

1 Introdução

1.1 Histórico dos Códigos LT

Os códigos LT (*Luby Transform*) [Luby02] são códigos corretores de erros e foram originalmente propostos para protegerem os dados transmitidos através de canais que podem ser modelados como canais com apagamento, introduzidos por Elias [Elias55], onde os pacotes transmitidos podem ser apagados com probabilidade P_a [Nguyen07].

Tais códigos foram a primeira classe dos códigos Fontanais propostos por Byres, Luby *et al.* em [Byres98], com velocidades de codificação e decodificação viáveis. Isto é possível graças a um algoritmo simples que caracteriza os códigos LT, baseado em operações XOR (OU-exclusivo) para codificar e decodificar a informação. Este algoritmo de codificação pode, em princípio, produzir um número infinito de símbolos codificados e, por isso, os códigos LT são considerados de taxa versátil (*rateless*).

Num sistema de comunicações, as trocas de informações feitas pelos usuários através de um canal podem sofrer vários problemas. Ao longo da transmissão, essas informações podem ser corrompidas ou até mesmo perdidas. Na internet, por exemplo, onde a troca de informações é feita através de pacotes, estes podem ser corrompidos devido ao ruído presente no canal, ou perdidos devido a mecanismos de controle de tráfego [Beltrão07].

O esquema tradicional de transferência de dados através de um canal com apagamento depende de uma comunicação em duas vias:

- O transmissor codifica e envia um pacote de informação.
- O receptor tenta decodificar o pacote recebido. Caso tenha sucesso, o receptor envia uma mensagem de reconhecimento ao transmissor. Caso contrário, o receptor solicita ao transmissor o reenvio do pacote.
- Esse processo em duas vias continua até que todos os pacotes da mensagem tenham sido transferidos com sucesso.

Em certos sistemas de comunicações, como as transmissões *broadcast* – nas quais um transmissor envia mensagens para um grupo de receptores – esse esquema de retransmissões não é adequado, seja por elevados custos ou por não comportarem as latências devido às retransmissões. Muitas vezes, nem mesmo há um canal de retorno. A fim de garantir a confiabilidade na transmissão de informações, os códigos corretores de erros, mais precisamente códigos para canais com apagamento, são uma alternativa às retransmissões de dados [Byres98, Byres02]. Os códigos Fontanais em geral, e os códigos LT em particular, resolvem esse problema adotando um protocolo de comunicação essencialmente em uma direção:

- O transmissor codifica e envia um pacote de informação.
- O receptor avalia cada pacote recebido. Caso haja erro no pacote, este é descartado. Caso contrário, o pacote é guardado como uma parte da mensagem.
- Eventualmente, o receptor terá pacotes válidos suficientes para reconstruir a mensagem por completo. Quando toda a mensagem for recebida satisfatoriamente, o receptor sinaliza que a transmissão está completa.

O modelo básico de sistemas de comunicações que é utilizado nesta tese, encontra-se ilustrado na Figura 1.1.

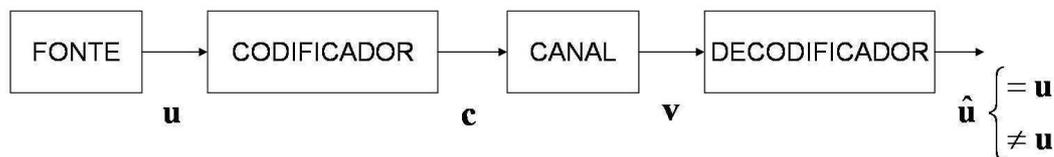


Figura 1.1: Sistema de comunicação codificado.

Apesar de os códigos LT poderem atuar em quaisquer canais com apagamento, o canal de interesse desta tese é o canal BEC (*Binary Erasure Channel*). Muitos sistemas de comunicações podem ser modelados por cenários que incorporam o BEC, ou seja, caso um pacote de informação recebido contenha erros que podem ser detetados, mas não corrigíveis pelo código corretor em uso, o pacote é descartado e interpretado como apagado. Essa estratégia é essencial para a comunicação que utiliza códigos LT. Na Figura 1.2, percebe-se que um símbolo binário transmitido por um canal BEC pode ser entregue ao receptor de forma correta (a saída do canal é 0 se a entrada for 0, ou 1 se a entrada for 1) ou dito *apagado* (E) se não puder ser reconhecido nem como 0 nem como 1.

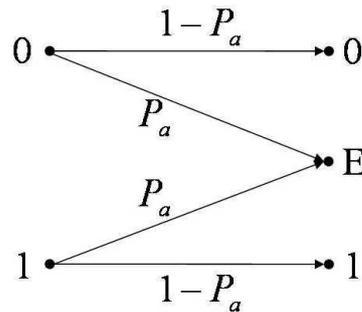


Figura 1.2: Representação de um canal BEC (*Binary Erasure Channel*).

Embora de baixa complexidade, os códigos LT são bastante eficientes, já que transmitem com alta probabilidade de sucesso, através de um canal BEC com capacidade C *bits/uso-do-canal*, um bloco de k símbolos binários de entrada, através da utilização de palavras-código binárias de comprimento n , não muito maior que $\frac{k}{C}$, o número mínimo de *bits* requerido pelo Teorema da Codificação de Canal de Shannon [Shannon04]. O aumento da eficiência dos códigos LT é diretamente proporcional ao aumento do tamanho dos blocos transmitidos k .

A geração seguinte aos códigos LT é formada pelos códigos Raptor [Shokrollahi06], que possuem codificação e decodificação com tempo linear. O Raptor utiliza dois estágios de codificação, onde o segundo estágio é um código LT. Primeiramente, a mensagem (símbolos de entrada) é codificada usando um código de bloco de taxa fixa (por exemplo, um código LDPC) e, em seguida, codifica-se esses novos símbolos (símbolos intermediários) através de um código LT.

1.2

Trabalhos Relacionados aos Códigos LT

Desde que os códigos LT foram propostos por Luby em 2002, muitos trabalhos vêm sendo apresentados com propostas que visam melhorias no seu desempenho. Os códigos Raptor [Shokrollahi06], já abordados, são um exemplo disso.

Hyytiä, Tirronen *et al.* trabalharam na otimização das distribuições de graus de códigos LT (Seção 2.3), sob certas circunstâncias. Em [Hyytiä06], eles descrevem um algoritmo para otimização iterativa das distribuições de graus parametrizadas para os códigos LT. Para isso, utilizaram métodos da teoria da

amostragem para construir uma função objetiva que eventualmente é otimizada com métodos não-lineares. Já em [Hyttiä07], eles focaram na otimização da distribuição de graus de códigos LT com blocos transmitidos de comprimento n bem pequeno ($n \leq 4$). Também apresentaram uma aproximação com a qual a distribuição de graus ótima proposta pode ser obtida para valores de $n \leq 10$ e, numericamente, até $n = 30$.

Ainda em relação às distribuições de graus, Zhu, Zhang *et al.* apresentaram o que chamaram de algoritmo sub-ótimo para a distribuição de graus de códigos LT [Zhu08]. Os resultados mostraram que essa proposta teve melhor desempenho em relação ao algoritmo da distribuição de graus Sóliton Robusta, mostrada na Subseção 2.3.1.

Tee, Nguyen *et al.* concatenaram serialmente um código LT com um BICM (*Bit-Interleaved Coded Modulation*) [Tee06]. No BICM, os esquemas de codificação e modulação são juntamente otimizados com o objetivo de atingirem o melhor desempenho possível quando utilizados em canais sem fio com desvanecimento. Na realidade, em [Tee06], o código LT é concatenado a um BICM com decodificação iterativa, chamado BICM-ID. A distribuição de graus Sóliton Robusta Melhorada, que está abordada na Subseção 2.3.2, é proposta por Tee, Nguyen *et al.* nesta tese. O uso dessa distribuição com a concatenação serial LT-BICM-ID apresentou melhores resultados de taxa de erro de *bit* (BER, do inglês *Bit Error Rate*) em comparação a outros códigos, num canal BEC contendo ruído aditivo gaussiano branco (RAGB).

Entre os anos de 2007 e 2008, Nguyen, Yang *et al.* introduziram o conceito de códigos LT sistemáticos [Nguyen07] e, a partir da distribuição Sóliton Robusta Melhorada [Nguyen08] (Subseção 2.3.2), desenvolveram uma nova distribuição de graus a ser usada com códigos LT sistemáticos, nomeada Sóliton Robusta Melhorada Truncada [Nguyen08], explicada na Subseção 2.3.3. Desta forma, conseguiram alto desempenho com os códigos LT sistemáticos em canais combinados entre BEC, RAGB e com desvanecimento Rayleigh. Yuan e Ping também publicaram trabalhos abordando códigos LT sistemáticos [Yuan07, Yuan08, Yuan09]. Em [Yuan09], por exemplo, o código QS-DLT (*Quasi-Systematic Doped LT Code*) proposto apresentou-se como uma alternativa de baixa complexidade aos códigos Raptor sistemáticos, com desempenhos semelhantes.

Inúmeros outros trabalhos abordam os códigos LT, aperfeiçoando-os e adaptando-os para determinados cenários ou situações. São os casos, por exemplo, de [Puducheri06, Bodine08, Woo08].

1.3

Proposta da tese

Conforme visto, há diversas formas de, a partir de um código – no caso desta tese, um código LT – criar-se um outro código com características melhoradas. Um procedimento amplamente utilizado para construir novos códigos de blocos é introduzir modificações simples a um bom código (embora possa não ser tão simples encontrar tal modificação) [Blahut03]. Expandindo-se (com técnicas de alongamento) ou restringindo-se (com técnicas de puncionamento ou encurtamento) códigos conhecidos, cria-se novos códigos com características melhoradas ou que se adaptarão melhor a determinadas aplicações. Algumas dessas modificações podem ser inócuas (como o puncionamento) aos códigos LT. Porém, como será mostrado nesta tese, outras são úteis e podem gerar códigos modificados com características melhoradas.

Primeiramente, busca-se um aprofundamento no estudo dos códigos LT bidimensionais propostos em [Paiba08], através de uma série de modificações realizadas como, por exemplo, o uso de diferentes tamanhos das matrizes LT e de diferentes valores dos *overheads*. Em seguida, o foco muda para os códigos LT originais e, a eles, são propostas algumas modificações, sendo a técnica de alongamento a principal.

A análise realizada na presente tese, através de simulações de transmissões de blocos codificados por um canal BEC, mostra que os códigos LT alongados apresentam desempenho superior aos códigos LT tradicionais. Tal constatação é a principal contribuição científica desta tese. Por apresentarem melhor desempenho e por serem menos complexos, todos os resultados desta tese foram obtidos com o uso de códigos LT sistemáticos. Surgem, então, os códigos LT sistemáticos alongados (SLTA). Conjectura-se, no entanto, que o alongamento de códigos LT não-sistemáticos também apresente desempenho superior em relação aos códigos não alongados correspondentes.

1.4

Estrutura da Tese

Além deste capítulo introdutório, a presente tese está organizada em outros quatro capítulos, conforme explicado a seguir. As referências bibliográficas utilizadas encontram-se ao final do texto e estão organizadas na ordem alfabética de seus autores.

- ◇ **Capítulo 2:** São apresentados os códigos LT, seus processos de codificação e decodificação e as distribuições de graus utilizadas. Também são abordados, mais particularmente, os códigos LT bidimensionais e os códigos LT sistemáticos, que são o foco principal da tese.
- ◇ **Capítulo 3:** Contém as propostas das variações, tanto dos códigos LT bidimensionais, quanto dos códigos LT convencionais, que são estudadas ao longo da tese.
- ◇ **Capítulo 4:** Os resultados do estudo são mostrados e analisados através de gráficos obtidos por meio de simulações realizadas através de um programa desenvolvido em linguagem Matlab.
- ◇ **Capítulo 5:** As conclusões da tese são apresentadas, bem como sugestões para trabalhos futuros.