

# HEINRICH RUDOLF HERTZ

1857-1894



Moisés Piedade | Carlos Fernandes

## Vida e carreira

Heinrich Rudolf Hertz nasceu na cidade de Hamburgo, Alemanha, no dia 22 de Fevereiro de 1857, no seio de uma família de classe alta que beneficiava da pertença às cidades da Liga Hanseática<sup>1</sup>. O pai, Gustav Ferdinand Hertz, com ascendência judaica, era advogado e foi senador. A mãe, Anna Elisabeth Pfefferk, era muito exigente e dedicou uma atenção muito especial à educação dos seus cinco filhos (Heinrich, o mais velho, Gustav, Rudolf, Otto e Melanie), acompanhando de muito perto os seus estudos e desempenho escolar.

Desde muito novo H. Hertz revelou uma grande tendência para questões tecnológicas, nomeadamente na área de realização mecânica de pequenos objetos e aparelhos. Esta capacidade adquirida na juventude acabaria, mais tarde, por lhe ser extremamente útil na conceção e na realização das engenhosas experiências que fez para comprovar a existência de ondas eletromagnéticas que

---

1. Hamburgo, cidade fazendo parte da nova Alemanha unificada, tinha sido uma Cidade Imperial Livre fazendo parte da Liga Hanseática, que envolvia uma ligação económica preferencial entre cidades dedicadas ao comércio marítimo.

tinham sido previstas pela teoria do campo eletromagnético de James Maxwell. Além desta preferência pela formação experimental sempre teve um grande gosto por estudar, aprender e dominar várias línguas e, nos seus estudos secundários, esteve sempre entre os melhores alunos da sua classe.

Heinrich procurou inicialmente obter uma formação universitária tecnológica muito avançada em várias universidades em Dresden, Munique e Berlim, mas o seu interesse acabou por privilegiar mais a formação em física e em matemáticas avançadas, tendo terminado o seu doutoramento em 1880 na Universidade Humboldt de Berlim, sob orientação de Hermann Helmholtz<sup>2</sup>. Em 1883 tornou-se professor de Física na Universidade de Kiel e em 1885 assumiu uma vaga de professor de Física na Universidade de Karlsruhe.

Em 1886 Heinrich Hertz casou com Elisabeth Doll, filha de Max Doll que foi professor de geometria da Universidade de Karlsruhe. Deste casamento resultaram as duas filhas Johanna e Mathilde.

A família de Heinrich sempre esteve ligada ao conhecimento científico. Ambas as filhas do casal Heinrich-Elisabeth, tiveram um percurso académico muito interessante: Johanna foi professora de geometria na Universidade de Karlsruhe e Mathilde foi uma renomada bióloga.

No início de 1893, Hertz adoeceu com dores de cabeça extremamente fortes, exatamente no ano em que as suas principais experiências viriam a ser conhecidas através da publicação do livro "*Electric Waves*" (Hertz 1893). Foi operado mas na sequência dessa operação apanhou uma infeção bacteriana no sangue à qual não resistiu, acabando por falecer a 1 de Janeiro de 1894, com apenas 36 anos.

Elisabeth Doll não voltou a casar e Johanna e Mathilde não tiveram filhos e, por isso, Hertz não deixou descendentes, mas deixou um caminho científico excepcionalmente prometedora para muitos cientistas que o seguiram. Mas a família Hertz acabaria por ter um prémio Nobel no seu seio, na pessoa do físico Gustav Ludwig Hertz<sup>3</sup>, sobrinho de Heinrich, filho do seu irmão Gustav.

---

2. Hermann Ludwig Ferdinand **Helmholtz** (1821-1894), considerado um dos mais importantes cientistas alemães do século XIX, notabilizou-se nas áreas da filosofia, ótica, eletrodinâmica, matemática e meteorologia. é conhecido pela formulação em 1847 da lei da conservação da energia.

3. **Gustav Ludwig Hertz** (1887-1975), físico alemão que fez trabalho experimental na confirmação da estrutura do átomo.

Com efeito, quando em 1921 o físico dinamarquês Niels Bohr<sup>4</sup> apresentou um modelo teórico para a estrutura dos átomos, baseado em órbitas planetárias de elétrons caracterizadas por níveis de energia discretos, que lhe valeu o prêmio Nobel, em 1922, não existia qualquer prova experimental desta teoria. Esta prova viria a ser feita por Gustav Ludwig juntamente com o seu colega James Franck<sup>5</sup> que fizeram estudos sobre o impacto de elétrons em átomos e confirmaram experimentalmente o modelo teórico que tinha sido proposto por Niels Bohr. A confirmação da existência das órbitas e da quantificação da energia necessária para os elétrons passarem de uma órbita para outra, valeu-lhes o prêmio Nobel em 1925<sup>6</sup>.

## A carreira científica de Hertz

Hertz, procurou sempre as escolas que, na sua opinião, melhor se adequavam à formação que pretendia adquirir. Assim, em 1876, depois de terminar o ensino secundário, inscreveu-se em engenharia no Instituto Politécnico de Dresden, mas acabaria por ir para o Instituto de Tecnologia de Munique, para se dedicar à investigação na área da Física e complementar a sua formação em Matemática.

Embora tenha prosseguido os seus estudos na Universidade Humboldt, na área de engenharia, ao fim de um ano desistiu e formou-se em física, tendo aperfeiçoado muito os seus conhecimentos de matemática avançada e de física.

Em 1879, no ano da morte de James Maxwell, cientista que viria a influenciar muito o seu pensamento científico, Hertz, com 22 anos, aceitou uma bolsa de investigação da Academia de Ciências de Berlim, para trabalhar sob orientação de Helmholtz. A investigação pretendida visava descobrir se existia alguma relação entre a polarização dielétrica de vários materiais isoladores e as forças eletromagnéticas. Hertz teve acesso aos laboratórios de Helmholtz, onde desenvolveria a sua atividade e levaria a cabo o trabalho de doutoramento, que terminou em 1880. Neste trabalho Hertz usou oscilações provocadas por bobinas de

4. Niels **Bohr** (1885-1962), físico dinamarquês que ficou célebre pelo seu modelo da estrutura do átomo e da teoria quântica.

5. James **Franck** (1882-1964), físico alemão que fez trabalho experimental na confirmação da estrutura do átomo.

6. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1925/hertz/biographical/>

indução e condensadores (garrafas de Leyden). Embora os resultados obtidos por Hertz não tenham sido muito conclusivos, deram-lhe uma grande motivação para continuar estes estudos por outros métodos (Hertz 1893).

Hertz manteve-se como investigador pós-doutoramento e assistente de Helmholtz até 1883, ano em que assumiu uma posição de professor na universidade de Kiel e em 1885 tornou-se professor de Física na Universidade de Karlsruhe.

Na primavera de 1886 Hertz recomeçou os seus estudos sobre oscilações elétricas e procurou compreender melhor a teoria de Maxwell do campo eletromagnético, que Hertz considerava ter uma grande influência dos trabalhos de Michael Faraday. Por essa razão referia-se a esta teoria pela designação “*Faraday-Maxwell Theory*”.

Em 1889, já depois das suas descobertas sobre as ondas eletromagnéticas, ainda com apenas 25 anos, tornou-se professor na Universidade de Bona, consolidando uma carreira académica fulgurante.

Hertz recebeu vários prémios e condecorações internacionais, nomeadamente:

- Medalha Matteucci em 1888, pela *Accademia Nazionale delle Scienze* (Itália);
- Medalha Rumford em 1890, pela *Royal Society of London*;
- *Prix La Caze* em 1889 pela *Académie des Sciences* de Paris.

## **A teoria de James Maxwell**

Para se perceber o contributo de Hertz, vale a pena ir um pouco atrás. Em 1845 Faraday tinha introduzido o conceito de campo para substituir a noção de “ação à distância”, o que provocou uma reação negativa de muitos cientistas. Os estudos anteriores pressupunham a existência de um meio físico invisível designado por éter. Segundo Faraday, seriam as alterações à volta dos magnetes do que designou por “*eletrotonic state*”, e que hoje em dia se chama “Vetor Potencial Magnético”, que causavam a indução magnética. Maxwell, a pedido de Faraday, formalizou esta noção de campo com as suas linhas de força. No seu primeiro artigo de 1861 “*On Physical Lines of Force*”, Maxwell introduziu o conceito de corrente de deslocamento e em 1865 publicou o artigo “*A Dynamical*

*Theory of the Electromagnetic Field*” onde aparece o sistema de 20 equações de Maxwell, designado por Teoria de Maxwell do campo eletromagnético.

A teoria de Maxwell não foi muito valorizada pelo próprio e também não foi particularmente apreciada pelos cientistas da época, havendo, contudo, algumas notáveis exceções como George Fitzgerald<sup>7</sup>, Oliver Lodge<sup>8</sup>, Heaviside, Helmholtz e, mais tarde, Hertz, que foram, por essa razão, apelidados de *Maxwellians* (Hunt 2005). Só 23 anos depois da morte de Maxwell se começou a dar valor ao seu trabalho científico, nomeadamente depois das experiências de Hertz (Rautio 2010).

Um dos maiores apoiantes da teoria de Maxwell foi o cientista Oliver Heaviside, que simplificou a teoria e lhe retirou a necessidade dos conceitos de potencial elétrico e vetor potencial magnético<sup>9</sup>. No ano em que Hertz faleceu (1893) e depois da comprovação experimental da existência de ondas eletromagnéticas, foi publicado o livro *“Eletromagnetic Theorie”* de Heaviside, onde este escreveu: *“The great gap between Hertzian waves and waves of light has not yet been bridged, but I do not doubt that it will be done by the discovery of improved methods of generating and observing very short waves”*. E assim foi.

## Outros antecedentes

Antes das experiências de Hertz alguns cientistas já tinham sido confrontados com algumas situações experimentais de transmissão de energia elétrica à distância que não podiam ser explicadas por fenómenos de indução.

Vinte anos antes da descoberta de Ørsted de que uma corrente elétrica cria um campo magnético, em 1802 o italiano Domenico Romagnosi<sup>10</sup> publicou uma experiência em que a descarga de uma pilha de Volta magnetizava uma agulha magnética colocada à distância.

7. George **Fitzgerald** (1851-1901), físico irlandês com trabalhos notáveis no eletromagnetismo e na lei da contração do tempo *“Lorentz-Fitzgerald Contraction”* que abriria caminho para Teoria da Relatividade de Einstein.

8. Sir Oliver **Lodge** (1851-1940), experimentalista e professor britânico com trabalhos pioneiros na Rádio.

9. Contudo o sistema de equações de Maxwell é mais geral pois pode ser adaptado a fenómenos da física quântica, como veio a ser demonstrado.

10. Gian Domenico **Romagnosi** (1761-1835), filósofo economista e jurista italiano.

Uma destas experiências, enigmáticas na época, foi também descrita por Joseph Henry<sup>11</sup> que conseguia magnetizar agulhas magnéticas colocadas dois pisos acima do seu laboratório, a 10 m de distância, quando provocava uma descarga elétrica. Chegou a magnetizar agulhas magnéticas colocadas a 12 km de distância.

Em 1870, Johann Wilhelm von Bezold<sup>12</sup> num artigo sobre descargas elétricas, descreveu algumas situações que Hertz estudou e que vieram a ter muita importância no seu trabalho científico.

Em 1879, o anglo-americano David Hughes<sup>13</sup> transmitiu sinais à distância de 450 metros, usando um mecanismo de relojoaria que periodicamente interrompia a corrente numa bobina de indução gerando uma faísca elétrica. Ouvia num auscultador a perturbação resultante desta faísca detetada pela alteração da resistência do microfone de carbono que Hughes estava a desenvolver. Hughes apresentou estes resultados na Academia das Ciências de Londres mas os cientistas presentes consideraram que eram fenómenos de indução eletromagnética, opinião que não convenceu Hughes.

Os trabalhos de Oliver Lodge sobre descargas elétricas em para-raios, feitos em 1882 (Lodge 2012), e de Oliver Heaviside (Heaviside 1893), na transmissão de sinais por cabos mostraram a existência de situações experimentais que eram muito semelhantes às conclusões que Hertz iria obter.

Em 1883, George Fitzgerald na presença de William Thomson (Lord Kelvin) apresentou um método teórico baseado nas equações de Maxwell para gerar ondas eletromagnéticas com o comprimento de onda de dois metros (150 MHz).

Para a investigação realizada sobre as ondas eletromagnéticas foi fundamental a bobina de indução inventada em 1836 pelo irlandês Nicholas Callan<sup>14</sup>, com influência direta dos trabalhos de Michael Faraday e de William Sturgeon<sup>15</sup>. Esta bobina/transformador foi depois aperfeiçoada por outros investi-

---

11. Joseph **Henry** (1797-1878), matemático e físico estadunidense. Descobriu a indutância mútua e fez desenvolvimentos no eletromagnete, no motor elétrico e foi o inventor do relé. Foi apoiante de James Smithson, o primeiro financiador da *Smithsonian Institution* de que Henry foi o primeiro secretário.

12. Johann Wilhelm **von Bezold** (1837-1907), físico e meteorologista alemão, com trabalhos no domínio da percepção visual e no estudo de descargas elétricas.

13. David Edward **Hughes** (1831-1900), músico, inventor do impressor telegráfico e do microfone de carbono.

14. Nicholas **Callan** (1799-1864), padre e cientista irlandês inventor da bobina de indução.

15. William **Sturgeon** (1783-1850), físico e inventor britânico que criou o primeiro eletromagnete e o primeiro motor elétrico utilizável.

gadores, nomeadamente por Heinrich Ruhmkorff<sup>16</sup> e foi possível gerar forças eletromotrizes extremamente elevadas capazes de provocar um arco elétrico, ou seja, uma faísca através do ar.

O arco elétrico tem um comportamento de resistência incremental negativa (depois da disrupção do ar, quando a tensão baixa e a corrente aumenta). Este funcionamento potencia a geração de oscilações amortecidas em circuitos elétricos, tendo constituído até 1916 uma das principais fontes de radiofrequência.

## As experiências de Hertz

Hertz era um profundo conhecedor da Teoria de Maxwell do eletromagnetismo, e só assim se compreende o sucesso experimental que teve. Todavia, quando perguntavam a Hertz o que era a teoria de Maxwell, invariavelmente dizia: “a teoria é simplesmente o sistema de 20 equações de Maxwell”.

Em 1886, em Karlsruhe, Hertz usava frequentemente as bobinas espirais acopladas de Peter Riess<sup>17</sup> e de Knochenhauer<sup>18</sup> nas demonstrações da disciplina de física que lecionava. Estas bobinas correspondiam a dois anéis metálicos abertos, com igual diâmetro, terminados em pequenas esferas metálicas, cuja distância podia ser ajustada por um parafuso micrométrico (micrómetro de Riess). Hertz, ao usar as espiras de Riess, ficou surpreendido pelo facto de ser relativamente fácil gerar uma faísca numa espira (anel primário) à custa de uma pequena bobina de indução e por observar uma réplica na outra espira (anel secundário)<sup>19</sup>.

Hertz concluiu rapidamente que não se tratava de um efeito de indução, uma vez que o afastamento progressivo dos dois anéis não seguia a lei de decréscimo da indução eletromagnética. Chegou a notar faíscas com o anel secundá-

16. Heinrich **Ruhmkorff** (1803-1877), fabricante alemão de instrumentos que introduziu melhoramentos consideráveis na bobina de indução que viria a ter um papel fundamental no desenvolvimento da Rádio.

17. Peter **Riess** (1804-1883), físico alemão que criou o spark gap com ajuste micrométrico de espaçamento e a espira terminada com duas esferas metálicas com espaçamento ajustável de modo a ser ressonante numa dada frequência.

18. K. W. **Knochenhauer**, físico alemão, autor em 1854 do livro “*Beiträge Zur Elektrizitätslehre*” (Contribuições para a Teoria da Eletricidade) que contribuiu para o desenvolvimento da espira ressonante.

19. Este facto foi observado sem necessidade de usar a grande bateria de garrafas de Leyden e a grande bobina de indução que Hertz tinha usado nos trabalhos anteriores realizados em Berlim.

rio colocado a 12 m do anel primário. Além disso, notou a existência de nodos de potencial nulo no anel recetor e verificou que a colocação de dielétricos junto das esferas do anel secundário podia aumentar ou diminuir o tamanho da faísca mas que não tinha qualquer efeito junto do nodo. Hertz avaliava os máximos de potencial através do tamanho das faíscas produzidas (2 a 6 mm)<sup>20</sup>. Nessa altura, Hertz só dispunha deste instrumento para determinar qualitativamente as diferenças de potencial a partir do comprimento das faíscas elétricas. Este sistema de espiras constituiu o emissor e o detetor de ondas de rádio usado em todas as suas experiências.

Apesar de desconhecer o método proposto anteriormente por George Fitzgerald para gerar perturbações eletromagnéticas, Hertz usou um método semelhante e produziu oscilações eletromagnéticas com frequências muito elevadas (até cerca de 1,3 GHz). Teve sempre de adaptar o seu detetor de oscilações ao comprimento de onda a usar, de modo a este ser ressonante.

## O gerador de frequência variável

Hertz fez experiências muito meticulosas com materiais condutores e isoladores que mostraram que ambos os materiais poderiam influenciar a existência, ou não, de máximos e mínimos de potencial e de correntes ao longo dos condutores.

Hertz construiu um gerador de radiofrequência baseado no faiscador elétrico cuja frequência podia ser ajustável. O gerador era constituído por dois condutores elétricos com 1,3 m de comprimento, onde se podiam deslizar duas esferas metálicas de modo a variar a distância entre elas<sup>21</sup>. O resultado foi um circuito ressonante onde se desenvolvia a frequência da oscilação provocada pela faísca. Esta estrutura é o chamado dipolo de Hertz. Num circuito vizinho (circuito secundário) com estrutura semelhante podia ajustar-se o comprimento dos fios de modo a obter uma faísca com comprimento máximo quando se estivesse na frequência de ressonância do circuito secundário (igual à do circuito gerador primário).

---

20. Através da medida da separação entre as esferas do anel secundário, usando um micrómetro, Hertz também poderia estimar a diferença de potencial desenvolvida, recorrendo às leis experimentais de Friedrich Paschen (1865-1947) sobre a disrupção dielétrica.

21. Os condutores representam uma autoindução e as esferas apresentam uma capacidade entre elas. A partir dos seus valores Hertz estimou o valor da frequência de oscilação.



Hertz verificou rapidamente que os condutores elétricos não eram equipotenciais. Nesses condutores detetou pontos (nodos) onde a vizinhança de um condutor ou dielétrico não perturbava as faíscas produzidas no micrómetro de Riess. Observou também que noutros pontos desses condutores a presença desses objetos influenciava muito a dimensão das faíscas.

Destas experiências Hertz tirou três conclusões fundamentais:

1. As alterações na polarização de dielétricos produziam campos magnéticos equivalentes aos produzidos por correntes nos condutores;<sup>22</sup>
2. Os dielétricos podiam ser polarizados, quer por forças eletrostáticas, quer por forças eletromagnéticas;
3. O ar e o espaço livre comportavam-se como dielétricos normais.

Estas três observações experimentais eram previstas na teoria de Maxwell e foram importantes nas futuras experiências de Hertz.

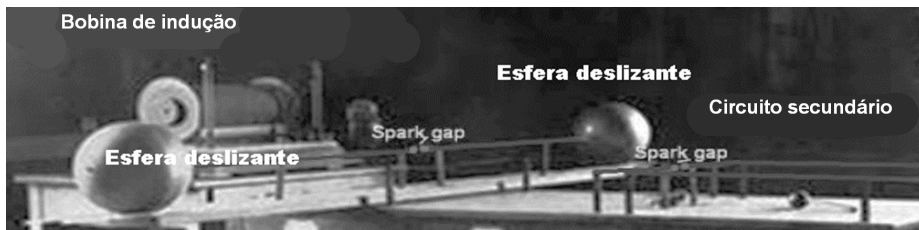


Figura 1: O gerador eletromagnético de esferas deslizantes acoplado a um circuito secundário.

## O efeito fotoelétrico

Todas as experiências de Hertz foram feitas no seu laboratório sem qualquer tipo de iluminação para poder observar as faíscas elétricas. Em 1887, Hertz descobriu que a luz da faísca elétrica tinha efeito nas observações elétricas que fazia. Realizou experiências que comprovaram esse facto e que lhe permitiram descobrir o efeito fotoelétrico.

Verificou que a incidência de luz ultravioleta sobre as esferas do micrómetro, obtida por separação do espetro de luz normal através de um prisma, fazia com

<sup>22</sup>. Hertz confirmava assim a hipótese de Maxwell de que a corrente de deslocamento também gerava campo magnético.

que a dimensão das faíscas se alterasse, embora não ocorresse esse fenómeno com luz de outros comprimentos de onda. Deste modo, Hertz descobriu que a luz ultravioleta facilitava o mecanismo de geração de faíscas; hoje sabe-se que a luz ultra violeta consegue ionizar o ar e isso facilita o início da disrupção elétrica do ar e a geração da faísca elétrica.

Um efeito análogo, mas diferente, o efeito fotovoltaico, já tinha sido observado em 1839 por Alexandre Becquerel<sup>23</sup>. O efeito fotoelétrico só foi esclarecido em 1905, por uma teoria desenvolvida por Einstein, quando este tinha apenas 26 anos. Em 1922, Einstein, o pai da revolucionária Teoria da Relatividade, haveria de ser Prémio Nobel, essencialmente pelo seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico, como esclareceu o Júri do Nobel da Física desse ano “*for his work on theoretical physics, especially for his discovery of the law of the photoelectric effect*”.

## **Campo próximo e campo distante de um radiador eletromagnético**

Usando o sistema de esferas deslizantes sobre o condutor central, Hertz conseguiu obter posições que maximizavam a amplitude das faíscas obtidas no circuito secundário (detetor), ou seja, colocava os dois circuitos em condições de ressonância na mesma frequência. Afastando o detetor do circuito primário e mudando a sua orientação, Hertz conseguiu detetar comportamentos diferentes do detetor, concluindo que havia dois tipos de campos radiados, que se atenuavam com a distância  $d$ . Um campo que se atenuava com  $d^3$ , junto ao emissor, e outro, ortogonal, que se atenuava com  $d^2$ , nas regiões mais afastadas. Hoje sabemos que se trata do campo próximo e do campo distante que um radiador eletromagnético sempre gera.

## **As ondas estacionárias no espaço**

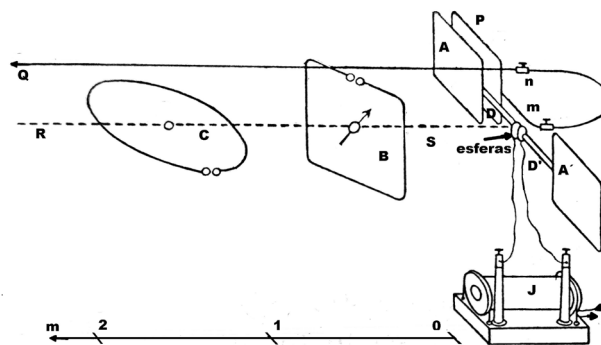
Hertz fez uma experiência que viria a ser fundamental para chegar à conclusão da existência das ondas eletromagnéticas. Construiu um emissor eletro-

---

23. Alexandre **Becquerel** (1820-1891), físico francês célebre pelos seus trabalhos sobre ação da luz sobre vários materiais, nomeadamente a descoberta do efeito fotovoltaico.

magnético cujo desenho se representa na Figura 2. Este emissor eletromagnético usa um dipolo elétrico formado pelos condutores elétricos, D e D', ligados a duas placas de latão, A e A', colocadas numa posição vertical. O dipolo foi alimentado pela bobina de Rumkorff. Nesta experiência, Hertz usou dois tipos de detetores alternativos: as espiras B e C terminadas por dois micrómetros de Riess. A partir da capacidade das placas A e A' e da autoindução dos condutores D e D', Hertz estimou que o período das oscilações seria de  $1.4 \times 10^{-8} \text{ s}$  24s<sup>24</sup> (cerca de 71,4 Mcps)<sup>25</sup> e ajustou os dois detetores alternativos para serem ressonantes nesta frequência.

Hertz colocou uma placa de zinco com cerca de 4 m x 2 m na parede do laboratório, em frente do emissor, a cerca de 12 m. Se houvesse ondas, elas refletir-se-iam na chapa metálica e iriam interferir com as novas ondas que caminhavam para a parede. E assim foi. Hertz detetou a sobreposição dos dois tipos de ondas obtendo máximos e mínimos de energia, manifestados pela dimensão das faíscas dos detetores em diferentes locais da sala. Mediu a distância entre máximos, na direção frontal do emissor (linha R S da Figura 2), de cerca de 2,1 m, que corresponderia ao comprimento de onda  $\lambda$  de 4,2 m. Como conhecia a frequência do sinal (71,4 MHz), tendo em conta o valor do comprimento de onda  $\lambda$  estimou uma velocidade de propagação de cerca de 300000 km/s, tal como Maxwell tinha previsto. Foi aqui que verdadeiramente confirmou a teoria de James Maxwell.



**Figura 2:** Experiência de Hertz para estudar a estrutura do campo eletromagnético.

24. Hertz usava a fórmula de Helmholtz para o cálculo de indutância de um fio que considerava ser mais geral do que as fórmulas existentes de Maxwell, de Weber e de Newman para o caso de um fio sem terminação.

25. Mcps: milhões de ciclos por segundo, unidade usada na época.

Na Figura 2 o emissor é constituído pelas placas A e A' de latão com 40 cm de lado, ligadas a dois condutores D e D' com 60 cm de comprimento e pela bobina de Rumkorff J, ligada às esferas de onde saltam as faíscas elétricas.

Por sua vez, os recetores são formados pela espira quadrada B, com 60 cm de lado, e pela espira circular C, com raio de 35 cm, ambas com micrómetros nas extremidades ajustados para ressonância (período de 14ns) e colocadas ortogonais à direção de radiação. A placa P, na vizinhança de A, também faz parte dos recetores, para gerar excitação do condutor, com 12 m de comprimento e extremidade ligada à terra.

## **A propagação das ondas eletromagnéticas num fio**

Numa outra experiência, Hertz procurou determinar a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas num fio condutor. Colocou a placa P por detrás da placa A ligada ao condutor retilíneo nQ, situado 30 cm acima do plano do dipolo (figura 2), perpendicular ao dipolo e centrado com este. Este condutor retilíneo tinha 60 m de comprimento e o terminal remoto estava ligado à Terra. Hertz garantiu que, com este comprimento, havia sinal no fio, mas não havia ondas estacionárias<sup>26</sup>.

Hertz usou fios mais curtos medidos desde a origem n e verificou que nestes fios condutores se passou a notar a existência de máximos e mínimos do sinal localizados em pontos do fio, reveladores da existência de ondas estacionárias. Mediu a distância entre dois máximos consecutivos (comprimento de onda) e, para sua surpresa, obteve o valor de 2,8 m, valor que era menor do que aquele que tinha medido no ar. Como consequência, a velocidade de propagação no fio seria de 200000 km/s, ou seja, inferior à que tinha determinado no ar (300000 km/s). Repetiu a experiência com fios de vários diâmetros e materiais e até com um eletrólito num tubo de vidro muito comprido, obtendo sempre um valor próximo de 200000 km/s. Desta forma, Hertz, concluiu que esta velocidade medida não variava muito nem com o tipo de fio usado nem com o diâmetro do fio. Hertz concluiu ainda que para altas frequências o facto de o fio ser magnético não alterava as suas conclusões, embora tivesse alguma influência para frequências baixas.

---

26. A perda progressiva de energia ao longo do fio impedia a formação de ondas estacionárias.

Entusiasmado com este resultado, Hertz verificou que o campo radiado pelo fio também interferia com o campo radiado pelas placas A A', mas que, neste caso, os máximos do campo total estavam espacialmente mais afastados (cerca de 7,5 m). Verificou que teria de ser assim devido à sobreposição de ondas de comprimentos de onda diferentes. Foi deste modo que Hertz confirmou o ponto de vista de Faraday, que admitia que os campos tinham existência própria e não eram uma propriedade dos objetos. Hipótese que tinha sido contestada por muitos cientistas e que só mais tarde seria finalmente confirmada por Einstein<sup>27</sup>.

Entusiasmado com os seus resultados experimentais Hertz começou a procurar efeitos ondulatórios semelhantes aos que já eram conhecidos da ótica e da acústica. Usou as paredes do laboratório como refletores onde a força elétrica se anulava, produzindo reflexões que interferiam com as ondas incidentes. Atrás de um pilar de ferro observou a não existência de força eletromagnética tal como acontece com a sombra do pilar quando iluminado com luz. Observou efeitos eletromagnéticos semelhantes aos obtidos na ótica com o espelho de Fresnel e até mesmo aos anéis de Newton obtidos com a passagem da luz por duas placas paralelas. Hertz começou a acreditar que a teoria eletromagnética de Maxwell era a mais perfeita das várias existentes, ao verificar que quase todos os seus resultados experimentais batiam certo com as previsões de Maxwell, exceção feita à previsão da velocidade de propagação num fio condutor ser igual à do ar<sup>28</sup>. Hertz viria a estudar mais a fundo esta questão para tentar explicar esta diferença entre a teoria e a experiência. Nesta altura Hertz tinha já uma convicção muito forte de que a luz também era um fenómeno eletromagnético.

Em 1888, já Hertz admitia que as ondas eletromagnéticas poderiam ter alguma relação com as propriedades da luz. Sendo a velocidade de propagação praticamente a mesma, Hertz encetou experiências para ver se outras propriedades da luz também se encontravam nas ondas eletromagnéticas.

Hertz já produzia ondas com diversos tipos de polarização das ondas eletromagnéticas, tendo estudado os efeitos da transmissão, da difração, da reflexão e da refração destas ondas em diferentes materiais. Valendo-se da sua experiência de fabricação de objetos quando era jovem, Hertz construiu recetores para-

27. Tanto Hertz como Maxwell tinham a convicção de que para haver propagação da força eletromagnética era preciso haver um meio elástico de transporte, mesmo que fosse invisível, – o éter, hipótese que Faraday não achava necessária.

28. A velocidade determinada pela teoria de Maxwell é a da luz para um condutor ideal, retilíneo, e de diâmetro infinitesimal, situações diferentes das encontradas nas experiências de Hertz.

bólicos de madeira mas usando metais refletores para ver se as ondas se podiam concentrar, como acontecia com a luz num espelho parabólico.

## **A concentração de ondas eletromagnéticas**

Nas experiências realizadas, foi muito evidente para Hertz a semelhança das ondas eletromagnéticas com as ondas de luz, o que o levou a intuir que talvez fosse possível concentrar a radiação eletromagnética através de um espelho parabólico como se fazia com a luz.

Numa primeira experiência Hertz mandou fazer um espelho constituído por uma chapa de zinco com forma côncava parabólica suportada por uma estrutura de madeira com 4 m de altura por 1 m de abertura, no foco do qual colocou o seu emissor. Os resultados não foram os esperados e Hertz abandonou a experiência. Mais tarde, Hertz apercebeu-se que as ondas eletromagnéticas que tinha usado tinham entre 4 m a 5 m de comprimento de onda (maiores do que as dimensões do espelho) e que talvez fosse essa a razão que explicasse o seu fracasso experimental. Mas, no final do ano de 1888, Hertz já estava a conseguir produzir ondas com comprimentos de onda cerca de 10 vezes menores<sup>29</sup> e resolveu repetir as experiências mas desta vez com um novo espelho, com 2 m de altura e 1 m de abertura de boca e uma distância focal de 12,5 cm. Na Figura 4 representa-se a vista de topo da experiência com espelho parabólico. Hertz usou um novo dipolo emissor muito mais pequeno, constituído por cilindros de latão com 3 cm de diâmetro e 13 cm de comprimento terminados em esferas com 2 cm de raio excitadas por uma pequena bobina de indução.

Já depois da sua descoberta do efeito fotoelétrico, Hertz, com o dispositivo de madeira S, impediu que a luz das faíscas fosse refletida no espelho e influenciasse a descarga elétrica. Hertz também abandonou as espiras de Riess como detetor, já que estas teriam de ser muito pequenas e as faíscas dificilmente observáveis, tendo construído o dipolo recetor representado na Figura 3 II em que o micrómetro estava incluído numa caixa fechada (sem luz), por onde pôde observar as faíscas.

---

29. Hertz usava comprimentos de onda grandes relativamente aos detetores utilizados (anel de Riess) para ter precisão razoável na localização espacial da força eletromagnética e ainda conseguir obter faíscas facilmente observáveis.

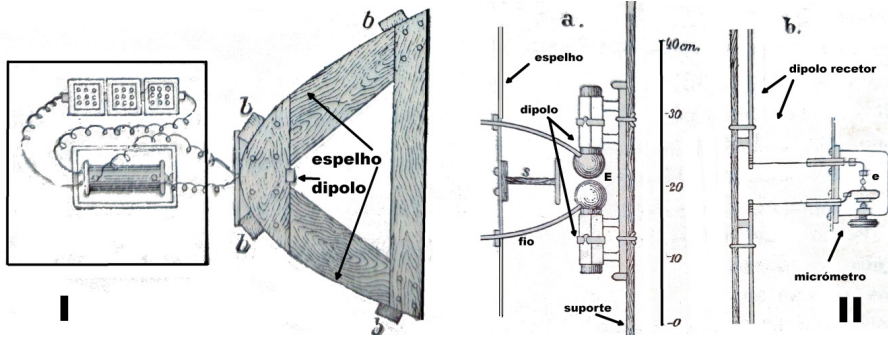


Figura 3: I – Emissor com espelho parabólico; II – Dipolo emissor e detector usado.

Hertz procurou logo caracterizar a radiação eletromagnética que acabara de produzir. Constatou que atrás do espelho não havia qualquer sinal. Colocou uma placa de zinco com 2m x 1m ortogonal com o eixo do espelho e detetou a existência de ondas estacionárias com grande amplitude mas que estavam concentradas no eixo do espelho, com velocidades próximas da velocidade da luz. Hertz acabara de fazer pela primeira vez um feixe orientado de radiação eletromagnética, concentrado, dirigido na direção do eixo do espelho. Mas esta experiência trouxe-lhe novas surpresas. Hertz ou o seu assistente que o acompanhava nas experiências verificaram que era muito difícil posicionar-se na frente do feixe sem alterar a radiação eletromagnética. Uma vez mais a criatividade experimental de Hertz resolveu o problema. Construiu um novo espelho exatamente igual ao espelho principal, mas que agora tinha no seu foco o detector usado. Adicionalmente, os sinais recebidos eram transferidos para o micrômetro colocado atrás do segundo espelho, onde Hertz poderia observar os sinais sem que a sua presença alterasse o feixe eletromagnético gerado. Foi assim que Hertz fez a primeira emissão e recepção de um feixe de micro-ondas.

## Polarizadores eletromagnéticos

Depois da experiência com os espelhos parabólicos eletromagnéticos, Hertz teve a confirmação de que a radiação emitida pelo feixe era caracterizada por uma força elétrica polarizada na vertical; experimentalmente bastou-lhe rodar o espelho recetor de 90° para não ser produzida qualquer faísca. Na sequência desta observação, Hertz teria afirmado: *“The two mirrors behave like the polari-*

*zer and analyser of an optical polarization apparatus*". Seguidamente, Hertz construiu um quadro octogonal de madeira com 2 m de altura e 2 m de largura no qual esticou paralelamente fios de cobre separados de 30 mm. Ao passar esta estrutura pelo trajeto do feixe eletromagnético (entre os dois espelhos), Hertz verificou que sempre que os fios se deslocassem ortogonalmente ao plano focal dos espelhos não havia qualquer perturbação, mas se a passasse com os fios na direção do plano focal, cancelava o sinal (faíscas) no espelho refletor.

Nesta altura Hertz procurou fazer experiências que já tinham sido realizadas na ótica, tentando verificar se existia uma relação entre as forças eletromagnéticas e a luz. Voltou a colocar os dois espelhos com planos focais ortogonais, de modo a não ter faíscas no espelho recetor. Voltou a passar o quadro octogonal pelo trajeto do feixe emitido e voltou a não ter faíscas recebidas, quer o quadro passasse com os fios na vertical ou na horizontal. Todavia, quando passou o quadro com uma inclinação dos fios de  $45^\circ$  relativamente ao plano focal do emissor, Hertz viu as faíscas a aparecerem novamente no recetor. De forma evidente, o quadro conseguiu separar as componentes da força eletromagnética incidente no seu plano e deixou passar apenas as que tinham uma componente ortogonal aos fios. Com a estrutura ortogonal Hertz acabava de construir o primeiro polarizador eletromagnético.

## **A reflexão da onda eletromagnética**

Com o feixe de radiação eletromagnética produzida pelo seu espelho cilíndrico de secção parabólica, Hertz fez um conjunto notável de experiências que mostraram que a reflexão por uma superfície metálica mantinha o carácter da polarização recebida, e que, adicionalmente, a reflexão não era difusa, gerando um novo feixe emitido pela superfície segundo um ângulo que era igual ao ângulo de incidência na superfície.

Hertz fez comunicações de uma sala para outra sem estarem em linha de vista, usando placas metálicas refletoras colocadas de forma geometricamente apropriada. Usando o polarizador eletromagnético que apenas deixava passar ondas elétricas ortogonais aos fios, Hertz verificou que as ondas que não passavam eram refletidas, funcionando o polarizador como espelho para essas ondas. Todas estas observações já eram conhecidas da ótica. Embora não o pudesse



provar, Hertz acreditava que a luz também era uma onda eletromagnética, muito embora Faraday já tivesse demonstrado que havia uma relação entre magnetismo e luz.

## A refração da onda eletromagnética

Hertz, construiu prismas gigantes de cera para ver se estes também refrata-  
vam as ondas tal como o prisma de vidro fazia com a luz. Todas as experiências confirmaram as previsões. Hertz conseguiu, assim, provar experimentalmente que o comportamento das ondas eletromagnéticas era análogo ao da luz.

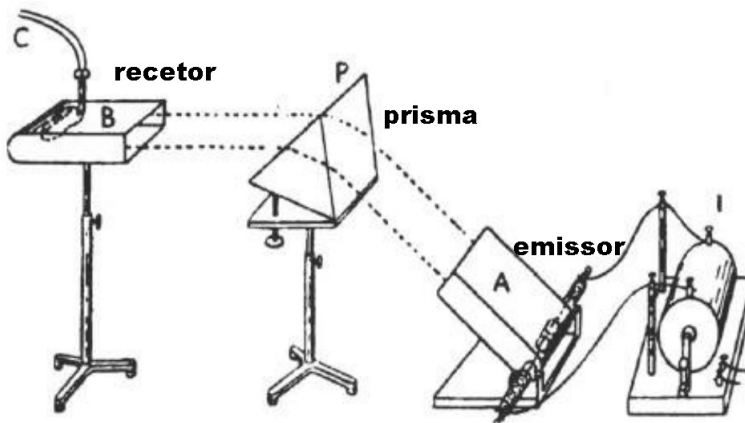


Figura 4: Experiência de refração de ondas eletromagnéticas através de um prisma de cera.

Hertz construiu um prisma de material dielétrico (asfalto duro) com 1,5 m de comprimento, e base triangular com 1,2 m de lado (Figura 4). O asfalto foi fundido e depositado numa forma de madeira. Usando os seus espelhos parabólicos como emissor e como recetor, Hertz conseguiu confirmar que o prisma construído por material dielétrico mudava a trajetória da onda incidente, segundo ângulos que dependiam da frequência incidente. Com estas experiências, Hertz tinha poucas razões para duvidar de que a estrutura da luz também fosse uma radiação eletromagnética, embora nunca o tenha afirmado perentoriamente.

## O impacto das ondas eletromagnéticas na sociedade

Relativamente às ondas eletromagnéticas, Hertz descreveu, muitas vezes, aos seus alunos e também a outros cientistas, as propriedades muito interessantes das ondas eletromagnéticas cuja existência tinha comprovado, bem como os dispositivos que tinha inventado para as processar. Muito frequentemente os seus interlocutores perguntavam: “para que serve isto tudo?”. Ao que Hertz invariavelmente respondia: “*I do not think that the radio waves that I have discovered will have any practical application*”. Curiosamente, aqui está uma situação em que Hertz estava completamente errado.

Com os trabalhos subsequentes de vários cientistas como Oliver Lodge, Tesla, Marconi, Lee de Forest, Fessenden, Armstrong e outros, surgiu a Rádio, que foi a principal tecnologia desenvolvida no princípio do século 20. Logo depois seguida pela Televisão e por todos os meios de comunicação baseados em ondas eletromagnéticas, incluindo, obviamente, a luz.

## O reconhecimento dos trabalhos de Maxwell e Hertz

A teoria de Maxwell não foi inicialmente valorizada por muitos cientistas, dado que envolvia uma conceção e conhecimentos matemáticos muito avançados, que tornavam difícil a assimilação e pouco prática a resolução do sistema de 20 equações inicialmente proposto por este brilhante matemático. Maxwell também não fez qualquer tentativa de demonstrar experimentalmente a validade das hipóteses apresentadas. Em 1884, cerca de 20 anos depois da teoria de Maxwell, o engenheiro e matemático Oliver Heaviside (Belmont 1996) conseguiu formalizar a teoria de Maxwell em apenas quatro equações, as que melhor conhecemos atualmente, expressas em termos de grandezas mais perceptíveis e mensuráveis pelos físicos e engenheiros.

Só depois dos trabalhos de Hertz, os cientistas começaram a relevar o trabalho de Maxwell. Muitas experiências foram feitas para replicar os trabalhos de Hertz e algumas falharam. O engenheiro de Marconi, A. Fleming<sup>30</sup>, repetiu estas experiências descritas por Hertz e obteve as mesmas conclusões: as ondas eletromagnéticas comportam-se como a luz.

---

30. Ambrose **Fleming** (1849-1945), inventor do díodo de vácuo e o responsável da primeira comunicação transatlântica por rádio.

Algumas das medidas experimentais de Hertz foram contestadas ou corrigidas por outros cientistas. A discussão entre Hertz e Henri Poincaré<sup>31</sup>, através de doze famosas cartas trocadas entre eles (Belmont 1996), permitiram esclarecer alguns erros experimentais de Hertz. Poincaré é o autor do princípio da invariância das leis da Física em diferentes espaços de transformações e foi o primeiro a apresentar as Transformações de Lorentz e a reconhecer a Invariância das leis de Maxwell.

O trabalho fundamental de Hertz foi essencialmente de natureza experimental. Mas Hertz tinha um conhecimento teórico muito profundo sobre o eletromagnetismo. Nos seus últimos dois trabalhos, desenvolveu a teoria dos fenômenos eletromagnéticos para corpos parados e para corpos em movimento, usando conceitos da Teoria de Maxwell, sujeito a algumas hipóteses simplificativas. Mas este assunto só viria a ser completamente resolvido, mais tarde, por Einstein.

Hertz morreu no dia 1 de janeiro de 1894 sem poder apreciar o enorme impacto que os seus trabalhos tiveram no desenvolvimento das radiocomunicações, que nessa altura estavam a dar os primeiros passos, e sem ver a enorme aceitação das suas experiências, muitas delas feitas com algum secretismo, e que foram publicadas no livro “Electric Waves” (Hertz 1893).

## Notas Finais

Nesta biografia refere-se uma bibliografia mínima que permite perceber o caminho seguido por Hertz e os trabalhos que mais o influenciaram. A sua principal obra é o livro “*Electric Waves*” que consiste na reprodução de alguns artigos que publicou mas onde Hertz enquadra o leitor sobre o seu pensamento e como foi sedimentando e sequenciando as experiências que ia fazendo. Neste livro, Hertz descreve detalhes de construção dos dispositivos que inventou e que permitiram a outros investigadores repetir as experiências que fez. O trabalho original foi escrito em alemão, com o título “*Untersuchungen uber die Ausbreitung der Elektrischen Kraft*” (Investigações sobre a Propagação da Força Elétrica) e foi publicado em 1892. A tradução para inglês foi feita em 1893 por D.

---

31. Henri Poincaré (1854 -1913), excelente matemático e físico francês. Autor de cerca de 30 livros em diversas áreas. Em 1906 foi nomeado presidente da Academia das Ciências francesa.

E. Jones e incluiu um prefácio da autoria de Lord Kelvin que sugeriu a mudança de título para “*Electric Waves*”. Este livro foi exatamente reproduzido em 1962 pela editora Dover Publications Inc..

No Museu Faraday do IST pode encontrar algumas demonstrações sobre as ondas de rádio realizadas com dispositivos que são réplicas dos que foram propostos por Hertz.

Todas as páginas web referidas foram consultadas em maio de 2022.

## **Bibliografia**

- BELMONT, E. 1996. “La correspondance Poincaré – Hertz.” *Philosophia Scientiae* Tome 1 (1): 21-62.
- HEAVISIDE, O. 1893. *Electromagnetic Theory-Volume i*. London, UK: The Electrician Printing; Publishing Co.Ld.
- HERTZ, Heinrich. 1893. *Electric Waves*. London, UK: MacMillan; Company.
- HUNT, B. J. 2005. *The Maxwellians*. Ithaca, NY, USA: Cornell University Press.
- LODGE, Oliver. 2012. *Lightning Conductors and Lighting Guards*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- RAUTIO, J. C. 2010. “Twenty Three Years: The Acceptance of Maxwell’s Theory.” *ACES Journal* 25 (12): 998-1006.