

MC886 - Trabalho prático individual

Guilherme P. Gonçalves (RA 091429)

Abstract

Este trabalho propõe um algoritmo de aprendizado on-line dos recursos carregados por páginas da Internet, como scripts e imagens, e agrupamento de recursos similares carregados por páginas sob uma mesma origem. Se disponíveis de antemão no momento em que o usuário requisita uma página, tais informações podem ser utilizadas pelo navegador para tomar ações especulativas, como pré-resolução DNS de URLs de recursos, tornando o carregamento da página mais rápido. O algoritmo proposto foi avaliado experimentalmente no navegador Firefox.

1. Introdução

A performance de navegadores web modernos depende de diversos fatores, como as velocidades de *parsing* de documentos HTML, ou de execução de Javascript. No entanto, a camada de rede possui importância especial, visto que pouco se pode avançar nas demais etapas do carregamento de uma página enquanto os dados ainda são trazidos, potencialmente com vários milissegundos de atraso, através da rede.

Uma área de possível otimização da camada de rede envolve fazer com que o navegador aprenda os padrões de acesso a recursos de uma página. Dessa forma, quando uma página é requisitada, algumas ações preditivas podem ser tomadas pelo navegador para agilizar a busca de recursos como imagens ou arquivos de *script*. Tais otimizações são particularmente importantes em ambientes móveis, com conexões 3G e 4G, que possuem alto *round trip time* (RTT), fazendo com que mesmo o estabelecimento de uma conexão TCP a um recurso, antes do envio de dados, atrase significativamente o carregamento de uma página.

O navegador Google Chrome possui um algoritmo [1] que explora essa ideia, e executa ações como pré-resoluções de DNS, pré-conexões, ou mesmo requisições especulativas de recursos e pré-renderização de páginas. Recentemente um outro algoritmo similar foi implementado no navegador Firefox [2], embora sem envolver ações mais agressivas (e, portanto, com implicações mais sérias para a privacidade do usuário) como as requisições especulativas.

O algoritmo implementado no Firefox opera, em linhas

gerais, sobre páginas isoladas: para cada página, tendo-se os recursos que ela já requisitou no passado, a razão do número de vezes em que um recurso foi acessado pela página pelo número de vezes que a página foi acessada dá um valor de *confiança* de que aquele recurso será necessário no próximo carregamento da página. Dependendo do valor da confiança, e das datas dos últimos acessos da página e do recurso, o navegador toma ações como pré-resolução de DNS (baixa confiança) ou pré-conexão (alta confiança).

Este trabalho explora uma abordagem diferente, em que todos os recursos acessados por páginas sob uma mesma origem são considerados de forma a encontrar grupos de recursos com padrões de acessos semelhantes. Quando uma página é requisitada, os grupos de recursos que melhor descrevem o comportamento passado da página são utilizados em ações preditivas. Dessa forma, caso duas páginas sejam visitadas em sucessão com frequência, por exemplo, seus recursos tendem a ser acessados de forma semelhante, e a navegação para uma delas causa a tomada de ações preditivas não apenas para os recursos dela, mas também para os da outra, potencialmente agilizando ambos os acessos.

A Seção 2 discute algumas das decisões iniciais que nortearam este trabalho e descreve em alto nível o algoritmo proposto, enquanto a seção 3 detalha seu funcionamento. A Seção 4 traz resultados de testes desse algoritmo em comparação com o navegador Firefox sem nenhum algoritmo de aprendizagem, e com o algoritmo atual.

2. Descrição geral do algoritmo

Desde o início, tomou-se como prioridade explorar o problema de predição de recursos sob um ângulo completamente diferente daquele utilizado pelos navegadores Chrome e Firefox. Dessa forma, enquanto estes algoritmos buscam otimizar o carregamento de uma página utilizando informações de acessos de recursos daquela página, o algoritmo aqui desenvolvido utiliza informações mais gerais da origem da página para otimizar a navegação através de um conjunto de páginas.

Além disso, o algoritmo atual no Firefox possui um número alto de constantes e parâmetros, o que, ao mesmo tempo que lhe confere flexibilidade, também o torna complexo e torna necessário um esforço de engenharia para encontrar a melhor combinação de valores para esses

parâmetros. Buscou-se, no desenvolvimento deste algoritmo, expor, se possível, um número menor de parâmetros ajustáveis, facilitando assim a avaliação experimental.

O algoritmo proposto é essencialmente uma aplicação de clusterização sobre os recursos carregados por páginas sob uma mesma origem. A clusterização acontece em dois níveis: primeiramente, todos os recursos sob uma determinada origem são agrupados em *clusters*, e a seguir, cada cluster é dividido em *subclusters*.

Uma vez calculados os agrupamentos, quando uma página já conhecida é carregada, escolhem-se como predição os recursos nos *clusters* e *subclusters* que melhor cobrem o conjunto de recursos requisitados por aquela página na última vez em que foi carregada. Caso a página não seja conhecida, isto é, jamais tenha sido visitada pelo usuário, ainda é possível inferir a partir dos *clusters* quais recursos são mais importantes para todas as páginas sob aquela origem, e possivelmente agir sobre eles. Para este trabalho, foi implementada apenas uma heurística simples para identificar esses recursos. Este caso é de particular interesse, pois o algoritmo atual do Firefox não toma ação alguma para páginas desconhecidas.

Como as informações de recursos e páginas mudam à medida que o usuário navega, é necessário que o algoritmo seja *online*. Para isso, basta recalcular periodicamente o agrupamento, utilizando dados pertencentes a uma determinada janela de tempo no passado e descartando dados antigos demais.

Enquanto está sendo utilizado, o navegador Firefox guarda algumas informações que são utilizadas por seu algoritmo de predição: *timestamp* de acesso de cada página e recurso, quais páginas carregaram quais recursos, e número de acessos a cada página e recurso. Como hipótese simplificada para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se por utilizar essas mesmas informações para descrever recursos.

3. Descrição detalhada do algoritmo

Sejam P o conjunto de páginas conhecidas para uma dada origem, r um recurso e $P_r \subseteq P$ o conjunto das páginas que requisitaram aquele recurso dentro da janela de tempo de tamanho $W = \text{now}() - W_0$ no passado. Sejam $T(r)$, $T(p)$, $H(r)$ e $H(p)$ a data do último acesso e o número de acessos (*hits*) ao recurso r e à página p , respectivamente. No caso dos recursos, são levados em conta todos os acessos de páginas sob a mesma origem, ou seja, $H(r)$ é a soma do número de acessos de todas as páginas de P_r a r , e $T(r)$ é a data (expressa em uma *timestamp* Unix) do mais recente desses acessos.

Cada recurso é então descrito pelo vetor bidimensional dado pela Equação 1:

$$v_r = \left(\frac{T(r) - W_0}{\text{now}() - W_0}, \frac{H(r)}{b_o + \sum_{p \in P_r} H(p)} \right) \quad (1)$$

Assim, a primeira componente do *feature vector* é simplesmente o tempo de acesso mais recente do recurso, normalizado pelo tamanho da janela de tempo W . O tamanho da janela, embora possa ser considerado um parâmetro, pouco influi no resultado do algoritmo quando grande o suficiente para evitar descarte excessivo de dados (note que acessos anteriores ao começo da janela W_0 são desconsiderados). Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se uma janela de duas semanas. Esta componente dá uma medida de importância global do recurso dentro daquela origem, visto que qualquer acesso a ele por qualquer página é suficiente para atualizar seu tempo de acesso mais recente.

A segunda componente do vetor é uma quantidade de acessos relativa, que expressa a importância de um determinado recurso para as páginas que o requisitam. No numerador, tem-se apenas o número total de acessos àquele recurso por todas as páginas do host, $H(r)$. No denominador, têm-se as quantias $\sum_{p \in P_r} H(p)$, o número total de acessos das páginas em P_r , e b_o , um *bias* específico para aquela origem.

A inclusão de b_o diferencia o caso em que um recurso r possui, por exemplo, 100 acessos por 100 páginas diferentes sob uma mesma origem, cada uma com um acesso, do caso em que r foi acessado apenas uma vez por uma única página. Supondo b_o igual a zero, em ambos os casos a segunda componente do vetor de r seria igual a 1, embora seja desejável reconhecer que r é bem mais importante no contexto da origem considerada no primeiro caso do que no segundo. Sendo assim, toma-se como b_o a moda do número de acessos das páginas daquela origem:

$$b_o = \text{mode}(H(p), \forall p \in P) \quad (2)$$

Portanto, se b_o e $\sum_{p \in P_r} H(p)$ são próximos, então aquele recurso provavelmente foi acessado apenas por poucas páginas, com números comuns de acessos (próximos de b_o), ou por muitas páginas, cada uma delas com número anormalmente baixo de acessos. De qualquer forma, conclui-se que aquele recurso não é importante, e seu vetor é penalizado. Note que esta distinção não leva em conta o número de páginas que acessam um recurso – seja o somatório de $H(p)$ alto devido a um grande número de acessos a um recurso por uma única página ou devido a vários acessos por várias páginas, a importância do recurso permanece a mesma.

Os vetores de todos os recursos são então agrupados utilizando o algoritmo Kmeans com distância Euclidiana. Durante o desenvolvimento do algoritmo proposto, utilizou-se como *dataset* auxiliar dados de navegação coletados pelo

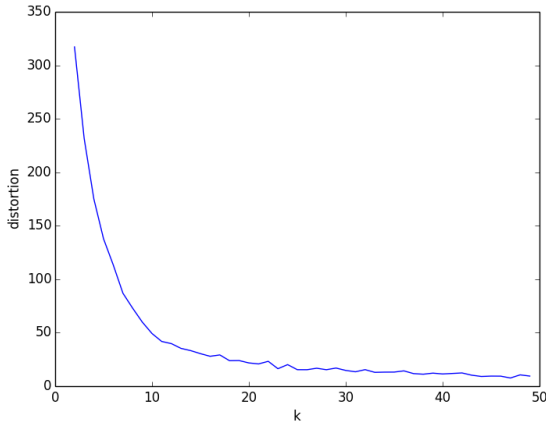


Figure 1. Distorção em função de K para o dataset do YouTube.

Firefox durante duas semanas no YouTube. Vários dos parâmetros do algoritmo proposto, inclusive a escolha do valor de K na aplicação do Kmeans, foram derivados de experimentos nesse conjunto de dados.

Para a escolha do valor de K, utilizou-se a regra do cotovelo. Conforme mostra a Figura 1, a distorção (somatório da diferença quadrada entre cada vetor e o centróide de seu *cluster*) tem maior redução para K próximo de 10. Foi tomado, portanto, esse valor fixo para o algoritmo final, embora uma estratégia adaptativa que escolha um valor menor quando menos dados estão disponíveis possa ser desejável no futuro. Cada cluster é então dividido novamente em 5 *subclusters*. Esse processo é feito para cada um dos hosts conhecidos pelo navegador.

Quando uma página conhecida p é visitada, então, o algoritmo consiste em computar o conjunto $R_{explicit}$ de recursos carregados explicitamente pela página em seu último acesso (denominados recursos explícitos), obtido a partir de $T(r)$ e $T(p)$ como na Equação 3, e então selecionar os 4 clusters que contém o maior número de recursos de desse conjunto.

$$R_{explicit} = \{r : T(r) > T(p), p \in P_r\} \quad (3)$$

O número 4 foi escolhido porque, experimentalmente, observou-se que 3 clusters eram suficientes para cobrir acima de 90% dos $R_{explicit}$ de quase todas as páginas no *dataset* do YouTube, e o cluster a mais serve para fornecer a liberdade para que sejam selecionados clusters com recursos de outras páginas.

Dos 20 subclusters que compõem esses 4 clusters, são selecionados para o conjunto de predição $R_{selected}$ os 15 que melhor cobrem $R_{explicit}$, desde que sua seleção não faça com que $R_{selected}$ tenha tamanho maior do que 50% do tamanho de $R_{explicit}$. O valor 50% é um parâmetro que controla a agressividade do algoritmo ao fazer suas

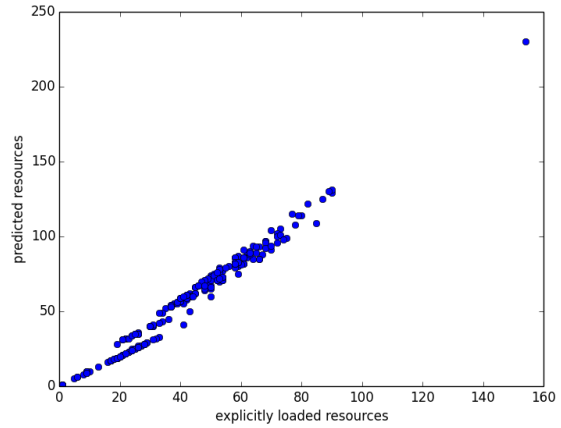


Figure 2. Crescimento de $R_{predicted}$ em função do tamanho de $R_{explicit}$ nos dados do YouTube.

predições. O conjunto de recursos para os quais serão tomadas ações preditivas é, então:

$$R_{predicted} = R_{explicit} \cup R_{selected} \quad (4)$$

Para páginas não conhecidas, são selecionados simplesmente os 15 subclusters mais próximos do ponto (1, 1), dentre os 4 clusters também mais próximos desse ponto.

A Figura 2 ilustra o crescimento linear o tamanho de $R_{predicted}$ em função do tamanho de $R_{explicit}$ para cada página nos dados retirados do YouTube, mostrando o funcionamento do controle da agressividade do algoritmo.

A Figura 3 é um histograma da fração de $R_{explicit}$ em $R_{predicted}$ nas páginas do YouTube, mostrando como, embora essa fração seja limitada inferiormente, para a maior parte das páginas ainda é possível obter predições substancialmente maiores do que apenas $R_{explicit}$.

4. Resultados experimentais

Esta seção contém os resultados da avaliação experimental do algoritmo proposto.

A metodologia dos testes consistiu em visitar algumas páginas por quatro dias, de forma a coletar dados de treinamento necessários para as predições, e então submeter o navegador a rodadas do WebPageTest [3], uma ferramenta que permite medir diversas estatísticas durante o carregamento de uma página. Em particular, para estes testes, tomou-se como métrica de qualidade das predições o SpeedIndex [4], uma medida aproximada do tempo de carregamento da página em milissegundos conforme percebido pelo usuário. Dessa forma, um bom algoritmo de predição deve resultar em uma redução do SpeedIndex.

Cada execução do WebPageTest envolveu 20 acessos a uma página em velocidade de conexão 3G. Embora o Web-

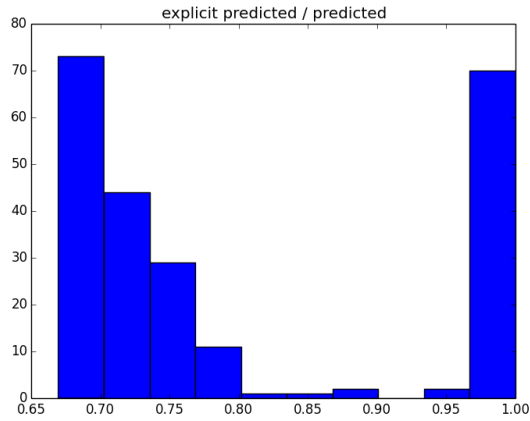


Figure 3. Crescimento de $R_{predicted}$ em função do tamanho de $R_{explicit}$ nos dados do YouTube.

PageTest também execute acessos repetidos à página (ou seja, a cada execução têm-se resultados de 20 primeiros acessos e 20 acessos repetidos), a fim de minimizar a interferência do *cache* sobre os testes, e também porque os dados necessários para a predição já estavam presentes no navegador (ou seja, não se buscava aprendizado durante os testes), foi considerado apenas o SpeedIndex dos primeiros acessos.

Para cada teste, foram comparadas três variantes do Firefox: *kmeans*, que utiliza o algoritmo aqui proposto, *seer*, que utiliza o algoritmo já existente no navegador, e *noseer*, que não toma nenhum tipo de ação preditiva, servindo como *baseline*. Para a variante *kmeans*, a única ação preditiva tomada foi a pré-conexão para todos os recursos preditos para uma página. Todas as variantes utilizaram os mesmos dados de treinamento durante os testes. Para os testes em que o algoritmo proposto aparentou ser superior, foram ainda executados testes estatísticos de Friedman, com pós-teste de Nemenyi para comparação entre os algoritmos avaliados.

Cabe notar ainda dois problemas observados na metodologia de testes causados por restrições na infraestrutura utilizada. Primeiramente, os testes foram executados sobre uma conexão direta com a Internet (e não, por exemplo, usando WebPageReplay [5]). Além de prejudicar a reprodutibilidade dos resultados, visto que as páginas usadas no teste estão sujeitas a mudanças, isso faz também com que os experimentos sejam afetados por oscilações normais na rede. No entanto, na medida em que os experimentos foram todos executados juntos, pode-se considerar pequena a influência desses fatores sobre o resultado final.

Além disso, como a coleta inicial de dados e os testes no WebPageTest ocorreram em computadores diferentes, algumas pequenas diferenças entre essas máquinas causaram o

Algoritmo	Mediana	Média	Desvio padrão
kmeans	20.115,00	19.299,30	2.439,00
noseer	22.968,00	22.838,50	4.954,00
seer	25.000,00	22.575,15	2.471,00

Table 1. Média e mediana do SpeedIndex para o experimento turing.

carregamento de recursos diferentes, porém equivalentes, pela mesma página. Por exemplo, diferenças de resolução nas máquinas fazem com que imagens que diferem apenas no tamanho (e na URL) sejam acessadas pela mesma página no treinamento e no teste. Dado que as predições não causam *download* dos recursos, mas apenas pré-conexão ao servidor responsável por eles, isso em geral não afeta os resultados experimentais. No entanto, a análise da acurácia das predições fica prejudicada, visto que a simples comparação entre as URLs dos recursos preditos e efetivamente carregados durante o teste considera errada uma predição que estaria correta caso o treinamento tivesse sido feito na mesma máquina que o teste. Dessa forma, as taxas de acerto desta seção devem ser tomadas como limitantes inferiores apenas.

A Tabela 1 contém a média e mediana do SpeedIndex para a primeira visualização no teste *turing*, que consiste em acessar o artigo sobre Alan Turing na Wikipedia. Trata-se de um teste simples para exercitar os algoritmos em uma página que sofre poucas modificações com o tempo.

Assumindo distribuição Gaussiana da média, observa-se que a média do algoritmo *kmeans* ficou 3,19 desvios padrão abaixo do *noseer*. O algoritmo *seer*, em comparação, ficou apenas 0,23 desvios padrão abaixo do *baseline*. Neste teste, ao menos 33,82% das predições feitas pelo algoritmo *kmeans* estavam de fato corretas (isto é, foram de fato feitas no teste com a mesma URL), e essas predições corretas compõem ao menos 53,49% de todas as requisições de recursos feitas no teste. De todas as requisições feitas, 58,14% eram conhecidas, ou seja, já haviam sido feitas pela página durante o treinamento. Isso evidencia que, embora não seja necessariamente preciso prever com sucesso grande parte das requisições conhecidas para se obter bons resultados, ainda pode haver espaço para melhora do algoritmo ao explorar-se melhor tais requisições.

A Tabela 2 contém as medições de SpeedIndex para a primeira visualização da página em cada um dos 20 testes. Essa tabela foi usada em um teste de Friedman com valor crítico 6,3, correspondente a 5% de confiança no resultado. A estatística de teste encontrada, 12,7, fornece evidência de que a diferença encontrada é de fato significativa, e um pós-teste de Nemenyi comparando os algoritmos dois a dois confirma a superioridade do algoritmo *kmeans* sobre os demais neste experimento.

A Tabela 3 contém os resultados para o experimento

seer	kmeans	noseer
19183	20300	36540
23500	17171	20623
21404	19160	22968
25000	16740	24368
23064	18818	25417
20480	27973	23368
21008	18932	21452
25026	18664	18419
20100	20115	21543
20072	18015	18894
23908	17537	17624
19408	17628	19517
21700	20644	17152
24800	20335	17639
25956	17828	18821
17621	17610	30248
23700	17664	30411
26273	19900	22928
24800	22600	27526
24500	18352	21312

Table 2. SpeedIndex para os primeiros carregamentos no experimento turing

Algoritmo	Mediana	Média	Desvio padrão
kmeans	15.800,00	15.481,70	4.842,00
noseer	8.595,00	18.653,30	6.480,00
seer	10.031,00	18.103,25	4.303,00

Table 3. Média e mediana do SpeedIndex para o experimento main+turing.

main+turing, que consiste em visitar a página principal da Wikipedia, e a seguir o mesmo artigo sobre Alan Turing, monitorando-se o SpeedIndex desse segundo carregamento. As duas páginas haviam sido visitadas próximas uma da outra anteriormente, de forma que, quando a primeira foi requisitada, alguns recursos da segunda foram preditos.

Esse teste visava especificamente a exercitar a propriedade do algoritmo *kmeans* de fazer previsões atravessando a fronteira das páginas. A melhora de 2,19 desvios padrão do *kmeans* em relação ao *baseline*, e o fato de que o SpeedIndex neste teste ficou consideravelmente abaixo do observado no teste anterior (embora aqui, com duas páginas visitadas, também existam efeitos de *cache* mais pronunciados), fornecem evidência para a validade da abordagem geral do algoritmo proposto.

O teste de Friedman realizado com as medidas de SpeedIndex dos primeiros carregamentos neste experimento (Tabela 4), no entanto, não aponta diferença estatisticamente significativa – aqui, o valor estatístico encontrado de 6,1, embora próximo do valor crítico, não fornece

seer	kmeans	noseer
19100	13244	18700
30465	23876	16400
16000	15300	19500
27200	21600	17300
14498	18900	8199
17800	19400	11128
15300	7943	15900
17300	27144	21251
16614	16200	26600
15800	15200	24000
21200	12000	34700
17800	12240	16800
16900	12200	20300
18800	15800	24000
16500	8641	19300
16000	15500	19100
16987	15800	7093
16235	9146	20000
10031	17400	24200
21535	12100	8595

Table 4. SpeedIndex para os primeiros carregamentos no experimento main+turing

Algoritmo	Mediana	Média	Desvio padrão
kmeans	20.430,00	24.692,85	7.477,00
noseer	23.893,00	23.390,10	5.056,00
seer	27.964,00	23.454,70	4.554,00

Table 5. Média e mediana do SpeedIndex para o experimento cnn.

evidência da superioridade de nenhum algoritmo sobre os demais.

Nesse teste, ao menos 44,12% das previsões estavam corretas, e as previsões corretas compõem também 44,12% do total das requisições. As requisições conhecidas foram 65,71% das requisições do teste.

A Tabela 5 contém os resultados do teste *cnn*, que carregou a página inicial da edição internacional do site do veículo de notícias CNN. Trata-se de uma página muito mais complexa e sujeita a mudanças do que as da Wikipedia usadas nos testes anteriores.

Neste caso, o algoritmo *kmeans* teve SpeedIndex médio de pouco mais de um desvio padrão acima do *baseline*, embora com alto desvio padrão, e o algoritmo *seer* teve desempenho similarmente fraco – 0,56 desvios padrão acima do *baseline*. As previsões corretas foram 26,90% do total, mas apenas 36,48% das requisições já haviam sido vistas no treinamento.

A Tabela 6 expressa os resultados do teste *politics*, que carregou a página de política da edição internacional da CNN. Essa página não estava presente no treinamento, de

Algoritmo	Mediana	Média	Desvio padrão
kmeans	21.607,00	24.370,00	5.939,00
noseer	24,732.00	23,737.21	4,267.00
seer	24,256.00	22,587.40	2,896.00

Table 6. Média e mediana do SpeedIndex para o experimento politics.

Algoritmo	Mediana	Média	Desvio padrão
kmeans	10.122,00	20.303,00	5.357,00
noseer	20,662.00	20,363.00	4,370.00
seer	20,485.00	22,832.00	7,708.00

Table 7. Média e mediana do SpeedIndex para o experimento cnn+world.

forma que, caso se observasse alguma melhora nos resultados do algoritmo *kmeans*, ela se deveria à heurística de escolha de predição para páginas desconhecidas.

O algoritmo *kmeans* ficou 0,66 desvios padrão acima do *baseline*, um resultado que, embora não indique melhora, também não pode ser considerado piora significativa. Aqui, apenas 5,66% das predições estavam corretas, e 19,81% das requisições feitas no teste foram preditas.

Finalmente, a Tabela 7 contém os resultados do teste *cnn+world*, análogo ao teste *main+turing*, mas envolvendo a página inicial da edição internacional da CNN e a página de notícias mundiais.

Não se observou, nas médias desse experimento, melhora expressiva trazida por nenhum algoritmo. A mediana extraordinariamente baixa do algoritmo *kmeans* pode ser explicada, assim como para o algoritmo *noseer* no experimento *main+turing*, por oscilações normais da rede.

O algoritmo proposto obteve, assim, resultados muito bons para páginas simples como artigos da Wikipedia, mas todas as variantes do navegador analisadas tiveram grande degradação de performance em páginas mais complexas como as do site de notícias CNN.

5. Conclusão e trabalho futuro

Este trabalho resultou em um algoritmo de predição de acesso a recursos de páginas web que trouxe melhoras no SpeedIndex de algumas páginas de teste simples sobre o *baseline* e o algoritmo atualmente implementado no navegador Firefox. Para páginas complexas e páginas não vistas no treinamento, não se observou melhora significativa.

Sabendo-se que o tempo de carregamento de uma página é frequentemente dominado pelo tempo de acesso de um único recurso, uma direção de trabalho futuro pode envolver priorizar recursos de alguma forma, visando a sempre prever aqueles que podem atrasar mais o carregamento da página. Conforme comprovado na Seção 4, não é necessário, e de fato pode ser custoso, simplesmente usar

como predição todos os recursos conhecidos para uma página.

Outra continuação natural deste trabalho poderia envolver o desenvolvimento de heurísticas mais sofisticadas para a escolha de recursos a prever quando páginas desconhecidas são acessadas. A heurística simples aplicada neste algoritmo, que não trouxe resultados bons para uma página complexa, tende a escolher recursos acessados muito recentemente, e que portanto têm boa probabilidade de estar em *cache* no navegador, não sendo necessária sua predição.

References

- [1] High performance networking in google chrome <http://www.igvita.com/posa/high-performance-networking-in-google-chrome/>, November 2013. 1
- [2] Bugzilla: Add interface for predictive actions <https://bugzil.la/881804>, November 2013. 1
- [3] Webpagetest <http://www.webpagetest.org/>, November 2013. 3
- [4] Speedindex <https://sites.google.com/a/webpagetest.org/docs/using-webpagetest/metrics/speed-index>, September 2013. 3
- [5] Webpagereplay <https://code.google.com/p/web-page-replay/>, November 2013. 4