

Capitolo 1

Analisi Sperimentale

1.1 La libreria TPTP

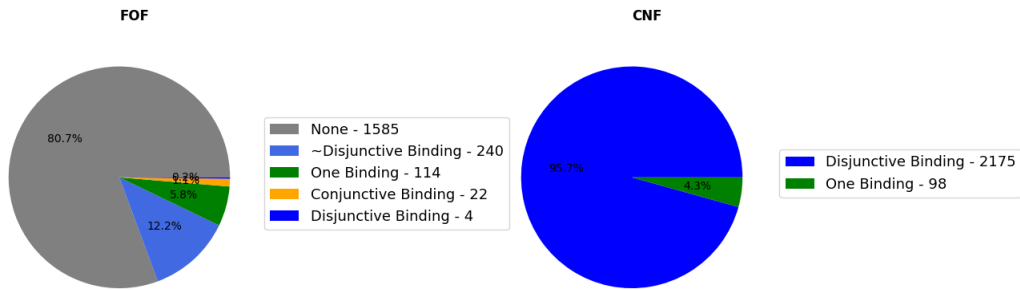


Figura 1.1: Classificazione Libreria TPTP fof e cnf senza uguaglianza

Per verificare la correttezza e l'efficienza dell'algoritmo implementato è stata scelta la libreria di problemi TPTP [?] come dataset di problemi da risolvere. La libreria TPTP è una collezione di problemi per sistemi ATP dove ogni problema è scritto in formato TPTP come descritto nella sezione ???. I problemi TPTP sono suddivisi in base al dominio di appartenenza e il formato (fof, cnf, tff, ecc). Il nome dei file segue il seguente schema:

`<domain><number>[+,-]<version>.p`

dove '`<domain>`' è il dominio di appartenenza del problema composto da tre lettere maiuscole e '`<number>`' è un numero, generalmente di tre cifre, che identifica il problema all'interno del dominio. Il simbolo `+` indica che il problema è scritto con la sintassi *fof* mentre il simbolo `-` indica che il problema è scritto con la sintassi *cnf*. '`<version>`' è un suffisso che identifica la versione del problema. Ad esempio un nome valido è *SYN001+1.003.p* che indica il problema 1 del dominio *Syntactic*, in formato *fof*, versione 1.003.

Non tutti i problemi sono adatti per essere risolti con l'algoritmo implementato ed è stato quindi necessario filtrare i problemi in base a determinate caratteristiche. In primo luogo sono stati scartati tutti i problemi non in formato *fof* o *cnf* e i problemi con uguaglianza. Questo è stato possibile tramite il comando *TPTP2T*:

- Per i problemi *fof*: `tptp2T -q2 -pps Form FOF -Equality`
- Per i problemi *cnf*: `tptp2T -q2 -pps Form CNF -Equality`

Il risultato delle due query ha restituito una lista di **1969** problemi in formato *fof* e **2274** problemi in formato *cnf*. Da entrambe le liste è stato scartato un problema puramente proposizionale, quindi poco significativo per la sperimentazione, ma estremamente grande da rallentare l'intero set di benchmark, riducendo il numero di potenziali problemi utili a **1965** per i problemi *fof* e **2273** per i problemi *cnf*.

Successivamente tutti i problemi sono stati classificati tramite il classificatore descritto nella sezione ???. Si ricorda che i problemi sono dati in formato $(A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_n) \rightarrow C$ dove A_1, A_2, \dots, A_n sono assiomi e C è la congettura, mentre sia l'algoritmo di decisione che Vampire lavorano sul problema negato ovvero $A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_n \wedge \neg C$. Per classificazione di un problema P con congettura si intende quindi il frammento di appartenenza del problema negato $\neg P$. Nelle formule in cui non è presente la congettura, come quelle del formato *cnf*, per classificazione della formula $P = A_1 \wedge \dots \wedge A_n$ si intende il frammento di appartenenza del problema non negato P . I risultati della classificazione sono mostrati in figura 1.1.

Riguardo i problemi *fof*, dei 1965 problemi analizzati:

- **1585** sono stati classificati come *None* e quindi totalmente inutilizzabili.
- **114** sono *One Binding* e **22** sono *Conjunctive Binding*, quindi adatti per l'algoritmo.
- **244** sono *Disjunctive Binding* e quindi non adatti per l'algoritmo.

Dei 244 problemi *Disjunctive Binding*: **240** contengono la congettura mentre gli altri **4** non la contengono. I 240 problemi con la congettura sono stati recuperati negandoli in modo tale da portarli nel formato $\neg A_1 \vee \dots \vee \neg A_n \vee C$ che fa parte del frammento *Conjunctive Binding* e quindi adatto per l'algoritmo (questi problemi nella figura 1.1 sono chiamati \sim *Disjunctive Binding*). Questo porta ad un numero totale di **376** problemi utili in formato *fof*.

Riguardo i problemi *cnf*, la suddivisione è più netta. Tutte le formule CNF sono infatti o del frammento *One Binding*, se per ogni clausola tutti i letterali della clausola hanno la stessa lista di termini, o altrimenti del frammento *Disjunctive Binding*. Dei 2273 problemi analizzati:

- **98** sono del frammento *One Binding*
- **2175** sono del frammento *Disjunctive Binding*

In questo caso la negazione delle formule *Disjunctive Binding* porterebbe a problemi puramente proposizionali e quindi poco utili per la sperimentazione. Il totale dei problemi utili in formato *cnf* è quindi di **98**. Per un totale di **474** problemi utili. La lista dei 474 problemi è riportata nell'appendice ???. Ogni problema è stato numerato nella tabella ?? per essere facilmente identificato.

1.2 Analisi dei risultati

In questa sezione verranno analizzati i risultati dell'esecuzione dell'algoritmo sui problemi selezionati nel paragrafo precedente e confrontati con i risultati ottenuti da Vampire. L'obiettivo della sperimentazione è confrontare l'efficienza di un algoritmo general purpose basato su Resolution come quello implementato da Vampire con un algoritmo specializzato SMT come quello implementato. Vampire implementa numerose strategie, euristiche e inferenze di semplificazione per essere efficiente a livello competitivo quindi per indurlo a comportarsi il più possibile come il modello della *Given Clause* descritta nella sezione ?? è stato necessario disabilitare/impostare alcune opzioni. L'algoritmo di saturazione adottato è stato *Otter*, poiché l'algoritmo predefinito *LRS* non offre garanzie di completezza e si basa sull'uso di limiti di tempo e memoria come criteri di selezione/semplificazione utilizzando come vero e proprio input che influenza il calcolo. È preferibile evitare questa metodologia poiché si desidera che gli algoritmi confrontati abbiano quantomeno lo stesso input e che non dipendano dai

limiti di tempo e di memoria. Per il preprocessing sono state disabilitate tutte le semplificazioni non comuni a entrambi gli algoritmi. In particolare l'opzione `-updr` (Unused Predicate Definition Removal) è stata disabilitata in quanto non utilizzata dall'algoritmo Binding. Come regola di semplificazione è stata disattivata l'opzione `-fs` (Forward Subsumption) che elimina clausole che sono sussunte da altre clausole durante la fase di *Forward simplification* (Una clausola D è sussunta da una clausola C se esiste una sostituzione σ tale che $C^\sigma \subseteq D$, clausole del genere vengono cercate dalla `fs` e rimosse perchè ridondanti). È stata disattivata anche l'opzione `-av` (AVATAR - Advanced Vampire Architecture for Theories and Resolution) che è un metodo SMT implementato in Vampire per lo splitting delle clausole tramite un Sat solver. L'opzione `-av` è stata disattivata dato che l'obiettivo è quello di far utilizzare a Vampire solo calcoli del primo ordine. Il comando utilizzato per l'esecuzione di Vampire è quindi il seguente:

```
vampire --mode vampire -sa otter -t 10m -m 12000 -av off -updr off -fs off <problem>
```

Dove `<problem>` è il problema da risolvere. Come limiti di tempo e memoria sono stati impostati rispettivamente 10 minuti e 12GB di ram. L'algoritmo per i frammenti Binding è stato eseguito con i seguenti parametri:

```
vampire --mode 1b -t 10m -m 12000 <problem>
```

I seguenti risultati sono estrapolati dall'esecuzione del programma su un Macbook Pro 2018, 2.9 GHz 6-Core Intel Core i9, 16 GB 2400 MHz DDR4 sistema operativo macOS Sonoma 14.0. Gli esperimenti sono stati poi ripetuti su un computer Windows 11 con processore Intel Core i9-13900K e ram 32GB DDR5 sul sottosistema Windows for Linux (WSL) e si sono ottenuti tempi di esecuzione, come da aspettativa, più bassi ma assolutamente coerenti, mentre per memoria i valori sono rimasti esattamente gli stessi. I tempi delle tabelle si riferiscono ai tempi rilevati dalla macro *TimeTrace* posta all'inizio dell'algoritmo per i frammenti Binding e all'inizio del *MainLoop* di Vampire escludendo quindi i tempi di parsing e preprocessing. Per una maggior accuratezza, i tempi sono stati calcolati come media di 5 esecuzioni.

One Binding

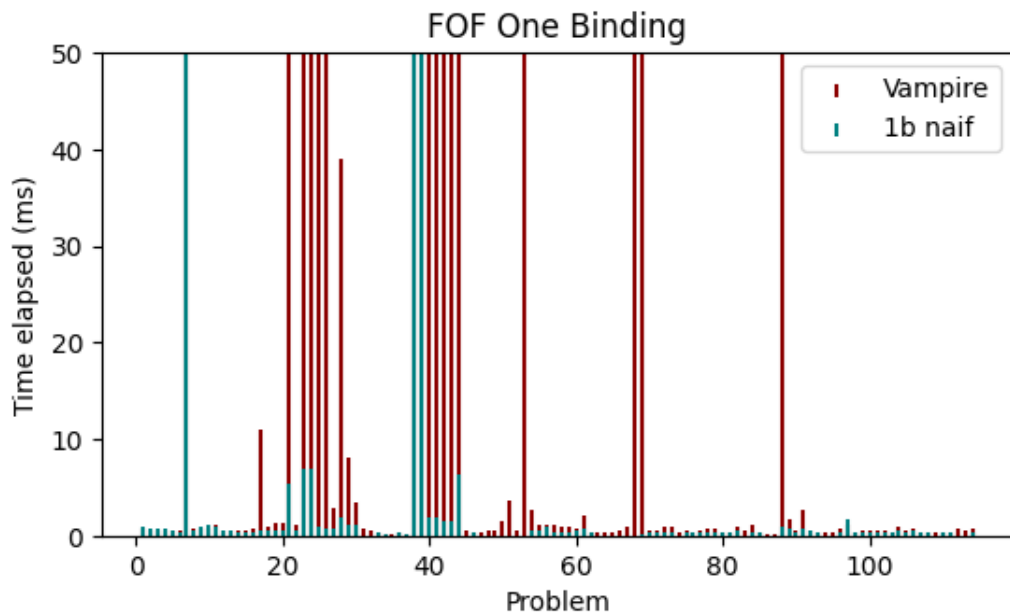


Figura 1.2: Tempo Vampire vs 1b naif, problemi fof del frammento One Binding

Partendo dai problemi *fof* del frammento *One Binding* è possibile osservare un grafico in figura 1.2 relativo alla tabella ?? dei tempi di esecuzione (Vampire in rosso(-sangue) e l'algoritmo naif color foglia di tè). Si nota subito che nonostante la maggior parte dei problemi venga risolta in tempi molto brevi da entrambi, nell'ordine di millisecondi, l'algoritmo naif si comporta molto bene rispetto a Vampire. Questo anche perchè molti dei problemi selezionati sono risultati puramente proposizionali e quindi risolti direttamente dal SAT solver senza passare per l'algoritmo effettivo. Nella tabella questi problemi sono contrassegnati con una '(g)' affianco tempo. È noto infatti che per problemi proposizionali i SAT solver sono molto più efficienti rispetto ad algoritmi per la logica del primo ordine. Questi casi in cui i problemi vengono risolti in pochi millisecondi e i problemi proposizionali, sono poco significativi per il confronto ma vi sono comunque dei problemi del primo ordine interessanti. In particolare i problemi di KRS (Knowledge Representation): 7, 21 e 25. In tutti e tre i problemi Vampire va in timeout (10 minuti). Nel problema 7 anche l'algoritmo naif va in timeout mentre il problema 21 viene risolto in 5 millisecondi e il problema 25 in meno di un millisecondo. Il problema 7 è l'unico dei One Binding fof che da veramente problemi all'algoritmo naif. Analizzando le statistiche del problema si nota che il 99% del tempo viene impiegato dalla ricerca dei mus. Andando a vedere come è formato si scopre che il problema è composto da tanti τ -Binding molto semplici che però hanno tutti lo stesso termine più qualche termine ground con termini diversi. Il problema crea tanti nuovi BindingLiterals uguali, $b_1(x_1), \dots, b_2(x_n)$, che fanno esplodere la ricerca del mus non ottimizzato.

Nella figura 1.3 si può osservare il grafico dell'utilizzo di memoria estratto dalla tabella ?. Sulla memoria non c'è molto da dire, entrambi gli algoritmi utilizzano in media 400Kb di memoria tranne nei casi dei problemi proposizionali in cui Vampire ne consuma molta di più. L'unico caso più interessante è sempre il problema 7 in cui Vampire utilizza circa 10Gb, arrivando quasi al limite (12Gb) e l'algoritmo naif ne utilizza meno di 1Gb. Questo vuol dire che probabilmente con più tempo Vampire non avrebbe comunque concluso per mancanza di memoria, mentre l'algoritmo naif avrebbe potuto continuare ancora per molto.

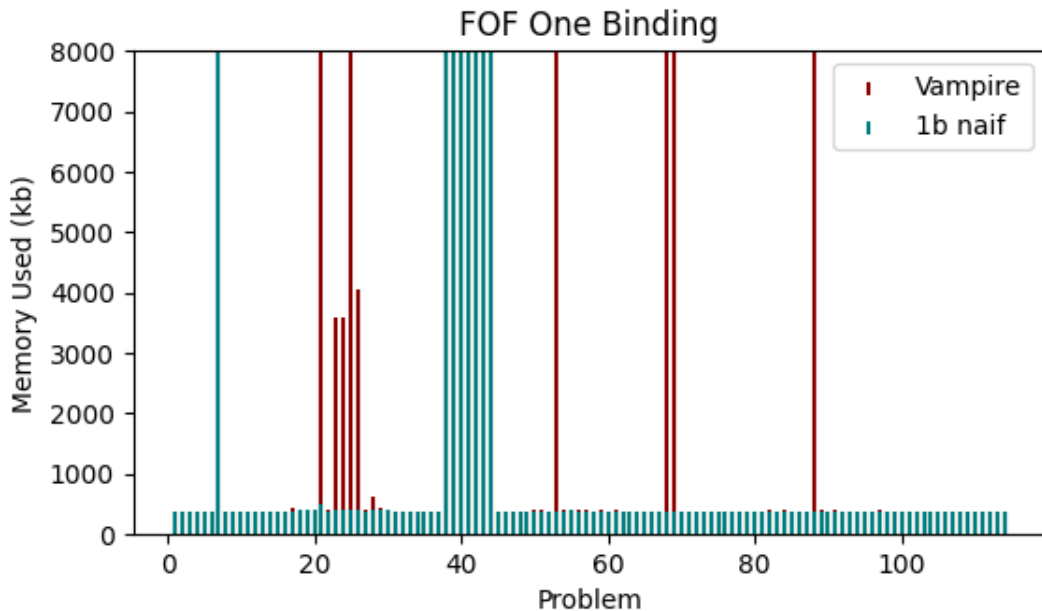


Figura 1.3: Memoria Vampire vs 1b naif, problemi fof del frammento One Binding

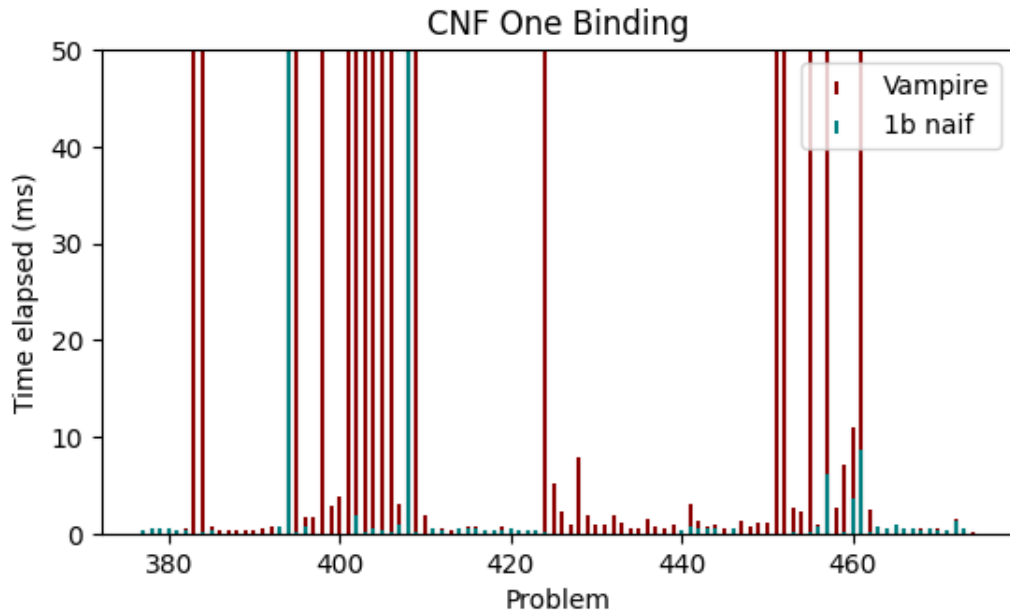


Figura 1.4: Tempo Vampire vs 1b naif, problemi cnf del frammento One Binding

Anche per i problemi *cnf* del frammento *One Binding* si possono fare le stesse osservazioni fatte sopra. Nella figura 1.4 si può osservare il grafico dei tempi di esecuzione estratto dalla tabella ???. Molti dei problemi *cnf* non sono altro che la conversione dei rispettivi problemi *fof* ed è quindi ragionevole che i tempi di esecuzione siano simili. Anche qui vi sono tre casi interessanti nel dominio SYN (Syntactic): 457 e 461 e nel dominio PUZ (Puzzle): 408. Anche in questo contesto Vampire va in timeout in tutti e tre i problemi. Nel problema 408 anche l'algoritmo naif va in timeout. Nei problemi 457 e 461 l'algoritmo naif risolve il problema rispettivamente in circa 6 e 9 millisecondi. Anche per questo problema il 99% del tempo per la risoluzione del problema 408 è impiegato nella ricerca dei mus. Il problema non ha niente di particolare, se non che ha un'alta concentrazione di letterali ground. Riguardo la memoria anche in questo caso entrambi si mantengono in media sui 400Kb tranne nei casi già discussi in precedenza.

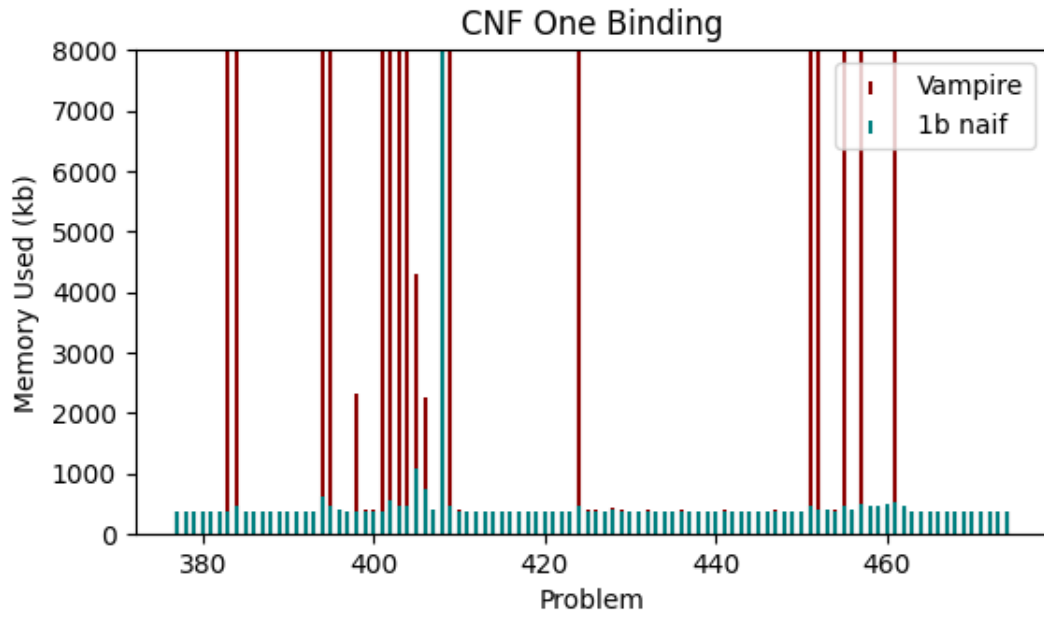


Figura 1.5: Memoria Vampire vs 1b naif, problemi cnf del frammento One Binding

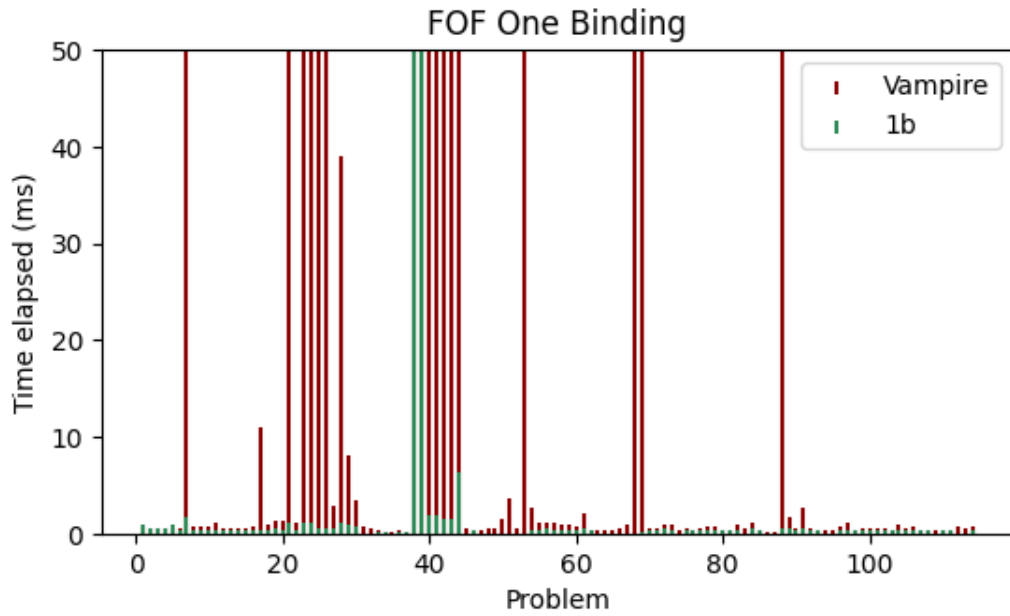


Figura 1.6: Tempo Vampire vs 1b, problemi fof del frammento One Binding

Simulando l'esecuzione dell'algoritmo mus naif su un input del tipo $b_1(t), \dots, b_2(t)$, dove i b_i sono BindingLiterals e t è un termine comune, succede questo:

- Viene effettuata la prima chiamata su $b_1(t)$ e si cercano i letterali unificanti. Il primo letterale che restituisce il SubstitutionTree è $b_1(t)$ (questo dipende anche dall'ordine di inserimento). $b_1(t)$ fa già parte della soluzione e quindi si passa al prossimo letterale. Il letterale successivo è $b_2(t)$ e si aggiunge alla soluzione.
- Viene effettuata la seconda chiamata ricorsiva su $b_2(t)^\sigma$ dove σ è l'unificatore di b_1 e b_2 cioè la sostituzione vuota. Quindi la chiamata ricorsiva viene effettuata su $b_2(t)$.
- Viene creato un nuovo iteratore sul SubstitutionTree che restituisce in ordine b_1 e b_2 che vengono scartati perchè già presenti nella soluzione. In generale ad ogni livello con input b_x vengono scartati x letterali per trovare un nuovo letterale da aggiungere alla soluzione.
- Il ciclo si ripete finchè non si arriva a b_n e si è trovato il mus.

Tutto ciò accade solo nel primo ramo dell'albero di ricorsione. In un input del genere è facile vedere che il mus è unico ed è composto da tutti i letterali, ma l'algoritmo naïf una volta terminata la chiamata, ad esempio su b_1 , il letterale viene bloccato e viene cercato il mus che contiene il letterale successivo, in questo caso b_2 , senza considerare il letterale bloccato (b_1). È evidente che viene fatto molto lavoro inutile. La strategia adottata per ottimizzare questa ricerca è stata quella di verificare se la sostituzione σ è vuota. Nel caso della chiamata su b_1 , la sostituzione con b_2 è vuota quindi si aggiunge b_2 alla soluzione e si continua ad iterare sul SubstitutionTree senza effettuare la chiamata ricorsiva. Il risultato finale è l'algoritmo ?? spiegato nel capitolo precedente.

Questa ottimizzazione ha portato un miglioramento in tutti i problemi One Binding fof e cnf, e come si vedrà in seguito, anche negli altri frammenti. Anche solo con questa ottimizzazione è stato possibile risolvere i problemi 7 e 408. La seconda ottimizzazione è stata l'aggiunta dell'algoritmo ?? groundMus in combinazione con l'ordinamento dell'insieme di implicanti. Ordinando gli implicanti in modo da avere per primi i letterali ground, si induce a ricercare per primi i mus dei letterali ground che sono più semplici da trovare. Ordinando invece gli implicanti in modo da far stare vicini i letterali con termini uguali, si induce l'algoritmo a utilizzare la prima ottimizzazione. L'ottimizzazione del groundMus è l'ottimizzazione più significativa che è stata introdotta, in termini di risparmio di tempo e memoria. È da precisare che comunque i tempi di esecuzione erano già molto bassi prima delle ottimizzazioni, quindi sarebbe da verificare il loro reale impatto su problemi più complessi. Di seguito sono mostrati i grafici dei tempi di esecuzione e memoria di Vampire e dell'algoritmo ottimizzato.

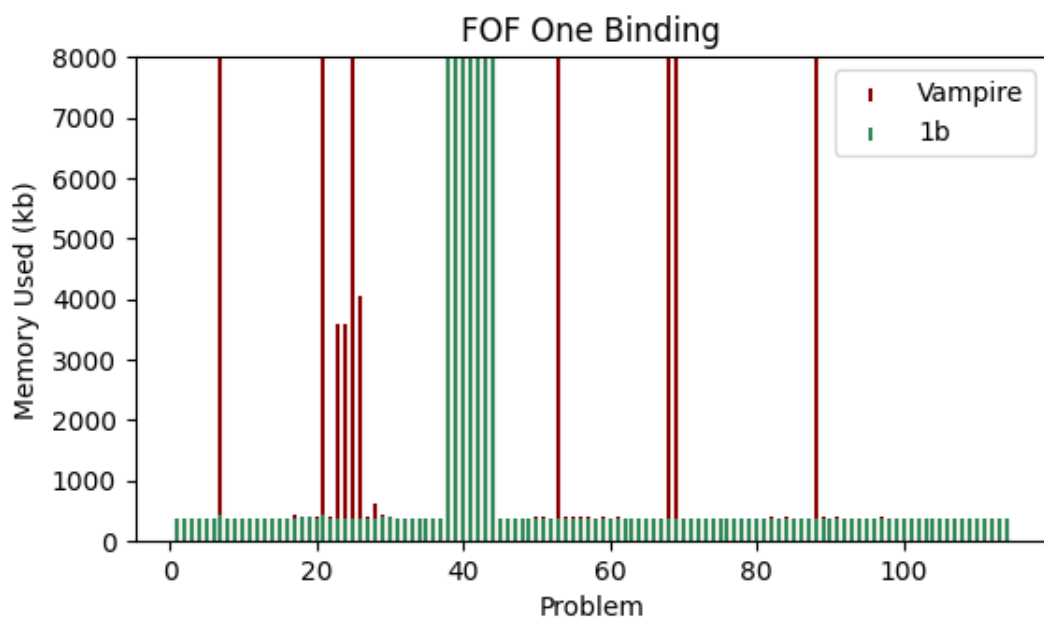


Figura 1.7: Memoria Vampire vs 1b, problemi fof del frammento One Binding

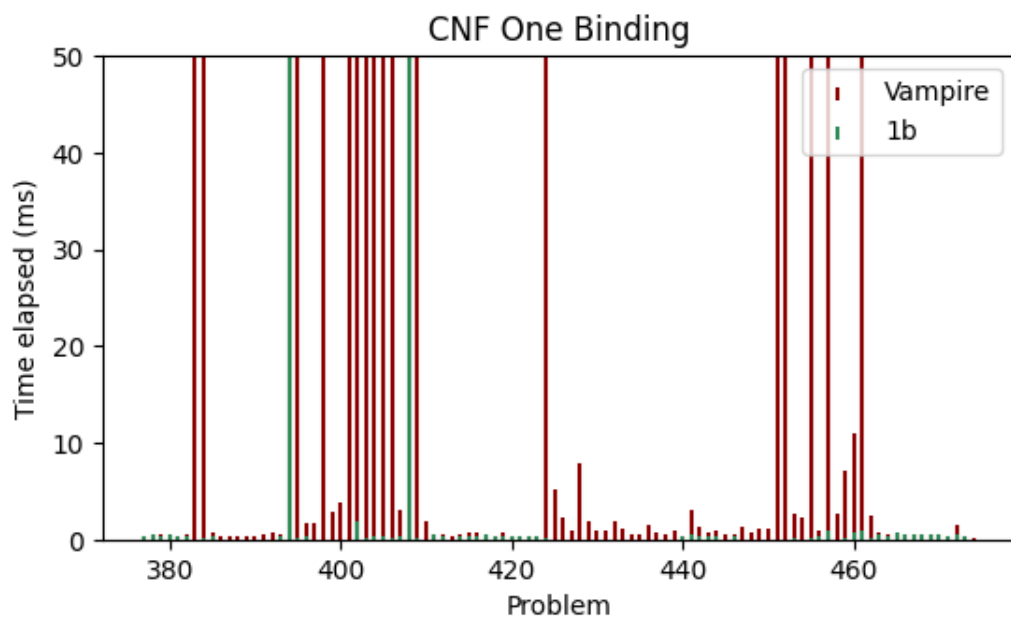


Figura 1.8: Tempo Vampire vs 1b, problemi cnf del frammento One Binding

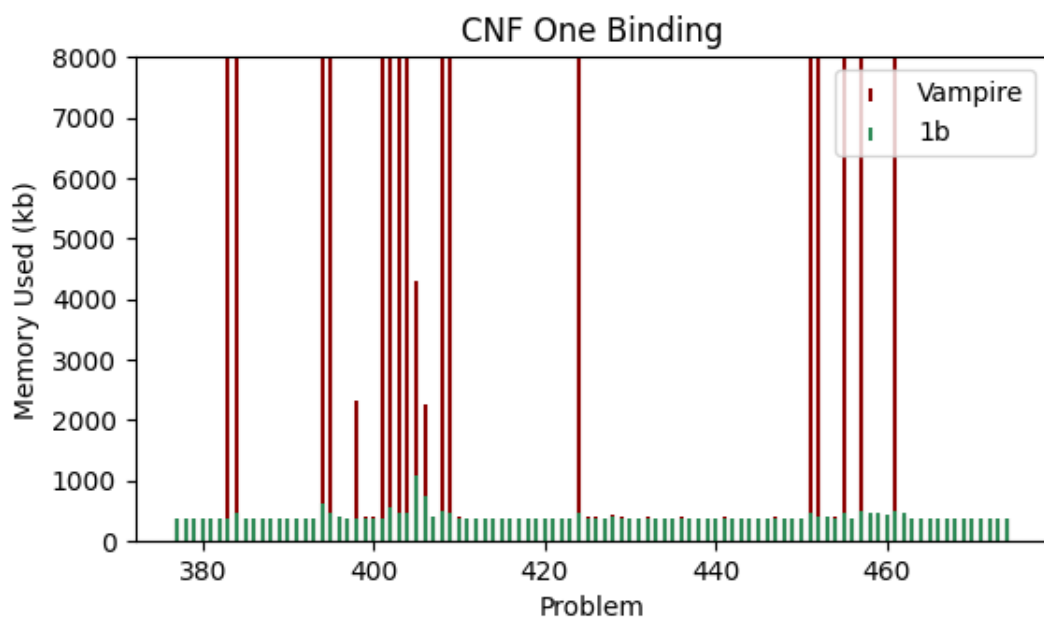


Figura 1.9: Memoria Vampire vs 1b, problemi cnf del frammento One Binding

Conjunctive Binding

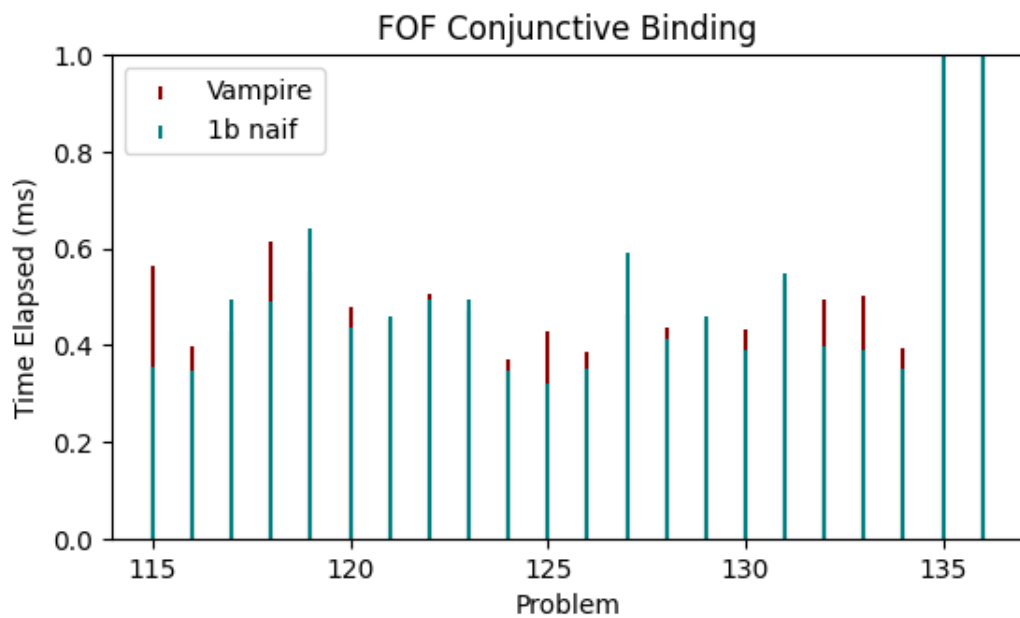


Figura 1.10: Tempo Vampire vs 1b naif, problemi fof del frammento Conjunctive Binding

La maggior parte dei problemi del frammento *Conjunctive Binding* sono risolti in meno di un millisecondo sia da Vampire che dall'algoritmo naif. Gli unici casi interessanti sono il problema 135 e 136 del dominio SYO (Syntactic). Il problema 135 va in timeout sia per Vampire che per l'algoritmo naif e usano rispettivamente 10Gb e 1Gb di memoria. Nel problema 136 invece l'algoritmo naif va in timeout e Vampire lo risolve in appena 400 millisecondi, utilizzando rispettivamente 1Gb e 4Mb di memoria. La prima ottimizzazione è stata sufficiente per risolvere il problema 135 in 200 millisecondi. Con l'aggiunta dell'ottimizzazione groundMus il problema 135 viene risolto in 120 millisecondi. Il problema 136 invece non viene risolto nei limiti di tempo nemmeno con l'aggiunta delle due ottimizzazioni. Il problema 136 è un teorema ciò significa che la sua negazione è insoddisfacibile. L'algoritmo deve quindi dimostrare che ogni insieme di implicanti trovato dal Sat solver è insoddisfacibile. Analizzando le statistiche si è visto che anche se, grazie all'ottimizzazione groundMus, per ogni insieme di implicanti veniva trovata una contraddizione in tempi ragionevoli, ogni nuovo modello proposto dal Sat solver differiva dal precedente per il valore pochi letterali. Il modo in cui si è diminuito il numero di assegnamenti da verificare è stato quello di utilizzare l'ultimo mus trovato per generare la clausola bloccante. Dato un insieme I di letterali e un suo sottoinsieme $U \subseteq I$, si può dimostrare facilmente che se la congiunzione dei letterali di U è insoddisfacibile allora lo è anche la congiunzione dei letterali di I . In gergo questo insieme di letterali insoddisfacibile è detto *unsat core*. Si può notare che l'ultimo mus trovato è proprio un *unsat core* dell'insieme di implicanti anche se non è detto che sia il più piccolo. Con questa terza ottimizzazione in combinazione con le altre due il problema 136 viene risolto in circa 6 secondi utilizzando 20Mb di memoria. Nell'intero set di Benchmark, questo è l'unico problema che, in termini di tempo e memoria, si discosta così tanto da Vampire.

Disjunctive Binding

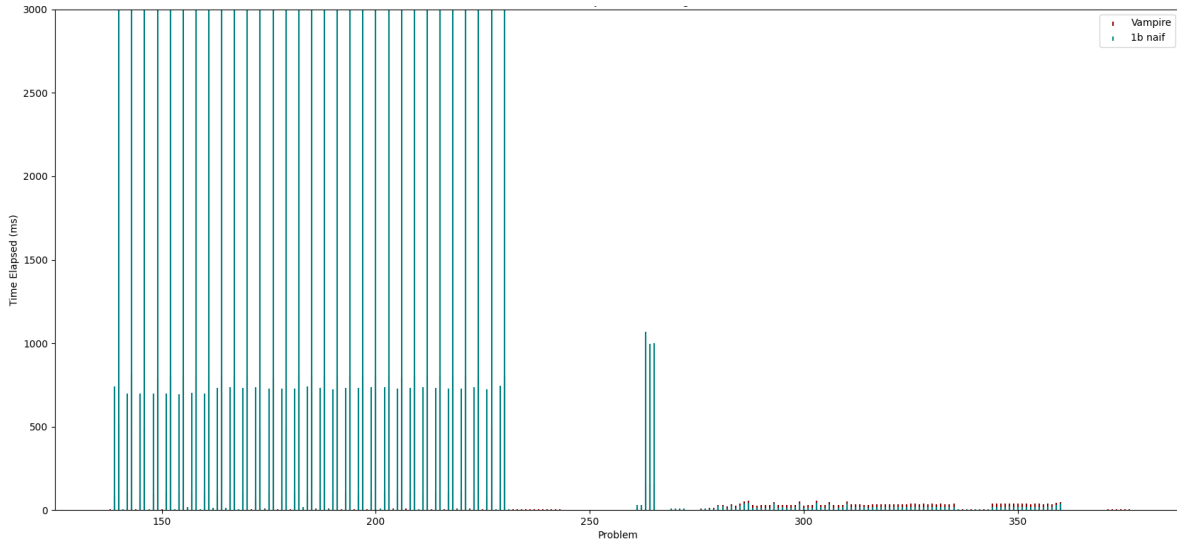


Figura 1.11: Tempo Vampire vs 1b naif, problemi fof del frammento Disjunctive Binding

Nei problemi di Disjunctive Binding negati, emerge un chiaro svantaggio dell'algoritmo naif rispetto alla soluzione offerta da Vampire. Anche con l'applicazione delle ottimizzazioni, si registra un miglioramento, ma non al punto da poter competere con la velocità di Vampire. È da notare che, nonostante i tempi di esecuzione inefficienti dell'algoritmo naif, il consumo di memoria rimane inferiore.

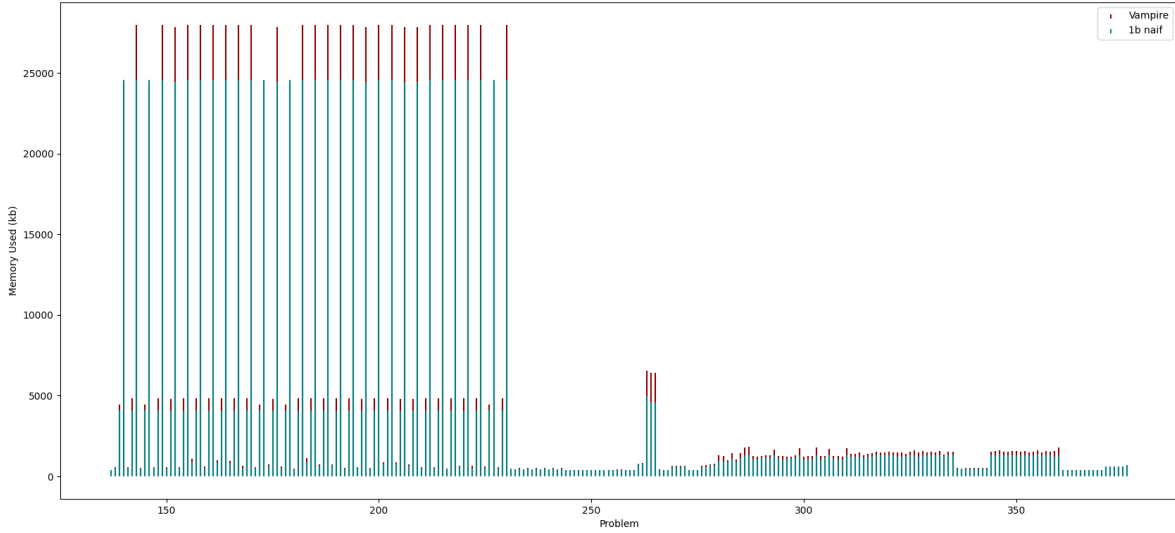


Figura 1.12: Memoria Vampire vs 1b naive, problemi fof del frammento Disjunctive Binding

Considerato che nell'algoritmo naive le uniche operazioni dispendiose in termini di memoria sono la generazione di clausole e la ricerca dei mus, si è ipotizzato che questo poco utilizzo di memoria sia dovuto al fatto che l'albero di ricorsione dell'algoritmo mus sia molto basso. Uno dei motivi per cui può capitare questa situazione è che il problema contenga una prevalenza di letterali ground. L'ipotesi è stata confermata analizzando le statistiche dei problemi e si è visto che il Sat solver in alcuni casi restituiva un insieme di implicanti composto esclusivamente da letterali ground. Di conseguenza l'algoritmo verificava inutilmente la soddisfacibilità dell'insieme trovato rifacendo in modo estremamente meno efficiente ciò che in realtà era già stato fatto dal Sat solver. Per ovviare a questo problema è stato aggiunto un controllo che verifica se l'insieme di implicanti è composto esclusivamente da letterali ground e, in tal caso si restituisce direttamente \top . I problemi Disjunctive sono gli unici che presentano questa caratteristica e questo è dovuto soprattutto al fatto che sono stati generati dalla negazione dei problemi originali. In una formula del tipo $\neg A_1 \vee \dots \vee \neg A_n \vee C$ è sufficiente che una delle formule tra gli assiomi e la congettura sia ground affinché sia possibile avere un insieme di implicanti ground. Nel grafico 1.13 è possibile osservare come quest'ultima ottimizzazione abbia migliorato i tempi di esecuzione, rivelando però, che anche in questo caso, i problemi verificati sono poco significativi. Anche qui nella tabella dei tempi i problemi che fanno uso di questa ottimizzazione sono contrassegnati con una '(g)' affianco tempo.

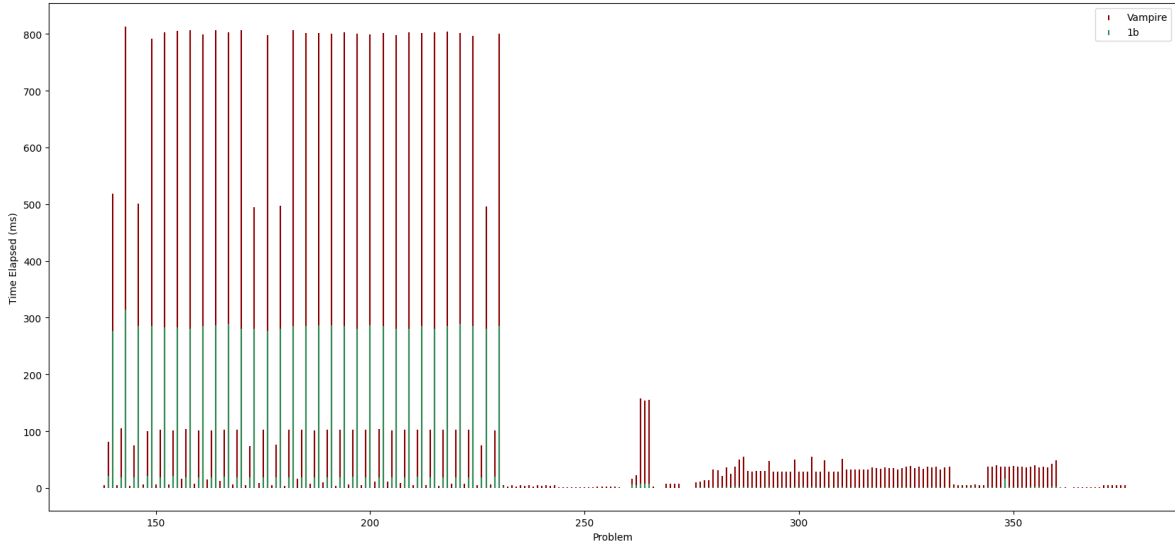


Figura 1.13: Tempo Vampire vs 1b, problemi fof del frammento Disjunctive Binding

1.3 Conclusioni e Possibili Sviluppi futuri

Nonostante i problemi analizzati si siano rilevati poco significativi, i risultati ottenuti sono comunque interessanti e rivelano le potenzialità dell'algoritmo. La sperimentazione ha inoltre riconfermato la netta superiorità dei Sat solver o più in generale di sistemi basati su SMT rispetto ad algoritmi puramente basati su Resolution per la risoluzione di problemi proposizionali. Guardando tutto l'insieme dei risultati si nota che l'algoritmo ottimizzato è in grado di risolvere più problemi rispetto a Vampire e in generale 'vince' in termini di tempo e memoria per la maggior parte dei problemi. Se si considerano il tempo totale per l'esecuzione dei benchmark si vede che l'algoritmo naif impiega circa 1 ora mentre Vampire impiega circa 4.5 ore e l'algoritmo ottimizzato impiega solo 15.6 secondi. Questi tempi così alti sono dovuti ovviamente ai timeout. Considerando i problemi comuni risolti sia da Vampire e l'algoritmo naif si vede che l'algoritmo naif impiega circa 19.5 minuti mentre Vampire impiega solo 4.8 minuti. Questo distacco è dovuto principalmente ai problemi Disjunctive. Se non si considerano i problemi Disjunctive, l'algoritmo naif impiega infatti circa 400 millisecondi contro i 4.3 minuti di Vampire. Il conteggio totale delle vittorie è di 337 a 109 in favore dell'algoritmo naif. Se non si considerano i problemi puramente ground le vittorie dell'algoritmo naif scendono a 273 contro 109 di Vampire. Passando invece all'algoritmo ottimizzato, se si considerano solo i problemi risolti sia da Vampire che dall'algoritmo ottimizzato, Vampire impiega 4.8 minuti mentre l'algoritmo ottimizzato impiega 15.6 secondi. Se si escludono tutti i problemi puramente ground e i problemi Disjunctive risolti con la quarta ottimizzazione, il totale è di 5 secondi per Vampire e 5.9 secondi per l'algoritmo ottimizzato. Di questi 5.9 secondi però, 5.8 sono impiegati per risolvere il problema 136 cioè il 98% del tempo totale. Se non si considera questo problema l'algoritmo ottimizzato impiega 0.1 secondi contro i 4.9 secondi di Vampire. Il conteggio delle vittorie è di 426 a 21 in favore dell'algoritmo ottimizzato. Se si escludono i problemi ground e i problemi risolti con la quarta ottimizzazione, il conteggio scende a 150 a 21.

A parte il problema 136, la differenza di tempo tra Vampire e l'algoritmo ottimizzato è davvero minima, nell'ordine di decimi di millisecondi e non è quindi possibile stabilire quale approccio sia migliore per problemi non proposizionali. Il set di benchmark andrebbe ampliato con problemi più complessi per effettuare un confronto più significativo. Anche generando dei problemi più specifici per il frammento. Moti dei problemi selezionati infatti fanno parte del frammento Bernays-Schönfinkel, quindi senza

funzioni, oppure spesso contengono solo predicati unari o binari. Sarebbe interessante anche effettuare un confronto con altri theorem prover come IProver e E.

Il primo passo da compiere per migliorare l'algoritmo è quella di modificare la procedura di preprocessing. Modificando le funzioni standard di Vampire per la trasformazione in CNF e il Namig si eliminerebbe la necessità di creare i *booleanBinding* arrivando anche a dimezzare il numero di letterali creati. Andrebbe anche studiata la semplificazione updr (Unused definitions and pure predicate removal) e applicata, se possibile, al preprocessing. Andando ad utilizzare direttamente il Sat solver senza passare dall'interfaccia di Vampire si potrebbero sfruttarne appieno le potenzialità. Ad esempio, in questa implementazione quando viene trovato un mus, viene creato un Sat solver da zero e inizializzato con tutte le Sat clausole associate ai letterali del mus. Questo comporta un notevole dispendio di tempo. Una strategia alternativa sarebbe quella di aggiungere le clausole del mus nel corso della visita dell'albero di ricorsione e eliminarle quando non più necessarie. Al momento, nell'interfaccia di Vampire è possibile solo aggiungere clausole ma non rimuoverle ed è per questo che l'algoritmo non è stato implementato in questo modo fin da subito. Per quanto riguarda il problema 136, il motivo per cui Vampire impiega così poco tempo è attribuibile alle euristiche di selezione delle clausole. Andrebbe indagato se e quali euristiche possono essere applicate anche all'algoritmo implementato per guidarne l'esecuzione. L'ottimizzazione groundMus è stata l euristica più significativa che ha permesso di risolvere la maggior parte dei problemi che l'algoritmo naif non riusciva a risolvere. Il problema che così com'è implementato il sorting degli implicanti, l'ordine di priorità di selezione dei letterali ground è dato esclusivamente da come viene data in input la formula. Una strategia sarebbe quella di dare un ordine di priorità in base al numero di volte che un letterale ground compare con polarità opposta in una Sat clausola per massimizzare la probabilità di trovare una contraddizione. Con questa strategia probabilmente si riuscirebbe a risolvere il problema 136 in tempi più ragionevoli. Questa analisi non dovrebbe essere molto diversa da quella fatta da updr. Un altro aspetto del preprocessing è che non è escluso che vi siano dei LiteralBinding ground. Questo accade perchè i booleanBinding vengono creati prima della skolemizzazione mentre i LiteralBinding vengono creati dopo. Si potrebbe aggiungere un'opzione per scomporre i LiteralBinding ground una volta skolemizzati o comunque aggiungere un controllo del tipo che se la sotto formula ha un prefisso esistenziale con polarità positiva (o universale con polarità negativa) allora non crea il booleanBinding. Seguendo questa strada però bisognerebbe aggiungere uno step in più per skolemizzare la FBE e inoltre verificare che il Naming non causi problemi. Non è stato indagato su come questo aspetto possa impattare sulle prestazioni dell'algoritmo. Da un lato la creazione di questi booleanBinding semplifica il lavoro del Sat solver durante la ricerca dell'implicante, dall'altro però, potrebbe appesantire il lavoro che viene fatto all'interno dell'algoritmo. Inoltre questo aspetto potrebbe andare in conflitto con l'ottimizzazione proposta in precedenza per il groundMus. Un altro aspetto critico da migliorare, sempre riguardo la ricerca dei mus, è la ricerca dei letterali unificanti all'interno del SubstitutionTree. In particolare, andrebbe creato un iteratore ad hoc per navigare il SubstitutionTree. In questa implementazione ad ogni livello viene creato un nuovo iteratore che spesso propone letterali già presenti nella soluzione facendo molto lavoro di unificazione inutile.

In conclusione, l'approccio proposto si è dimostrato promettente e vi sono molte strade da esplorare per migliorare l'algoritmo e renderlo più competitivo, tuttavia, sono richieste ulteriori indagini e sviluppi per formulare conclusioni definitive su quale sia l'approccio migliore.