

IMPULSOS INVISÍVEIS

A engenharia invisível que conecta
o mundo e quase ninguém entende

AMOSTRA

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\Delta \mathbf{B} / t$$

Para adquirir o livro completo acesse: livros.wagner.com.br

Wagner R. Bomfim

IMPULSOS INVISÍVEIS

A engenharia invisível que conecta o mundo e quase ninguém entende

Prólogo: A Física do Desejo - O ar que respiramos não é vazio. É um meio físico com propriedades mensuráveis: densidade, temperatura, condutividade. Quando um homem pré-histórico batia um tambor na entrada de sua caverna, ele não estava apenas produzindo som. Estava iniciando uma cadeia causal precisa: a pele do tambor vibrava, comprimindo e rarefazendo as moléculas de ar adjacentes. Essa perturbação propagava-se como uma onda de pressão longitudinal, viajando a aproximadamente 343 metros por segundo ao nível do mar a 20°C. A energia da batida dissipava-se com o quadrado da distância, limitada pela absorção atmosférica e obstáculos topográficos. Este era o primeiro canal de comunicação: analógico, baseado em energia mecânica, com largura de banda de talvez 50 Hz a 5 kHz - suficiente para ritmos básicos, insuficiente para voz articulada.

A revolução foi perceber que poderíamos usar um meio diferente: não a matéria (ar), mas o campo. A descoberta da

Para adquirir o livro completo acesse: livrowagner.com.br

eletricidade revelou que o universo é permeado por forças que podem ser manipuladas. Quando Alessandro Volta empilhou discos de zinco e cobre separados por feltro embebido em salmoura em 1800, criando a primeira pilha, ele estabeleceu um fluxo contínuo de elétrons - uma corrente. O salto conceitual de Hans Christian Ørsted em 1820, observando que uma agulha de bússola desviava-se próximo a um fio conduzindo corrente, demonstrou a ligação fundamental: eletricidade gera magnetismo. Michael Faraday, em 1831, mostrou o inverso: magnetismo variável induz eletricidade. Estas não eram curiosidades de laboratório; eram as leis fundamentais de um novo plano de existência.

James Clerk Maxwell, entre 1861 e 1865, unificou estas observações em vinte equações (posteriormente condensadas por Oliver Heaviside em quatro). As Equações de Maxwell descreviam como cargas elétricas criam campos elétricos (Lei de Gauss), como monopólos magnéticos não existem (Lei de Gauss para magnetismo), como campos magnéticos variáveis criam campos elétricos (Lei de Faraday), e como campos elétricos variáveis - crucialmente - criam campos magnéticos (Lei de Ampère-Maxwell, com o termo de "corrente de deslocamento"). A solução destas equações para o vácuo revelou algo extraordinário: campos elétricos e magnéticos

oscilantes poderiam auto-sustentar-se, propagando-se como uma onda transversal. A velocidade desta onda, calculada a partir das constantes elétricas e magnéticas do vácuo (ϵ_0 e μ_0), era aproximadamente 3×10^8 metros por segundo - a velocidade da luz. Maxwell havia descoberto, teoricamente, que a luz era uma onda eletromagnética. E se a luz era, então talvez outras frequências também fossem possíveis.

Heinrich Hertz, entre 1887 e 1888, materializou esta teoria. Seu transmissor consistia em um circuito RLC (Resistor-Indutor-Capacitor) com um centelhador. Quando carregado a alta tensão, o centelhador ionizava o ar, criando um caminho condutivo que permitia ao capacitor descarregar através do indutor. Esta descarga oscilatória amortecida (um "ringing") ocorria na faixa de MHz, irradiando ondas eletromagnéticas. Seu receptor, a alguns metros de distância, era um simples anel de cobre com um pequeno gap. Quando as ondas incidiam sobre o anel, induziam uma corrente que causava pequenas centelhas no gap, visíveis no escuro. Hertz varreu sistematicamente o laboratório com paredes metálicas, demonstrando reflexão; usou prismas de pitch, demonstrando refração; mostrou padrões de interferência. Ele mediu o comprimento de onda (λ) e, conhecendo a frequência (f) do oscilador, calculou a velocidade ($c = \lambda f$), confirmando a

previsão de Maxwell. Chamou-as de "ondas hertzianas". Morreu em 1894, aos 36 anos, sem imaginar que estava fornecendo a base física para toda comunicação sem fio.

O passo de Hertz para Marconi foi de físico para engenheiro. Marconi não estava interessado em verificar teorias, mas em maximizar a distância. Em 1895, na villa de seu pai em Pontecchio, ele construiu um transmissor melhorado: uma bobina de indução (o "jigger") carregando um capacitor até o centelhador romper, conectado a uma antena vertical e um terra. O receptor usava o coesor de Branly - um tubo com limalha de metal que normalmente apresentava alta resistência, mas que sob a influência de ondas de rádio tornava-se momentaneamente condutivo. Marconi adicionou um "tapper", um martelinho que batia no tubo após cada sinal, desfazendo as pontes metálicas e resetando o coesor. Este era um detector de envelope primitivo.

Sua inovação crucial foi sistematicamente aumentar a altura das antenas e melhorar o aterramento. Ele entendeu empiricamente que a antena e o terra formavam um circuito ressonante, e que a eficiência de irradiação dependia criticamente de suas dimensões em relação ao comprimento de onda. Em 1901, para a transmissão transatlântica, a estação em

Poldhu, Cornualha, usava um transmissor de faísca de 25 kW (um transformador alimentando um capacitor que descarregava através de um centelhador rotativo de 50 cm) conectado a uma antena colossal: 50 fios em forma de leque suspensos de um mastro central de 60 metros. Em Signal Hill, Terra Nova, a antena era um fio de 150 metros suspenso por uma pipa.

A recepção do sinal "S" (três pontos em Morse: ...) em 12 de dezembro de 1901 não foi limpa. O coesor de Marconi, conectado a um telefone, produzia apenas um leve sinal audível acima do ruído atmosférico (estático). Seu assistente, George Kemp, confirmou ter ouvido os três pontos. A comunidade científica foi céptica: as ondas hertzianas, pensava-se, propagavam-se em linha reta. Como haviam seguido a curvatura da Terra? A explicação veio em 1902, com Arthur Kennelly e Oliver Heaviside postulando independentemente a existência de uma camada ionizada na atmosfera superior - a ionosfera - que refletia ondas de rádio de baixa frequência (abaixo de ~30 MHz). A transmissão de Marconi utilizava ondas longas (cerca de 300 kHz, $\lambda \approx 1000\text{m}$) que refletiam entre a ionosfera e o solo, em modo de "salto". A Terra tinha, efetivamente, um duto de propagação natural.

Este foi o nascimento da engenharia de radiofrequência: a manipulação consciente do espectro eletromagnético para comunicação. O século XX seria dedicado a dominar este recurso invisível - dividindo-o, modulando-o, amplificando-o e, finalmente, digitalizando-o. Cada torre de celular que se ergue hoje é um descendente direto da pipa de Marconi em Signal Hill, operando sob as mesmas leis de Maxwell, mas com uma sofisticação que ele nem poderia sonhar.

A próxima revolução não seria na física, mas na informação. Enquanto Marconi transmitia seus pontos e traços, estava enviando uma mensagem codificada. A natureza deste código, e os limites fundamentais de quanta informação qualquer canal - incluindo o éter - poderia carregar, seria desvendada por um homem em um escritório nos Bell Labs, quatro décadas depois. Seu nome era Claude Shannon, e seu teorema seria a Constituição da era digital. Mas antes de chegarmos lá, precisamos entender o mundo analógico que ele herdou e que precisaria ser transformado.

Parte I: A Pré-História da Mobilidade (1900-1970)

Capítulo 1: Rádio Móvel - A Era dos Tubos de Vácuo e da Operadora Humana

O período entre as Guerras Mundiais viu o rádio evoluir de uma curiosidade para uma infraestrutura crítica. A comunicação móvel, no entanto, permaneceu no domínio militar, marítimo e de serviços públicos. O equipamento era colossal. Um típico rádio móvel militar dos anos 1930, como o SCR-508 usado em tanques, operava em HF (2-18 MHz) e consistia em várias unidades separadas: um transmissor de 50 Watts com múltiplos tubos de vácuo (807 como final de potência), um receptor super-heteródino com estágios de RF, oscilador local, misturador e IF (Frequência Intermediária), uma unidade de controle, e uma fonte de alimentação que convertia a tensão DC da bateria do veículo (12V ou 24V) para as altas tensões (200-600V DC) necessárias para os tubos. Tudo isso pesava mais de 100 kg.

A telefonia móvel civil começou de forma embrionária com o **Mobile Telephone Service (MTS)** da Bell System, iniciado em St. Louis em 2 de junho de 1946. Vamos dissecar seu funcionamento em nível de circuito:

1.1 O Terminal Móvel:

Um típico aparelho MTS, como o modelo da Motorola, ocupava todo o porta-malas de um sedan grande. Contenia:

- **Transmissor:** Um oscilador cristal controlado, geralmente usando um tubo 6AG7 em configuração Pierce, gerando um sinal na faixa de 35-44 MHz. A estabilidade de frequência era crítica; desvios maiores que 0.005% (± 500 Hz) causariam interferência em canais adjacentes. A modulação de frequência (FM) era usada para voz. O áudio do microfone (um carbono, simples) passava por um pré-amplificador de tubo (12AX7) e depois por um "reactance tube" (outro 6AG7) que varria a capacitância do circuito do oscilador, desviando sua frequência proporcionalmente ao sinal de áudio. O índice de modulação era baixo (± 5 kHz), pois a largura de banda alocada por canal era apenas 30 kHz. O sinal era então amplificado por um ou dois estágios (tubos 807 ou 6146) para uma potência de saída de 10-20 Watts. Um filtro passa-banda LC (indutor-capacitor) sintonizado limitava a emissão fora da banda.

- **Receptor:** Um super-heteródono duplo-conversão. A primeira conversão usava um oscilador local sintonizado ~455 kHz acima da frequência recebida, produzindo uma primeira IF de 455 kHz. Um segundo oscilador e misturador convertiam para uma segunda IF de 50 kHz, onde a filtragem de canal era mais fácil usando cristais ou filtros mecânicos. A detecção era por discriminador de Foster-Seeley, que convertia as variações de frequência de volta em áudio. O áudio era amplificado por um estágio de potência (tubo 6V6) que alimentava um alto-falante dinâmico.
- **Controle e Lógica:** Tudo era controlado por relés eletromecânicos. Um relé principal era acionado ao se levantar o fone. Ele ligava a alta tensão para os tubos (após um atraso de 30 segundos para aquecimento dos catodos), conectava a antena ao transmissor (via relé de antena), e iniciava a sequência.

1.2 A Estação Base:

Localizada em um ponto alto da cidade (como o Empire State Building em NY), a estação base tinha múltiplos receptores e transmissores, um para cada canal. A antena era uma colinear vertical de ganho moderado (6-9 dBi). O sinal recebido do

móvel era demodulado e, em vez de ir diretamente para a rede, era injetado em uma linha de áudio que levava à mesa da **operadora**.

1.3 A Operadora Humana:

Este é o elemento mais crucial e arcaico do sistema. A central MTS era uma sala cheia de painéis com uma fileira de tomadas (jacks) para cada canal. Cada operadora tinha um headset com um microfone de garganta (para não capturar o ruído da sala).

O processo:

1. **Sinal de Chamada:** Quando um usuário móvel levantava o fone, seu transmissor enviava um tom de 2.000 Hz em modulação de frequência. Na estação base, esse tom era detectado e acendia uma lâmpada no painel correspondente àquele canal.
2. **Conexão da Operadora:** A operadora, vendo a luz, inseria o plugue de seu headset na tomada correspondente. Ela ouvia um tom de linha e dizia "Número, por favor?".
3. **Discagem por Voz:** O usuário ditava o número desejado (ex: "Murray Hill 5-9975").

4. **Conexão Física:** A operadora tinha diante de si um painel de discagem (um "cord board") idêntico ao das centrais telefônicas manuais. Ela inseria um plugue de cabo em uma tomada correspondente à linha tronco para a central telefônica automática local. Com a outra mão, ela usava um disco rotativo no painel para gerar os pulsos de discagem correspondentes ao número.
5. **Monitoramento e Término:** Durante a ligação, a operadora monitorava silenciosamente. Quando a chamada terminava, o móvel enviava um tom de 600 Hz. A luz no painel se apagava. A operadora então desconectava fisicamente os plugues, liberando o canal.

1.4 Limitações Fundamentais:

- **Capacidade:** Uma cidade como Nova York tinha 12 canais. Com um tempo médio de chamada de 3 minutos, a capacidade teórica máxima (Erlang B) era de cerca de 4.5 Erlangs por canal a 1% de bloqueio. Isso dava ~54 chamadas simultâneas para toda a cidade. Insustentável.
- **Modo de Operação:** Era "half-duplex" com PTT. O usuário pressionava um botão para falar, soltava para ouvir. A duplexagem total exigiria filtros duplexores

(cavidades ressonantes) pesados e caros, além de separação de frequência maior.

- **Privacidade:** Zero. Qualquer um com um receptor de ondas curtas podia sintonizar 35-44 MHz e ouvir todas as conversas.
- **Cobertura:** O transmissor da estação base, com 250 Watts, cobria um raio de 40-50 km em terreno plano. Nas bordas da cobertura, o sinal era fraco e sujeito a desvanecimento ("fading") devido a multipercurso.

O **Improved MTS (IMTS)**, introduzido em 1964, foi uma tentativa de automatizar e expandir. Ele operava em VHF alto (152-158 MHz) e UHF (454-460 MHz), com canais de 25 kHz. A grande inovação foi a discagem por tons (DTMF) e o controle automático. O celular agora enviava sua identificação (MIN) digitalmente usando modulação por desvio de frequência (FSK - Frequency Shift Keying) a 10 kbps no canal de controle. Uma central de comutação automática (mais parecida com uma central telefônica) fazia a conexão. Mas o espectro ainda era escasso. O IMTS usava um esquema de "busca de canal" ("scanning"): o celular, quando ligado, varria todos os canais de controle até encontrar um livre, então se registrava. Para fazer uma chamada, ele repetia o processo.

Para receber, a rede pagava o celular em seu canal de controle registrado.

A clonagem tornou-se trivial. O par MIN-ESN era transmitido em claro. Um fraudador com um scanner e um gravador de áudio podia capturar a sequência de tons FSK, decodificá-la manualmente (os tons eram audíveis), e programar um EPROM com os números. A fraude custou bilhões. O sistema também sofria de "captura" ("capture effect") típica do FM: se dois sinais estivessem no mesmo canal, apenas o mais forte seria ouvido, o mais fraco completamente suprimido. Isso era bom para rejeitar interferência fraca, mas catastrófico se uma estação base distante (em outra cidade) usando a mesma frequência tivesse sinal mais forte que a local na borda da célula - causando interferência co-canal.

A saturação era inevitável. Em 1976, o serviço de celular em Nova York tinha 12 canais IMTS servindo 543 clientes na lista de espera. A média de espera por um canal livre era de 30 minutos. O conceito celular, proposto em 1947, era a única saída. Mas sua implementação exigiria não apenas novas frequências, mas uma nova filosofia de rede: uma inteligência distribuída que pudesse rastrear, entregar e gerenciar milhões de dispositivos em movimento. E isso, por sua vez, exigiria

compreender os limites teóricos da própria informação que se pretendia transportar.

Capítulo 2: Os Fundamentos Teóricos - Shannon, o Ruído e a Geometria Celular

2.1 O Fantasma no Canal: Ruído Térmico de Johnson-Nyquist

Antes de qualquer discussão sobre comunicação, é preciso entender o inimigo fundamental: o ruído. Em 1928, John B. Johnson dos Bell Labs observou que todo resistor, independente de sua construção, apresentava uma flutuação aleatória de tensão em seus terminais. Harry Nyquist, seu colega, forneceu a explicação teórica: o movimento térmico dos elétrons dentro do material. A potência do ruído térmico é dada por:

$$P_n = kTB$$

Onde:

- **k** é a constante de Boltzmann (1.380649×10^{-23} J/K)
- **T** é a temperatura absoluta em Kelvin
- **B** é a largura de banda em Hertz

Para adquirir o livro completo acesse: livrowagner.com.br

Para um sistema de rádio a temperatura ambiente ($T = 290 \text{ K}$) com uma largura de banda de 30 kHz (típica do AMPS), a potência de ruído térmico é:

$P_n = (1.38e-23) * 290 * 30,000 \approx 1.2 \times 10^{-16} \text{ Watts}$, ou -129 dBm (decibéis relativos a 1 miliwatt).

Qualquer sinal que chegue à antena do receptor com potência próxima a -129 dBm será afogado neste ruído fundamental. O " piso de ruído " define o limite absoluto da sensibilidade do receptor. Na prática, os próprios componentes do receptor (transistores, misturadores) adicionam ruído extra. A figura de ruído (Noise Figure - NF) de um componente quantifica quanto ele degrada a relação sinal-ruído (SNR). Um receptor típico dos anos 70 tinha uma NF de $8\text{-}10 \text{ dB}$. Isso significa que o piso de ruído efetivo do sistema era $-129 \text{ dBm} + 10 \text{ dB} = -119 \text{ dBm}$.

Um sinal de rádio enfraquece com a distância. A perda de percurso (path loss - L_p) em espaço livre segue a Lei do Inverso do Quadrado, expressa pela fórmula de Friis:

$$L_p \text{ (dB)} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(4\pi/c)$$

Onde $*d*$ é a distância em metros, $*f*$ é a frequência em Hz, e $*c*$ é a velocidade da luz. Para uma frequência de 850 MHz (AMPS) a 1 km :

$L_p \approx 20 \cdot \log(1000) + 20 \cdot \log(850e6) - 147.55 \approx 60 + 178.6 - 147.55 \approx 91 \text{ dB}$.

Assim, um transmissor de 20 Watts (43 dBm) teria sua potência reduzida para $43 - 91 = -48 \text{ dBm}$ a 1 km de distância. Isso está bem acima do piso de ruído de -119 dBm , então a comunicação é possível. Mas a 10 km, a perda é adicionalmente $20 \cdot \log(10) = 20 \text{ dB}$ pior, chegando a -68 dBm , ainda robusta. O problema real não é o espaço livre, mas o ambiente urbano: prédios causam sombra (shadowing), reflexões causam cancelamento (fading seletivo em frequência), e a presença de outros sinais causa interferência. A margem do sistema (link budget) precisa levar em conta esses fatores, frequentemente adicionando uma "margem de fading" de 20-30 dB.

2.2 A Revolução de Shannon: Informação como Entropia

Em julho de 1948, Claude E. Shannon publicou "A Mathematical Theory of Communication" no *Bell System Technical Journal*. Seu trabalho partiu de uma abstração radical: separar o significado semântico da mensagem de sua representação física.

Ele modelou uma fonte de informação como um processo estocástico que gera símbolos de um alfabeto com certas probabilidades. A "surpresa" ou "informação" contida em um

Para adquirir o livro completo acesse: livrowagner.com.br

símbolo $*i*$ com probabilidade p_i é $I_i = \log_2(1/p_i)$ bits. Se o símbolo é certo ($p=1$), $I=0$ bits (nenhuma informação). Se é improvável (p baixo), I é grande. A **entropia da fonte H** é a informação média por símbolo: $H = - \sum p_i \log_2(p_i)$.

Por exemplo, uma fonte binária que gera 0s e 1s com igual probabilidade ($p=0.5$) tem entropia $H = -[0.5*\log_2(0.5) + 0.5*\log_2(0.5)] = 1$ bit/símbolo. Essa fonte é "maximamente incerta". Se a fonte gerasse 0 com $p=0.9$ e 1 com $p=0.1$, a entropia seria $H = -[0.9*\log_2(0.9) + 0.1*\log_2(0.1)] \approx 0.469$ bits/símbolo. É possível comprimir essa fonte: em vez de enviar cada símbolo individualmente, podemos agrupá-los e codificar os grupos mais prováveis com sequências curtas de bits, e os menos prováveis com sequências longas (codificação de Huffman). Essa é a **codificação de fonte**, e seu limite é a entropia H .

Mas o cerne da revolução é o **Teorema da Capacidade do Canal com Ruído**. Shannon considerou um canal discreto com capacidade C (em bits por segundo), e uma fonte com entropia H (em bits por símbolo). Se $H < C$, existe um esquema de codificação (codificação de canal) que permite que a informação seja transmitida com taxa de erro arbitrariamente pequena. Se $H > C$, a taxa de erro não pode ser reduzida a zero.

Para um canal contínuo de largura de banda **B** (Hz) sujeito a ruído térmico branco gaussiano aditivo (AWGN) com potência **N**, e com potência de sinal média limitada a **S**, a capacidade é:

$$C = B \log_2(1 + S/N)$$

Esta equação, a **Fórmula de Shannon-Hartley**, é a lei fundamental das comunicações. Ela diz que a capacidade cresce linearmente com **B**, mas apenas logaritmicamente com **S/N**. Dobrar a largura de banda dobra a capacidade. Dobrar a potência do sinal (aumentando **S/N** em 3 dB) aumenta a capacidade apenas marginalmente. Isso tem implicações profundas: para aumentar drasticamente a capacidade, é preciso mais espectro (largura de banda), não apenas transmissores mais potentes.

Considere um canal AMPS de 30 kHz com uma SNR típica de 18 dB (razão **S/N** de 63.1). A capacidade de Shannon é:

$$C = 30000 * \log_2(1 + 63.1) \approx 30000 * \log_2(64.1) \approx 30000 * 6 \approx 180,000 \text{ bps.}$$

No entanto, o AMPS analógico transporta apenas uma voz com qualidade telefônica (3.1 kHz) que, se amostrada a 8 kHz e quantizada a 8 bits (padrão PCM), requer 64 kbps. Por que a taxa real (64 kbps) é menor que a capacidade teórica (180

kbps)? Porque o AMPS não é um sistema digital otimizado de acordo com Shannon. Ele usa FM analógica, que é ineficiente em espectro. Shannon mostrou o caminho: digitalize o sinal de voz, comprima-o (codificação de fonte) para talvez 8 kbps, e então proteja-o com códigos de correção de erro (codificação de canal) que adicionam redundância inteligente, permitindo operar próximo ao limite de S/N. Essa é a receita para todas as comunicações digitais modernas.

2.3 O Memorando de 1947: A Célula Hexagonal

Em 11 de dezembro de 1947, D.H. Ring, engenheiro dos Bell Labs, completou um memorando interno intitulado "Mobile Telephony — Wide Area Coverage". É um documento de 39 páginas que contém, em seu anexo, o primeiro esboço conceitual de um sistema celular.

Ring começou analisando o problema do sistema de grande área (IMTS-like). Ele notou que com um único transmissor de alta potência, a capacidade era fixa pelo número total de canais. Para aumentar a capacidade, a única saída era "dividir a área em um número de pequenas áreas de cobertura, cada uma com sua própria estação transmissora". Ele propôs que cada pequena área (célula) usasse um subconjunto do total de canais. Células não adjacentes poderiam reutilizar os mesmos canais.

Para adquirir o livro completo acesse: livrowagner.com.br