

Um protocolo FSA com resolução imediata de colisões para sistemas RFID sob o efeito captura

Henrique Stagni¹, Rafael Perazzo Barbosa Mota¹, Daniel Macêdo Batista¹

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade de São Paulo (USP)
Rua do Matão 1010 – 05508-090 – São Paulo – SP – Brasil

{stagni,perazzo,batista}@ime.usp.br

Abstract. *Capture effect is a common phenomenon in passive radio frequency identification systems. When multiple tags transmit their signals to a reader simultaneously, one of the tags will be successfully identified due to capture effect. In this paper, we present an algorithm which handles collisions as soon as they occur, which we believe to be a better way of taking advantage of a capture effect environment in order to improve identification efficiency. The algorithm we propose is both easy to implement and computationally efficient. Moreover we use a more realistic approach for modelling the capture effect. Our solution is based on the IDFSA-IcolR algorithm, a Frame Slotted Aloha (FSA) algorithm, with similar properties, which does not regard environments with capture effect.*

Resumo. *O efeito captura é um fenômeno comum em sistemas RFID. Quando múltiplas etiquetas respondem a uma solicitação simultaneamente, uma delas pode ser corretamente identificada devido a este efeito. Neste artigo é proposto um algoritmo que resolve colisões assim que elas ocorrem, o que é uma boa maneira de explorar um ambiente com efeito captura de forma a obter uma melhor eficiência de identificação. Ademais, o algoritmo proposto é de fácil implementação, é computacionalmente eficiente e modela o efeito captura de modo realístico. A proposta se baseia no algoritmo IDFSA-IcolR, um algoritmo FSA com propriedades similares mas que não considera efeito captura. Experimentos de simulação são realizados para comprovar as vantagens do algoritmo.*

1. Introdução

Identificação por radiofrequência (RFID) é um termo genérico para tecnologias que permitam a identificação de objetos por meio de ondas de rádio. Um número que identifica univocamente (ID) cada objeto de um sistema RFID é armazenado em uma *etiqueta* RFID. Uma etiqueta RFID é um dispositivo eletrônico que contém um microchip e uma antena. Tal dispositivo pode receber sinais de rádio de um *leitor* RFID e mandar, por sua vez, um sinal de volta ao leitor — usando uma técnica de reflexão de sinal conhecida como *retro-difusão* — contendo o seu número de identificação e, possivelmente, outras informações. Um *leitor* RFID é, também, um dispositivo eletrônico que, após ter identificado todas as etiquetas do sistema, envia tais informações para um outro dispositivo que se encarrega de efetivamente processá-las.

A tecnologia RFID possui muitas vantagens em relação a identificação pelos assim chamados *códigos de barra*, que ainda constituem, em diversas aplicações, a solução mais empregada para resolver o problema de identificação de objetos. Ao contrário de etiquetas

RFID, códigos de barra são pouco robustos — sujeira, umidade e dobras nas embalagens de produtos podem impedir sua leitura —, podem ser facilmente falsificados e, acima de tudo, exigem intervenção humana no processo de leitura.

A tecnologia RFID, por sua vez, não exige intervenção humana, possibilitando a identificação de múltiplas etiquetas de forma *eficiente*, isto é, em um curto intervalo de tempo. Ainda assim, existem aplicações que exigem uma eficiência de identificação que ainda não é atingida pelos atuais sistemas RFID, o que inviabiliza seu uso. A (relativamente) baixa eficiência dos sistemas RFID atuais é causada pela *colisão* entre etiquetas. Uma *colisão* ocorre quando múltiplas etiquetas respondem simultaneamente ao leitor. Como todas elas compartilham o mesmo canal de comunicação, os seus respectivos sinais de rádio se interferem mutuamente, o que geralmente impede a identificação de qualquer uma delas [1]. É possível, entretanto, que o leitor identifique uma das múltiplas etiquetas em colisão, como consequência de um fenômeno chamado *efeito captura*. O *efeito captura* ocorre quando o sinal proveniente de alguma das etiquetas em colisão tem uma potência muito maior do que o sinal das demais de modo que o leitor só consegue receber o sinal da etiqueta que *captura* o canal, isto é, aquela com a maior potência. Apesar de ser um fenômeno muito observado na prática, o *efeito captura* em sistemas RFID só tem sido considerado em trabalhos mais recentes (ver Seção 2).

Um *protocolo anticolisão* para um sistema RFID é uma especificação do conjunto de *mensagens* (ou *comandos*) que o leitor pode enviar às etiquetas, bem como a ação tomada por uma *etiqueta* ao receber cada uma dessas mensagens — geralmente o envio de uma mensagem para o leitor e uma mudança de *estado*. O *protocolo* também especifica o tamanho (em número de *bits*) dos identificadores de cada etiqueta, o código de detecção de erros usado para constatar a ocorrência de *colisões*, e diversos outros parâmetros específicos do sistema em questão. Finalmente temos o algoritmo anticolisão, responsável por ditar a estratégia usada pelo leitor para enviar mensagens específicas de um protocolo anticolisão em questão, de forma a reconhecer todas as etiquetas do sistema no menor tempo possível, resolvendo as prováveis colisões que venham a ocorrer.

Neste artigo propomos o IDFSA-IcolR-CE, uma solução para identificação de etiquetas RFID em ambientes sob o efeito captura. Nossa solução compreende um algoritmo anticolisão FSA (*Frame Slotted Aloha* — ver seção 2) com *resolução imediata* de colisões, isto é, em que etiquetas que participam de uma colisão são reconhecidas em um processo que não envolve as demais etiquetas e que é iniciado imediatamente após a colisão. Nosso algoritmo foi concebido para um sistema RFID abstrato, dotado de um protocolo que possibilita que um leitor identifique a ocorrência de efeito captura assim que ele ocorre.

Na seção seguinte, revisamos os algoritmos anticolisão FSA existentes na literatura. Na Seção 3 descrevemos o modelo que assumimos para o efeito captura e outras suposições que fazemos neste trabalho. A Seção 4 descreve o protocolo desenvolvido e a Seção 5 descreve o algoritmo anticolisão específico usado por nossa solução. Os resultados obtidos são apresentados na Seção 6 e discutidos na Seção 7.

2. Algoritmos anticolisão FSA

Neste artigo serão considerados sistemas RFID pertencentes à classe FSA (*Frame Slotted Aloha*). Tais sistemas possuem protocolos que permitem que o leitor envie uma men-

sagem que determina o início de um novo *quadro*, composto de um dado número L de etapas distintas de comunicação denominadas *slots*— o início de cada um desses *slots* é determinado por uma mensagem enviada pelo leitor. Fixado um quadro, cada etiqueta pode se comunicar com o leitor em apenas um *slot*, escolhido uniformemente ao acaso pela etiqueta no início do quadro. Para cada *slot*, definimos seu *tamanho de colisão* como o número de etiquetas associados a ele. Dizemos que um *slot* com tamanho de colisão s é *ocioso*, de *identificação* ou de *colisão* se $s = 0$, $s = 1$ ou $s > 1$, respectivamente. Diferentes sistemas FSA se distinguem principalmente pelo algoritmo anticisão empregado, mas também por particularidades dos protocolos anticisão.

Podemos classificar os algoritmos FSA de acordo com o momento em que as etiquetas colididas são identificadas. Em algoritmos *DFSA* (*Dynamic Frame Slotted Aloha*), o leitor repete sucessivos quadros (possivelmente com diferentes tamanhos) até que todas as etiquetas tenham sido identificadas. Um exemplo peculiar de algoritmo DFSA é o chamado Algoritmo Q para o padrão global EPC (*EPC Class 1 Generation 2* [2]). O protocolo especificado no padrão EPC permite que o leitor mande uma mensagem que inicia um novo quadro antes do término do atual. O Algoritmo Q (o algoritmo padrão especificado no EPC) usa tais mensagens para iniciar um novo quadro (de tamanho possivelmente diferente do anterior) a cada *slot* de colisão. Uma outra classe de algoritmo FSA são os algoritmos *com resolução imediata de colisão*. Tais algoritmos mantêm um único *quadro principal* e identificam etiquetas colididas em um mecanismo separado enquanto as demais etiquetas esperam. O algoritmo proposto em [3], por exemplo, reconhece etiquetas colididas em um mecanismo conhecido como *árvore binária*. A solução proposta neste trabalho é baseada no algoritmo IDFS-ICOLR [4], no qual todo *slot* de colisão do quadro principal dá origem à criação de um *quadro de colisão*, em que participam apenas as etiquetas colididas. Durante a execução de um quadro de colisão, o algoritmo se comporta como um sistema DFSA, repetindo o quadro (com um tamanho possivelmente diferente) até que todas as etiquetas sejam identificadas e o algoritmo possa voltar à execução do quadro principal.

Um ponto crítico de todo algoritmo FSA é a escolha do tamanho dos quadros usados. Um tamanho de quadro muito menor que o número de etiquetas tende a conter muitos *slots* de colisão, enquanto que um quadro de tamanho muito maior tende a conter muitos *slots* ociosos. Assim, todos os algoritmos FSA devem fazer alguma espécie de estimativa do número de etiquetas do sistema. Em alguns algoritmos, como o proposto neste trabalho, a estimativa precede o processo de identificação. Em outros, como o Algoritmo Q, a estimativa é feita ao longo do próprio processo de identificação, uma vez que o tamanho do quadro pode ser alterado a qualquer momento.

Apesar da grande variedade de soluções para sistemas RFID propostas na literatura, há poucos trabalhos que lidam com o fenômeno do efeito captura. Algoritmos DFSA em geral já são capazes de identificar todas as etiquetas do sistema, mesmo considerando o efeito captura. Entretanto, a ocorrência desse fenômeno pode fazer com que tais algoritmos façam uma estimativa errada do número de etiquetas, degradando a eficiência da solução [5]. Li e Wang propõem em [6] um algoritmo de estimação que lida com efeito captura, permitindo que algoritmos DFSA que façam uso dessa estimação não subestimem o número de etiquetas do sistema. Wu e Zeng [5] desenvolveram um algoritmo anticisão compatível com o padrão EPC que lida com o efeito captura. Embora esse sistema identi-

fique etiquetas que colidiram em *slots* sem efeito captura imediatamente, as etiquetas em *slots* de colisão capturados são identificadas apenas em quadros subsequentes.

Este trabalho se distingue dos demais ao propor um sistema RFID em que *todas* as colisões são resolvidas imediatamente, independente da eventual ocorrência de efeito captura. Ademais, a exemplo dos dois sistemas citados anteriormente, boa parte dos trabalhos existentes assume que o efeito captura pode ocorrer em cada *slot* com uma probabilidade fixa. Nossa solução assume um modelo mais realístico para o efeito captura, que será descrito na próxima seção.

3. Suposições sobre o sistema

3.1. Modelo de efeito captura

Neste trabalho, usamos um modelo mais realístico [7] para o efeito captura, em vez do modelo mais simples usado por boa parte dos algoritmos atualmente (ver Seção 2).

Em experimentos práticos, o efeito captura costuma ocorrer com maior frequência quando um *slot* tem um *tamanho de colisão* pequeno, isto é, quando apenas um número pequeno de etiquetas é associado a ele [8, 9]. Esse fenômeno pode ser inclusive verificado analiticamente se assumirmos que as etiquetas foram dispostas, uniformemente ao acaso, no interior de uma região circular [9, 10]. Os dois artigos supracitados, apesar de assumirem respectivamente diferentes modelos estocásticos para a propagação por rádio, provam que a probabilidade do efeito captura ocorrer em um dado *slot* de tempo decresce *exponencialmente* com o tamanho de colisão do *slot*. Em outras palavras, podemos assumir que há uma constante positiva γ tal que a probabilidade $C(s)$ de um *slot* com tamanho de colisão s ser capturado é dada pela equação (1) abaixo.

$$C(s) = e^{-\gamma(s-1)}. \quad (1)$$

Note que a equação acima satisfaz $C(1) = 1$, de forma que podemos considerar um *slot* de identificação usual (com tamanho de colisão 1) como uma forma degenerada de efeito captura.

3.2. Suposições gerais

O sistema consiste de um leitor RFID e n etiquetas passivas satisfazendo as condições listadas abaixo.

- As n etiquetas estão na área de cobertura do leitor e não se movem durante o processo de identificação. Nenhuma nova etiqueta entra na área de cobertura do leitor enquanto o processo de identificação estiver em andamento.
- Não há perdas ou atrasos na transmissão de quaisquer mensagens do sistema.
- O parâmetro γ da Equação 1 é conhecido pelo sistema. Fazemos tal suposição, uma vez que tal parâmetro não varia quando o processo de identificação é repetido em um mesmo local e com equipamentos similares.
- Supomos que o leitor *não* possui meios de distinguir entre um *slot* de identificação e um *slot* de colisão em que ocorre efeito captura.

4. Protocolo anticolisão

Nesta seção, especificamos um protocolo anticolisão cujo objetivo é dar suporte a algoritmos anticolisão com resolução imediata de colisões. Em particular, nosso protocolo fornece meios para que um algoritmo anticolisão reconheça se o *slot* corrente é de colisão, de forma que o processo de reconhecimento das etiquetas em colisão possa ser iniciado imediatamente.

O protocolo proposto assume que cada mensagem das etiquetas para o leitor contém um *código de detecção de erros* (como CRC), de forma que o leitor consiga identificar quando há uma interferência de sinal. Contudo, só isso não é suficiente para que o leitor distinga um *slot* de colisão em que ocorre efeito captura de um *slot* de identificação. A solução do protocolo proposto consiste em uma troca extra de mensagens entre as etiquetas e o leitor em *slots* em que uma etiqueta é reconhecida: após informar o reconhecimento da etiqueta, o leitor espera possíveis mensagens de outras etiquetas informando que estavam associadas a esse mesmo *slot* (o que configura a ocorrência do efeito captura). Observamos que se nessa transmissão extra ocorre novamente efeito captura (possivelmente degenerado), o leitor pode ser capaz de reconhecer uma etiqueta adicional. Chamaremos tal identificação de *identificação tardia*.

O protocolo proposto dá suporte a dois tipos de quadro: um quadro *principal* — do qual participam inicialmente todas as etiquetas — e quadros *de colisão* — dos quais participam apenas as etiquetas associadas ao último *slot* processado no quadro principal. O protocolo permite ainda que um quadro de colisão seja repetido diversas vezes, recurso que pode ser usado por algoritmos anticolisão até que todas as etiquetas colididas sejam identificadas.

4.1. Mensagens do protocolo

O leitor pode trocar as mensagens da Tabela 1 com as etiquetas. Cada etiqueta pode enviar as mensagens listadas na Tabela 2 como resposta a uma comunicação vinda do leitor.

4.2. Diagrama de estados da etiqueta

O algoritmo da etiqueta é dado pelo diagrama de estados da Figura 1. Na figura, ID representa o identificador da etiqueta, o símbolo $*$ representa qualquer identificador diferente de ID e $\text{unif}(1..L)$ é a operação de escolher um número uniformemente ao acaso entre 1 e L . rec : representa uma mensagem recebida e env : representa uma mensagem enviada.

4.3. Tamanho ótimo do quadro principal

Nesta seção analisamos a *eficiência* do quadro principal, dado pelo número médio de etiquetas identificadas por *slot* desse quadro. Essa análise determina o tamanho de quadro principal que um algoritmo anticolisão qualquer pode usar para maximizar o número de identificações no quadro principal. Lembramos que é possível que até duas etiquetas sejam reconhecidas em um mesmo *slot*, como consequência de uma eventual identificação tardia.

Suponha que o sistema tenha n etiquetas e que o tamanho do quadro principal seja L . Fixe um *slot* i qualquer do quadro principal e defina S como a variável aleatória que

Nome da Mensagem	O que indica
QUADRO(L)	Início da fase de identificação. O parâmetro L é um inteiro positivo que indica o tamanho do quadro principal.
SLOT(i)	Início do <i>slot</i> i .
ACK(i, ID)	Leitor reconheceu etiqueta com identificador ID durante <i>slot</i> i do quadro principal.
QUADROCOL($i, L, [ID]$)	Início de um quadro de colisão de tamanho L para reconhecer as etiquetas associadas ao <i>slot</i> i que não foram identificadas no quadro principal. O parâmetro opcional ID indica que uma etiqueta com identificador ID foi reconhecida tardiamente no <i>slot</i> i do quadro principal.
SLOTCOL($i, [ID]$)	Início do <i>slot</i> i do quadro de colisão. O parâmetro opcional ID indica que uma etiqueta com identificador ID foi reconhecida tardiamente no <i>slot</i> de colisão $i - 1$.
ACKCOL(i, ID)	Leitor reconheceu etiqueta com identificador ID durante <i>slot</i> i do quadro de colisão.

Tabela 1. Mensagens entre leitor e etiquetas.

Nome da Mensagem	O que indica
ETIQUETA(ID)	Informa ao leitor o número ID que a identifica.
CAPTURADA(ID)	Informa ao leitor que esta etiqueta estava associada ao mesmo <i>slot</i> que a última etiqueta identificada.

Tabela 2. Mensagens de resposta das etiquetas.

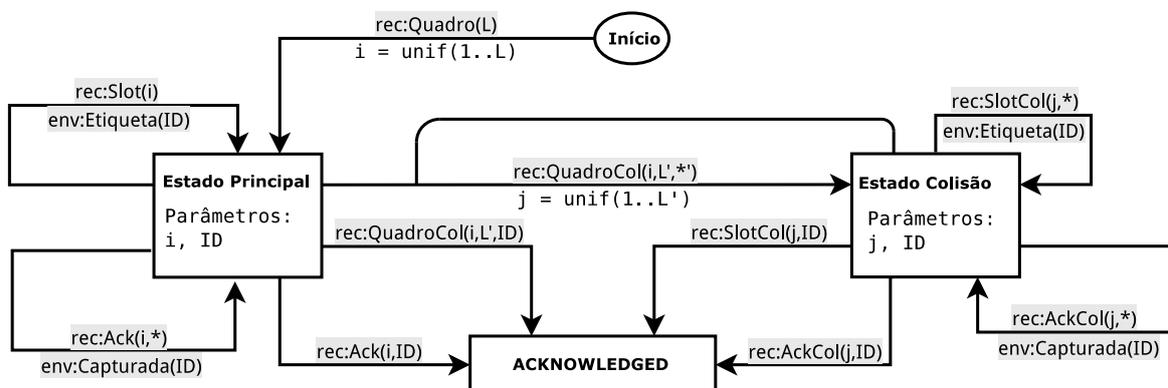


Figura 1. Diagrama de estados de uma etiqueta com identificador ID

conta o número de etiquetas associadas a i . Considere também a variável aleatória Z que indica o número de etiquetas reconhecidas durante o *slot* i .

A eficiência média ef do sistema (no quadro principal) pode ser expressa, portanto, como

$$\begin{aligned}
ef &= \mathbb{E}(Z) \\
&= 1 \cdot \mathbb{P}(Z = 1) + 2 \cdot \mathbb{P}(Z = 2) \\
&= 1 \cdot \left(\mathbb{P}(S = 1) + \sum_{s=2}^n \mathbb{P}(S = s)C(s)(1 - C(s - 1)) \right) \\
&\quad + 2 \cdot \left(\sum_{s=2}^n \mathbb{P}(S = s)C(s)C(s - 1) \right) \\
&= \mathbb{P}(S = 1) + \sum_{s=2}^n \mathbb{P}(S = s)C(s)(1 + C(s - 1))
\end{aligned}$$

Como cada etiqueta é associada ao *slot* i com probabilidade $\frac{1}{L}$ e de maneira independente da escolha das demais etiquetas, temos que S tem distribuição binomial, isto é, que $S \sim \text{Bin}(n, \frac{1}{L})$. Portanto, segue que

$$ef = \frac{n}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-1} + \sum_{s=2}^n \binom{n}{s} \left(\frac{1}{L}\right)^s \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-s} e^{-\gamma(s-1)}(1 + e^{-\gamma(s-2)}) \quad (2)$$

Fixado γ , desconhecemos uma fórmula fechada que determine o valor de L que maximize a expressão acima em função de n . Notamos, entretanto, que esse valor pode ser computado *a priori* para cada n por força bruta e armazenado em uma tabela. Desta forma, um algoritmo anticisão que tenha acesso a tal tabela pode escolher o melhor tamanho de quadro principal em função de uma estimativa para o número n de etiquetas. No caso particular do protocolo IDFS-ICOLR-CE, os valores estimados para o número de etiquetas são sempre potências de 2, o que permite que o tamanho dessa tabela seja drasticamente reduzido.

5. Algoritmo anticisão IDFS-ICOLR-CE

O algoritmo anticisão proposto possui duas fases distintas. A primeira consiste na estimação do número de etiquetas do sistema, de forma a determinar um bom valor para o quadro principal, e a segunda consiste na identificação propriamente dita.

5.1. Fase de estimação

A fase de estimação considerada aqui é inspirada no processo de estimação usado em [4] e tem o objetivo de determinar rapidamente apenas uma estimativa grossa do número de etiquetas do sistema. Mais especificamente, esse algoritmo determina uma estimativa Q para o maior inteiro Q^* que satisfaça $2^{Q^*} \leq n$, onde n é o número de etiquetas do sistema.

O algoritmo inicia tomando $Q = 1$. A cada passo, o algoritmo de estimação repete um número T de vezes o seguinte experimento: cria um quadro de tamanho $L = 2^Q$ e chama apenas as etiquetas associadas ao primeiro *slot*. Se houve colisão (ou efeito

captura) em mais do que 40% dessas T vezes, o algoritmo de estimação dobra o valor de Q . Caso contrário, o algoritmo devolve o valor atual de Q como sua estimativa para Q^* .

De fato, se em algum passo do algoritmo temos $Q < Q^*$, então $L < 2n$, o que implica que a probabilidade de que mais do que uma etiqueta esteja associada ao primeiro *slot* é pelo menos $1 - 3e^{-2} \approx 59\%$, quando $n \rightarrow \infty$. Por outro lado, se $Q \geq Q^*$, então $L \geq 2n$ e, portanto, a probabilidade de que mais do que uma etiqueta esteja associada ao primeiro *slot* é no máximo $1 - 2e^{-1} \approx 26\%$, quando $n \rightarrow \infty$.

5.2. Fase de identificação

Nessa seção apresentamos na forma de pseudocódigo (Algoritmo 1 e Algoritmo 2) o algoritmo usado pelo leitor na fase de identificação. Assumimos que o leitor tem disponível uma tabela com os valores ótimos de quadro principal para cada n . Essa tabela pode ser computada previamente como descrito na Seção 4.3. O código que implementa os algoritmos está disponível em <https://github.com/stagni/icolrce> sob a licença GPL v2.0.

Algoritmo 1 Operação principal do leitor

```
1:  $n \leftarrow$  (valor obtido a partir do processo de estimação).
2:  $L \leftarrow$  TamanhoQuadroOtimo( $n$ )
3: Envia mensagem QUADRO( $L$ ).
4: para  $i = 1$  to  $L$  faça
5:   Envia mensagem SLOT( $i$ ).
6:   se (não recebe respostas) então
7:     Nada a fazer (slot ocioso)
8:   senão se (recebe sinal com colisão) então
9:     Chama ResolveColisões( $i, 2, \text{nil}$ ) (Algoritmo 2)
10:  senão se (recebe mensagem ETIQUETA( $ID$ )) então
11:    Envia mensagem ACK( $i, ID$ )
12:    se (não recebe respostas) então
13:      Nada a fazer (não ocorreu efeito captura)
14:    senão se (recebe mensagem CAPTURA( $ID'$ )) então
15:      Chama ResolveColisões( $i, 1, \text{nil}$ ) (Algoritmo 2)
16:    senão se (recebe sinal com colisão) então
17:      Chama ResolveColisões( $i, 1, \text{nil}$ ) (Algoritmo 2)
18:    fim se
19:  fim se
20: fim para
```

Fazemos aqui algumas observações sobre o tamanho do quadro de colisão usado pela nossa solução. Esse quadro possui apenas 2 *slots* se foi originado de uma colisão normal e apenas 1, se foi originado de uma colisão com efeito captura. A escolha se justifica pelo fato do número médio de etiquetas associadas a um mesmo *slot* do quadro principal ser pequeno. Além disso, na ocorrência de efeito captura pelo menos uma das etiquetas colididas já foi identificada. Observamos na prática que em um número considerável de vezes (principalmente na ocorrência de identificações tardias), não resta nenhuma etiqueta a ser identificada no quadro de colisão.

O tamanho do quadro de colisão é aumentado por um fator multiplicativo de 1,1 no caso em que nem todas as etiquetas foram identificadas e o processo precisa ser repetido. Esse aumento é feito apenas para garantir que a eficiência do sistema não seja deteriorada no caso raro em que em que muitas etiquetas participam do quadro de colisão: neste caso, o número de *slots* no quadro de colisão eventualmente cresce até um valor que permita a identificação de tais etiquetas.

Algoritmo 2 Função de tratamento de *slot* de colisão.

```

1: procedure RESOLVECOLISÕES( $i, L, idTardia$ )
2:   Envia mensagem QUADROCOL( $j, \lfloor L \rfloor, idTardia$ ).
3:    $idTardia \leftarrow nil$ .
4:   repita
5:      $colisão \leftarrow false$ 
6:     para  $j = 1$  até  $\lfloor L \rfloor$  faça
7:       Envia mensagem SLOTCOL( $j, idTardia$ ).
8:        $idTardia \leftarrow nil$ .
9:       se (não recebe respostas) então
10:        Nada a fazer (slot ocioso)
11:       senão se (recebe sinal com colisão) então
12:         $colisão \leftarrow true$ 
13:       senão se (recebe mensagem ETIQUETA( $ID$ )) então
14:        Envia mensagem ACKCOL( $j, ID$ )
15:        se (não recebe respostas) então
16:          Nada a fazer (não ocorreu efeito captura)
17:        senão se (recebe mensagem CAPTURA( $ID'$ )) então
18:           $colisão \leftarrow true$ .
19:           $idTardia \leftarrow ID'$ 
20:        senão se (recebe sinal com colisão) então
21:           $colisão \leftarrow true$ .
22:       fim se
23:     fim se
24:     fim para
25:     se  $colisão = true$  então
26:        $L \leftarrow 1.1 \times L$ 
27:       Envia mensagem QUADROCOL( $i, \lfloor L \rfloor, nil$ )
28:     fim se
29:   até  $colisão = false$ 
30: fim procedure

```

6. Experimentos

Os experimentos realizados para avaliar o desempenho da solução proposta foram feitos por meio de simulações computacionais [11]. Para efeito de comparação, implementamos o Algoritmo Q, como especificado no padrão EPC [2], que é capaz de identificar todas as etiquetas, mesmo sob a ocorrência do efeito captura (como descrito na Seção 2). Como as demais propostas da literatura não utilizam um modelo realístico de efeito captura, os mesmos não foram considerados nas comparações para evitar comparações injustas. O

cenário modelado considera uma única identificação, com variação no número de etiquetas. O grande número de etiquetas foi considerado prevendo um aumento significativo da quantidade de objetos no futuro, principalmente em cenários da Internet das Coisas.

6.1. Métricas utilizadas

A principal métrica utilizada na literatura para avaliar o desempenho de sistemas RFID é o número de *slots* usados durante todo o processo de identificação. De maneira equivalente, também considera-se a *eficiência do sistema*, que é dada pelo número médio de identificações realizadas em cada *slot*.

Uma outra métrica utilizada diz respeito ao tempo total gasto durante o processo de identificação. Essa métrica não é equivalente à anterior, pois o tempo gasto em um *slot* pode variar se for um *slot* de identificação, de colisão ou ocioso. Neste trabalho consideramos que o leitor consome um tempo médio de $1,375ms$, $0,3375ms$ ou $0,0675ms$ em *slots* de identificação, de colisão ou ocioso, respectivamente. Apesar de serem relativos a leitores compatíveis com o padrão EPC (ver [12]), esses valores de tempo médio representam a relação de tempos válida em qualquer sistema RFID, a saber, de que *slots* de identificação são mais custosos que os demais tipos de *slot*.

É importante notar que em *slots* de identificação, há uma comunicação extra realizada pelo IDFSA-IcolR-CE para que o leitor fique ciente da ocorrência do efeito captura. Assim, o tempo gasto pelo IDFSA-IcolR-CE em *slots* de identificação é potencialmente maior do que o tempo gasto por soluções que não necessitam desta comunicação extra (como o Algoritmo Q). As métricas descritas não são, portanto, as métricas ideais para comparar os algoritmos IDFSA-IcolR-CE e Algoritmo Q. Fazemos uma discussão mais aprofundada sobre essa questão na Seção 7.

6.2. Resultados obtidos

Na Figura 2 comparamos a eficiência (isto é, o número médio de identificações por *slot*) das soluções IDFSA-IcolR-CE e Algoritmo Q para um valor fixo de γ ($\gamma = 0,5$) e para diferentes números (N) de etiquetas a serem identificadas. Observamos que ao considerarmos um número razoavelmente grande de etiquetas, o sistema IDFSA-IcolR-CE obtém uma eficiência superior à obtida pelo Algoritmo Q. O intervalo de confiança estatístico foi de 95% e encontrou-se variações no intervalo de 0,3% a 0,8% do valor da média para todos os pontos. Para facilitar a leitura dos gráficos, não foram incluídos os intervalos de confiança, uma vez que os mesmos são pequenos o suficiente para serem seguramente ignorados. Assume-se que perdas, atrasos e outros erros são tratados em camadas mais baixas, de forma que o processo anticolisão se concentre no problema de minimizar o número de colisões durante o processo de identificação.

Também comparamos a eficiência dos algoritmos IDFSA-IcolR-CE e Q ao considerarmos diferentes valores de γ . Na Figura 3 comparamos o número de *slots* gastos por cada sistema no processo de identificação de 1000 etiquetas. O sistema proposto obtém um desempenho superior ao Algoritmo Q para todos os valores de γ considerados. Como esperado, a medida que γ diminui, o número de *slots* gastos no processo de identificação diminui em ambos os sistemas, pois estamos considerando ambientes onde a ocorrência de efeito captura é cada vez mais provável.

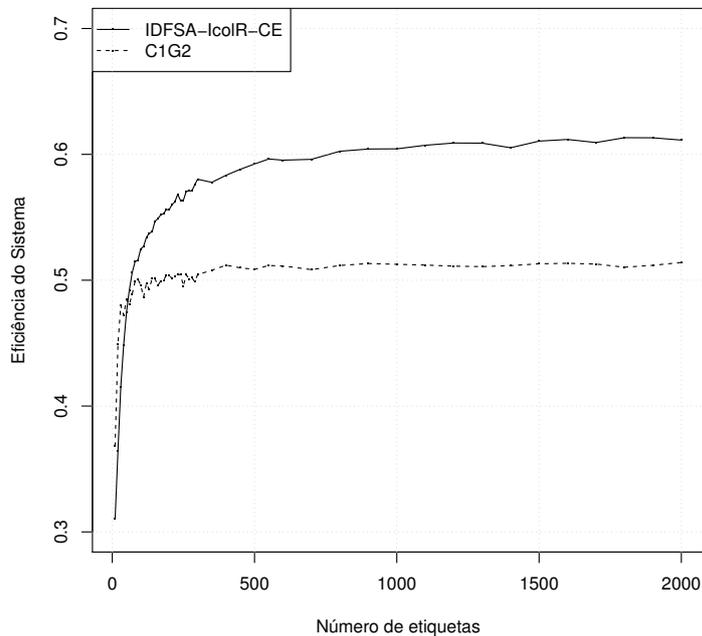


Figura 2. Número médio de identificações por *slot* ($\gamma = 0.5$)

Também obtemos um melhor desempenho usando a nossa solução quando comparamos o número de segundos gastos no processo de identificação. A Figura 4 mostra a redução relativa no tempo de identificação de 1000 etiquetas ao usarmos nossa solução em vez do Algoritmo Q.

7. Conclusão

Os resultados obtidos mostram que o algoritmo IDFSA-IcolR-CE obtém um desempenho consideravelmente melhor do que o Algoritmo Q ao identificar um número considerável de etiquetas em ambientes com efeito captura. Esta maior eficiência da nossa solução decorre, em parte, da escolha das métricas usadas: ao equipararmos o custo de *slots* de identificação em ambas as soluções, estamos desconsiderando a comunicação extra exigida pela nossa solução para que o leitor fique ciente da (possível) ocorrência de efeito captura. Por mais que o protocolo descrito no EPC também faça, na prática [2], a mesma quantidade de trocas de mensagens em um *slot* de identificação, esta troca extra tem como objetivo diminuir a quantidade de *bits* transmitidos entre leitor e etiquetas e o sistema IDFSA-IcolR-CE exigiria, de qualquer maneira, uma transmissão de uma maior quantidade de dados em um *slot* de identificação.

Como a resolução instantânea de colisões em cenários de efeito captura exige que *slots* de identificação sejam mais custosos, concluímos que é necessário o uso de métricas mais finas do que as geralmente encontradas na literatura para que esse tipo de solução seja avaliado.

Contudo, é importante ressaltar que o ganho de eficiência de nossa solução em relação ao Algoritmo Q é cada vez maior, à medida em que consideramos ambientes

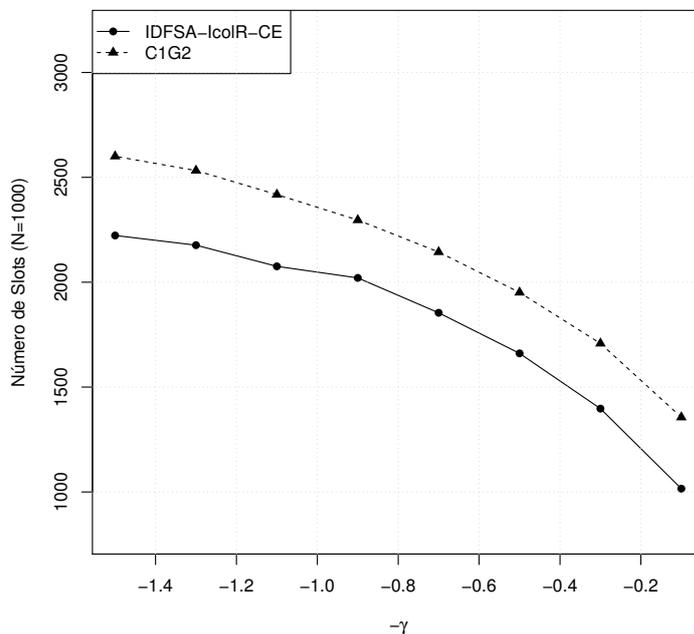


Figura 3. Número total de slots gastos no processo de identificação de 1000 etiquetas

com maior incidência de efeito captura. Isso indica que a maior eficiência do sistema IDFSa-IcolR-CE decorre não apenas das métricas que o favorecem, mas também da sua capacidade de explorar ambientes em que há maior ocorrência de efeito captura.

Finalmente, observamos que o valor ótimo obtido para o tamanho dos quadros de colisão (que, ao contrário do quadro principal, foram determinados empiricamente) foi extremamente pequeno (ver Algoritmo 2). Isso indica que uma maior eficiência poderia ser obtida ao empregarmos outros métodos para reconhecer etiquetas colididas, como por exemplo o uso de árvores binárias [3].

Referências

- [1] D. Klair, K.-W. Chin, and R. Raad, "On the energy consumption of pure and slotted aloha based {RFID} anti-collision protocols," *Computer Communications*, vol. 32, no. 5, pp. 961 – 973, 2009.
- [2] EPCglobal, GS1 Inc., "EPCTM Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860MHz-960MHz Version 2.0.1," EPCGlobal Inc., Tech. Rep., April 2015, Acesso em 25 de Dezembro de 2015. [Online]. Available: [\url{http://www.gs1.org/epcrfid/epc-rfid-uhf-air-interface-protocol/2-0-1}](http://www.gs1.org/epcrfid/epc-rfid-uhf-air-interface-protocol/2-0-1)
- [3] H. Wu, Y. Zeng, J. Feng, and Y. Gu, "Binary tree slotted aloha for passive rfid tag anticollision," *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 1, pp. 19–31, 2013.

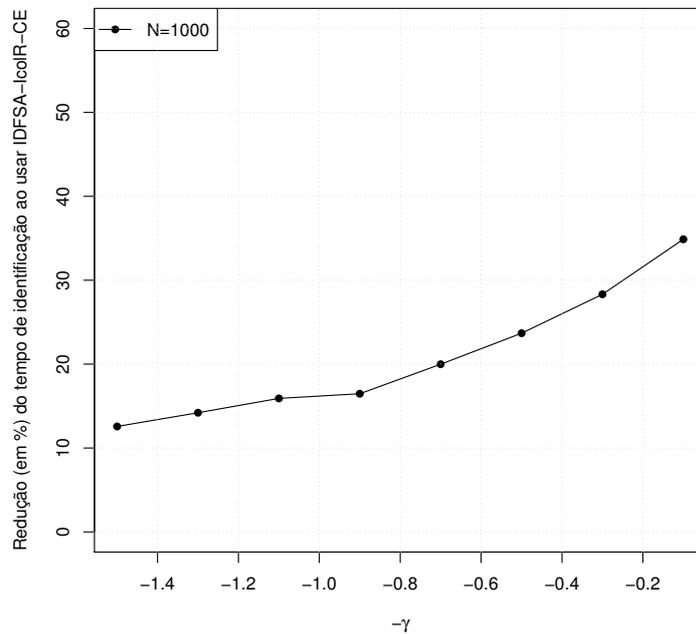


Figura 4. Redução relativa do tempo gasto na identificação de 1000 etiquetas:
 $(T_Q - T_{IcolR-CE})/T_Q$

- [4] R. P. B. Mota, “An Easy to Implement and Energy-saving Anti-Collision Algorithm for RFID Systems,” in *Proceedings of the Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2015 IEEE 9th International Conference on*, ser. AICT '15. Rostov on Don, Rostov, Russia: IEEE, 2015.
- [5] H. Wu and Y. Zeng, “Passive RFID Tag Anticollision Algorithm for Capture Effect,” *Sensors Journal, IEEE*, vol. 15, no. 1, pp. 218–226, January 2015.
- [6] B. Li and J. Wang, “Efficient Anti-Collision Algorithm Utilizing the Capture Effect for ISO 18000-6C RFID Protocol,” *Communications Letters, IEEE*, vol. 15, no. 3, pp. 352–354, March 2011.
- [7] A. Bekkali, S. Zou, A. Kadri, M. Crisp, and R. Penty, “Performance analysis of passive uhf rfid systems under cascaded fading channels and interference effects,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 3, pp. 1421–1433, March 2015.
- [8] M. Zorzi, “Capture probabilities in random-access mobile communications in the presence of rician fading,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 1, pp. 96–101, Feb 1997.
- [9] J. Sanchez and D. Smith, “Capture effect in rician fading channels with application to slotted aloha,” in *Global Telecommunications Conference, 1999. GLOBECOM '99*, vol. 5, 1999, pp. 2390–2394 vol.5.
- [10] J. C. Arnbak and W. Van Blitterswijk, “Capacity of slotted aloha in rayleigh-fading channels,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 5, no. 2, pp. 261–269, 1987.

- [11] R. P. B. Mota, “Simulator and Benchmark for RFID Anti-Collision Evaluation,” in *Proceedings of the Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2015 IEEE 9th International Conference on*, ser. AICT '15. Rostov on Don, Rostov, Russia: IEEE, 2015.
- [12] W. Chen, “Optimal frame length analysis and an efficient anticollision algorithm with early adjustment of frame length for rfid systems,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2015.