

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ROGIEL JOSIAS SULZBACH

# **Método de classificação e comparação de build orders em StarCraft II**

Porto Alegre

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ROGIEL JOSIAS SULZBACH

**Método de classificação e comparação de build orders em  
StarCraft II**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin

Porto Alegre

2016

ROGIEL JOSIAS SULZBACH

## **Método de classificação e comparação de build orders em StarCraft II**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

---

**Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin**  
Orientador - UFRGS

---

**Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho**  
Chefe do Departamento de Engenharia  
Elétrica (DELET) - UFRGS

Aprovado em ??? de dezembro de 2016.

data

BANCA EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Marcelo Soares Lubaszewski**  
UFRGS

---

**Prof. Dr. Luiz Fernando Ferreira**  
UFRGS

---

**Prof. Dr. Tiago Roberto Balen**  
UFRGS

# Resumo

RESUMO

Palavras-chave: ...

# Abstract

ABSTRACT

**Keywords:** ...

# Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de uma distribuição de probabilidade de uma ação com 2 repetições . . . . .	12
Figura 2 – Exemplo da distribuição de probabilidade da ação $A_1$ . A curva em azul representa a primeira repetição da ação (nos tempos $t_1$ e $t_2$ ), a curva em laranja representa a segunda repetição (nos tempos $t_3$ e $t_4$ ) e a curva em verde representa a terceira repetição da ação (tempos $t_6$ e $t_7$ ). . . .	19
Figura 3 – Exemplo da distribuição de probabilidade da ação $A_1$ . Como a ação $A_2$ somente é executada uma única vez no exemplo, apenas uma repetição é mostrada no gráfico. A ação corresponde aos instantes de tempo $t_5$ e $t_8$ . . . .	20
Figura 4 – Forma gráfica de distribuição estatística de uma ação <i>Gateway</i> e suas repetições . . . . .	24
Figura 5 – Forma gráfica de distribuição estatística de uma ação <i>Adept</i> e suas repetições . . . . .	25

# Lista de Tabelas

Tabela 1	– Um exemplo de uma <i>build order</i> com as ações $A_1$ e $A_2$ ocorrendo nos tempos $t_n$ .	17
Tabela 2	– Resultado da autoclassificação	25
Tabela 3	– Resultado da validação cruzada	26
Tabela 4	– Resultado da validação cruzada	26

# Lista de Abreviaturas e Siglas

BO	<i>Build Order</i>
SC2	<i>StarCraft II</i>
PDF	<i>Probability Distribution Function</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
RTS	<i>Real Time Strategy</i>



# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	9
1.1	Sobre o StarCraft II . . . . .	9
1.2	O uso de aprendizado de máquina em jogos de estratégia em tempo real . . . . .	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	11
2.1	Trabalhos anteriores . . . . .	11
2.2	A estrutura estatística de uma <i>build order</i> . . . . .	12
2.3	Fator de <i>branching</i> de um jogo de StarCraft: BroodWar . . . . .	13
2.4	O Teorema de Bayes . . . . .	13
3	MÉTODO . . . . .	14
3.1	Extração dos dados . . . . .	14
3.2	<i>Dataset</i> de referência . . . . .	16
3.3	Treinamento . . . . .	16
3.3.1	Forma Matricial . . . . .	18
3.4	Classificação . . . . .	21
3.4.1	Forma Matricial . . . . .	21
3.5	Comparação . . . . .	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	23
4.1	Autoclassificação . . . . .	24
4.2	Validação cruzada . . . . .	26
4.3	Teste de ruído . . . . .	26
5	CONCLUSÕES . . . . .	28
6	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS . . . . .	29
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .	30

# 1 Introdução

## 1.1 Sobre o StarCraft II

StarCraft II é um jogo de estratégia militar em tempo-real desenvolvido pela *Blizzard Entertainment* onde três facções disputam partidas multiplayer em modalidade 1 contra 1. O objetivo do jogo consiste em conseguir destruir todas as estruturas do adversário que provém infraestrutura para a construção e manutenção do exército.

O jogo possui um sistema de economia, onde para que um jogador possa treinar ou desenvolver uma tecnologia, é necessário que primeiro sejam extraído recursos do ambiente virtual de jogo. O jogo também apresenta um sistema de "árvore tecnológica" onde há um encadeamento de pré-requisitos para o treinamento e construção de unidades de exército mais avançadas. É a existência desta árvore tecnológica que possibilita que seja possível inferir e prever uma determinada estratégia do jogador.

O modo mais comum de execução de uma estratégia é utilização de *build orders*. Uma *build order* é uma sequência de ações tomadas por um jogador no decorrer do jogo, que, quando executadas de forma correta, oferecem alguma vantagem estratégica para o jogador. Muitas build orders são padronizadas e otimizadas por jogadores profissionais durante o treino e são popularizadas em campeonatos mundiais.

Neste trabalho será desenvolvido e implementado um método de classificação para *build orders* de partidas de jogadores profissionais de StarCraft II. Foi feita a escolha de utilizar partidas profissionais pois são jogadores com elevado conhecimento do jogo e reagem de forma ótima para várias situações inusitadas ou inesperadas, o que reduz a variabilidade das medidas extraídas dos arquivos de *replay* do jogo. Para a extração de dados foi utilizado um pacote de *replays* (arquivo binário que codifica todas as ações tomadas em um jogo) de competições profissionais de StarCraft II durante o ano de 2016.

Uma aplicação direta para o método proposto é o desenvolvimento de uma inteligência artificial que seja capaz de tomar decisões ao longo de um jogo de forma verossímil à um jogador humano, conforme proposto em (SYNNAEVE; BESSIERE, 2011a).

## 1.2 O uso de aprendizado de máquina em jogos de estratégia em tempo real

O uso de aprendizado de máquina em jogos de estratégia em tempo real (RTS) pode ser dividido em vários problemas: táticas, estratégias e *micro management* conforme definido por (SYNNAEVE; BESSIERE, 2011b).

Táticas se refere ao posicionamento de unidades no mapa e é diretamente depende da forma com a qual as unidades interagem entre si no jogo. Dessa forma, uma solução para este problema deve considerar o mapa e as interações entre as mecânicas de cada unidade.

Os problemas de estratégia se referem ao plano geral de jogo. A estratégia surge de uma expectativa para o desenvolver do jogo, por exemplo, supondo que um jogador deseja investir fortemente na sua economia para que consiga construir unidades tecnológicas de maior custo. A estratégia é a forma com a qual ele vai conseguir atingir este objetivo. Em geral, a estratégia é independente do mapa em que jogo está sendo jogado, mas é diretamente relacionado à raça do oponente, suas escolhas tecnológicas e sua gerência da economia (geralmente denominado de *macro management*). A estratégia de um jogador está diretamente relacionada com a sua escolha *build order*.

Por fim, os problemas de *micro management* consistem na gerência de unidades individuais, ou seja, o jogador faz o controle de cada unidade do exercito de forma individual. O *micro management* é uma especialização das táticas, mas se refere à cada unidade individual ao invés do exército inteiro.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Trabalhos anteriores

"A Data Mining Approach to Strategy Prediction"(WEBER; MATEAS, 2009) apresentaram uma forma de expressar uma *build order* de StarCraft Brood War em um vetor de *features* para processamento bem como a performance de quatro algoritmos de classificação. No trabalho concluíram que os diferentes algoritmos possuíam performance diferenciada nos diversos estágios de jogo. O modelo de codificação de features proposto baseava-se num critério de primeira-aparição, isto é, o vetor de *features* contém o instante em que a primeira instância de uma dada unidade ou estrutura ocorria no jogo e, caso não houvesse ocorrência, utilizava um valor padronizado de zero.

Adicionalmente, a fim de simular efeitos de *scouting* ruído foi adicionado nos vetores de *features* como forma de gerar variação nos *timings* de cada ação e então analisar a performance dos algoritmos. Foi concluído que todos os algoritmos perdiam precisão proporcional à quantidade de ruído adicionada, no entanto o algoritmo de k-NN (*k-nearest neighbors*) não degradou a performance de forma tão drástica quanto os outros algoritmos. Também foi adicionado outro teste de ruído para simular informação incompleta: lacunas foram inseridas no vetor de *features* a fim de emular a situação em que o jogador não consegue extrair uma informação do jogo do oponente. Com este tipo de ruído, a conclusão foi de que a precisão dos algoritmos de decaía de forma linear com o nível de ruído adicionado no vetor.

Em "A Bayesian Model for Opening Prediction in RTS Games with Application to StarCraft"(SYNNAEVE; BESSIERE, 2011a), baseado no trabalho anterior de (WEBER; MATEAS, 2009), realizaram o desenvolvimento de um modelo Bayesiano para classificação de build orders de StarCraft: Brood War utilizando um método de extração de *features* de ações significativas dos replays. A extração do replay considerava estruturas na árvore de tecnologia e considerava apenas a primeira construção de uma estrutura e o índice da sequência de construção era utilizado para treinar o sistema. O método era capaz de identificar a abertura do jogador após a construção de, na média, 10 estruturas. Contudo, devido ao número limitado de *features*, era possível enumerar todas as possibilidades de jogos possíveis (em torno de 1000 por raça). O método era adequado para classificação em que a informação era limitada, por exemplo, era adequada para o contexto de uma inteligência artificial de toma suas decisões baseada na sua capacidade de *scouting* (tentar descobrir a estratégia de um outro jogador utilizando uma unidade que descobre cada estrutura feita pelo oponente).

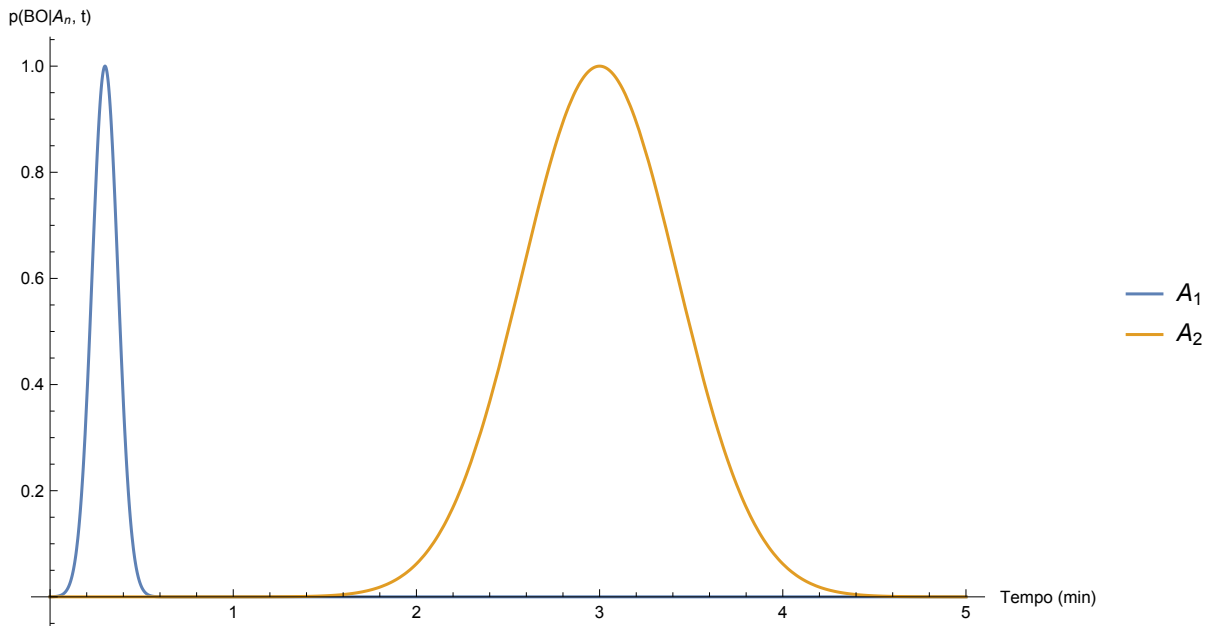
(SYNNAEVE; BESSIERE, 2011b) apresenta uma análise extensiva para técnicas e dificuldades encontradas ao aplicar algoritmos de aprendizado de máquina em diversos tipos de jogo, incluindo jogos de estratégia em tempo real (RTS).

## 2.2 A estrutura estatística de uma *build order*

Uma build order genérica pode ser expressa como uma sequência de ações cujo valor tempo de execução médio e desvio padrão estão relacionados com uma função distribuição de probabilidade.

Seja  $A$  uma ação arbitrária,  $A_n$  a sequência da ação durante o jogo (primeira vez que ela é executada, segunda, terceira, etc...),  $BO$  seja uma *build order* em que a sequência de ações  $A_n$  foram executadas e  $t$  o tempo de jogo em minutos. Dessa forma, podemos expressar a distribuição de probabilidade de uma sequência da forma indicada na Figura 1:

Figura 1 – Exemplo de uma distribuição de probabilidade de uma ação com 2 repetições



Na Figura 1 é possível observar que a primeira vez que a ação é executada, a tolerância para atraso é pequena, contudo, na segunda execução a tolerância de atraso é muito maior.

A tolerância de execução se faz necessária pois um jogador pode atrasar alguns segundos por múltiplos motivos durante o jogo, embora ele ainda esteja executando a mesma build-order.

Para uma *build order* real, haverá uma distribuição de probabilidade para cada uma das ações que podem oscilar em torno de 30 a 40 dependendo da facção do jogador.

## 2.3 Fator de *branching* de um jogo de StarCraft: BroodWar

Em teoria dos jogos, *branching factor* é o número de nós-filho em cada um dos nós de ações possíveis no jogo, isto é, é o número de opções que um jogador tem disponível em cada momento. referência

Infelizmente não há análises científicas feitas para a complexidade de um jogo de StarCraft II, mas é possível realizar uma comparação utilizando o jogo antecessor da série, StarCraft: Brood War lançado em 1998. De acordo com (WEBER; MATEAS, 2009), StarCraft: BroodWar possui um fator de branching estimado médio de  $1 \times 10^6$  que, comparado à um jogo de xadrez onde a média é de 35, é um valor extremamente alto. O alto nível de complexidade força que seja utilizado um modelo probabilístico ao invés de uma análise determinista, uma vez que é impossível obter, ou sequer gerar, uma amostra para todas as possibilidades de jogos. Devido a novas mecânicas de jogo introduzidas em StarCraft II espera-se a complexidade seja superior à de seu antecessor.

## 2.4 O Teorema de Bayes

O Teorema de Bayes relaciona a probabilidade de um evento associado à uma restrição. A definição matemática do teorema é dada pela Equação ??:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (2.1)$$

onde  $A$  é um evento,  $B$  é a restrição do evento  $A$ . Dessa forma, é possível determinar a probabilidade do evento  $A$  ter acontecido, dado que o evento  $B$  foi observado.

Em termos da análise de *build orders*, pode-se aplicar o teorema da seguinte forma:

$$P(BO|A, t) = \frac{P(A|BO, t)P(BO)}{P(A, t)} \quad (2.2)$$

onde  $BO$  é uma *build order* qualquer que deseja-se estimar a probabilidade de estar sendo executada, dado que o jogador executou a ação  $A$  no tempo  $t$ . Para tanto, precisa-se determinar 3 fatores:

- $P(A, t)$ : a probabilidade de um jogador executar a ação  $A$  no instante  $t$ , independe da *build order*;
- $P(BO)$ : a probabilidade de um jogador executar a *build order*  $BO$ , independente da ação que o jogador está executando;
- $P(A|BO, t)$ : a probabilidade de ter executado a ação  $A$  supondo que o jogador está executando a *build order*  $BO$  no instante  $t$ ;

## 3 Método

Neste trabalho foi utilizado Python 2.7 como a linguagem de programação para a implementação do método. Este motivo foi guiado principalmente pelo fato da biblioteca oficial de processamento de replays oferecida pela Blizzard Entertainment, Inc. (desenvolvedor do StarCraft II) ser em Python. A biblioteca de processamento de replays oficial, *s2protocol* (Blizzard Entertainment, Inc., 2013) é de código-fonte aberto e está disponível no GitHub. Demais códigos utilizados são parte de uma distribuição padrão do Python 2.7 ou foram desenvolvidos para o trabalho.

### 3.1 Extração dos dados

Os replays de StarCraft II são arquivos do tipo MoPAQ, um formato proprietário desenvolvido pela Blizzard Entertainment nos anos 90 para uso em seus jogos. Embora o formato seja proprietário é possível localizar na internet uma gama de implementações ou documentação desenvolvida por engenharia reversa. Um arquivo MPQ é análogo à um arquivo ZIP e contém um índice de arquivos e blocos de conteúdo. Nos *replays* há uma série de *stream* de eventos de jogo e neste trabalho somente será utilizado o stream chamado "Tracker Events" que são eventos cujo conteúdo é destinado para ferramentas que desejam processar os replays, ao contrário de informações úteis para a simulação do jogo. Este *stream* está armazenado como "replay.tracker.events" dentro do MPQ.

O *stream* de *Tracker Events* foi processado utilizando uma classe em Python que extrai as seguintes informações do evento:

- Nome (tipo) do evento;
- *Game loop* do evento (o número de iterações do loop principal do jogo);
- ID do jogador que gerou o evento;
- Estrutura de dados específica de cada evento;

A expressão de conversão de *game loops* para o tempo, em segundos é dada pela Equação 3.1.

$$t_{seg} = 16 \cdot n_{loops} \cdot \frac{26}{36} \cdot \frac{131}{148} \quad (3.1)$$

onde  $t_{seg}$  é o tempo em segundos,  $n_{loops}$  é o número de *game loops*.

Dentre os vários tipos de eventos contidos neste stream, 4 destes eventos são interessantes na análise:

**NNet.Replay.Tracker.SPlayerStatsEvent** : contém informações sobre o estado atual do jogador. De interesse na análise: suprimento em uso pelo exército e total de suprimento disponível.

**NNet.Replay.Tracker.SUnitBornEvent** evento disparado para cada unidade/estrutura criada no jogo. Este evento somente é despachado para unidades que aparecem no campo de batalha de forma "pronta", isto é, no momento em que a unidade pode ser vista pelo jogador, ela já pode ser controlada.

**NNet.Replay.Tracker.SUnitInitEvent** semelhante ao evento SUnitBornEvent, mas este evento é despachado para unidades que são construídas diretamente no campo de batalha e não estão disponíveis para jogo imediatamente no instante do evento. Embora a unidade/estrutura neste evento não seja imediatamente utilizável, no método proposto, apenas o tempo em que usuário inicia a construção é considerado.

**NNet.Replay.Tracker.SUpgradeEvent** evento disparado para cada melhoramento de exército realizado pelo jogador. Estes eventos são muito importantes pois podem indicar ou refinar a intenção do jogador.

Para o evento **SPlayerStatsEvent** são extraídas duas informações: a quantidade de suprimento utilizada pelo exército do jogador e o total de suprimento disponível para o jogador. Esta informação não é utilizada pelo método de classificação, mas é utilizada popularmente em sites de *build orders* de StarCraft II, uma vez que, durante o jogo, é mais simples indexar as ações baseado no suprimento usado e total do que no instante de tempo absoluto da ação.

Para os eventos **SUnitBornEvent**, **SUnitInitEvent** e **SUpgradeEvent** descritos anteriormente, apenas uma informação é extraída: o nome da unidade, estrutura ou melhoramento feito pelo jogador. Este nome é único para cada tipo de unidade, estrutura ou melhoramento.

Uma vez que após os 6 minutos de jogo, a partida se torna reativa, ao invés de algorítmica, a sequência de eventos é truncada até os 6 minutos de jogo. Isto garante que as informações tenham menor variabilidade. Ao decorrer da partida, as ações executadas por um jogador começam a se tornar em resposta das ações do outro jogador e, portanto, não há sentido realizar uma classificação de *build order* para ações que ocorrem além de um certo limite de tempo.



## 3.2 *Dataset* de referência

Como não há nenhum índice de replays e build-orders disponível publicamente o conjunto de replays utilizado para treinamento e validação foi classificado manualmente utilizando replays de diversos campeonatos do ano de 2016

**Intel Extreme Masters 10** : 19 *replays*

**Intel Extreme Masters 11** : 35 *replays*

**WCS Spring Championship 2016** : 54 *replays*

totalizando 108 *replays*.

Para a classificação manual das estratégias cada replay foi assistido no jogo e classificado conforme as regras abaixo:

- A composição de exército de um jogador no instante do primeiro ataque realizado por ele;
- Se o jogador fosse atacado por outro e tivesse mais de 8 unidades perdidas, o *replay* era descartado;
- Caso não houvesse investida por parte dos dois jogadores até os 6 minutos de jogo, a composição de exército do jogador aos 6 minutos de jogo era classificada.

Um exército em StarCraft II pode ser composto por mais de 10 tipos de unidades diferentes, contudo isto é incomum. De forma geral, exércitos são compostos por um grande número de unidades básicas de ataque e algumas unidades de suporte. Na classificação, as unidades de suporte foram desprezadas na composição do exército. Esta regra é violada somente caso a unidade de suporte seja incomum ou trouxe um benefício significativo para o jogador.

## 3.3 Treinamento

O treinamento foi realizado de forma simples: a sequência de ações para cada *replay* era iterada e o tempo de execução da ação era gravado em uma lista. Uma lista separada era usada para cada repetição. Por exemplo, supondo que as *build orders*  $BO_1$  e  $BO_2$  sejam duas amostras com o mesmo *label*:

Tabela 1 – Um exemplo de uma *build order* com as ações  $A_1$  e  $A_2$  ocorrendo nos tempos  $t_n$ .

$BO_1$		$BO_2$	
<b>T</b>	<b>A</b>	<b>T</b>	<b>A</b>
$t_1$	$A_1$	$t_2$	$A_1$
$t_3$	$A_1$	$t_4$	$A_1$
$t_5$	$A_2$	$t_6$	$A_1$
$t_7$	$A_1$	$t_8$	$A_2$

Dessa forma, as duas listas terão o seguinte conteúdo:

$$\begin{aligned}
 T_{A_1} = \{ \{t_1, t_2\}, \\
 \{t_3, t_4\}, \\
 \{t_6, t_7\} \}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

onde  $T_{A_1}$  é o vetor de tempos da execução de cada repetição da ação  $A_1$  nos múltiplos *replays* processados.  $\{t_1, t_2\}$  representa os tempos da primeira repetição,  $\{t_3, t_4\}$  da segunda e  $\{t_6, t_7\}$  da terceira.

$$T_{A_2} = \{ \{t_5, t_8\} \} \tag{3.3}$$

onde  $T_{A_2}$  é o vetor de tempos da execução de cada repetição da ação  $A_2$  nos múltiplos *replays* processados. Esta ação possui uma única repetição.

Seja  $\mu(T_x, R)$  a média do vetor de tempo  $T_x$  para a repetição  $R$  e  $\sigma(T_x, R)$  o desvio padrão do vetor de tempo  $T_x$  para a repetição  $R$ , então a distribuição  $p$  de probabilidade de uma ação pode ser definida como:

$$p_{T_x}(t, R) = Ae^{-\frac{(t-\mu(T_x, R))^2}{\sigma(T_x, R)^2}} \tag{3.4}$$

onde  $A$  é a frequência com que um par ação-repetição ocorre dentre todas as amostras de treinamento utilizadas,  $\mu$  é o tempo médio de execução do par ação-repetição e  $\sigma$  o correspondente desvio-padrão.

A Equação 3.4 apresenta a função distribuição de probabilidade para uma ação. Isto é, representa a probabilidade de uma ação qualquer  $A$  pertencer a uma *build order*  $BO_1$  dado que a ação foi executada pelo jogador no instante  $t$ .

Esta função é uma variação da função distribuição de probabilidade Gaussiana, no entanto, é ajustada de forma que, para o ponto médio, seu valor seja unitário (para  $A = 1$ ) ou tenha o valor de  $A$ , que indica a frequência com que uma ação ocorreu nos *datasets* de treinamento.

Para o cálculo da média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) os itens internos do vetor  $T_x$  são utilizados. Para o exemplo apresentado nas Equações 3.2 e 3.3, as médias são dadas pelos vetores das Equações 3.5 e 3.6, respectivamente:

$$\mu_{A_1} = \left\{ \frac{t_1 + t_2}{2}, \frac{t_3 + t_4}{2}, \frac{t_6 + t_7}{2} \right\} \quad (3.5)$$

$$\mu_{A_1} = \left\{ \frac{t_5 + t_8}{2} \right\} \quad (3.6)$$

O cálculo de desvio padrão para os vetores das Equações 3.2 e 3.3 foi omitido no exemplo pois a expressão é complexa e não influencia no entendimento e um valor genérico é apresentado nas Equações 3.7 e 3.8.

$$\sigma_{A_1} = \{\sigma_{A_1,1}, \sigma_{A_1,2}, \sigma_{A_1,3}\} \quad (3.7)$$

$$\sigma_{A_1} = \{\sigma_{A_2,1}\} \quad (3.8)$$

Neste exemplo, de forma a simplificar o cálculo, assume-se que a frequência de cada par ação-repetição é unitária.

É possível substituir os valores de média e desvio-padrão das Equações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 na função distribuição de probabilidade da Equação 3.4. O vetor final é denominado de "vetor de probabilidades".

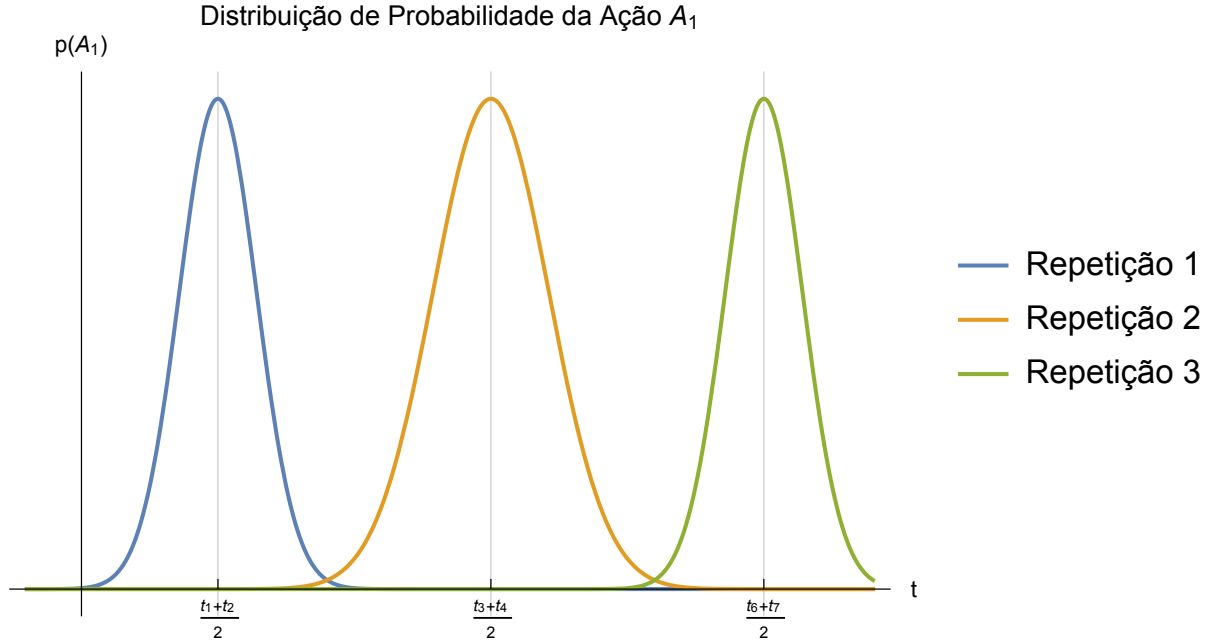
Com os resultados de média (Equações 3.5 e 3.6) e desvio padrão (Equações 3.7 e 3.8), é possível obter um gráfico do formato da distribuição de probabilidade conforme representado nas Figuras 2 e 3.

### 3.3.1 Forma Matricial

O treinamento pode ser realizado de forma matricial. Onde as colunas indicam as ações e as linhas indicam as repetições de cada ação respectiva. Dessa forma, é possível definir uma matriz de médias e desvios padrões.

Dado um conjunto de  $N$  ações que podem se repetir até  $M$  vezes, então, é possível definir uma matriz  $M \times N$ , cujos elementos são formatos pelo tempo médio de execução

Figura 2 – Exemplo da distribuição de probabilidade da ação  $A_1$ . A curva em azul representa a primeira repetição da ação (nos tempos  $t_1$  e  $t_2$ ), a curva em laranja representa a segunda repetição (nos tempos  $t_3$  e  $t_4$ ) e a curva em verde representa a terceira repetição da ação (tempos  $t_6$  e  $t_7$ ).



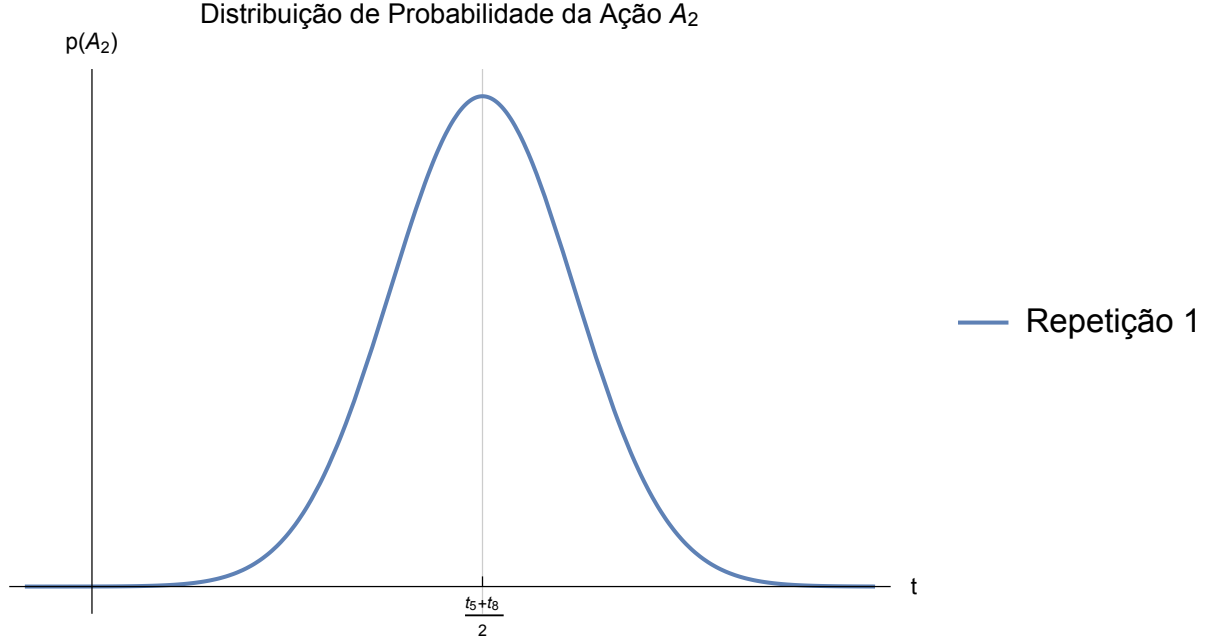
de cada par ação-repetição, denominada de "matriz de média do tempo de execução", expressa na Equação 3.9.

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu_{A_1,1} & \mu_{A_2,1} & \cdots & \mu_{A_N,1} \\ \mu_{A_1,2} & \mu_{A_2,2} & \cdots & \mu_{A_N,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{A_1,M} & \mu_{A_2,M} & \cdots & \mu_{A_N,M} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

De forma análoga a matriz de média do tempo de execução, é possível definir a "matriz de desvio padrão do tempo de execução" para os valores de desvio padrão do tempo de execução de cada par ação-repetição e a outra matriz denominada "matriz de frequência de ocorrência de repetição" que define a frequência de ocorrência de um dado par ação-repetição no conjunto de amostras observadas. A definição formal da matriz de desvio padrão do tempo de execução está apresentada na Equação 3.10. A definição formal da matriz de frequência de repetição está apresentada na Equação 3.11.

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{A_1,1} & \sigma_{A_2,1} & \cdots & \sigma_{A_N,1} \\ \sigma_{A_1,2} & \sigma_{A_2,2} & \cdots & \sigma_{A_N,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{A_1,M} & \sigma_{A_2,M} & \cdots & \sigma_{A_N,M} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Figura 3 – Exemplo da distribuição de probabilidade da ação  $A_1$ . Como a ação  $A_2$  somente é executada uma única vez no exemplo, apenas uma repetição é mostrada no gráfico. A ação corresponde aos instantes de tempo  $t_5$  e  $t_8$ .



$$F = \begin{pmatrix} F_{A_1,1} & F_{A_2,1} & \cdots & F_{A_N,1} \\ F_{A_1,2} & F_{A_2,2} & \cdots & F_{A_N,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{A_1,M} & F_{A_2,M} & \cdots & F_{A_N,M} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Substituindo-se as matrizes de média e desvio padrão do tempo de execução e de frequência de ocorrência de repetição, Equações 3.9, 3.10 e 3.11, respectivamente, na função de distribuição de probabilidade dada pela Equação 3.4, é possível construir um vetor de probabilidade. Todas as operações entre matrizes são realizadas utilizando operadores de Hadamard (HORN, 1990) ou operações termo-a-termo.

Por convenção matemática, e evitar um problema de indeterminação no cálculo de probabilidade associada, uma ação cuja repetição não ocorre nas amostras encontradas, deve ter o valor de média não-nulo e o valor de desvio padrão deve ser infinito. Por convenção, neste trabalho utiliza-se o valor de média 0.0. Esta escolha foi feita para que a função distribuição de probabilidade seja avaliada com valor 1.0 para ações inexistentes

na amostra de treinamento, independente da ação ser executada pelo jogador numa *build order* utilizada no processo de classificação.

$$p(t) = \begin{pmatrix} F_{A_1,1} e^{-\frac{(t_{A_1,1} - \mu_{A_1,1})^2}{\sigma_{A_1,1}^2}} & F_{A_2,1} e^{-\frac{(t_{A_2,1} - \mu_{A_2,1})^2}{\sigma_{A_2,1}^2}} & \dots & F_{A_N,1} e^{-\frac{(t_{A_N,1} - \mu_{A_N,1})^2}{\sigma_{A_N,1}^2}} \\ F_{A_1,2} e^{-\frac{(t_{A_1,2} - \mu_{A_1,2})^2}{\sigma_{A_1,2}^2}} & F_{A_2,2} e^{-\frac{(t_{A_2,2} - \mu_{A_2,2})^2}{\sigma_{A_2,2}^2}} & \dots & F_{A_N,2} e^{-\frac{(t_{A_N,2} - \mu_{A_N,2})^2}{\sigma_{A_N,2}^2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{A_1,M} e^{-\frac{(t_{A_1,M} - \mu_{A_1,M})^2}{\sigma_{A_1,M}^2}} & F_{A_2,M} e^{-\frac{(t_{A_2,M} - \mu_{A_2,M})^2}{\sigma_{A_2,M}^2}} & \dots & F_{A_N,M} e^{-\frac{(t_{A_N,M} - \mu_{A_N,M})^2}{\sigma_{A_N,M}^2}} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

onde  $t$  é uma matriz que indica o tempo de execução dos pares ação-repetição de uma *build order* que se deseja classificar.

### 3.4 Classificação

O processo de classificação é realizado de forma independente para cada *label* (*build order*) utilizado no processo de treinamento. Os valores de probabilidade para cada par de ação-tempo de um *replay* são multiplicados e o valor final determina a semelhança de uma *build order* treinada e a executada.

Considerando-se o exemplo anterior, é possível aplicar o instante de execução de cada ação do jogador no vetor de ações correspondente e obter a probabilidade de que uma ação qualquer  $A$ . Dessa forma, a probabilidade total de que um conjunto de ações seja parte de uma *build order* qualquer é dada pela Equação 3.13:

$$p_{BO} = \prod_{n,i} p(BO|A_{(n,i)}, t) \quad (3.13)$$

onde  $n$  indica o tipo da ação,  $i$  a sua repetição e  $p(BO|A_{(n,i)}, t)$  é a probabilidade de que a ação seja parte de uma *build order*  $BO$  dado que  $A_{(n,i)}$  foi executada no instante de tempo  $t$ , conforme a Equação 3.4.

#### 3.4.1 Forma Matricial

Dada a matriz de probabilidades de uma *build order* treinada, conforme a Equação 3.12, a probabilidade final de uma *build order* treinada é dada pela redução da matriz através da operação de multiplicação de seus termos, conforme Equação 3.14.

$$p_{BO} = \prod_{i,j} p(t)_{ij} \quad (3.14)$$

onde  $i$  e  $j$  são respectivamente as linhas e as colunas das matrizes de probabilidade e de tempo de execução da *build order* a ser classificada,  $t$  é a matriz de tempo de execução da *build order* para ser classificada,  $p$  é a matriz de probabilidades de uma *build order* qualquer  $BO$  e  $p_{BO}$  é a probabilidade reduzida da matriz  $p$  cujo valor é equivalente à operação da Equação 3.13.

### 3.5 Comparação

Para realizar a comparação entre *build orders* é feita uma tabela que compara a taxa de vitória de cada *build order* contra a *build order* do oponente.

## 4 Resultados e Discussões

No processo de treinamento, é extraído a sequência de construção de cada jogador (a *build order*), calculadas estatísticas de primeira ordem (média e desvio padrão) e a frequência de cada par ação-repetição em relação ao conjunto de replays correspondentes a mesma *build order*.

O método foi treinado utilizando 7 build orders da raça Protoss.

**Adept Glaives** : 6 replays

**Adept Stargate** : 14 replays

**Adept Immortal** : 13 replays

**Stalker Immortal** : 3 replays

**Adept Prism DT** : 5 replays

**Stalker Disruptor** : 5 replays

**Blink Stalker** : 8 replays

A Figura 4 apresenta uma exemplo das funções distribuição de probabilidade para uma ação do tipo "Gateway" da *build order* "Adept Immortal".

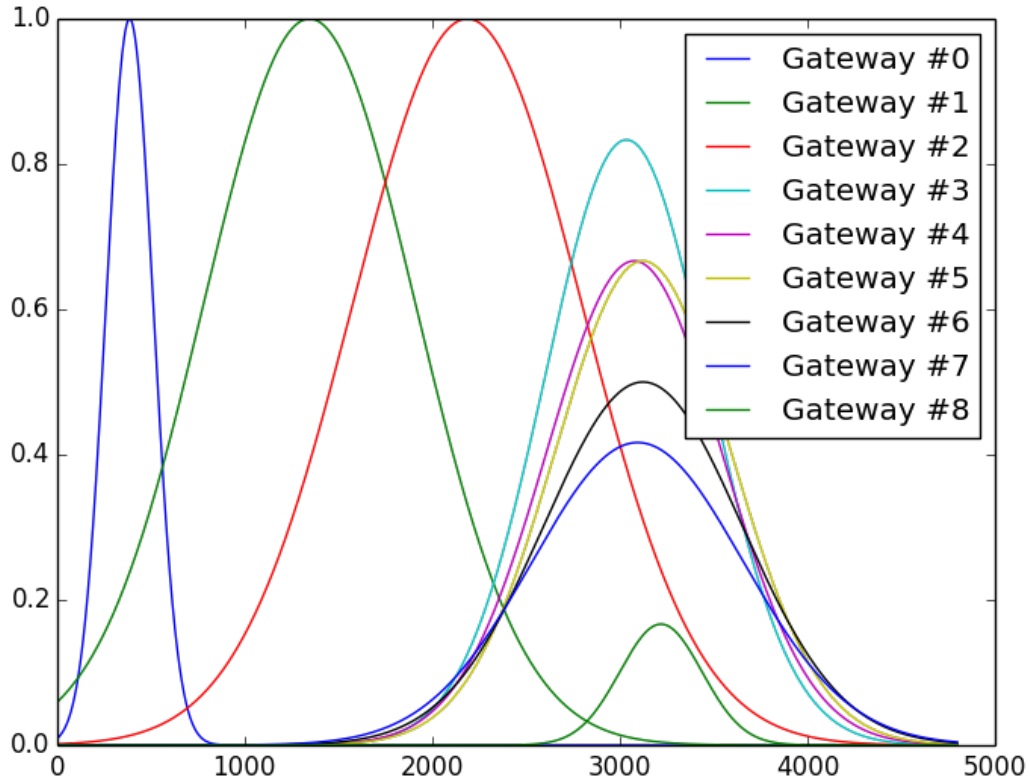
Observa-se que a frequência de ocorrência das repetições no *dataset* de treinamento é decrescente. Isto é uma consequência do método escolhido para classificação. A primeira execução de uma ação, irá, independentemente do tempo em que for executada, considerada como a primeira repetição. A redução da frequência tem duas causas principais:

**Alteração da estratégia do jogador** : um jogador pode ter escolhido uma estratégia levemente diferente devido ao contexto do jogo ou em resposta à *build order* do oponente;

**Ações opcionais** : algumas ações podem ser opcionais e somente são executadas em alguns mapas.

Há uma tendência no desvio-padrão e variância do tempo de execução do par ação-repetição de crescerem ao decorrer da partida. Os principais motivos deste crescimento é a incapacidade de jogadores humanos executarem as ações de forma perfeita e sem qualquer variabilidade. Este fator é agravado com a característica da "árvore tecnológica" onde



Figura 4 – Forma gráfica de distribuição estatística de uma ação *Gateway* e suas repetições

algumas ações possuem dependências tecnológicas em outras anteriores. Embora a tendência seja visível na maior parte das ações, ainda é possível que ela reduza em alguns casos específicos.

Um exemplo onde o desvio padrão reduz de forma significativa é visível na Figura 5, a primeira repetição possui um desvio padrão significativamente maior ao da segunda repetição. Este comportamento é esperado quando a primeira ação é considerada opcional e incorre num erro onde a primeira repetição deveria ter frequência menor que a segunda. Infelizmente, devido à forma de como o método de separação foi estabelecido, não é possível evitar este efeito.

## 4.1 Autoclassificação

Após o treinamento, foi calculado o índice de "autoclassificação" que é a taxa de acerto do método ao classificar os mesmos *replays* utilizados no treinamento. Os resultados deste teste estão expostos na Tabela 2.

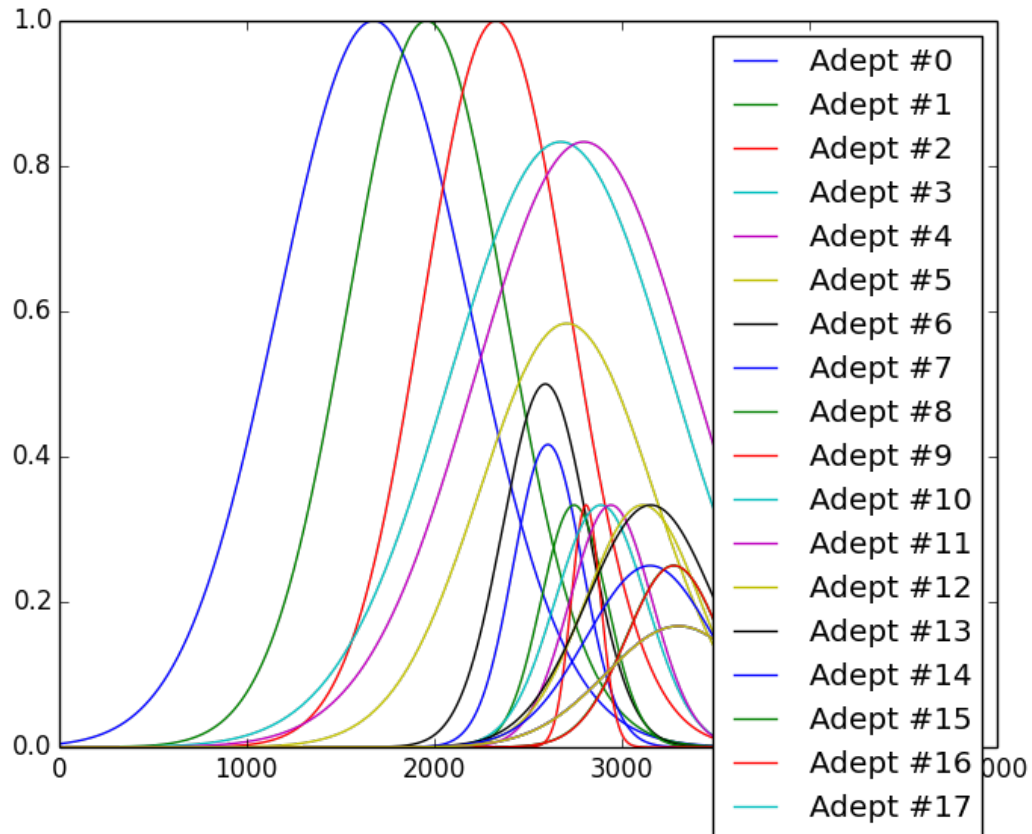
Figura 5 – Forma gráfica de distribuição estatística de uma ação *Adept* e suas repetições

Tabela 2 – Resultado da autoclassificação

<i>Build order</i>	Acertos	Total	Taxa de acerto
<b>Adept Glaives</b>	6	6	1.0
<b>Adept Stargate</b>	7	14	0.5
<b>Adept Immortal</b>	11	13	0.85
<b>Stalker Immortal</b>	3	3	1.0
<b>Adept Prism DT</b>	5	5	1.0
<b>Stalker Disruptor</b>	2	5	0.4
<b>Blink Stalker</b>	6	8	0.75

Estes resultados apontam para um erro de classificação alto para as *build orders* "Adept Stargate", que possui engloba 3 *build orders* diferentes, sob uma sequência de ações iniciais semelhantes. A alta taxa de erro é justificada pela frequência de ocorrência das últimas ações, onde, como há 3 *branches* possíveis, implica na redução do valor da função distribuição de probabilidade do par ação-repetição. A taxa de erro de "Stalker Disruptor" é justificada pelo fato das duas builds "Stalker Disruptor" e "Stalker Immortal" serem muito semelhantes, a divergência entre as duas ocorre muito próximo do marco de 6 minutos

onde as ações foram truncadas uma vez que todos os erros de classificação da *build order* "Stalker Disruptor" apontam para "Stalker Immortal".

## 4.2 Validação cruzada

A fim de realizar uma validação do resultado, utilizou-se um *dataset* individual de *replays* que não foram utilizados no treinamento para validar os resultados do método. Neste dataset, um número variável de *replays* foi utilizado.

Tabela 3 – Resultado da validação cruzada

<i>Build order</i>	Acertos	Total	Taxa de acerto
<b>Adept Glaives</b>	3	3	1.0
<b>Adept Stargate</b>	3	4	0.75
<b>Adept Immortal</b>	10	11	0.90
<b>Stalker Immortal</b>	6	7	0.85
<b>Adept Prism DT</b>	1	1	1.0
<b>Stalker Disruptor</b>	14	16	0.875
<b>Blink Stalker</b>	10	12	0.83

## 4.3 Teste de ruído

Para testar a robustez do método sob condições de informações incompletas, como seria necessário caso uma inteligência artificial (AI) estivesse testando as possibilidades de ações de um jogador humano.

Neste teste, foi removido de forma aleatória um percentual de ações de cada *build order* do *dataset* de validação. Para que o teste seja replicável, utilizou-se o nome do replay (conforme indicado no índice dos *replays* do *dataset* de treinamento) como *seed* para a geração da sequência de exclusão das ações. Isto garante que independente de onde e quem execute o algoritmo, o resultado deve ser o mesmo.

Tabela 4 – Resultado da validação cruzada

<i>Build order</i>	2%	5%	10%	20%	30%	50%	70%	80%
<b>Stalker Immortal</b>	0.86	0.57	0.43	0.14	0.29	0.14	0.29	0.43
<b>Adept Glaives</b>	1.00	1.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Adept Stargate</b>	0.75	0.75	0.50	0.25	0.50	0.00	0.00	0.00
<b>Stalker Disruptor</b>	0.88	0.69	0.38	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Blink Stalker</b>	0.83	0.67	0.75	0.50	0.42	0.33	0.25	0.17
<b>Adept Immortal</b>	0.91	0.73	0.73	0.64	0.55	0.27	0.00	0.00
<b>Adept Prism DT</b>	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00

No teste de ruído é observável que algumas das *build orders* cujo classificador obteve o melhor desempenho, como é o caso da "Adept Prism DT", o classificador também foi

capaz de suportar maior nível de ruído. Isto se deve provavelmente ao fato desta *build order* em especial, ser bastante diferente das demais.

## 5 Conclusões

Conforme visto no teste de autotclassificação, o método possui dificuldade em classificar *build orders* muito genéricas onde há alta possibilidade de variação, conforme é o caso da *build order* "Adept Stargate". No teste de validação cruzada, o método foi capaz de conseguir uma taxa de aproximadamente 85% de acerto, chegando a 100% de acertos em alguns casos específicos, embora com poucas amostras.

## 6 Propostas de Trabalhos Futuros

- Utilização de um refinamento utilizando ações-chave

# Referências Bibliográficas

Blizzard Entertainment, Inc. *s2protocol*. 2013. Disponível em: <<https://github.com/Blizzard/s2protocol>>.

HORN, C. R. J. R. A. *Matrix Analysis*. 1st. ed. CUP, 1990. ISBN 0521305861, 0521386322. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=03e9a9ebb67da1d5fa059774b3a12c4b>>.

SYNNAEVE, G.; BESSIERE, P. A bayesian model for opening prediction in rts games with application to starcraft. In: IEEE. *2011 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG'11)*. [S.l.], 2011. p. 281–288.

SYNNAEVE, G.; BESSIERE, P. A bayesian model for plan recognition in rts games applied to starcraft. *arXiv preprint arXiv:1111.3735*, 2011.

WEBER, B. G.; MATEAS, M. A data mining approach to strategy prediction. In: IEEE. *2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*. [S.l.], 2009. p. 140–147.