

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia de Software

Modificando o SATPLAN06 com outros métodos de busca

Autor: Mateus Nascimento Nóbrega
Orientador: Dr. Bruno César Ribas

Brasília, DF
2022



Mateus Nascimento Nóbrega

Modificando o SATPLAN06 com outros métodos de busca

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Software da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Software.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Dr. Bruno César Ribas

Brasília, DF

2022

Mateus Nascimento Nóbrega

Modificando o SATPLAN06 com outros métodos de busca

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Software da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Software.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 06 de maio de 2022:

Dr. Bruno César Ribas
Orientador

Dr. John Lenon Cardoso Gardenghi
Convidado 1

Dr. Razer Anthom Nizer Rojas
Montaño
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Resumo

O SATPLAN-BIN, MINISATPLAN e MINISATPLAN2 são propostas de abordagens alternativas à solução de problemas de planejamento baseadas no planejador SATPLAN06, que faz uso de duas estratégias já existentes, que são a de planejamento como satisfatibilidade e a criação de uma estrutura chamada de grafo de planejamento. O MINISATPLAN é uma versão simplificada do SATPLAN06 que remove várias funcionalidades existentes no SATPLAN06 para otimizar o tempo de execução. Diferente da busca linear realizada pelo SATPLAN06, o SATPLAN-BIN utiliza-se de uma busca binária para encontrar o menor nível do grafo de planejamento na qual um problema é satisfazível. O MINISATPLAN2 faz uma busca linear, mas avança de dois em dois níveis, ao invés de um, na procura do menor nível do grafo de planejamento.

Palavras-chave: planejamento, PDDL, satisfatibilidade, inteligência artificial.

Abstract

SATPLAN-BIN, MINISATPLAN and MINISATPLAN2 are proposals of alternative approaches to the existing one found on SATPLAN06, that unifies the planning as satisfiability framework with the planning graph approach found on BLACKBOX. MINISATPLAN is an optimized version of SATPLAN06 that removes many of its existing features in order to improve the execution time. Unlike the linear search found on SATPLAN06, SATPLAN-BIN makes use of a binary search approach to find the lowest planning graph level that solves a problem. MINISATPLAN2 also works using a linear search, but when trying to find the lowest planning graph level, it increments by two, instead of one, found in SATPLAN06's approach.

Key-words: planning, artificial intelligence, satisfiability, PDDL.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação gráfica do grafo de planejamento. (LAMBITE, 2022) . . .	17
Figura 2 – Gráfico da diferença do teste <i>post hoc</i> de Nemenyi	27

Lista de tabelas

Tabela 1 – Regras de junção dos conectivos lógicos	13
Tabela 2 – Valores de $q_{0,05}$ para diferentes valores de K no teste de Nemenyi. . . .	21
Tabela 3 – Média do ranking das quatro abordagens. Cada execução foi ranqueada de 1 a 4, em que a execução mais rápida recebeu o ranking de 1 e a que levou mais tempo recebeu o ranking de 4.	26
Tabela 4 – Domínio: blocks-strips-typed	32
Tabela 5 – Domínio: blocks-strips-untyped	32
Tabela 6 – Domínio: freecell-strips-typed	33
Tabela 7 – Domínio: freecell-strips-untyped	33
Tabela 8 – Domínio: gripper-round-1-strips	33
Tabela 9 – Domínio: logistics-round-1-strips	33
Tabela 10 – Resultado da execução de todos os domínios	44

Lista de abreviaturas e siglas

SAT	Satisfatibilidade/satisfazível
CNF	Conjunctive Normal Form (Forma Normal Conjuntiva)
IPC	International Planning Competition
PDDL	Planning Domain Definition Language
ICAPS	International Conference on Automated Planning and Scheduling
UNSAT	Insatisfazível
SATPLAN	Planning as Satisfiability (Planejamento como satisfatibilidade)
STRIPS	Stanford Research Institute Problem Solver

Sumário

Lista de ilustrações	7
Lista de tabelas	7
1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	10
1.2 Organização	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Satisfatibilidade booleana (SAT)	12
2.2 Planejamento	13
2.3 PDDL	15
2.4 GRAPHPLAN	16
2.5 Planejamento como satisfatibilidade	16
2.6 SATPLAN06	18
2.6.1 Aspectos técnicos	18
2.7 Teste de Friedman	20
2.7.1 Teste <i>post hoc</i> de Nemenyi	20
3 ABORDAGENS	22
3.1 minisatplan	22
3.2 minisatplan2	23
3.3 satplan-bin	24
4 EXPERIMENTOS	26
5 CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS	29
APÊNDICES	31
APÊNDICE A – RESULTADOS DAS INSTÂNCIAS RESOLVIDAS POR TODOS OS PLANEJADORES	32
APÊNDICE B – RESULTADO DA EXECUÇÃO DE TODAS AS INSTÂNCIAS	34

1 Introdução

Um problema de planejamento é definido como um problema em que dado um estado inicial e um conjunto de ações possíveis, é necessário chegar em um dado estado objetivo. Devido a sua definição abstrata, problemas de planejamento podem ser encontrados em várias áreas do nosso cotidiano, principalmente na área de robótica e de veículos não tripulados. Como exemplo, temos o veículo destinado a exploração espacial marciano (TOMPKINS; STENTZ; WETTERGREEN, 2004) que contém um planejador embutido para auxiliá-lo em sua navegação em Marte e o telescópio espacial Hubble (JOHNSTON et al., 1993), que utiliza um planejador para a organização de suas tarefas internas.

Ao longo dos anos, foram propostos vários métodos para a solução de problemas de planejamento, como: a busca progressiva e regressiva no espaço de estados, planejamento como satisfatibilidade, planejamento de ordem parcial, entre outros (RUSSELL; NORVIG, 2020).

Em Kautz e Selman (1992), foi proposta uma abordagem que consiste em tratar um problema de planejamento como um problema de satisfatibilidade. O GRAPHPLAN (BLUM; FURST, 1997) utiliza uma estrutura chamada grafo de planejamento para representação do problema e realiza uma busca nele.

O SATPLAN06 (KAUTZ; SELMAN; HOFFMAN, 2006) é uma abordagem que une as técnicas de planejamento como satisfatibilidade e também, da representação no grafo de planejamento para resolução de problemas de planejamento utilizando o BLACK-BOX (KAUTZ; SELMAN, 1999).

O IPC (International Planning Competition) é uma competição de planejamento organizada pela ICAPS realizada com o objetivo de promover pesquisa na área de planejamento, na qual os participantes criam planejadores que passam por uma série de testes (*benchmarks*) que avaliam o seu desempenho (ICAPS, 2021).

1.1 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é descrever e analisar três novas abordagens à solução de problemas de satisfatibilidade, baseadas na abordagem já existente do SATPLAN06, onde são utilizados busca binária, uma busca linear otimizada e modernização do código para reduzir o tempo de execução dos problemas.

1.2 Organização

Este trabalho está organizado cinco capítulos. No Capítulo 2, são apresentados os conceitos necessários para o entendimento do trabalho, como o problema da satisfatibilidade booleana, o conceito de planejamento e as técnicas de solução de problemas de planejamento relacionadas com a proposta desse trabalho.

No Capítulo 3, são descritas as três abordagens testadas nesse trabalho: o MINISATPLAN, MINISATPLAN2 e SATPLAN-BIN. São explicadas as ideias deles por trás e a implementação dos mesmos.

O Capítulo 4 contém as informações sobre os experimentos e os dados coletados. No Capítulo 5, são levantadas as conclusões derivadas dos dados coletados e as considerações finais em relação ao trabalho. Os Apêndices A e B contêm os dados coletados pelos experimentos descritos no capítulo 4.

2 Referencial Teórico

Esse capítulo aborda os conceitos necessários para a compreensão desse trabalho. A Seção 2.1 introduz o problema da satisfatibilidade Booleana, que é uma das abordagens utilizadas pelo SATPLAN06.

Na Seção 2.2, é explicado o conceito de planejamento e a Seção 2.3 define uma das linguagens de representação de problemas de planejamento, o PDDL. As Seções 2.4 e 2.5 descrevem as abordagens do GRAPHPLAN e planejamento como satisfatibilidade, respectivamente, com o intuito de preparar o leitor para a descrição do SATPLAN06 e seu método de funcionamento, contido na Seção 2.6. A Seção 2.7 aborda os dois métodos estatísticos utilizados na análise dos experimentos, o teste de Friedman e o teste de Nemenyi.

2.1 Satisfatibilidade booleana (SAT)

Em lógica proposicional, fórmulas representam proposições (também conhecidas como sentenças *declarativas*) que podem ser verdadeiras ou falsas, mas não podem ser as duas ao mesmo tempo. “A Faculdade do Gama é localizada na região do Gama.”, “A grama é verde.” e “Brasília é a capital do Brasil” são exemplos de proposições (RIBAS, 2011).

Uma sentença *composta* é a junção de duas ou mais proposições por conectivos lógicos. Os conectivos lógicos são:

- \wedge (e, conjunção);
- \vee (ou, disjunção);
- \neg (negação);
- \Rightarrow (se ... então, implicação);
- \Leftrightarrow (se e somente se, equivalência).

No contexto de lógica proposicional, sentenças simples e compostas são definidas como *fórmulas*, em que:

- Se x é uma fórmula, $\neg x$ também é uma fórmula;
- Se x e y são fórmulas, $(x \wedge y)$, $(x \vee y)$, $(x \Rightarrow y)$ e $(x \Leftrightarrow y)$ também são fórmulas;
- Todas as fórmulas são geradas a partir da aplicação das regras anteriores.

Uma variável proposicional é denotada por uma letra minúscula do alfabeto, como p , q , r ou pela forma x_1, x_2, \dots, x_n e pode receber os valores *verdadeiro* (V ou 1) ou *falso* (F ou 0). Um literal é uma variável x ou a sua negação $\neg x$. Uma cláusula é uma disjunção de literais.

A Tabela 1 define as regras dos conectivos lógicos mencionados acima, dado duas variáveis proposicionais p e q .

p	q	$\neg q$	$p \wedge q$	$p \vee q$	$p \Rightarrow q$	$p \Leftrightarrow q$
V	V	F	V	V	V	V
V	F	V	F	V	F	F
F	V	F	F	V	V	F
F	F	V	F	F	V	V

Tabela 1 – Regras de junção dos conectivos lógicos

Uma fórmula está na Forma Normal Conjuntiva (CNF - *Conjunctive Normal Form*) se ela é formada por uma conjunção de cláusulas. Como exemplo:

- A fórmula $(x \vee y) \wedge (\neg x \vee y \vee z)$ está na CNF;
- A fórmula $(x \vee y \wedge \neg z) \vee (\neg x \vee y)$ não está na CNF.

Uma fórmula é satisfazível se existe valores para suas variáveis de forma que o resultado dela seja verdadeiro. O problema da satisfatibilidade booleana determina se uma fórmula booleana é satisfazível. Como exemplo:

- A fórmula $(x \vee y) \wedge (\neg x \vee y \vee z)$ é satisfazível, pois x , y e z podem receber F , V e F , tornando a fórmula verdadeira;
- A fórmula $(x) \wedge (\neg x)$ não é satisfazível, pois não há valor para x que torna a fórmula verdadeira.

Uma aplicação que resolve um problema de satisfatibilidade é chamado de resolvidor SAT. O **siege** é um resolvidor SAT desenvolvido na *Simon Fraser University* em 2003 que possui fácil usabilidade e apresenta bom desempenho (RYAN, 2022).

2.2 Planejamento

A área de planejamento automático é um ramo da inteligência artificial que trabalha com a geração de uma sequência de ações necessárias para resolver um determinado problema. De acordo com Weld (1999), um problema de planejamento é definido como o problema em que dado um estado inicial, um conjunto de ações e um estado desejado

Estado inicial: *Lucas dentro de casa*

Estado final: *Lucas na universidade*

Ação: *Andar até o carro*

Pré-condições: *Lucas dentro de casa*

Efeitos: \neg *Lucas dentro de casa* \wedge *Lucas dentro do carro*

Ação: *Dirigir até a universidade*

Pré-condições: *Lucas dentro do carro*

Efeitos: \neg *Lucas dentro do carro* \wedge *Lucas dentro da universidade*

Exemplo 1 – Representação do problema utilizando lógica proposicional

final, é necessário encontrar a sequência de ações que permitam a situação desejada ser atingida a partir do estado inicial.

Um problema de planejamento, baseado no primeiro problema de planejamento da história (LIFSCHITZ et al., 2001), pode ser enunciado da seguinte maneira:

Lucas está no quarto da casa dele e deseja ir à Universidade de Brasília. O meu carro está na garagem da minha casa. A solução para esse problema é andar até o carro e dirigir até a universidade.

A partir do enunciado acima, é possível identificar os principais elementos que compõem um problema de planejamento. O estado inicial é definido com a proposição *Lucas dentro de casa*, as ações do problema são as proposições *Andar até o carro* e *Dirigir até a universidade*, e o estado objetivo é definido com a proposição *Lucas na universidade*.

O STRIPS (FIKES; NILSSON, 1971) é um sistema de planejamento onde uma ação é definida a partir das suas pré-condições e efeitos. As pré-condições definem o que deve ser verdadeiro para a ação ser executada e os efeitos indicam como o estado atual do mundo se altera caso a ação seja aplicada. Em problemas STRIPS, as proposições que não estão listadas em um estado são falsas.

Uma representação do problema anterior, utilizando lógica proposicional, pode ser vista no Exemplo 1.

Um sistema que resolve um problema de planejamento é chamado de *planejador* e a sequência de ações necessárias para resolver o problema é denominada de *plano*. O planejador receberá a descrição do problema em alguma linguagem, como por exemplo, PDDL, e retornará um plano para esse problema.

2.3 PDDL

Uma das formas de modelar um problema de planejamento é utilizando a linguagem PDDL (*Planning Domain Definition Language*), criada inicialmente com o intuito de ser utilizada em competições de planejamento para comparações de desempenho entre os planejadores e padronização dos problemas a serem testados (GHALLAB et al., 1998). Um problema em PDDL é composto de ações, predicados, objetos, o estado inicial e o estado a ser alcançado, em que:

- As ações mudam um determinado estado. Recebem parâmetros, pré-condições para sua execução e os seus efeitos;
- Os objetos são as entidades que fazem parte de um estado;
- Os predicados são afirmações feitas em cima de um objeto que podem ser verdadeiras ou falsas.

Um problema de planejamento descrito em PDDL é dividido em duas partes que são um arquivo de domínio e um arquivo do problema, onde:

- O arquivo de domínio é responsável pela descrição das características gerais do problema. A declaração dos objetos, predicados e ações que poderão ser usados no problema são definidos aqui;
- O arquivo do problema é uma instância do domínio que foi definido. Aqui é definido o estado inicial do problema e o estado na qual se deseja chegar.

```
(define (domain lucas-university)
  (:predicates
    (at-home ?p)
    (at-car ?p)
    (at-university ?p))
  (:action walk-to-car
    :parameters (?p)
    :precondition (and (at-home ?p))
    :effect (and (not (at-home ?p)) (at-car ?p)))
  (:action drive-to-uni
    :parameters (?p)
    :precondition (and (at-car ?p))
    :effect (and (not (at-car ?p)) (at-university ?p))))
```

Exemplo 2.2 – Exemplo de domínio no PDDL

Os exemplos 2.2 e 2.3 mostram como o problema descrito no exemplo 2.1 é modelado usando PDDL. No arquivo do domínio, as proposições e ações são definidas e no arquivo do problema, o domínio é referenciado e os estados iniciais e finais são definidos.

```
(define (problem lucas-university-0)
  (:domain lucas-university)
  (:objects lucas)
  (:init
    (at-home lucas))
  (:goal (at-university lucas)))
```

Exemplo 2.3 – Exemplo de problema no PDDL

2.4 GRAPHPLAN

Em [Blum e Furst \(1997\)](#), foi apresentada uma abordagem para a solução de problemas de planejamento chamada *GRAPHPLAN* que consiste em representar o problema em uma estrutura chamada de grafo de planejamento (*planning graph*). O grafo de planejamento é um grafo direcionado, separado em camadas (ou níveis), em que:

- Existem dois tipos de nós e camadas: a camada das proposições, que contém nós de proposição, e a camada das ações, que contém nós de ação;
- Existem três tipos de arestas que conectam os níveis: as arestas de pré-condição, de adição e de remoção, onde:
 - As arestas de pré-condição conectam proposições a ações e indicam que uma proposição é um pré-requisito para uma ação;
 - As arestas de adição conectam uma ação a uma proposição e indicam que uma ação é executado sobre uma proposição;
 - As arestas de remoção conectam uma ação a uma proposição e indicam que os efeitos de uma ação são revertidos sobre uma proposição.
- O primeiro nível do grafo de planejamento é um nível de proposições, que indica quais são as proposições verdadeiras no tempo 1, o segundo nível representa as ações executáveis no tempo 1. Os níveis alternam, ou seja: o terceiro nível indicam as proposições verdadeiras no tempo 2, o quarto nível representa as ações executáveis no tempo 2 e assim em diante.

A Figura 1 mostra uma representação gráfica do grafo, onde os círculos em azul representam os nós de proposição e os quadrados em cinza representam os nós de ação.

2.5 Planejamento como satisfatibilidade

Uma das formas de resolver um problema de planejamento é utilizando o planejador SATPLAN ([KAUTZ; SELMAN, 1992](#)), em que sua principal abordagem consiste em

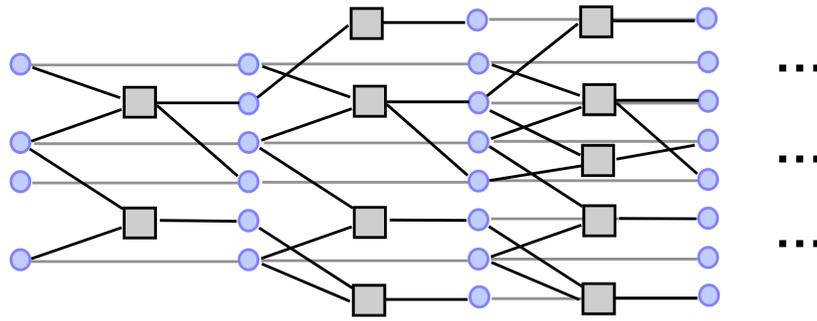


Figura 1 – Representação gráfica do grafo de planejamento. (LAMBITE, 2022)

receber um problema de planejamento e transformá-lo em um problema de satisfatibilidade. De acordo com Russell e Norvig (2020), a tradução da descrição de um problema para sua forma proposicional ocorre da seguinte forma:

- Transformação das ações em proposições: para cada ação, são formadas proposições através da utilização de constantes para cada um dos parâmetros. Ou seja, para uma ação $Abrir(porta, casa)$, teremos proposições para cada combinação de porta e casa;
- Adição de fórmulas que indicam que duas ações não podem ocorrer ao mesmo tempo. Por exemplo: $\neg(Ação1 \wedge Ação2)$;
- Adição de fórmulas que indicam pré-condições: Para uma ação A , é adicionada uma fórmula $A \Rightarrow PréCondição(A)$. Ou seja, se A ocorreu, isso implica que sua pré-condição também ocorreu;
- Definição do estado inicial: Para um predicado P no estado inicial, defina-o como verdadeiro. Caso não esteja no estado inicial, defina-o como falso ($\neg P$);
- Transformação do objetivo em uma proposição;
- Adição de fórmulas que representam estados posteriores.

Em Kautz e Selman (1999) foi apresentada uma nova versão do SATPLAN chamada BLACKBOX, que conecta as técnicas utilizadas no GRAPHPLAN e no SATPLAN que são a utilização de um grafo de planejamento e a conversão do problema para um problema de satisfatibilidade.

2.6 SATPLAN06

Em 2006, foi lançada uma versão do SATPLAN, chamada de SATPLAN06 (KAUTZ; SELMAN; HOFFMAN, 2006) que utiliza o BLACKBOX no processo de encontrar a solução do problema. Para resolver um problema de planejamento, ele:

- Constrói um grafo de planejamento que se estende até um tamanho (também chamado de nível) n ;
- Transforma as restrições decorrentes do grafo de planejamento em um conjunto de cláusulas;
- Utiliza um resolvidor SAT na fórmula gerada;
- Caso o resultado tenha retornado insatisfazível (UNSAT), incrementa n e repete o processo;
- Caso o resultado tenha sido satisfazível (SAT), ele faz a conversão da solução em satisfatibilidade para o formato original.

O problema de planejamento é PSPACE-completo (BYLANDER, 1991), mas o problema da satisfatibilidade booleana é NP-completo (COOK, 1971), fazendo com que o processo da criação do grafo de planejamento tenha aumento exponencial do tempo necessário para a solução.

2.6.1 Aspectos técnicos

O SATPLAN06 é escrito em C++ e o algoritmo do BLACKBOX é escrito em C e o código das duas soluções é encontrada na mesma pasta. Para a execução do SATPLAN06, após a compilação, são gerados dois binários, o do BLACKBOX chama-se `bb` e o do SATPLAN06 é chamado de `satplan`. O algoritmo 1 demonstra como o SATPLAN06 é executado.

Em relação à execução do algoritmo, o SATPLAN06:

- Recebe dois arquivos `.pddl` de entrada do usuário, um deles é o arquivo de domínio e o outro é o da instância a ser resolvida;
- Caso não haja nenhum problema na leitura dos dois arquivos, na linha 3, ele invoca o binário do BLACKBOX através de uma chamada de sistema, que recebe o tamanho do grafo de planejamento e também os arquivos de domínio e instância, os quais serão processados por ele;

Algoritmo 1 Funcionamento do SATPLAN06

Entrada: Um arquivo de domínio `dominio.pddl` e o arquivo do problema `problema.pddl`

Saída: Um arquivo `problema.soln.pddl` com a solução, caso o problema for satisfazível

```

1: maxLevel ← 1000
2: for i = 0, i < maxLevel, i = i + 1 do
3:   statusCNF ← chamaBlackBox("dominio.pddl", "problema.pddl", i)    ▷
   Retorna verdadeiro se conseguiu gerar o arquivo CNF
4:   if statusCNF then
5:     statusSAT ← chamaSATSolver("CNF_abcde")
6:
7:     if statusCNF is SAT then
8:       solucao ← constroiSolucaoPDDL("siege.results")
9:       criaArquivoSolucao("original.PID")
10:    end if
11:  end if
12: end for

```

- Se o nível passado para o BLACKBOX não for suficiente para gerar o grafo de planejamento (verificado na linha 4), o nível é aumentado em 1 e o laço recomeça;
- Caso o grafo de planejamento consiga ser gerado, a representação CNF do grafo é gerada pelo BLACKBOX (um arquivo com nome prefixado `CNF_` e sucedido de caracteres aleatórios) e é mandada para um resolvidor SAT na linha 5 (por padrão para o resolvidor `siege`), que retorna um arquivo chamado `siege.results` com a solução caso o resultado seja satisfazível;
- Como é necessário converter a solução em satisfatibilidade em uma solução no formato PDDL, é feita uma última chamada ao BLACKBOX na linha 8, que recebe essa solução e faz a conversão, escrevendo outro arquivo temporário chamado `original.PID`, onde PID é o identificador do processo que está executando o SATPLAN06;
- É criado um arquivo final para a solução com nome `problema.pddl.soln` e o conteúdo do arquivo `original.PID` é copiado para ele. O arquivo temporário é excluído após a cópia.

2.7 Teste de Friedman

O teste de Friedman (DEMSAR, 2006) é um teste estatístico que analisa a existência de diferença estatisticamente significativa entre K modelos sobre N conjuntos de dados, que se baseia na comparação do ranking de desempenho de um modelo. Para cada conjunto de dados, cada um dos modelos avaliados recebe uma posição, ordenado do melhor para o pior (de 1 a K). Em caso de empate, são atribuídos valores médios da posição (RIBAS, 2015).

Após o ranqueamento, o *rank* médio é determinado para cada um dos K modelos. Seja R_{ij} a posição do modelo j , ($1 \leq j \leq K$), para um conjunto de dados i , ($1 \leq i \leq N$), o *rank* médio é definido conforme a equação 2.1.

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^N R_{ij}}{N} \quad (2.1)$$

Sob a hipótese nula de que o desempenho de todos os modelos são equivalentes, e que consequentemente seus valores de *rank* médio são iguais, a estatística de Friedman é definida pela equação 2.2.

$$\chi_F^2 = \frac{12N}{K(K+1)} \left[\sum_{j=1}^K R_j^2 - \frac{K(K+1)^2}{4} \right] \quad (2.2)$$

Em Iman e Davenport (1979) foi proposta uma versão menos conservadora do teste de Friedman, na qual é utilizada a distribuição F com $(K-1)$ e $(K-1)(N-1)$ graus de liberdade. O cálculo dessa versão é apresentado na equação 2.3.

$$F_f = \frac{(N-1)\chi_F^2}{N(K-1)\chi_F^2} \quad (2.3)$$

Se a hipótese nula é rejeitada pelo teste, isso implica que existe diferença significativa de desempenho.

2.7.1 Teste *post hoc* de Nemenyi

No cenário da hipótese nula ser rejeitada, o teste de Friedman não é capaz de indicar quais modelos apresentam diferença. O teste *post hoc* de Nemenyi (1963) é um pós-teste utilizado para detectar quais diferenças entre modelos são significativas. A eficácia de dois métodos é significativamente diferente se os seus respectivos *rank*s médios diferirem por pelo menos um valor de diferença crítico (CD), mostrado na equação 2.4.

$$CD = q_\alpha \sqrt{\frac{K(K+1)}{6N}} \quad (2.4)$$

A tabela 2 apresenta os valores de q_α , dado $\alpha = 0,05$, para diferentes quantidades de métodos.

K	2	3	4	5	6	7	8	9	10
q_α	1,960	2,343	2,569	2,728	2,850	2,949	3,031	3,102	3,164

Tabela 2 – Valores de $q_{0,05}$ para diferentes valores de K no teste de Nemenyi.

3 Abordagens

Um dos fatores que faz com que alguns problemas no SATPLAN06 acabem demorando minutos ou as vezes até horas para serem resolvidos é a forma em que ele faz a busca por nível. Quando o algoritmo tenta resolver o problema fazendo a chamada para o BLACKBOX num determinado nível n , se a solução para esse nível não for encontrada, o SATPLAN06 incrementa n e realiza outra chamada para o BLACKBOX, consequentemente recriando o grafo de planejamento todas as vezes em que o problema não conseguir ser resolvido.

As abordagens propostas nesta seção procuram reduzir o custo computacional necessário para achar a solução, através da simplificação e modernização do código atual do SATPLAN06 e de abordagens alternativas para a busca do menor nível necessário, que procuram reduzir o número de reconstruções do grafo de planejamento.

As três abordagens foram implementadas em C++17, devido à familiaridade do autor com a linguagem e o fato do SATPLAN06 ter sido escrito nela também, que permite reutilização do código já existente.

Nos algoritmos que as abordagens irão referenciar, a função `isSat` encapsula o processo de verificação de satisfatibilidade que o SATPLAN06 faz, ou seja, ela faz a chamada para o BLACKBOX e para o resolvidor SAT, retornando se o problema é satisfazível naquele nível.

Nos Algoritmos 2 e 3, a variável `maxLevel` recebe o valor de 1000 pelo fato da busca no SATPLAN06 utilizar esse mesmo limite em sua implementação.

3.1 minisatplan

Inicialmente escrito como base para os testes de outras abordagens, o `minisatplan` é uma versão simplificada do SATPLAN06 que faz a utilização de apenas um resolvidor SAT, o `siege` e limita a entrada do usuário a apenas o arquivo de domínio e de problema. O Algoritmo 2 demonstra o seu funcionamento.

Algoritmo 2 minisatplan

Entrada: Um arquivo de domínio `dominio.pddl` e o arquivo do problema `problema.pddl`

Saída: Retorna SAT junto ao nível, se o problema for satisfazível e UNSAT caso não seja satisfazível

```

1:  $maxLevel \leftarrow 1000$ 
2: for  $i = 0, i < maxLevel, i = i + 1$  do
3:    $status \leftarrow isSat("dominio.pddl", "problema.pddl", i)$ 
4:   if  $status$  is SAT then
5:     return (SAT,  $i$ )
6:   end if
7: end for
8: return UNSAT

```

3.2 minisatplan2

Similar ao `minisatplan`, descrito na Seção 3.1, o `minisatplan2` é uma abordagem que, diferente do `minisatplan` e do SATPLAN06, quando um determinado nível n não é o suficiente para gerar o grafo de planejamento, ele incrementará n em 2, ao invés de 1. Se o nível $(n + 2)$ for SAT, o `minisatplan2` verificará se o nível anterior $(n + 1)$ também é satisfazível. No caso do nível anterior ser satisfazível, ele irá retorná-lo. O Algoritmo 3 demonstra seu funcionamento.

Algoritmo 3 minisatplan2

Entrada: Um arquivo de domínio `dominio.pddl` e o arquivo do problema `problema.pddl`

Saída: Retorna SAT junto ao nível, se o problema for satisfazível e UNSAT caso não seja satisfazível

```

1:  $maxLevel \leftarrow 1000$ 
2: for  $i = 0, i < maxLevel, i = i + 2$  do
3:    $status \leftarrow isSat("dominio.pddl", "problema.pddl", i)$ 
4:   if  $status$  is SAT then
5:      $isPreviousLevelSat \leftarrow isSat("dominio.pddl", "problema.pddl", i-1)$ 
6:     if  $isPreviousLevelSat$  is SAT then
7:       return (SAT,  $i - 1$ )
8:     end if
9:     return (SAT,  $i$ )
10:  end if
11: end for
12: return UNSAT

```

Devido ao avanço ter sido realizado de dois em dois níveis, os níveis nos quais o resultado possivelmente for UNSAT, não seria feita a chamada para o BLACKBOX.

3.3 satplan-bin

O `satplan-bin` é uma abordagem que faz a utilização de uma busca binária no intervalo de níveis possíveis. Ele primeiramente tenta definir o limite superior e inferior para a busca binária e assim aplicar a busca no intervalo que for encontrado. Os algoritmos 4 e 5 demonstram como método de busca é realizado.

A função `EncontraIntervaloDeBusca` retorna o primeiro nível em que a solução for satisfazível e enquanto ele não for satisfazível, será feita outra chamada para o `BLACKBOX` multiplicando o nível por 5.

O número 5 foi escolhido pelo fato de sua exponenciação providenciar intervalos razoáveis para busca (como exemplo: $[5, 25]$ e $[25, 125]$).

Isso é feito para definir os limites inferiores e superiores da busca binária que será realizada, pois se um nível L é satisfazível, pela ordem de execução da função, $L/5$ não é satisfazível.

Algoritmo 4 Definição do intervalo de busca

Entrada: Um arquivo de domínio `dominio.pddl` e o arquivo do problema `problema.pddl`

Saída: A função `EncontraIntervaloDeBusca` retorna o limite superior do intervalo da busca binária.

```

1: function ENCONTRAINTERVALODEBUSCA(dominio, problema)
2:    $N \leftarrow 1$ 
3:    $status \leftarrow \text{isSat}(N, \text{"dominio.pddl"}, \text{"problema.pddl"})$ 
4:   while  $status$  is UNSAT and  $N \leq 1000$  do
5:      $N \leftarrow N \times 5$ 
6:      $status \leftarrow \text{isSat}(N, \text{"dominio.pddl"}, \text{"problema.pddl"})$ 
7:   end while
8:   if  $N \geq 1000$  then
9:     return ERROR
10:  end if
11:  return  $N$ 
12: end function

```

Com os limites definidos, a ideia principal por trás da busca é que toda vez que se encontra um nível na qual o BLACKBOX consiga solucionar o problema, é reduzido na metade o espaço da busca pelo menor nível satisfazível a cada iteração do laço `while`, que conseqüentemente reduz consideravelmente a quantidade de chamadas feitas para o BLACKBOX, diminuindo o número de vezes que o grafo de planejamento é recriado.

Algoritmo 5 *satplan-bin*

Entrada: Um arquivo de domínio `dominio.pddl` e o arquivo do problema `problema.pddl`

Saída: Retorna SAT junto ao nível, se o problema for satisfazível e UNSAT caso não seja satisfazível

```
1: function BUSCABINARIA(dominio, problema)
2:   intervaloBase  $\leftarrow$  EncontraIntervaloDeBusca(dominio, problema)
3:   if intervaloBase = ERROR then
4:     return ERROR
5:   end if
6:    $L \leftarrow$  intervaloBase/5 ▷ Como R é SAT, basta dividir por 5
7:    $R \leftarrow$  intervaloBase
8:   while  $L < R$  do
9:      $M \leftarrow (L + R)/2$ 
10:    status  $\leftarrow$  isSat("dominio.pddl", "problema.pddl", M)
11:    if status is SAT then
12:       $R \leftarrow M$ 
13:    else
14:       $L \leftarrow M + 1$ 
15:    end if
16:  end while
17:  return (SAT,  $L$ )
18: end function
```

4 Experimentos

Para avaliação do desempenho das abordagens mencionadas neste trabalho, foram utilizados os mesmos domínios e problemas dos testes realizados no IPC ¹. Foi criada uma aplicação capaz de rodar as três abordagens descritas. Todos os planejadores utilizaram o resolvidor SAT `siege`. As execuções feitas no SATPLAN06 utilizaram a configuração padrão.

Os experimentos foram executados em máquinas com o processador AMD Ryzen 7 2700 de 8 núcleos com 16 GB de memória RAM. Foi criada uma ferramenta de testes, escrita em Python, que permite executar todas as instâncias de um domínio utilizando o planejador escolhido. Quando a ferramenta terminava sua execução, ela retornava para cada instância: a quantidade de tempo que a abordagem necessitou para resolvê-la e o status da execução (SAT, UNSAT ou erro).

As Tabelas de 4 a 9 do Apêndice A, mostram o tempo de execução das instâncias em que todas as abordagens resolveram. O tempo necessário para resolver cada instância é descrito em milissegundos. A tabela 10 do Apêndice B mostra o resultado de todas as execuções feitas pelas quatro abordagens.

Cada instância recebeu um limite de tempo de uma hora para ser resolvida, caso não fosse resolvida nesse intervalo de tempo, a ferramenta retornaria TLE (*Time Limit Exceeded*). As execuções que o planejador não conseguiu resolver, por motivos de: erros de memória, problemas no resolvidor SAT, entre outros., o resultado foi indicado com um traço (-).

	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
Média	2,923611	1,614583	2,930556	2,531250

Tabela 3 – Média do ranking das quatro abordagens. Cada execução foi ranqueada de 1 a 4, em que a execução mais rápida recebeu o ranking de 1 e a que levou mais tempo recebeu o ranking de 4.

Para descobrir se há diferença estatística significativa foi utilizado o teste de Friedman (DEMSAR, 2006). A análise pelo teste de Friedman é realizada por meio do ranking de desempenho das execuções, ou seja: para todas os N conjunto de dados, cada execução é ranqueada e uma média para as K configurações são calculadas. (MONTAÑO; RIBAS, 2017).

Evidenciada a diferença estatística, foi aplicado o teste *post hoc* de Nemenyi (1963) para mostrá-la. De acordo com o teste de Nemenyi, a eficácia de duas abordagens contém

¹ Disponível em: <<https://github.com/potassco/pddl-instances>>

diferença significativa se a média dos seus rankings diferem, no mínimo, por um valor crítico de diferença.

A Tabela 3 mostra a média dos rankings de execução das instâncias que todos os planejadores resolveram.

Aplicando o teste de Friedman com $K = 4$, $N = 144$ e nível de significância de 5%, os seguintes resultados são obtidos: $F_f = 42,70293009$ e valor- $p = 0,00001$. Os resultados indicam a existência de diferença estatística significativa.

O teste de Nemenyi foi aplicado com $CD = 0,3908657714$ e $q_{0,05} = 2,569032073$. A Figura 2 mostra o diagrama da diferença resultante, onde o eixo horizontal representa a média dos rankings das abordagens mostrada na Tabela 3. As linhas abaixo do eixo horizontal conectam configurações que não contém diferença estatística significativa com 95% de confiança. A diferença crítica é mostrada acima do eixo horizontal.

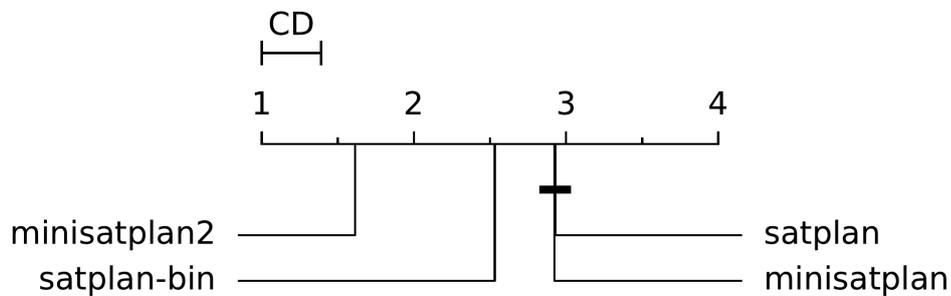


Figura 2 – Gráfico da diferença do teste *post hoc* de Nemenyi

A partir do gráfico da diferença do teste *post hoc* de Nemenyi, mostrado na Figura 2, é possível notar que, apesar da otimização realizada no MINISATPLAN, ele não contém diferença estatística significativa em comparação ao SATPLAN06. O MINISATPLAN2 foi a abordagem que teve o melhor desempenho. O SATPLAN-BIN obteve um resultado satisfatório.

5 Conclusão

O SATPLAN-BIN, apesar de não ter sido a abordagem com o melhor desempenho, os resultados obtidos foram satisfatórios e há espaço para o desenvolvimento de pesquisas futuras. O MINISATPLAN2 obteve os melhores resultados, podendo ser utilizado como alternativa com melhor desempenho comparado ao SATPLAN06.

Devido ao tempo disponibilizado para a realização do trabalho, ficou impossibilitada a realização de testes em mais domínios que poderiam proporcionar melhores resultados.

Apesar disso, o SATPLAN-BIN e o MINISATPLAN2 consolidaram-se como alternativas viáveis ao SATPLAN06.

Para trabalhos futuros, é possível realizar testes em outros fatores multiplicativos para a definição do intervalo de busca no SATPLAN-BIN. Há a possibilidade de realizar estudos na paralelização das abordagens: no MINISATPLAN2, é possível executar a verificação de dois níveis em paralelo. No SATPLAN-BIN, é possível paralelizar a verificação de satisfatibilidade de um determinado intervalo.

Referências

- BLUM, A. L.; FURST, M. L. Fast planning through planning graph analysis. *Artif. Intell.*, Elsevier Science Publishers Ltd., GBR, v. 90, n. 1–2, p. 281–300, feb 1997. ISSN 0004-3702. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(96\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(96)00047-1)>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 16.
- BYLANDER, T. Complexity results for planning. In: *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 1*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1991. (IJCAI'91), p. 274–279. ISBN 1558601600. Citado na página 18.
- COOK, S. A. The complexity of theorem-proving procedures. In: *Proceedings of the Third Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1971. (STOC '71), p. 151–158. ISBN 9781450374644. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/800157.805047>>. Citado na página 18.
- DEMSAR, J. Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. *Journal of Machine Learning Research*, v. 7, p. 1–30, 01 2006. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 26.
- FIKES, R. E.; NILSSON, N. J. Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, v. 2, n. 3, p. 189–208, 1971. ISSN 0004-3702. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004370271900105>>. Citado na página 14.
- GHALLAB, M. et al. Pddl - the planning domain definition language. 08 1998. Citado na página 15.
- ICAPS. *Competitions*. 2021. Disponível em: <<https://www.icaps-conference.org/competitions/>>. Acesso em: 13 de novembro de 2021. Citado na página 10.
- IMAN, R. L.; DAVENPORT, J. M. Approximations of the critical region of the friedman statistic. 1 1979. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/6143610>>. Citado na página 20.
- JOHNSTON, M. et al. Improving the observing efficiency of hubble space telescope. *AIAA Space Programs and Technologies Conference and Exhibit*, 01 1993. Citado na página 10.
- KAUTZ, H.; SELMAN, B. Planning as satisfiability. *Proceedings of the 10th European Conference on Artificial Intelligence*, p. 359–363, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 16.
- KAUTZ, H.; SELMAN, B. Unifying sat-based and graph-based planning. *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 1*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, p. 318–325, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 17.
- KAUTZ, H.; SELMAN, B.; HOFFMAN, J. Satplan: Planning as satisfiability. *21st Conference on Artificial Intelligence (AAAI-06)*, Boston, MA, USA, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 18.

- LAMBITE, J. L. *CS2710: Graphplan*. 2022. Disponível em: <<https://people.cs.pitt.edu/~wiebe/courses/CS2710/lectures/graphplan.pdf>>. Acesso em: 10 de maio de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 17.
- LIFSCHITZ, V. et al. Getting to the airport: The oldest planning problem in ai. 10 2001. Citado na página 14.
- MONTAÑO, R.; RIBAS, B. Planning as mixed-horn formulas satisfiability. In: . [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 26.
- NEMENYI, P. Distribution-free multiple comparisons. *Ph.D. thesis*, 01 1963. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 26.
- RIBAS, B. *Satisfatibilidade não-clausal restrita às variáveis de entrada*. Tese (Doutorado), 04 2011. Citado na página 12.
- RIBAS, B. *Um método de pré-processamento de fórmulas SAT e pseudo-Boolean baseado em técnicas de programação linear inteira mista*. Tese (Doutorado), 09 2015. Citado na página 20.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. [S.l.]: Prentice Hall, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 17.
- RYAN, L. *The siege satisfiability solver*. 2022. Disponível em: <<https://www2.cs.sfu.ca/research/groups/CL/software/siege/>>. Acesso em: 10 de abril de 2022. Citado na página 13.
- TOMPKINS, P.; STENTZ, A.; WETTERGREEN, D. S. Global path planning for mars rover exploration. *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720)*, v. 2, p. 801–815 Vol.2, 2004. Citado na página 10.
- WELD, D. Recent advances in ai planning. *AI Magazine*, 1999. Citado na página 13.

Apêndices

APÊNDICE A – Resultados das instâncias resolvidas por todos os planejadores

n	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin	n	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
1	269	167	221	267	1	221	117	217	267
2	267	115	165	215	2	217	115	165	215
3	216	115	115	215	3	269	115	165	265
4	215	165	215	265	4	419	165	265	315
5	215	165	215	265	5	316	165	265	315
6	265	215	315	315	6	265	215	365	265
7	516	265	315	415	7	265	215	365	415
8	416	215	315	415	8	265	265	365	415
9	415	315	515	415	9	415	315	566	465
10	467	365	465	515	10	415	315	516	515
11	1118	666	1016	666	11	1519	616	1117	615
12	768	516	816	666	12	716	515	866	716
13	1218	716	1016	916	13	967	716	1116	916
14	1467	817	1217	1016	14	1117	766	1317	1116
15	666	516	766	766	15	666	516	816	1016
16	2220	1317	2018	1417	16	1919	1267	2218	1769
17	1568	966	1317	1317	17	1317	917	1467	1419
18	1568	917	1317	1367	18	1267	917	1417	1820
19	3373	2270	3221	2219	19	4623	2069	7790	3827
20	4424	3121	3924	2218	20	9596	2720	11104	4283
21	11220	2218	3322	2068	21	3523	2070	3522	4130
22	12212	4727	5680	3622	22	6181	3974	6029	4075
23	10450	9047	7983	6881	23	8538	6634	8434	7031
24	4876	3271	5026	2975	24	5778	3272	5778	6537
25	8283	4225	6080	4279	25	6732	4075	6880	4177
26	8140	3372	4876	3474	26	5526	3272	5527	3724
27	12294	8935	12493	5933	27	23759	7788	14346	9653
28	12600	11552	12595	4777	28	13298	7888	14349	4727
29	16559	10493	14953	7585	29	19835	10044	26828	7494
30	29209	20378	22430	13349	30	31917	22286	41111	17614
31	33258	24496	29343	13197	31	38765	18108	45877	18446
32	28790	24197	28490	15109	32	34880	17762	55003	17266
33	66375	47370	58837	30201	33	79488	38287	88508	30751
34	40538	22972	33716	22094	34	40365	21620	69059	27270
35	112535	87636	107322	76736	35	142594	77428	143657	70168
36	120706	84288	105876	70772	36	120103	74777	159716	73909
37	150517	100322	148720	77443	37	161413	86495	213386	88957
38	131892	84837	115869	42052	38	166713	67984	199114	52237
39	108332	65415	105373	40831	39	117147	53222	191168	41960
40	126108	70536	121762	46629	40	133489	63764	181217	45500
41	165309	88285	140177	50745	41	152346	76469	217203	53781
42	213336	125849	206660	51648	42	181627	93816	274994	57227
43	295464	178623	301679	79704	43	274062	129447	410642	72654
44	218205	122045	202243	61037	44	174830	105426	270958	60574
45	918088	594889	981413	354312	45	937972	550051	1062268	322754
46	478282	359225	453502	286065	46	402744	349327	522581	220388
47	641395	365352	587957	154168	47	486287	285642	619957	158728

Tabela 4 – Domínio: blocks-strips-typed

Tabela 5 – Domínio: blocks-strips-untyped

n	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin	n	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
1	1922	4131	1273	390595	1	1772	3283	2176	105066
2	2020	3022	2221	220152	2	1919	4928	3125	223252
3	566	566	616	138108	3	566	566	1822	307385
4	2771	4023	2922	295502	4	3273	4075	3324	408420
5	2270	5027	2070	266594	5	2521	3474	2069	265084
11	26793	26043	29448	161266	11	26637	30999	33107	150810
12	5134	4531	5428	158781	12	8688	4777	5429	144848
13	14859	17116	12896	145720	13	12347	21318	12892	142331
14	7683	5733	6181	157432	14	9642	14979	6231	153851
15	12159	18821	14150	145419	15	12298	20117	14201	141666

Tabela 6 – Domínio: freecell-strips-typed

Tabela 7 – Domínio: freecell-strips-untyped

n	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
1	168	115	215	167
2	516	366	566	365
3	10038	7232	9741	8535
4	789938	439403	1429144	1395610

Tabela 8 – Domínio: gripper-round-1-strips

n	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
1	169	166	269	417
2	315	265	366	817
3	2422	2623	2471	5178
4	4129	4276	4127	8136
5	516	416	616	466
6	62916	39965	62526	78684
7	2422	1470	2475	6278
8	149223	147501	135524	272498
9	34596	21925	33755	63968
10	165848	127385	150321	177988
11	817	517	818	2223
12	90725	50033	91311	231785
13	1600995	1586871	1644552	3054942
14	191485	109979	189004	592313
15	13402	8939	13610	8739
16	15706	15661	15767	29682
17	8690	5078	8690	27989
18	1892813	1208874	1728362	3130911
21	262553	289543	240642	552805
23	29709	23037	27239	54424
24	656277	721638	459692	1097321
31	117	166	115	266
32	115	65	165	215
33	215	164	215	215
34	516	415	566	766
35	2373	1821	2220	2120

Tabela 9 – Domínio: logistics-round-1-strips

APÊNDICE B – Resultado da execução de todas as instâncias

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
1	blocks-strips-typed	269	167	221	267
2	blocks-strips-typed	267	115	165	215
3	blocks-strips-typed	216	115	115	215
4	blocks-strips-typed	215	165	215	265
5	blocks-strips-typed	215	165	215	265
6	blocks-strips-typed	265	215	315	315
7	blocks-strips-typed	516	265	315	415
8	blocks-strips-typed	416	215	315	415
9	blocks-strips-typed	415	315	515	415
10	blocks-strips-typed	467	365	465	515
11	blocks-strips-typed	1118	666	1016	666
12	blocks-strips-typed	768	516	816	666
13	blocks-strips-typed	1218	716	1016	916
14	blocks-strips-typed	1467	817	1217	1016
15	blocks-strips-typed	666	516	766	766
16	blocks-strips-typed	2220	1317	2018	1417
17	blocks-strips-typed	1568	966	1317	1317
18	blocks-strips-typed	1568	917	1317	1367
19	blocks-strips-typed	3373	2270	3221	2219
20	blocks-strips-typed	4424	3121	3924	2218
21	blocks-strips-typed	11220	2218	3322	2068
22	blocks-strips-typed	12212	4727	5680	3622
23	blocks-strips-typed	10450	9047	7983	6881
24	blocks-strips-typed	4876	3271	5026	2975
25	blocks-strips-typed	8283	4225	6080	4279
26	blocks-strips-typed	8140	3372	4876	3474
27	blocks-strips-typed	12294	8935	12493	5933
28	blocks-strips-typed	12600	11552	12595	4777
29	blocks-strips-typed	16559	10493	14953	7585
30	blocks-strips-typed	29209	20378	22430	13349
31	blocks-strips-typed	33258	24496	29343	13197

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
32	blocks-strips-typed	28790	24197	28490	15109
33	blocks-strips-typed	66375	47370	58837	30201
34	blocks-strips-typed	40538	22972	33716	22094
35	blocks-strips-typed	112535	87636	107322	76736
36	blocks-strips-typed	120706	84288	105876	70772
37	blocks-strips-typed	150517	100322	148720	77443
38	blocks-strips-typed	131892	84837	115869	42052
39	blocks-strips-typed	108332	65415	105373	40831
40	blocks-strips-typed	126108	70536	121762	46629
41	blocks-strips-typed	165309	88285	140177	50745
42	blocks-strips-typed	213336	125849	206660	51648
43	blocks-strips-typed	295464	178623	301679	79704
44	blocks-strips-typed	218205	122045	202243	61037
45	blocks-strips-typed	918088	594889	981413	354312
46	blocks-strips-typed	478282	359225	453502	286065
47	blocks-strips-typed	641395	365352	587957	154168
48	blocks-strips-typed	TLE	3180528	TLE	TLE
49	blocks-strips-typed	1299968	TLE	TLE	-
50	blocks-strips-typed	1253056	2243581	-	-
51	blocks-strips-typed	993276	2118351	-	-
52	blocks-strips-typed	949369	387344	667061	-
53	blocks-strips-typed	999112	TLE	TLE	-
54	blocks-strips-typed	946997	893785	1153621	-
55	blocks-strips-typed	1098516	TLE	-	-
56	blocks-strips-typed	876549	1590001	-	-
57	blocks-strips-typed	1135079	TLE	-	-
58	blocks-strips-typed	1136018	TLE	-	-
59	blocks-strips-typed	1137340	TLE	-	-
60	blocks-strips-typed	897608	-	-	-
61	blocks-strips-typed	1280723	TLE	-	-
62	blocks-strips-typed	1213870	2637803	-	-
63	blocks-strips-typed	1230158	2083471	-	-
64	blocks-strips-typed	1163342	2016341	-	-
65	blocks-strips-typed	1527685	-	-	-
66	blocks-strips-typed	1169458	1462864	-	-
67	blocks-strips-typed	1588560	-	-	-
68	blocks-strips-typed	1459442	-	-	-

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
69	blocks-strips-typed	1364894	1453314	-	-
70	blocks-strips-typed	1716622	-	-	-
71	blocks-strips-typed	1936534	-	-	-
72	blocks-strips-typed	1598986	-	-	-
73	blocks-strips-typed	2075770	-	-	-
74	blocks-strips-typed	1783154	-	-	-
75	blocks-strips-typed	1949040	-	-	-
76	blocks-strips-typed	2346602	-	-	-
77	blocks-strips-typed	2327106	-	-	-
78	blocks-strips-typed	2663429	-	-	-
79	blocks-strips-typed	3011226	-	-	-
80	blocks-strips-typed	2855499	-	-	-
81	blocks-strips-typed	2980426	-	-	-
82	blocks-strips-typed	2684409	-	-	-
83	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
84	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
85	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
86	blocks-strips-typed	3369692	-	-	-
87	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
88	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
89	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
90	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
91	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
92	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
93	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
94	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
95	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
96	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
97	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
98	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
99	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
100	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
101	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
102	blocks-strips-typed	TLE	-	-	-
1	blocks-strips-untyped	221	117	217	267
2	blocks-strips-untyped	217	115	165	215
3	blocks-strips-untyped	269	115	165	265

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
4	blocks-strips-untyped	419	165	265	315
5	blocks-strips-untyped	316	165	265	315
6	blocks-strips-untyped	265	215	365	265
7	blocks-strips-untyped	265	215	365	415
8	blocks-strips-untyped	265	265	365	415
9	blocks-strips-untyped	415	315	566	465
10	blocks-strips-untyped	415	315	516	515
11	blocks-strips-untyped	1519	616	1117	615
12	blocks-strips-untyped	716	515	866	716
13	blocks-strips-untyped	967	716	1116	916
14	blocks-strips-untyped	1117	766	1317	1116
15	blocks-strips-untyped	666	516	816	1016
16	blocks-strips-untyped	1919	1267	2218	1769
17	blocks-strips-untyped	1317	917	1467	1419
18	blocks-strips-untyped	1267	917	1417	1820
19	blocks-strips-untyped	4623	2069	7790	3827
20	blocks-strips-untyped	9596	2720	11104	4283
21	blocks-strips-untyped	3523	2070	3522	4130
22	blocks-strips-untyped	6181	3974	6029	4075
23	blocks-strips-untyped	8538	6634	8434	7031
24	blocks-strips-untyped	5778	3272	5778	6537
25	blocks-strips-untyped	6732	4075	6880	4177
26	blocks-strips-untyped	5526	3272	5527	3724
27	blocks-strips-untyped	23759	7788	14346	9653
28	blocks-strips-untyped	13298	7888	14349	4727
29	blocks-strips-untyped	19835	10044	26828	7494
30	blocks-strips-untyped	31917	22286	41111	17614
31	blocks-strips-untyped	38765	18108	45877	18446
32	blocks-strips-untyped	34880	17762	55003	17266
33	blocks-strips-untyped	79488	38287	88508	30751
34	blocks-strips-untyped	40365	21620	69059	27270
35	blocks-strips-untyped	142594	77428	143657	70168
36	blocks-strips-untyped	120103	74777	159716	73909
37	blocks-strips-untyped	161413	86495	213386	88957
38	blocks-strips-untyped	166713	67984	199114	52237
39	blocks-strips-untyped	117147	53222	191168	41960
40	blocks-strips-untyped	133489	63764	181217	45500

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
41	blocks-strips-untyped	152346	76469	217203	53781
42	blocks-strips-untyped	181627	93816	274994	57227
43	blocks-strips-untyped	274062	129447	410642	72654
44	blocks-strips-untyped	174830	105426	270958	60574
45	blocks-strips-untyped	937972	550051	1062268	322754
46	blocks-strips-untyped	402744	349327	522581	220388
47	blocks-strips-untyped	486287	285642	619957	158728
48	blocks-strips-untyped	TLE	3039715	TLE	2015298
49	blocks-strips-untyped	TLE	TLE	TLE	-
50	blocks-strips-untyped	TLE	2600591	2662801	-
51	blocks-strips-untyped	3056432	1902329	2843668	-
52	blocks-strips-untyped	736627	384947	753962	-
53	blocks-strips-untyped	TLE	TLE	TLE	-
54	blocks-strips-untyped	1314445	672997	1275450	-
55	blocks-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
56	blocks-strips-untyped	2483547	1655362	-	-
57	blocks-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
58	blocks-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
59	blocks-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
60	blocks-strips-untyped	1816126	820991	-	-
61	blocks-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
62	blocks-strips-untyped	TLE	2724472	-	-
63	blocks-strips-untyped	TLE	1883403	-	-
64	blocks-strips-untyped	TLE	1672893	-	-
65	blocks-strips-untyped	TLE	-	-	-
66	blocks-strips-untyped	2924580	1353575	-	-
67	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
68	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
69	blocks-strips-untyped	2902297	1343359	-	-
70	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
71	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
72	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
73	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
74	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
75	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
76	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
77	blocks-strips-untyped	-	-	-	-

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
78	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
79	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
80	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
81	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
82	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
83	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
84	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
85	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
86	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
87	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
88	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
89	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
90	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
91	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
92	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
93	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
94	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
95	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
96	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
97	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
98	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
99	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
100	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
101	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
102	blocks-strips-untyped	-	-	-	-
1	freecell-strips-typed	1922	4131	1273	390595
2	freecell-strips-typed	2020	3022	2221	220152
3	freecell-strips-typed	566	566	616	138108
4	freecell-strips-typed	2771	4023	2922	295502
5	freecell-strips-typed	2270	5027	2070	266594
6	freecell-strips-typed	7433	9994	3977	-
7	freecell-strips-typed	7084	8036	11097	-
8	freecell-strips-typed	11396	9391	14503	-
9	freecell-strips-typed	13300	12146	10141	-
10	freecell-strips-typed	4527	3375	3677	-
11	freecell-strips-typed	26793	26043	29448	161266
12	freecell-strips-typed	5134	4531	5428	158781

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
13	freecell-strips-typed	14859	17116	12896	145720
14	freecell-strips-typed	7683	5733	6181	157432
15	freecell-strips-typed	12159	18821	14150	145419
16	freecell-strips-typed	82275	67403	75760	-
17	freecell-strips-typed	31349	34210	58144	-
18	freecell-strips-typed	112503	218799	104353	-
19	freecell-strips-typed	34770	25484	26988	-
20	freecell-strips-typed	93598	56472	152832	-
21	freecell-strips-typed	TLE	TLE	210384	-
22	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
23	freecell-strips-typed	TLE	3549534	312424	-
24	freecell-strips-typed	102565	126267	124040	-
25	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
26	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
27	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
28	freecell-strips-typed	TLE	TLE	162094	-
29	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
30	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
31	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
32	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
33	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
34	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
35	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
36	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
37	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
38	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
39	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
40	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
41	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
42	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
43	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
44	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
45	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
46	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
47	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
48	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
49	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
50	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
51	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
52	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
53	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
54	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
55	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
56	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
57	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
58	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
59	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
60	freecell-strips-typed	TLE	TLE	-	-
1	freecell-strips-untyped	1772	3283	2176	105066
2	freecell-strips-untyped	1919	4928	3125	223252
3	freecell-strips-untyped	566	566	1822	307385
4	freecell-strips-untyped	3273	4075	3324	408420
5	freecell-strips-untyped	2521	3474	2069	265084
6	freecell-strips-untyped	9240	7079	4026	-
7	freecell-strips-untyped	6581	6782	11543	-
8	freecell-strips-untyped	10951	9290	14957	-
9	freecell-strips-untyped	15210	13800	10292	-
10	freecell-strips-untyped	3875	22656	7399	-
11	freecell-strips-untyped	26637	30999	33107	150810
12	freecell-strips-untyped	8688	4777	5429	144848
13	freecell-strips-untyped	12347	21318	12892	142331
14	freecell-strips-untyped	9642	14979	6231	153851
15	freecell-strips-untyped	12298	20117	14201	141666
16	freecell-strips-untyped	60602	89001	76000	-
17	freecell-strips-untyped	34396	34114	53758	-
18	freecell-strips-untyped	96539	267964	104050	-
19	freecell-strips-untyped	26884	26674	26784	-
20	freecell-strips-untyped	169885	385198	153680	-
21	freecell-strips-untyped	TLE	328081	210268	-
22	freecell-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
23	freecell-strips-untyped	TLE	203699	317987	-
24	freecell-strips-untyped	94504	96314	120867	-
25	freecell-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
26	freecell-strips-untyped	TLE	TLE	-	-

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
27	freecell-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
28	freecell-strips-untyped	TLE	1030745	158742	-
29	freecell-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
30	freecell-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
31	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
32	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
33	freecell-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
34	freecell-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
35	freecell-strips-untyped	TLE	TLE	-	-
36	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
37	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
38	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
39	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
40	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
41	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
42	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
43	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
44	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
45	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
46	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
47	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
48	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
49	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
50	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
51	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
52	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
53	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
54	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
55	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
56	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
57	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
58	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
59	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
60	freecell-strips-untyped	TLE	-	-	-
1	gripper-round-1-strips	168	115	215	167
2	gripper-round-1-strips	516	366	566	365
3	gripper-round-1-strips	10038	7232	9741	8535

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
4	gripper-round-1-strips	789938	439403	1429144	1395610
5	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
6	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
7	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	TLE	TLE
8	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
9	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
10	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
11	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
12	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
13	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	TLE	TLE
14	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	TLE	TLE
15	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
16	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
17	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
18	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
19	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
20	gripper-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
1	logistics-round-1-strips	169	166	269	417
2	logistics-round-1-strips	315	265	366	817
3	logistics-round-1-strips	2422	2623	2471	5178
4	logistics-round-1-strips	4129	4276	4127	8136
5	logistics-round-1-strips	516	416	616	466
6	logistics-round-1-strips	62916	39965	62526	78684
7	logistics-round-1-strips	2422	1470	2475	6278
8	logistics-round-1-strips	149223	147501	135524	272498
9	logistics-round-1-strips	34596	21925	33755	63968
10	logistics-round-1-strips	165848	127385	150321	177988
11	logistics-round-1-strips	817	517	818	2223
12	logistics-round-1-strips	90725	50033	91311	231785
13	logistics-round-1-strips	1600995	1586871	1644552	3054942
14	logistics-round-1-strips	191485	109979	189004	592313
15	logistics-round-1-strips	13402	8939	13610	8739
16	logistics-round-1-strips	15706	15661	15767	29682
17	logistics-round-1-strips	8690	5078	8690	27989
18	logistics-round-1-strips	1892813	1208874	1728362	3130911
19	logistics-round-1-strips	TLE	TLE	TLE	TLE
20	logistics-round-1-strips	2808870	2214078	-	2619425

n	domínio	minisatplan	minisatplan2	satplan	satplan-bin
21	logistics-round-1-strips	262553	289543	240642	552805
22	logistics-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
23	logistics-round-1-strips	29709	23037	27239	54424
24	logistics-round-1-strips	656277	721638	459692	1097321
25	logistics-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
26	logistics-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
27	logistics-round-1-strips	107471	52925	TLE	467
28	logistics-round-1-strips	257696	128443	TLE	1018
29	logistics-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
30	logistics-round-1-strips	TLE	TLE	-	TLE
31	logistics-round-1-strips	117	166	115	266
32	logistics-round-1-strips	115	65	165	215
33	logistics-round-1-strips	215	164	215	215
34	logistics-round-1-strips	516	415	566	766
35	logistics-round-1-strips	2373	1821	2220	2120

Tabela 10 – Resultado da execução de todos os domínios