

TELECOMUNICAÇÕES

Princípios Fundamentais

Lição síntese proferida no âmbito do Departamento de Engenharia Electrotécnica por ocasião dos 70 anos do Instituto Superior Técnico, por Manuel José de Abreu Faro

SUMÁRIO: Passados 150 anos sobre o telégrafo electromagnético e mais de um quarto de século sobre a explosão da Teoria da Informação entende-se oportuna uma meditação sobre estes factos.

O mesmo é dizer-se uma reflexão sobre o modo como as Telecomunicações evoluíram desde o Telégrafo de Morse até aos dias de hoje, em meios e conceitos do processo informativo.

Ao fazê-lo fomos necessariamente sintéticos apenas aflorando o essencial: a dimensionalidade do sinal, a medida de informação, o teorema da amostragem e a quantificação no actual contexto das telecomunicações guiadas e das ligações herztianas.

Estamos convictos que o avanço no domínio das Telecomunicações marcará este século, o que implicará uma filosofia do melhor aproveitamento de um progresso que se deseja.

SINAIS - O recurso a sinais preestabelecidos integrados num determinado código constitui o princípio primeiro do domínio da Engenharia que são as Telecomunicações.

Nos processos contemplados a semântica está ausente e os sinais e suas sequências são analisadas numa atitude puramente sintáctica.

Assim é nas telecomunicações de que nos ocuparemos. Não quer dizer que o seja sempre e para o futuro no mundo mais vasto da Cibernética.

Reduzimos assim os problemas de semiótica que se constituiu hoje numa ciência e técnica de pesquisa do modo como funcionam a comunicação e a significação [1].

Um processo de comunicação em que não preexista um código é simplesmente um processo de estímulo-resposta [1].

Nessa atitude, sinal não é qualquer agente de comunicação mas sim uma coisa que está por outra, essa correspondência que é biunívoca, e reversível, resulta exactamente de uma convenção que é o código [1], [2].

Nessa convenção, se S_1 é sinal de E_1 , E_1 é necessariamente assinalado por S_1 .

Quando assim sucede além de um processo de comunicação observa-se também um processo de significação.

Precisando deste modo, significar é exactamente um "signum facere", intencional, tentando uma comunicação através de um dado código.

As telecomunicações de que nos ocupamos são, pois, telesignificações.

Os sinais $S_1, S_2, \dots, S_n$ representantes das entidades $E_1, E_2, \dots, E_n$, podem assumir diversas formas significantes o que é próprio e característico do código concebido.

Temos, por exemplo, as combinações dos Pontos e Traços do Código Morse.

Temos, por exemplo, as 32 sequências de um código binário de cinco unidades: Código Baudot.

Escrever cartas em código pode ter interesse criptográfico mas é no tempo um sistema ineficiente no que respeita ao tráfego de mensagens.

Se um sinal físico assinalar um sinal gráfico, se esse sinal físico for célere e caminhe por si num determinado meio, então sim, encontramos um sistema interessante de significar.

Este o princípio básico de todos os telégrafos primitivos, dos antigos semáforos, do telégrafo electromagnético de Morse.

Este foi concebido em 1832.

Em 1831 Faraday tinha descoberto a Lei de Indução.

Foi o electromagnete que motivou Morse, um artista americano de visita à Europa.

Com pontos e traços Morse concebeu um código. Ao ponto fez corresponder um sinal eléctrico de amplitude constante e duração τ , ao traço uma duração 3τ , pontos e traços estavam separados por intervalos, na emissão, de duração τ .

A cada letra do alfabeto fez corresponder uma sequência de traços e pontos; entre letras o intervalo é de 3τ ; entre palavras a pausa é maior: 4τ ou 5τ .

O tempo de codificação física de uma letra depende da sequência de pontos e traços correspondente.

O E que é a letra mais frequente da língua inglesa foi codificado por um simples ponto ou seja pela unidade signífica de menor duração.

Morse seguia já boas regras de codificação mas a Teoria da Informação estava ainda num futuro distante, mais de um século.

OS PROCESSOS FUNDAMENTAIS - Morse não foi exactamente o primeiro a conceber o telégrafo electromagnético, quem primeiro o construiu foi Joseph Henry (1831-1832).

Morse está, no entanto, ligado ao código e ao sistema que foi aperfeiçoando com a ajuda de Gale, Henry e Vail.

Steinheil tinha descoberto que a terra podia ser utilizada como condutor de retorno.

A primeira mensagem telegráfica foi transmitida por Samuel Morse em 24 de Janeiro de 1838, linha de 10 milhas.

O serviço teleográfico inicia-se em 1843-1844 numa ligação Washington-Baltimore.

A partir de 1845 a América e a Europa foram-se enriquecendo, aqui e ali, com linhas telegráficas.

Gauss e Weber e Steinheil pelos anos 30 propuseram, com independência, codificações binárias. Também os dois primeiros conceberam um sistema utilizando um único fio e um galvanómetro detector.

Entre 1857 e 1865 tentou-se a ligação transcontinental por cabo submarino.

Em 1866, o organizador Cyrus Field, consegue finalmente o que, então, era uma tarefa gigantesca.

Um grande navio, o Great Eastern, com 2 400 milhas de cabo pesando 4 000 toneladas em vinte dias unia os dois continentes.

William Thomson, Lord Kelvin, foi o físico que assistiu nesta tarefa em que para a última ligação se utilizou o galvanómetro de sua invenção [3].

A partir de 1866 a América e a Europa estavam efectivamente ligadas por cabo submarino. Numa primeira experiência já o tinham estado durante dois meses, em 1858.

Em 1855, Lord Kelvin, calculou a resposta de uma linha telegráfica a um impulso. Em 1873 introduz uma inovação importante, utilizando impulsos dipolares de igual duração em correspondência com o "ponto" e o "traço" do código Morse. Assim se melhorou a resolução e a velocidade de transmissão.

Ainda em 1884, publica um trabalho sobre o tempo de transmissão no cabo submarino, embora polémico levantou conceitos e questões básicas. [4].

Entretanto, 1864, Maxwell apresenta à Royal Society a memória "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" onde a essência das suas ideias já está presente [5].

Entre 1865 e 1881 Maxwell consolidou a obra concebida dando corpo ao tratado sobre Electricidade e Magnetismo publicado em 1873.

As ondas electromagnéticas previstas na Teoria de Maxwell, foram evidenciadas experimentalmente por Hertz, 1887-88, que também elaborou uma teoria completa do dipolo oscilante, gerador e irradiador dessas ondas: Die Krafte elektrischer Schwingungen behandelt nach der Maxwellschen Theorie, Ann. Physik (1889).

Assim nasceu a primeira antena: o Dipolo Eléctrico de Hertz.

O Dipolo Eléctrico de Hertz e o seu dual, Dipolo Magnético de Hertz, são elementos essenciais no estudo da radiação das ondas Electromagnéticas.

Entre 1876-1899, nasce, cresce e consolida-se a telefonia: telefone de Alexander Graham Bell, a primeira estação de comutação em New Haven, oito linhas (1878), o microfone de grenalha de carvão de Hughes (1888).

Na Inglaterra, Strowger concebe a comutação automática através de um sistema passo a passo (1887).

Em 1893 trabalhos importantes de Heaviside conduzem à teoria do cabo carregado que tendo em vista diminuir a atenuação acabou por ser posta em prática por Pupin (1900) e noutra concepção por Krarup.

São a todos os títulos fundamentais os trabalhos de Heaviside sobre o cálculo operacional, teoria dos circuitos e propagação guiada por linhas (1892-1899).

Em 1887, como se disse, Hertz gera no laboratório as ondas electromagnéticas previstas por Maxwell, detecta-as (ressoador de Hertz) e evidencia todas as propriedades características das ondas: radiação, reflexão e refacção.

Em 1894, Marconi, tendo tomado conhecimento dessas experiências, repete-as e amplia o alcance da emissão incorporando no oscilador de Hertz uma antena semelhante às que Popov (1893) utilizava no detecção de descargas atmosféricas.

Isso foi decisivo e então formula um problema concreto.

Utilizar as ondas hertzianas nas comunicações.

As primeiras experiências conclusivas em radiotelegrafia datam de 1897: experiências de Lavernock.

Marconi utiliza as potencialidades da sintonia já evidenciada em 1889 por Lodge. Cumpre referir os trabalhos de Popov concebendo a antena detetora.

No princípio deste século, Dezembro de 1901, Marconi consegue estabelecer a ligação da Europa à América, via rádio. É coberta uma distância de 3 500 Km.

O ESPAÇO DAS TELECOMUNICAÇÕES - As experiências de Hertz dificultaram a interpretação teórica dos resultados de Marconi: num meio homogêneo as ondas electromagnéticas propagar-se-iam em linha recta.

Falava-se de uma montanha de mar que teria que ser trespassada pelas ondas electromagnéticas. Assim, a curvatura da terra tornava inexplicável uma ligação de tão grande porte, simplesmente processada na atmosfera.

Em 1902, a bordo do Philadelphia, Marconi, afastando-se progressivamente da Inglaterra, vai recebendo sinais nítidos durante o dia e ainda melhores durante a noite.

Assim descobria aquilo que tão simplesmente designou por "night effect".

Registando com escrito testemunho a recepção de sinais que viera captando desde a Inglaterra, foi acreditado.

Ainda em 1902, Heaviside e Kennely postularam a existência de uma "camada condutora" na alta atmosfera onde as ondas electromagnéticas se reflectiriam. Isso explicaria os resultados de Marconi.

Só em 1924-25, Appleton e Barnett procederam a experiências concludentes e esclarecedoras sobre a natureza dessa camada: tratava-se da ionosfera, na linguagem de hoje de um plasma, na realidade um magnetoplasma imerso que está no campo magnético da Terra.

Entretanto, fiel aos seus objectivos, Marconi continuava a trabalhar e em 1905 introduz um avanço importante: a antena direccional.

Até 1901 tudo tinha sido feito sem a Electrónica que entra em cena em 1904 com a descoberta do díodo por Fleming.

Em 1907 Lee De Forest inventa o triodo (Audion).

Assim se torna possível a amplificação electrónica e a decorrente concepção de osciladores electrónicos.

Marconi reconhece em 1922 que o êxito conseguido com as ondas longas e médias tão grande tinha sido que as potencialidades das ondas curtas tinham sido menos aproveitadas.

No entanto, essas ondas, ondas decamétricas, eram agora acessíveis graças ao espectacular desenvolvimento que a Electrónica registou após a Primeira Grande Guerra.

Esta meditação levou-o a estudar experimentalmente e de modo sistemático as radiocomunicações em onda curta: fê-lo num barco seu transformado em verdadeiro laboratório, o "Elletra I" [6].

Sem grande teoria, por intuição e pesquisa experimental intensa, finalmente, conclui:

A qualquer hora do dia, entre dois pontos à superfície terrestre, qualquer que seja a distância, é sempre possível uma ligação hertziana desde que criteriosamente se proceda à selecção da frequência de trabalho.

Estes trabalhos culminam com o êxito da ligação telefónica Inglaterra-Austrália (Poldhu-Sidney), estava-se em Maio de 1924:

Linhas, cabos, cabos submarinos, ligações hertzianas por onda superficial e ligações hertzianas via ionosfera eram e constituíam o espaço das telecomunicações de então.

Durante a Segunda Grande Guerra observaram-se progressos notáveis no domínio das microondas, muito particularmente no que se ligou ao desenvolvimento do Radar.

Depois da guerra o desenvolvimento prosseguiu e a importância das ligações em linha de vista ganhou crescente interesse. Tratava-se de um sucedâneo do cabo coaxial e era de importância fundamental para a interligação das estações radiodifusoras da Televisão. Assim nasceram os feixes hertzianos.

Em 1945, A.C. Clarke propunha uma extensão dos sistemas repetidores terrestres utilizando satélites geoestacionários.

Em 1955 J.R. Pierce propõe mais concretamente sistemas de telecomunicações utilizando satélites.

Em Outubro de 1957 é lançado o primeiro satélite artificial: o Sputnik.

Em Julho de 1962 foi lançado o Telstar que foi o primeiro satélite activo a dispor de um repetidor de banda larga.

Em Fevereiro de 1963 foi lançado o primeiro satélite geoestacionário, Syncom, mas a experiência falhou.

Em Julho de 1963 é lançado o segundo Syncom e colocado na órbita prevista.

Em 1965 é lançado o Intelsat I, (Early Bird), em 1967 o Intelsat II e (mais tarde) outros se seguiram.

Os satélites geoestacionários são colocados em órbitas equatoriais circulares e síncronas com 42 100 Km de raio e, portanto, a uma altitude de cerca de 35 800 Km, no Equador.

O satélite tem uma visibilidade que cobre 40% da superfície terrestre. Um sistema internacional completo exige, portanto, um mínimo de três satélites angularmente separados de 120° .

Assim se fez e assim acontece com os satélites que foram, e em número diverso, colocados sobre o Atlântico, o Índico e o Pacífico.

A ionosfera era um sistema passivo com perdas que garantia um retorno por refração.

Utilizando a camada F um salto representa uma distância máxima de 4 000 Km à superfície da Terra. Usando a camada E o salto é de 2000 Km.

Veja-se pois como o espaço das telecomunicações se alargou com a introdução dos satélites.

Com a Electrónica de hoje, neste Espaço, tudo quanto se imagine ganha uma realidade quase certa.

Entre o telégrafo de Morse e os dias de hoje decorreram cerca de 150 anos e nesse período construiu-se o espaço descrito: primeiro por instinto, aproveitando pragmaticamente o que a Ciência e Tecnologia iam facultando, a partir de 1920-30, a partir daí, já não foi bem assim, disso nos ocuparemos a seguir.

DIMENSIONALIDADE DO SINAL - Durante quase um século, 1830-1920, as Telecomunicações desenvolveram-se de modo pragmático, utilizando os sinais mais rápidos, os electromagnéticos, incorporando a fenomenologia e resultados da ciência contemporânea: primeiro a do Campo Electromagnético; mais tarde, já neste século, a da Electrónica.

As comunicações dos anos 1920-30 são já uma realidade forte, no entanto, a teoria abstracta dos sinais apenas tinha sido aflorada.

Os sinais estavam fortemente confundidos com os processos tecnológicos e realidade física em que se suportavam.

Ainda não se tinha entrado numa fase analítica do sinal e dos sistemas e muito menos numa fase sintética.

Entre outros podem considerar-se fundamentais e precursores da modernidade os trabalhos de E.H. Colpitts e O.B. Blackwell (1921), J.R. Carson (1922), R.V. Hartley (1923) e H. Nyquist (1924).

Nesse contexto já se fala claramente da Teoria da Modulação - Carson (1922) - e decorrentemente de portadora e bandas laterais.

Nyquist em 1924 e 1928 e Hartley em 1928 já abordam numa atitude moderna o problema da velocidade de transmissão de sinais telegráficos.

Hartley já utiliza o conceito de quantidade de informação não exactamente como Shannon mas anda próximo: formalmente há uma certa identificação, conceptualmente não.

Assim, sem prejuízo de intuições mais remotas onde avultam os trabalhos de Lord Kelvin e Heaviside é a partir dos anos 20 que os sinais começam a abstrair-se dos processos físicos em que se suportam o mesmo acontecendo com os sistemas que processam esses mesmos sinais.

* * *

Inicialmente o sinal foi tomado como uma forma, $f(t)$, descrita na variável tempo.

O ressoador de Helmholtz, a sintonia evidenciada por Lodge, as limitações introduzidas pela pupinização os trabalhos de Carson, Nyquist e Hartley devem ter contribuído, talvez, para a formação do conceito de frequência na acepção em que é tomada na análise espectral.

Assim diremos que a função $f(t)$ suportada e durando na variedade t corresponde uma densidade $F(\omega)$ suportada na variedade ω .

$F(\omega)$ é o integral de Fourier de $f(t)$ e $f(t)$ a transformada inversa.

A partir daqui a realidade objectiva sinal tanto pode ser descrita na variável natural t como na variável associada ω .

Correntemente a densidade espectral, $F(\omega)$, é simplesmente designada por espectro ainda que incorrectamente.

Para conhecer $F(\omega)$ é preciso conhecer toda a história no tempo de $f(t)$.

Para reconhecer $f(t)$ é necessário conhecer toda a descrição de $F(\omega)$ na frequência.

A Teoria das Funções Generalizadas, Teoria das Distribuições, permite hoje a análise de Fourier de determinados sinais que até ao estabelecimento dessa teoria apenas podiam ser tratados numa base de intuição física. É o caso, por exemplo, da "função de Dirac".

Nesta ordem de ideias o espectro de uma função de Dirac, $\delta(t)$, é de módulo constante em toda a variedade ω .

O espectro da $\exp(j\omega_0 t)$ é uma função de Dirac em ω localizada em ω_0 : $\delta(\omega - \omega_0)$.

Isto significa que um instante pode ser assinalado por uma função de Dirac no tempo mas exige a participação de todas as frequências por igual.

Significa que uma função sinusoidal que é periódica e não localiza no tempo, assinala, no entanto, no domínio da frequência, $f = \omega/2\pi$.

A transformada de $f(t) \exp(j\omega_0 t)$ é $F(\omega - \omega_0)$ e este resultado é a base fundamental das radiocomunicações e dos métodos de divisão de frequência (FDM).

Consideremos um sinal de duração significativa Δt_1 .

Então se, mantendo a forma, a duração passar para Δt_2 resulta do integral de Fourier que Δf_2 fica definida pela relação: $\Delta t_1 \Delta f_1 = \Delta t_2 \Delta f_2$.

Note-se que os suportes efectivos, Δf e Δt , podem ser definidos por critérios arbitrários mas objectivos aplicados às formas $f(t)$ e $F(\omega)$.

Conclusão: Numa base de conservação da forma a dimensionalidade do sinal é um invariante no espaço tempo-frequência: $\Delta t \Delta f = \text{const}$.

Pode pôr-se a questão de averiguar em que medida um sistema altera uma forma $F(\omega)$ e assim nasceu o conceito de filtro e os conceitos associados de banda passante e função de transferência.

Pode pôr-se um problema idêntico relativamente à forma $f(t)$ o que nos conduz ao conceito de resolução no tempo de um dado sistema e ao conceito de resposta ao impulso unitário.

Também numa base de conservação da forma se pode demonstrar que num dado sistema $\Delta f_B \cdot \Delta t_R = \text{const}^e$ em que Δf_B é a largura de banda e Δt_R o tempo de resolução.

Tudo isto se consubstancia no seguinte princípio fundamental aplicável a sinais e a sistemas, respectivamente:

- A duração no tempo e a ocupação espectral variam inversamente em relação a uma dada forma.

- A resolução no tempo e a largura de banda dum dado sistema também variam inversamente.

A segunda afirmação é corolário da primeira uma vez que a função de transferência está ligada à resposta ao impulso unitário no tempo: a função de transferência é o integral de Fourier da resposta ao impulso unitário.

Neste facto e no princípio da causalidade se radica o Teorema de Paley-Wiener sobre a realizabilidade de filtros.

A TEORIA DA INFORMAÇÃO - Em 1948 Claude Shannon deu a conhecer "A Mathematical Theory of Communication". Aí se introduzem os conceitos fundamentais da actual Teoria da Informação o que se inicia com a definição da quantidade de informação recebida por quem toma conhecimento de um acontecimento de probabilidade "a priori" p : $Q = -\log_2 p$ [bit].

Isto pressupõe um postulado, ausência de ruído.

Se este existir, e existe, subsistirá sempre, e em certa medida, dúvida se o primeiro sinal e na base de um dado código, nos chegou sem alteração. Só na ausência do ruído e dessa eventual perturbação haveria certeza na descodificação.

Shannon desenvolveu uma estratégia que interessa todo o sistema, desde a emissão à recepção.

A Fonte de Informação é estimada na base da quantidade de informação que, em média, gera na unidade de tempo.

Entre a Fonte de Informação e o canal de Informação insere-se o Centro Codificador e a codificação permite resolver os seguintes problemas essenciais:

- Adaptação da linguagem da fonte à linguagem do canal.
- Eliminar a natural redundância das fontes.
- Resistir à deterioração que o ruído introduz, permitindo reduzir o número de erros a um número arbitrariamente pequeno.

Resumidamente pode dizer-se que a Teoria da Informação confere às comunicações um carácter probabilístico e dispõe de teoremas que permitem afirmar que o êxito de uma comunicação é um acontecimento quase-certo desde que se jogue convenientemente com os parâmetros que conferem dimensionalidade à Quantidade de Informação e ao Canal de Informação.

O canal afere-se pela máxima quantidade de informação que um dado canal pode transmitir.

A máxima quantidade de informação que o canal pode transmitir na unidade de tempo designa-se por Capacidade do Canal.

Todos os trabalhos que convergiram para a Teoria da Informação assentam no seguinte considerando básico:

Reconhecimento da acção condicionante do ruído que não é essencialmente diferente do sinal.

Sinal e ruído convivem e qualquer dos dois tem carácter aleatório.

Extrair de modo sistemático o sinal do ruído é pois o problema fundamental:

Kolmogorov, Wiener e Kotelnikov e mais recentemente Kalman e Bucy conceberam filtros adequados à extracção do sinal do ruído. É matéria actual e em permanente evolução na Teoria do Reconhecimento de Formas.

No entanto, foi Shannon que estabeleceu uma teoria integral da comunicação em que a separação do sinal do ruído está sempre presente desde a codificação até à descodificação.

Nestes termos num sistema de comunicação distinguem-se os seguintes órgãos fundamentais: Fonte de Informação-Centro de Codificação-Canal de Informação - Centro de Descodificação - Destinatário.

O agente activo é sempre o sinal que na base de um código promove representações unívocas "the semantic aspects of communication are irrelevant to the engineering aspects" (Shannon).

TEOREMA DA AMOSTRAGEM - Na sua teoria matemática da comunicação Shannon trata os sinais discretos e os sinais contínuos, os primeiros são típicos da telegrafia, os outros intervêm na fonia e em qualquer outro sistema que processe formas que sejam funções contínuas do tempo.

Pode pôr-se a questão de saber se é possível interpolar a função $f(t)$ a partir do seu conhecimento em instantes discretos $t_1, t_2 \dots$.

À luz do que já se sabia a resposta é não.

De facto, haverá sempre a possibilidade de omitir entre dois instantes consecutivos um pormenor de suporte limitado no tempo.

Mas um suporte limitado no tempo significa um espectro ilimitado no domínio da frequência.

Deste modo, tratando-se de uma função $f(t)$ de espectro limitado essa possibilidade não é de excluir.

No domínio da Matemática a questão foi tratada por Whittaker em 1915 e retomada em 1935.

No entanto, deve-se a Shannon a interpretação física do teorema da amostragem em todas as suas consequências: amostragem discreta e reconstituição do sinal, função continua do tempo.

Também Kotelnikov e com independencia chegou aos mesmos resultados.

Concretamente trata-se do seguinte:

Uma função $f(t)$ de espectro limitado à banda $[0, F]$ pode ser reconstituída exactamente a partir de uma amostragem feita com a frequência de repetição $2F$.

Levanta-se uma vez mais o problema de que uma função $f(t)$ só pode ser de espectro limitado se for de suporte ilimitado no tempo.

No entanto, para $T \gg 1/2 F$ podemos falar e tratar como tal as funções de duração T .

Amostrando com frequência $2F$ durante o tempo T obtêm-se $2FT$ dados.

Admitindo que a mesma forma decorria mais lentamente então a duração seria KT e a frequência limite do espectro F/K : o produto mantém-se constante.

Chegamos assim à conclusão que na base da conservação da forma o número de dados independentes é invariante e dado por $2 F_1 T_1 = 2 F_2 T_2 = \dots$ em que $T_1, T_2 \dots$ representam os diversos tempos de transmissão da mesma forma. Confirma-se assim o conceito da dimensionalidade do sinal, tomado como forma.

Este número, $2FT$, já tinha sido obtido por Gabor em 1946.

Considerou uma função de duração T e analisou-a em série de Fourier; a frequência da fundamental é $1/T$ e, portanto, o número de harmónicas na banda F é FT . Mas a série é em senos e cosenos e assim o número de dados independentes é $2 FT$.

A Mathematical Theory of Communication de Shannon foi publicada em Julho e Outubro de 1948 no B.S.T.J.

Em Novembro de 1948 Oliver, Pierce e Shannon publicam no P.I.R.E "The Philosophy of P.C.M." e em Janeiro de 1949 e também no P.I.R.E Shannon publica Communication in the Presence of Noise.

PCM significa Pulse Code Modulation e a ideia já tinha sido patenteada por A.H. Reeves em 1939 (França) e 1942 (International Standard Electric Corporation). Deste assunto nos ocuparemos a seguir.

Quanto interessa no trabalho de Shannon é, como sempre, o enquadramento da questão numa perspectiva teórica e no âmbito da Teoria da Informação.

O trabalho de Janeiro de 1949 é verdadeiramente a primeira apresentação do Teorema da Amostragem aplicado às comunicações.

Utilizando o teorema da amostragem Shannon aborda os sinais contínuos numa nova atitude: uma função de duração T e espectro limitado na banda $[0, F]$ é representada num espaço de $2FT$ dimensões através das amplitudes amostradas em $2FT$ instantes.

O Teorema da Amostragem é a base teórica da Comunicação por Impulsos e de algumas aplicações importantes das Séries no Tempo [7][8][9].

A expressão analítica do teorema da amostragem é o seguinte:

$$s_F(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_F(t_n) \frac{\sin 2\pi F(t-t_n)}{2\pi F(t-t_n)}$$

em que $s_F(t)$ significa função de espectro limitado na banda $[0, F]$ e $t_n = \tau + \frac{n}{2F}$ os instantes de amostragem, τ é uma grandeza arbitrária.

A CAPACIDADE DO CANAL CONTINUO - Utilizando o teorema de amostragem Shannon estabeleceu um resultado importante para o canal contínuo afectado por ruído branco e gaussiano.

Ruído branco e gaussiano significa que as amplitudes amostradas do ruído, $n_1, n_2, \dots, n_{2FT}$, são independentes e que cada uma se rege de per si por uma distribuição gaussiana.

A partir do teorema da amostragem pode demonstrar-se que as "potências" do sinal e do ruído são

$$S \approx \frac{1}{2FT} \sum_{n=1}^{2FT} s_n^2 \quad N \approx \frac{1}{2FT} \sum_{n=1}^{2FT} n_n^2$$

basta atender à ortogonalidade das funções intervenientes no Teorema da Amostragem.

Pelas suas características, sinal e ruído são funções ortogonais no tempo pelo que a potência do sinal + ruído é dada por $S + N$.

A partir daqui Shannon determina o número máximo de sinais que de modo quase-certo poderá distinguir na convivência sinal+ruído. É dado por

$$N_{\max} = \frac{\text{Volume da esfera de raio } \sqrt{2FT(S+N)}}{\text{Volume da esfera de raio } \sqrt{2FT N}} = \left(\frac{\sqrt{2FT(S+N)}}{\sqrt{2FT N}} \right)^{2FT}$$

em que $2FT$ traduz a dimensionalidade do espaço tempo-frequência e $R_{(S+N)} = \sqrt{2FT(S+N)}$ e $R_N = \sqrt{2FT N}$ os raios associados a grandezas de "potências" $(S+N)$ e (N) , respectivamente.

Por definição, a quantidade de informação que se recebe relativamente ao sinal $[s_1, s_2, \dots, s_{2FT}]$, duração T e processado na largura de banda $[0, F]$ será

$$Q(F, T, \frac{S}{N})_{\max} = -\log_2 \frac{1}{N_{\max}} = FT \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

em que S/N traduz a relação sinal-ruído.

Para outro tipo de ruído o resultado não se aplica mas é possível estabelecer limites superior e inferior de $Q(F, T, \frac{S}{N})_{\max}$.

No entanto, a essência dos factos é a mesma e assim podemos utilizar para essa finalidade a expressão associada ao ruído branco e gaussiano

$$Q(F, T, \frac{S}{N})_{\max} = F T \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

que nos mostra que através de um canal com ruído é possível transmitir de modo quase-certo (probabilidade de erro arbitrariamente pequena) uma dada quantidade de informação desde que se jogue convenientemente com a duração T de utilização do canal, com a largura de banda F e relação sinal-ruído.

Este resultado traduz o limite superior de uma possibilidade mas não esclarece de modo prático como esse limite pode ser atingido.

Dividindo Q por T obtém-se a capacidade do canal contínuo

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

QUANTIFICAÇÃO - PCM - O sistema PCM (Pulse Code Modulation) é aquele que, dos conhecidos, mais aproxima o sistema ideal.

Consideremos um dado sinal $s_F(t)$ que pode ser amostrado em $2FT$ amplitudes.

Podemos quantificar cada uma destas amplitudes em N_n níveis equidistantes de Δ .

As amplitudes $s_F(t_n)$ compreendidas entre 0 e Δ serão tomadas como $\frac{\Delta}{2}$, as compreendidas entre Δ e 2Δ com $3\frac{\Delta}{2}$, etc.

Admitindo um sistema simétrico em que as amplitudes de $s_F(t_n)$ variem entre $\pm \frac{A}{2}$ e dispondo de N_n níveis de quantificação teremos $A = \Delta N_n$

É com estas amplitudes quantificadas que o canal trabalha, é isso que caracteriza o canal do sistema PCM.

Procedendo assim introduzimos uma alteração inicial que jamais se poderá corrigir. De facto substituímos as amplitudes $s_F(t_n)$ pelas amplitudes quantificadas.

Esta alteração designa-se por ruído de quantificação e a sua potência é

$$N_Q = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{1}{12} \left(\frac{A}{N_n} \right)^2$$

Admitindo que $s_F(t_n)$ tem uma distribuição uniforme de amplitudes então a potência do sinal é $S_F = \frac{A^2}{12}$ e então

$$\frac{S_F}{N_Q} = N_n^2$$

Assim obtivemos a relação sinal-ruído de quantificação. Vejamos agora o que se passa no canal.

É fácil demonstrar que a potência do sinal no canal é

$$S_c = \frac{N_n^2 - 1}{12} \Delta^2$$

A fim de que o ruído não altere uma amplitude quantificada será necessário que $\Delta/2 = K \sigma_n$ em que σ_n^2 é a variância do ruído gaussiano.

Admitindo a hipótese ergódica teremos: $\sigma_n^2 = \text{média no conjunto} = N_c = \text{média no tempo}$, onde N_c designa a potência do ruído no canal.

A probabilidade de erro pode tornar-se arbitrariamente pequena para K suficientemente grande.

É sempre possível eleger um valor de K para o qual a descodificação correcta de um nível é um acontecimento quase certo.

Sendo assim, a quantidade de informação transmitida pelo canal-PCM será

$$Q_{\text{PCM}}(F, T, \frac{S_c}{N_c}) \approx 2FT \log_2 N_n$$

Da expressão de S_c e atendendo ao facto de $\Delta = 2K \sqrt{N_c}$ facilmente se obtém

$$N_n = \sqrt{1 + \frac{12}{4K^2} \frac{S_c}{N_c}}$$

de onde resulta

$$Q_{\text{PCM}}(F, T, \frac{S_c}{N_c}) = FT \log_2 \left(1 + \frac{12}{4K^2} \frac{S_c}{N_c} \right)$$

o que é formalmente semelhante à expressão obtida para o canal ideal:

$$Q_{\text{Ideal}}(F, T, \frac{S_c}{N_c}) = FT \log_2 \left(1 + \frac{S_c}{N_c} \right)$$

Para um dado K , $(\frac{S_c}{N_c})$ será tanto menor quanto menor for o número de níveis, N_n .

Resulta daqui que o PCM mais vantajoso será o binário, $N_n = 2$.

Para o PCM binário simétrico teremos

$$\frac{S_c}{N_c} = K^2$$

Verifica-se um erro se para o nível $\Delta/2$ se o ruído tomar no momento de decisão um valor n tal que $n + \frac{\Delta}{2} < 0$ ou seja $n < -\frac{\Delta}{2} = -K \sigma_n$

Verifica-se também um erro se para o nível $-\Delta/2$ o ruído tomar no momento de decisão um valor n tal que $n - \frac{\Delta}{2} > 0$ ou seja $n > \frac{\Delta}{2} = K \sigma_n$

Em qualquer dos casos a probabilidade de erro é idêntica e pode assumir o valor

$$P_e = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^K \epsilon^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^K \epsilon^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Para $K > 3$ já teremos muito aproximadamente

$$P_e \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi} K} \epsilon^{-\frac{K^2}{2}}$$

Destes resultados facilmente se determinam os seguintes valores:

K	1	2	3	4	5
(S_c/N_c) dB	0	6	9,5	12	14
P_e	$1,59 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$

Utilizando um PCM binário assimétrico, níveis Δ e 0, teríamos $(\frac{S_c}{N_c}) = 2K^2$ e há que juntar 6 dB ao valor correspondente ao PCM simétrico de níveis $\pm \Delta/2$.

Podemos agora sumarizar os resultados.

Consideremos um sinal $s_F(t)$.

Admitamos que quantificamos as amplitudes em N_n níveis, isso significa uma relação sinal-ruído de quantificação $\frac{S_F}{N_Q} = N_n^2$.

Para $N_n = 64, 128$ e 256 níveis obtêm-se respectivamente relações de 36, 42 e 48 dB. Usando uma quantificação não uniforme estes valores podem melhorar-se [7].

A quantidade de informação associada ao sinal quantificado é $Q[F, T, N_n] = 2FT \log_2 N_n$.

Utilizando para a transmitir um PCM binário, teremos

$Q[F, T, N_n] = 2FT \log_2 N_n = 2 F_c T_c \log_2 N_{nc} = 2 F_c T_c$ uma vez que o número de níveis no PCM binário é dois, $N_{nc} = 2$, e o número de erros se desprezou.

Transmitindo em tempo real $T = T_c$ e então $F_c = F \log_2 N_n$ o que nos mostra que o canal binário exige maior largura de banda que o sinal $s_F(t)$.

Se $N_n = 128 = 2^7$ cada amplitude do sinal dá origem a sequências de 7 impulsos binários, se $N_n = 256$ teremos sequências de 8.

A relação sinal-ruído de quantificação

$$\begin{aligned} \left(\frac{S_F}{N_Q}\right)_{dB} &= 10 \log_{10} N_n^2 = 10 \log_{10} 2 \log_2 N_n^2 = 20 \log_{10} 2 \log_2 N_n = \\ &= 20 \log_{10} 2 \frac{F_c}{F} \approx 6 \frac{F_c}{F} \end{aligned}$$

mostra-nos que no PCM a largura de banda é proporcional à relação sinal-ruído de quantificação.

Esta troca de relação sinal-ruído com largura de banda é uma propriedade importante dos sistemas de modulação no tempo, evidenciada com generalidade por Shannon. O PCM é o sistema prático que melhor promove essa troca. Em modulação de frequência e em sucessões de impulsos modulados no tempo a relação sinal-ruído é simplesmente proporcional ao logaritmo da largura de banda.

Utilizando um parâmetro de confiança $K=5$ o que equivale a uma relação sinal-ruído no canal de 14 dB teremos uma probabilidade de erro $P_e = 3,4 \cdot 10^{-6}$.

Se usássemos um canal binário assimétrico $[\Delta, 0]$ a relação sinal-ruído seria de 20 dB.

Admitindo um canal de fonia $F=4000$ Hz, e 256 níveis o canal-PCM exige uma largura de banda $F_c = 8.400 = 32\,000$ Hz.

Numa conversa de 3 minutos a informação transmitida é
 $Q = 2 F_c T_c = 2.32\ 000.180 = 1,152.10^7$ bits e os erros observados serão provavelmente, 39 alterações de binários dígitos num conjunto de 11,52 milhões de binários dígitos.

* * *

Chegados a este ponto as possibilidades conceptuais das Telecomunicações de hoje podem resumir-se na relação

$$2 FT \log N_n = 2 F_c T_c \log_2 N_{nc}$$

em que o membro da esquerda traduz a quantidade de informação que durante o tempo T , arbitrariamente se extrai do sinal $s_F(t)$ usando N_n níveis de quantificação e o membro da direita a capacidade de um canal PCM que de modo quase-certo utiliza N_{nc} níveis.

Em termos de relação sinal-ruído no canal o PCM mais favorável é o binário simétrico o que significa dois níveis, $N_{nc} = 2, \pm \Delta/2$.

Um facto importante ressalta daqui: num dado continuam e antes que se atinja o limite da resolução física a informação que se obstrai de um sinal $s_F(t)$ é arbitrária, depende do número de níveis em que se quantifique o sinal.

A relação sinal-ruído de quantificação dá-nos uma medida da indeterminação que medeia entre a forma que se reconstitui $s_{FQ}(t)$ e o sinal $s_F(t)$.

Por $s_{FQ}(t)$ designa-se a função contínua de espectro limitado $[0, F]$ reconstituível a partir de uma sucessão de amplitudes quantificadas.

A quantificação é pois a operação que se interpõe entre o sinal $s_F(t)$ e o canal-PCM.

Do telégrafo de 1832 evoluímos até um novo telégrafo que através de sequências binárias transmite amplitudes quantificadas e em última análise a forma contínua $s_{FQ}(t)$.

A dimensionalidade do sinal $2FT$ dá lugar à dimensionalidade da quantidade de informação $2FT \log_2 N_n$ associável ao sinal $s_F(t)$ no tempo T .

Isto ainda não é exactamente assim para todos os serviços em uso mas poderá ser sempre assim.

As implicações do PCM são pois profundas.

Uma amostragem uniforme no tempo prepara o caminho para uma comutação por divisão no tempo, esse é o futuro.

Em intervalos de tempo bem determinados uma via de banda larga aceita ou faculta series cronológicas que nessa via entram ou dessa via saiem.

A comutação por divisão no tempo é o futuro e representa uma revolução nos métodos convencionais dessa operação necessária e complexa que é a comutação.

CONCLUSÕES: Em matéria de propagação guiada assiste-se ao crescente aumento da capacidade dos sistemas físicos: em 1940 os cabos garantiam 60 conversões telefônicas simultâneas.

Dos anos de 1950 até hoje normalizaram-se os seguintes sistemas coaxiais 1,3 MHz (300 vias), 4 MHz (960 vias), 12 MHz (2700 vias) e 60 MHz (10 800 vias).

Um circuito exige duas vias e assim os cabos coaxiais são colocados aos pares. Nos anos de 1975-80 desenvolveu-se um sistema múltiplo de 11 pares cada um dos quais com a capacidade de 10 800 circuitos.

Destes 11 pares, 10 são usados em fonia permitindo $10 \times 10\ 800 = 108\ 000$ conversas telefônicas simultâneas.

O sucedâneo da propagação guiada foi a radiação dirigida em linha de vista: feixes hertzianos.

No entanto, a atenuação agrava-se em presença da chuva e da neve. Há que contar com as riscas de absorção dos componentes da atmosfera.

Investiga-se nessa matéria, apuram-se as janelas existentes.

Existe especial interesse nas portadoras acima dos 10 GHz. Estão propostas bandas nos 18, 22 e 39 GHz.

Nos meados de 1975 foi lançado um sistema digital operando nos 18 GHz com estações repetidoras com a capacidade de canais de 2 vias e em que cada via drena 274 Mb/s. Sete são dedicados a fonia e o sistema permite assim 28 224 conversações telefônicas simultaneas em PCM (No exemplo a seguir esclarece-se como se pode calcular o número de conversações telefônicas) [10]

Resumidamente podemos dizer que as ondas milimétricas representam o campo promissor do futuro.

As comunicações em infravermelho põem problemas mecânicos de vibração das lentes emissora e receptora.

As comunicações ópticas, laser, poderão ter interesse pela acessibilidade que permitem, por exemplo, nas zonas submersas do mar.

Seguidamente e a partir dos meados de 1970 (1975-80) são concebidos sistemas utilizando guias de secção circular, modo TE_{01} , que para um diâmetro da ordem de 6 cm permitem a utilização de uma banda de 40 a 110 GHz, a banda 40-75 respeita a um sentido e a banda 75-110 a outro.

Este sistema utiliza 60 portadoras equidistantes de 550 MHz o que ocupa 33 GHz.

Cada portadora é modulada por um sinal digital múltiplo incluindo 4032 vias telefônicas usando quantificação em 256 níveis e PCM binário. Teremos assim $4032 \cdot (2 \cdot 4250 \text{ Hz}) \cdot 8 \approx 274,176 \text{ Mb/s}$ admitindo uma frequência de repetição de 8500 Hz o que corresponde em fonia tomar, por prudência, $F=4250 \text{ Hz}$.

Das 60 portadoras apenas 57 são utilizadas em fonia o que conduz a $57 \times 4032 \approx 230\,000$ conversas telefônicas.

Para a fonia e outras finalidades são transmitidos 274 M bit/s por cada portadora o que equivale a $274 \times 60 \text{ M bit/s}$ na banda efectiva de 33 GHz.

Fazendo o quociente $33 \cdot 10^9 / 2,74 \times 6 \times 10^9$ obtem-se 2 Hertz/binário digito.

Nyquist demonstrou que para transmitir N dados independentes por segundo será exigida teoricamente uma largura de banda de $N/2 \text{ Hz}$.

É isso que se afirma quando se diz que um sinal de banda $[0, F]$, amostrado ao ritmo $2F/\text{seg.}$, exige uma largura de banda F para transmitir as 2FT amplitudes.

Então para transmitir $274 \times 60 \text{ M bit/s} = 16,44 \text{ G bit/s}$ seria necessária uma largura de banda mínima de 8,22 GHz.

O número efectivo de 33 GHz deve-se a dois factos, o primeiro porque na prática o ritmo actualmente em uso é cerca de metade do ritmo de Nyquist: isto significa que N dados/s exigem $N \text{ Hz}$.

A segunda razão é porque se usam portadoras moduladas com o aproveitamento das duas bandas laterais.

Trata-se de modulação binária de fase - PRK - que exige o mesmo que a modulação de amplitude, assim se chega a que N dados/seg exigem 2 NHz ou seja os 2 Hz/binário digito já encontrados.

A máxima atenuação teórica deste sistema observa-se na frequência mais baixa da banda (40 - 110)GHz e é da ordem de 1 dB/Km o que permite estações repetidoras afastadas de cerca de 40 km.

Num cabo coaxial de 4 MHz a atenuação em 4MHz é cerca de 4,5 dB/Km o que exige estações repetidoras afastadas de 9 Km. No cabo de 60 MHz o afastamento previsto para as estações repetidoras é de 1,55 Km.

O guia ôco de secção circular é, portanto, um sistema de alta capacidade e baixa atenuação.

A sua implementação apenas dependerá da viabilidade económica de um sistema de tal porte.

Note-se que as 4032 vias, amostradas, quantificadas e passadas a PCM dão origem a sequências que se interlaçam no tempo resultando os 274 Mbit/s - trata-se do método de Divisão no Tempo que o Teorema de Amostragem permite -(TDM).

Chama-se a atenção para o facto do guia circular ter como dielectrico azoto sêco para evitar as riscas de absorção do ar húmido.

Em matéria de propagação guiada, sempre vantajosa na sua protecção contra a meteorologia e livre das riscas de absorção do ar, as fibras ópticas são hoje a realidade maior.

Já se produzem comercialmente fibras com atenuações de 1 a 4 dB/Km. Note-se que o vidro vulgar introduz atenuação da ordem de 5 dB/m.

Experimentalmente já se conseguiram fibras com atenuações inferiores a 1 dB/Km.

Neste momento existe a possibilidade física da construção de sistemas de fibras com uma capacidade de 1 bilião de bit por segundo.

A estes avanços em propagação guiada juntam-se as potencialidades associadas às diversas hierarquias de satélites, não só no que respeita à capacidade dos canais mas ainda aos sistemas de múltiplo acesso que uma rede de satélites permite garantindo fáceis interconexões entre estações terrestres.

A tudo isto juntam-se as possibilidades abertas pelas técnicas de LSI e VLSI (Very Large Scale Integration).

Estamos certos que as Telecomunicações, como tudo, estão condicionadas e em permanente intermotivação com a Tecnologia disponível.

Mas o Espaço das Telecomunicações é tão vasto que neste momento o factor primordial de avanço é o que se liga à capacidade de conceber em abstracto o que cria e define um domínio, diríamos, das Matemáticas Aplicadas.

Para a Física está também aberto um caminho ou pelo menos a averiguação de limites de resolução. Talvez se consiga nesse contexto de minúcia discreta estabelecer novos limites teóricos numa mesma Teoria da Informação e dar também resposta clara ao problema já equacionado do quantum mínimo de energia exigido pela transmissão de uma unidade de quantidade de informação.

À Engenharia competirá aproveitar numa base de juizos de realidade.

O avanço, no entanto, será de ordem tal que a Sociologia, em última análise a felicidade humana serão tocadas e deverão pronunciar-se.

Seria estulta pretensão tentar travar a investigação, fechar caminhos à curiosidade, e, assim, numa atitude de progresso que se deseja, a reflexão a dar-se, a dar-se e a resultar, seria um facto profundo e inédito.

Manuel José de Almeida Faro

REFERÊNCIAS

- [0] - M.J. de Abreu Faro - P.L. Borges Teixeira e outros - Concepção e projecto de sistemas de telecomunicações no País - Relato do Tema 4 - Congresso da Ordem dos Engenheiros, Novembro 1977, Publicado na Técnica - 445-446-447-448-453.
- [1] - Umberto Eco - O signo - Editorial Presença
- [2] - J.G. Herculano de Carvalho - Teoria da Linguagem - Atlantida Editora - Coimbra - 1967
- [3] - Albert Bettex - Inventeurs e Découvertes - Hachette
- [4] - D.A. Bell - Information Theory - London - 1953
- [5] - Edmond Bauer - L'Électromagnétisme-Hier et Aujourd'hui - Albin Michel
- [6] - W.J. Baker - A History of the Marconi Company - Methuen - 1970
- [7] - M.J. de Abreu Faro - Comunicação por Impulsos - Estudo da Modulação de Sucessão de Impulsos - Dissertação para concurso ao lugar de professor catedrático do I.S.T., publicada com complementos na Técnica nºs 262, 263, 264 e 265 - 1956.
- [8] - M.J. de Abreu Faro - Estudo das "Séries no Tempo" e a sua aplicação à determinação da resposta de sistemas lineares de transmissão - Técnica, nºs 275, 276 - 1957 - e nº 278 - 1958.
- [9] - M.J. de Abreu Faro - Determinação do espectro de potência e da função de auto-correlação a partir de séries no tempo - Técnica nº 295, 1959.
- [10] - James Martin - Future Developments in Telecommunications - Prentice Hall 1977.