssembly

La ricerca di soluzioni efficienti e portabili per eseguire codice in ambienti diversi è diventata una priorità fondamentale nell'informatica moderna. In questo contesto, WebAssembly (Wasm) emerge come una tecnologia chiave, fornendo un formato binario sicuro, veloce e indipendente dalla piattaforma. Nel corso di questo capitolo, esploriamo il processo di generazione di codice WebAssembly attraverso un interprete dedicato a un linguaggio personalizzato. Il nostro linguaggio, creato per soddisfare specifiche esigenze o paradigmi di programmazione unici, si propone di offrire una flessibilità senza precedenti agli sviluppatori. Attraverso un interprete appositamente progettato, saremo in grado di tradurre il codice sorgente del nostro linguaggio in istruzioni Wasm, consentendo così l'esecuzione di programmi in un ambiente virtuale altamente performante e sicuro. Nel corso di questo capitolo, esamineremo in dettaglio il processo di compilazione, passando attraverso le fasi cruciali che trasformano il nostro codice sorgente in un modulo WebAssembly. Dalla rappresentazione intermedia alla gestione delle dipendenze, esploreremo come l'interprete si adatta alle specificità del nostro linguaggio per garantire una corretta esecuzione e ottimizzazione delle risorse. Il capitolo si propone inoltre di approfondire le sfide e le opportunità che emergono durante il processo di generazione di WebAssembly. Analizzeremo le scelte di progettazione dell'interprete, l'ottimizzazione del codice e la gestione delle risorse, fornendo un quadro completo delle considerazioni che guidano il nostro approccio alla generazione di codice Wasm. Forniremo inoltre le istruzioni per eseguire il modulo WebAssembly generato, e analizzeremo il processo di esecuzione e di debug dello stesso attraverso un motore di runtime.

1.1 Introduzione WebAssembly

WebAssembly (Wasm) è un formato di istruzioni altamente performante, portabile e sicuro, progettato per essere eseguito in ambienti virtuali. Originariamente concepito da un gruppo di lavoro congiunto tra Google, Mozilla, Microsoft e Apple, il principale obiettivo di WebAssembly è fornire un formato binario indipendente dalla piattaforma, garantendo al contempo sicurezza e velocità. Sebbene sia stato ideato principalmente per essere eseguito all'interno dei browser web, Wasm trova applicazioni anche in contesti diversi come server, dispositivi IoT e applicazioni desktop.

Le istruzioni Wasm si distinguono dalle istruzioni di un processore reale in quanto sono progettate per l'esecuzione in un ambiente virtuale. Ciò implica che le istruzioni Wasm non possono essere eseguite direttamente da un processore fisico; richiedono invece una traduzione preliminare in istruzioni native. Questo processo di traduzione è gestito da un motore di runtime, il quale interpreta le istruzioni Wasm e le traduce in istruzioni native del sistema ospite. Oltre alla traduzione delle istruzioni, il motore di runtime si occupa anche della gestione della memoria e delle risorse del sistema, fornendo un'astrazione sicura e indipendente dalla piattaforma.

In sintesi, WebAssembly rappresenta una tecnologia versatile e potente che offre un'alternativa efficace alle tradizionali soluzioni di esecuzione di codice, poiché il formato binario di WebAssembly è progettato per essere facilmente scaricabile e decodificabile dai browser web. Consente dunque l'esecuzione di codice web a velocità prossime a quelle delle applicazioni native. Questa caratteristica rende Wasm un'opzione attraente per una vasta gamma di applicazioni, inclusi giochi, strumenti di produttività, applicazioni di elaborazione multimediale e molto altro ancora.[5]

1.2 WebAssembly Text Format

Il formato di testo WebAssembly (WAT) [**WebAssemblyTextFormat**] è un formato di testo leggibile dall'uomo per la rappresentazione di moduli WebAssembly. Il formato è stato progettato per essere utilizzato come rappresentazione intermedia durante il processo di compilazione, fornendo un'astrazione leggibile dall'uomo per il codice Wasm. Consiste in un insieme di istruzioni mnemoniche e direttive che corrispondono direttamente alle istruzioni binarie di WebAssembly. Il compilatore che abbiamo sviluppato genera un file .wat ed in seguito il tool wat2wasm [2] genera il file .wasm, che a sua volta potrà essere eseguito da un motore di runtime.

I tipi di dati che troviamo in wat sono:

- **i32** 32-bit integer
- **i64** 64-bit integer
- **f32** 32-bit float
- **f64** 64-bit float

Un singolo parametro (*param i32*) e il tipo di ritorno (*result i32*).

```
1 (func (param i32) (param i32) (result f64) ...)
```

Listing 1.1: Esempio di funzione in wat

I parametri locali possono essere dichiarati all'interno di una funzione, e sono accessibili solo all'interno della funzione stessa. I comandi *local.get* e *local.set* vengono utilizzati per accedere agli indici dei parametri locali. Possiamo usare anche l'operatore *\$* per accedere ai parametri locali, in maniera più human-readable.

```
1 (func $fun (param i32) (param i32) (result f64)
2   (local $par1 i32)
3   (local $par2 i32)
4   (local $par3 f64)
5   ...
6   (local.get $par1)
7   (local.get $par2)
8   (local.set $par3)
9   ...
10 )
```

Listing 1.2: Esempio di funzione in wat

Come vediamo in questo esempio la funzione *\$fun* prende in input due parametri di tipo intero e ritorna un valore di tipo float. Inoltre all'interno della funzione vengono dichiarati tre parametri locali, due di tipo intero e uno di tipo float.

1.2.1 WebAssembly System Interface

Mentre il WebAssembly (Wasm) era inizialmente destinato all'uso nel sandbox del browser web, è progettato in modo tale da poter essere eseguito su qualsiasi piattaforma se esiste un'implementazione del runtime Wasm. Nei browser, il Wasm viene eseguito nell'interprete JavaScript e nel sandbox del browser, ma per eseguire moduli Wasm al di fuori di essi, è necessaria un'interfaccia con il sistema sottostante. Qui entra in gioco WASI (l'interfaccia di sistema WebAssembly).

WASI è un'interfaccia di sistema standardizzata per WebAssembly. WASI si riferisce a tutti i diversi interpreti del codice Wasm al di fuori del browser. La Bytecode Alliance ha un paio di runtime Wasm di propria produzione: Wasmtime e WAMR (WebAssembly Micro Runtime). WASI promuove linee guida su come dovrebbe essere realizzato un corretto interprete Wasm in modo da mantenere le funzionalità di sicurezza sandbox che ha all'interno dei browser per impostazione predefinita. Wasmtime è un runtime di tipo just-in-time per il codice Wasm e WAMR è un interprete Wasm progettato per dispositivi embedded.[3]

Stack Machine

L'esecuzione del WebAssembly é definita in termini di Stack-Machine, dove l'idea generale é che ogni tipo di istruzione esegue operazioni di tipo *push/pop* dallo stack. Quando viene chiamata una funzione, inizia con uno stack vuoto che viene gradualmente riempito e svuotato man mano che le istruzioni del corpo vengono eseguite. Quindi, ad esempio, dopo aver eseguito la seguente funzione:

```
1  (func $somma(param $p1 i32)(param $p2 i32)
2      (result i32)
3      local.get $p1
4      local.get $p2
5      i32.add)
```

Quando viene chiamata la funzione \$somma, viene passato il precedente valore nella pila come parametro \$p1. La prima istruzione *local.get* copia il valore di \$p1 nello stack, e la seconda istruzione *local.get* copia il valore di \$p2 nello stack. Infine, l'istruzione *i32.add* rimuove i due valori superiori dello stack, li somma e inserisce il risultato nello stack. Alla fine dell'esecuzione della funzione, lo stack contiene il risultato della somma dei due valori passati come parametro. Come vediamo nello schema seguente:

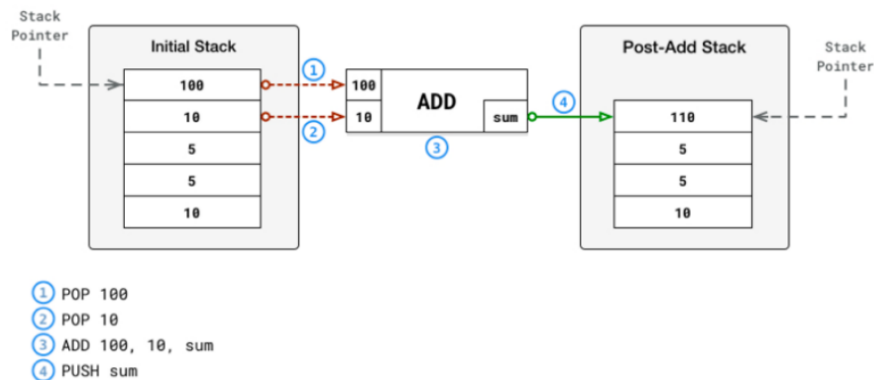


Figura 1.1: Stack Machine WASM

Un puntatore mantiene la posizione di esecuzione all'interno del codice e uno stack di controllo virtuale tiene traccia dei blocchi e dei costrutti man mano che vengono in input (operazione push) e in output (operazione pop). Le istruzioni tuttavia vengono eseguite senza alcun riferimento a un AST. Pertanto, la parte del formato delle istruzioni binarie della definizione si riferisce a una rappresentazione binaria delle istruzioni che sono in un formato leggibile dallo stack di decodifica nel browser.[1] Per eseguire la **chiamata della funzione ??**, vediamo il codice seguente:

```

1  (func $main
2    (result i32)
3    i32.const 10
4    i32.const 5
5    call $somma)

```

La prima istruzione *i32.const* inserisce il valore costante 10 nello stack, e la seconda istruzione *call* chiama la funzione *\$somma*. La funzione *\$somma* viene eseguita, e il risultato viene inserito nello stack. Alla fine dell'esecuzione della funzione, lo stack contiene il risultato della somma dei due valori passati come parametro. Dobbiamo inoltre aggiungere una dichiarazione di esportazione per fare in modo che la funzione sia visibile all'esterno del modulo(per esempio anche dal codice javascript).

```

1  (export "main"(func $main))

```

La prima stringa "main" é il nome della funzione che vogliamo esportare e che sarà visibile anche all'esterno del modulo, mentre la seconda é l'identificativo della funzione a cui fa riferimento.

1.3 Entità di WebAssembly

Le entità principali di WebAssembly sono:

- **Module:** Un modulo WebAssembly è un'unità di codice che può essere caricata e eseguita da un motore di runtime. Un modulo può contenere funzioni, variabili, tabelle e memoria, oltre a definizioni di tipi e importazioni/esportazioni.
- **Binario:** Il formato binario di WebAssembly è una rappresentazione compatta e ottimizzata del modulo Wasm. Il formato binario è progettato per essere eseguito in modo efficiente da un motore di runtime, consentendo l'esecuzione di codice Wasm in ambienti virtuali.
- **Embedder:** Un embedder è un'applicazione o un ambiente che incorpora un motore di runtime WebAssembly. Gli embedder possono includere browser web, server, dispositivi IoT e applicazioni desktop, tra gli altri.

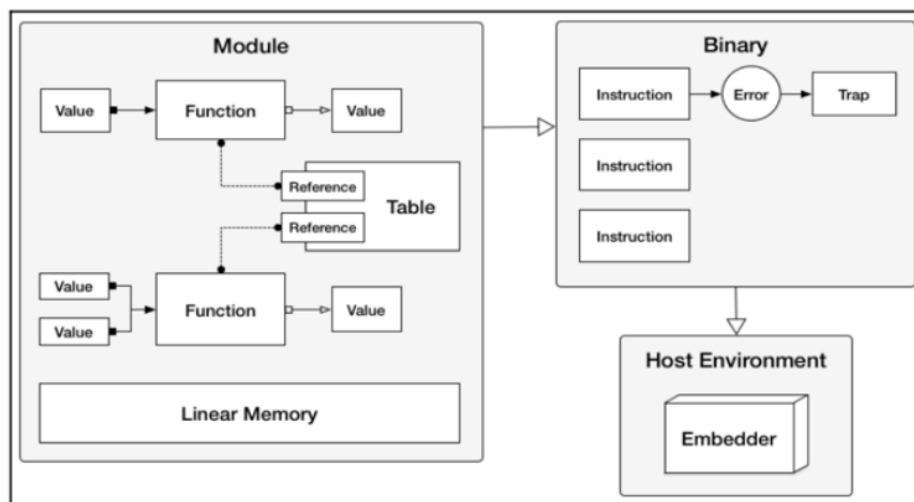


Figura 1.2: Schema Entità WebAssembly

Moduli

Un modulo WebAssembly è un'unità di codice che può essere caricata e eseguita da un motore di runtime. Un modulo può contenere funzioni, variabili, tabelle e memoria, oltre a definizioni di tipi e importazioni/esportazioni. I moduli Wasm sono progettati per essere indipendenti dalla piattaforma, consentendo l'esecuzione di codice Wasm in ambienti virtuali diversi. I moduli

Wasm possono essere creati manualmente o generati da un compilatore, consentendo agli sviluppatori di scrivere codice in un linguaggio ad alto livello e di eseguirlo in un ambiente virtuale altamente performante e sicuro. I tipi di valore definiti in wasm come abbiamo visto in precedenza sono **i32**, **i64**, **f32**, **f64**, e i tipi di funzione **func**, ognuna delle quali accetta una sequenza di valori come parametri e restituisce una sequenza di valori come risultato. Un modulo interagisce con una memoria lineare, considerata come un intervallo contiguo di indirizzi in byte che si estende dall'offset 0 fino a una dimensione variabile. La memoria può essere utilizzata per memorizzare dati e istruzioni, e può essere condivisa tra più moduli. Lo stato iniziale di una memoria lineare è definito dalla memoria lineare e dalle sezioni dei dati del modulo. La dimensione della memoria può essere aumentata dinamicamente dall'operatore `grow-memory`. Una memoria lineare può essere considerata una matrice non tipizzata di byte ma non è specificato come gli embedder mappino questa matrice nella propria memoria virtuale. Simile a una memoria lineare in wasm esiste il concetto di **tabelle**, che sono valori di un particolare tipo di tabella. Una tabella consente di contenere valori come puntatori nativi, a cui il codice Webassembly può accedere tramite un indice.

Formatting Binario

Le istruzioni in wasm rientrano in due categorie: **Istruzioni di controllo**, che formano costrutti di controllo e **Istruzioni di manipolazione dello stack**, che manipolano lo stack di valori. Le istruzioni di controllo sono istruzioni che modificano il flusso di controllo del programma, come ad esempio l'istruzione `if`. Le istruzioni di manipolazione dello stack sono istruzioni che manipolano lo stack di valori, come ad esempio l'istruzione `i32.const` che inserisce un valore costante nello stack. In Wasm le traps sono errori che si verificano durante l'esecuzione di un modulo Wasm, come ad esempio un'overflow aritmetico o un accesso fuori dai limiti della memoria. Le traps possono essere gestite da un motore di runtime, consentendo al modulo Wasm di continuare l'esecuzione in caso di errore.

Embedder

Un embedder è un'applicazione o un ambiente che incorpora un motore di runtime WebAssembly. Un'implementazione di webassembly viene in genere incorporata in un ambiente host. Un embedder implementa la connessione tra tale ambiente host e la semantica di webassembly e fornisce un'interfaccia per l'accesso a funzionalità come la memoria, le tabelle e le funzioni esportate da un modulo Wasm.[1][4]

1.4 CostCompiler to WAT

L'interprete che abbiamo sviluppato genera un file .wat, questo file .wat andrà poi convertito in un file .wasm, che a sua volta potrà essere eseguito da un motore di runtime. Questa conversione viene fatta tramite il tool `wat2wasm` presente nella toolchain WebAssembly Binary Toolchain WABT [2]. Attraverso il comando:

```
1  wat2wasm file.wat -o file.wasm
```

Il tool `wat2wasm` prende in input un file di testo .wat e genera un file byte-code .wasm. Il file .wasm generato può quindi essere eseguito direttamente da un motore di runtime WebAssembly, consentendo l'esecuzione del modulo Wasm in un ambiente virtuale. Andando più nel dettaglio di come viene generato il file .wat dall'interprete, vediamo che per ogni nodo dell'ast che abbiamo parlato nei capitoli precedenti viene creata un'ulteriore funzione "`codeGeneration()`" che ritorna una stringa. Ricorsivamente andremo a chiamare la funzione "`codeGeneration()`" per ogni nodo dell'ast che ritorna una stringa che mano a mano verrà concatenata con la precedente andando a ottenere il codice wat. Andremo a vedere nello specifico due implementazioni della funzione "`codeGeneration()`" durante la generazione del codice wat, la `codeGeneration` per l'`if Node` e la `codeGeneration` per il `for Node`.

```
1  @Override
2  public String codeGeneration(HashMap<Node, Integer>
   offset_idx) {
3      return "(local $res i32)\n" +
4              "(if"+exp.codeGeneration(offset_idx)+
5              "(then\n"+stmT.codeGeneration(offset_idx)+
6              "(local.set $res)" +
7              "\n)" +
8              "(else\n"+stmF.codeGeneration(offset_idx)+
9              "(local.set $res)" +
10             "\n)" +
11             "\n)" +
12             "(local.get $res)\n";
13 }
```

Listing 1.3: `codeGeneration()` per l'`if Node`

Descriviamo il funzionamento della `codeGeneration` per l'`if Node`. Come vediamo nel listato 1.3 la funzione ritorna una stringa che contiene il codice wat per l'`if Node` e prende come parametro un `offset_idx`. `offset_idx` é un hashmap che mappa un nodo ad un intero, e ci serve per tenere traccia dell'offset delle variabili locali all'interno della memoria lineare. La prima istruzione `(local $res i32)` dichiara una variabile locale di nome `$res` di tipo `i32`, che serve da

accumulatore per il risultato del ramo *then* e il risultato del ramo *else*. La seconda istruzione *if* richiama la funzione `codeGeneration()` dell'exp Node, che ritorna una stringa che contiene il codice wat per l'exp Node. Viene valutata l'espressione e se il risultato é 1 allora viene eseguito il ramo *then*, altrimenti viene eseguito il ramo *else*. La terza istruzione *then* richiama la funzione `codeGeneration()` del ramo *then*, che ritorna una stringa che contiene il codice wat per il ramo *then*. Al termine di quella `codeGeneration` ci aspettiamo di avere un elemento della pila che contenga il risultato di quella espressione, con il `local.set $res` andiamo a salvare il risultato nella variabile locale `$res`, e togliendolo da quella pila, mantenendo così l'invariante. La quarta istruzione *else* richiama la funzione `codeGeneration()` del ramo *else*, che ritorna una stringa che contiene il codice wat per il ramo *else*, in maniera simmetrica a ciò che abbiamo fatto per il ramo *then*. La quinta istruzione `local.get` prende il valore della variabile locale `$res` e lo inserisce nello stack, e lo ritorna.

Andremo di seguito a vedere lo stesso ragionamento per la `codeGeneration` del `for` Node:

```

1  @Override
2  public String codeGeneration(HashMap<Node, Integer>
   offset_idx) {
3      return
4          "(local $" + id + " i32)\n" +
5          "(local $" + id + "_max i32)\n" +
6          "(local $res i32)\n" +
7          exp.codeGeneration(offset_idx) +
8          "(local.set $" + id + "_max)\n" +
9          "(loop $for" + line + "\n" +
10         "(if
11             (i32.lt_u
12                 (local.get $" + id + ") (local.get $" + id + "_max))" +
13             "(then" +
14                 stm.codeGeneration(offset_idx) +
15                 "(local.set $res)\n" +
16                 "(local.get $" + id + "\n)" +
17                 "(i32.const 1)\n" +
18                 "(i32.add)\n" +
19                 "(local.set $" + id + "\n)" +
20                 "(br $for" + line + ")\n)" +
21             "(else" +
22                 "(local.get $" + id + "_max)\n" +
23                 "(local.set $" + id + ")
24             )\n))\n
25         (local.get $res)" ;

```

Listing 1.4: codeGeneration() per il for Node

La prima istruzione (*local \$id i32*) dichiara una variabile locale di nome \$id di tipo i32, che servirà da iteratore, e la seconda istruzione (*local \$id_max i32*) dichiara una variabile locale di nome \$id_max di tipo i32, che serve da limite superiore per l'iteratore, infine viene dichiarata una variabile \$res per memorizzare il risultato del corpo del ciclo, in caso di ritorno. La terza istruzione *exp.codeGeneration()* richiama la funzione codeGeneration() dell'exp Node, che ritorna una stringa che contiene il codice wat per l'exp Node. Questo valore appena valutato, verrà salvato nella variabile locale \$id_max, con la quarta istruzione (*local.set \$id_max*). La quinta istruzione (*local.get \$id_max*) prende il valore della variabile locale \$id_max e lo inserisce nello stack, e lo ritorna. Successivamente viene eseguito un loop, che viene eseguito finché il valore della variabile locale \$id_max è minore del valore della variabile locale \$id. Questo è reso possibile attraverso la definizione della label (*loop \$for+line*) che ci permette di definire l'inizio del loop.

L'istruzione *if (i32.lt_u (local.get \$id_max) (local.get \$id))* prende i due valori \$id_max e \$id e li confronta, se il secondo è minore del primo allora esegue il ramo then, eseguendo il corpo del ciclo, altrimenti esce dal loop e passa al nodo successivo. Dentro il ramo then viene eseguito il corpo del ciclo, richiamando la funzione codeGeneration() del corpo del ciclo, che ritorna una stringa che contiene il codice wat per il corpo del ciclo. Inoltre verrà preso il contatore \$id, verrà incrementato di 1, e verrà salvato nella variabile locale \$id, con l'istruzione (*local.set \$id*) e salta alla label definita in precedenza (*br \$for+line*).

Come ultima operazione verrà preso il valore della variabile locale \$res e lo inserisce nello stack, e lo ritorna.

1.5 Esecuzione del modulo WebAssembly

Una volta generato il file .wasm, possiamo eseguirlo attraverso un motore di runtime. Nel nostro specifico caso di debug utilizziamo un file html che contiene il seguente codice javascript:

```

1 const memory = new WebAssembly.Memory({ initial: 1 });
2
3 const importObject = {
4   js: { mem: memory }
5 };

```

```

6
7 fetch("output.wasm")
8   .then(response => response.arrayBuffer())
9   .then(bytes => WebAssembly.instantiate(bytes,
10     importObject))
11   .then(obj => {
12     console.log(obj.instance.exports.main(10));
13   })
14   .catch(error => console.error(error));

```

Listing 1.5: Esecuzione del modulo WebAssembly

La prima istruzione *const memory = new WebAssembly.Memory(initial: 1);* definisce un oggetto memory che rappresenta la memoria del modulo WebAssembly. In questo caso, la memoria è inizializzata con una dimensione iniziale di 1 pagina. La seconda istruzione *const importObject = { js: { mem: memory } };* definisce un oggetto di importazione che contiene la memoria del modulo WebAssembly. Questo oggetto di importazione verrà utilizzato per fornire l'accesso alla memoria del modulo WebAssembly. La terza istruzione *fetch("output.wasm")* carica il file .wasm e restituisce una Promise che contiene i byte del file .wasm. Andando nella console di chrome é possibile vedere il file .wasm caricato, e debuggarlo come vediamo in questo snippet:

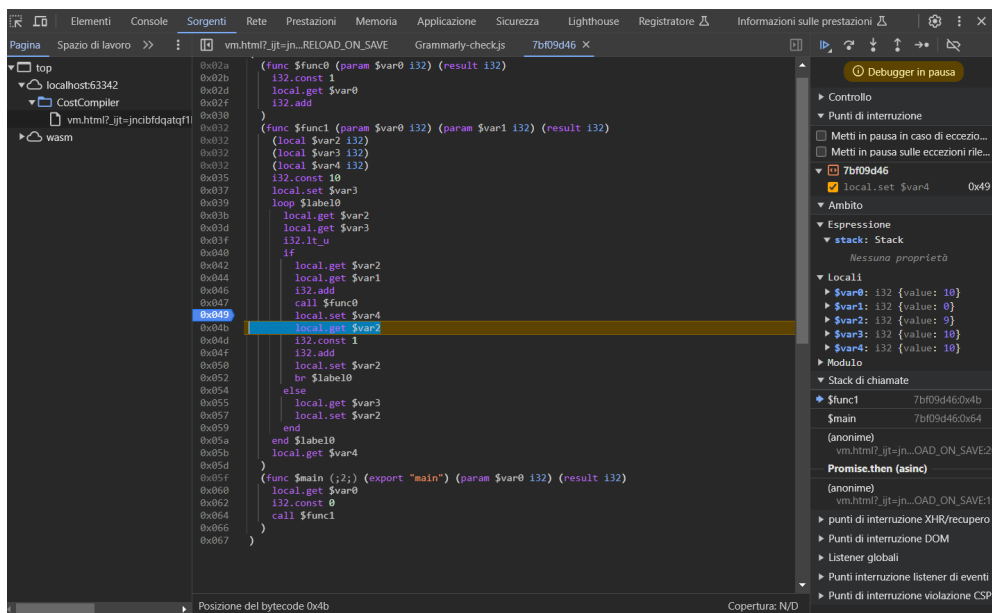


Figura 1.3: Debug del file output.wasm

Come notiamo il file `.wasm` é stato caricato correttamente, e possiamo andare a vedere il suo contenuto, inserire breakpoint e andare ad analizzare il runtime del nostro codice. Notiamo inoltre che il formato WAT a confronto é molto piú leggibile, soprattutto per quanto riguarda il nome delle variabili, Wasm contiene il programma mappando le variabili in var_0, \dots, var_n . A destra troviamo sia lo stack, mentre altre di sotto le variabili che interagiscono in un determinato scope locale, e lo stack di chiamate delle funzioni.