

O dínamo de Zobel Gramme

O Dínamo elétrico é um conversor de energia que transforma energia mecânica de rotação numa tensão contínua e, por isso, é considerado um gerador elétrico. Depois da pilha de Volta, o dínamo foi a primeira fonte de energia de tensão contínua com capacidade de gerar potências elétricas elevadas. O motor elétrico de corrente contínua faz a função inversa do dínamo, isto é: transforma energia elétrica contínua em energia mecânica de rotação.

Um pouco da história do motor e do dínamo

Deve-se ao inglês Michael Faraday (1791-1867) a criação de ambos os dispositivos elétricos designados por motor e gerador: [motor em 1822](#) e dínamo em 1831.

Em 1822, o francês François Arago (1786-1853) publicou alguns resultados experimentais relativos à interação entre uma agulha magnética e um disco metálico. Faraday teve conhecimento destes resultados e estudou-os meticulosamente o que lhe permitiu chegar, em 1831, ao primeiro dínamo - o [disco de Faraday](#). O disco de metal é forçado a rodar dentro do campo magnético produzido por um magneto permanente. Faraday conseguiu extrair uma pequena tensão, desenvolvida entre o centro do disco e a sua periferia, através de dois contactos deslizantes (escovas), Fig.1. O dínamo de Faraday não teve muita aplicação prática¹ mas, em 1955, serviu de modelo para vários cientistas estudarem as perturbações do campo magnético da Terra.



Fig. 1 – [Disco de Faraday](#).

Através da rotação de uma espira condutora dentro de um campo magnético constante, produzido, por exemplo, por um magneto permanente, através da lei de Faraday da indução eletromagnética, pode obter-se uma força eletromotriz induzida cuja amplitude varia de forma sinusoidal no tempo, tendo um valor máximo quando o plano da espira é perpendicular à direção do campo magnético e terá o valor mínimo quando tem a mesma direção, Fig. 3.

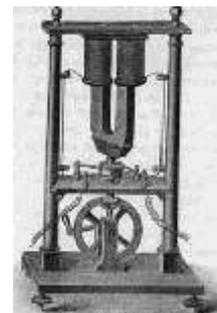


Fig. 2 – Alternador de Pixii.

Em 1832, o francês Hippolyte Pixii (1808-1835) apresentou o primeiro gerador de tensão alternada – o alternador. Este alternador consistia numa estrutura mecânica muito simples que fazia rodar um magneto permanente em frente de um solenoide², Fig.2. O resultado obtido foi uma tensão alternada sinusoidal que, nos anos 30 do século 19, não tinha grande aplicação prática³.

Nesta época, as grandes aplicações eram em galvanoplastia, área que tinha sido desenvolvida por Michael Faraday, mas que exigia muita corrente contínua, obtida a partir de pilhas de Volta. A investigação dirigia-se, pois, para a realização de geradores de tensão contínua. A força motriz também seria obtida por motores de tensão contínua.

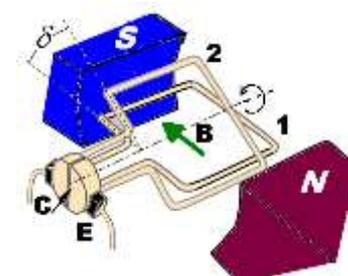


Fig. 3 – Espiras num campo magnético.
C - coletor; E - escova.

¹ - Produzia uma força eletromotriz muito pequena mas podia debitar uma corrente muito grande.

² - Em 1823, Ampère, introduziu o termo solenoide para designar uma bobina helicoidal.

³ - Ainda era cedo para a corrente alternada ser uma alternativa de energia elétrica.

A necessidade de conversão da tensão alternada gerada por enrolamentos de espiras que rodam em campos magnéticos constantes com velocidade angular ω , levou à descoberta da operação de retificação da tensão alternada⁴ que seria realizada pelo coletor de tensão e por escovas deslizantes sobre esse coletor, ver Fig. 3. Nesta figura a espira 1 não gera qualquer tensão mas a espira 2 gera uma tensão cuja amplitude seria $V_{\max} \cdot \sin(\delta)$.

A estrutura clássica de dínamos e de motores de tensão contínua está representada na Fig. 4.

Em 1834, o russo Moritz Jacobi (1801 -1874), nascido na Alemanha, apresenta o primeiro motor acionado por uma bateria de células voltaicas. Em 1835, o ferreiro e inventor Thomas Davenport (1802-1851) desenvolve um motor mas não consegue patentear-lo⁵.

Em 1837, o escocês Robert Davidson (1804-1894) projetou motores elétricos para acionar prensas em diversas fábricas e até construiu um motor elétrico para acionar uma locomotiva. Ainda em 1837, nos Estados Unidos da América (EUA), Davenport conseguiu operar uma máquina de impressão à custa de um motor elétrico desenvolvido por si.

Em França, o mecânico Paul Froment, na mesma época, produzia motores elétricos para acionar máquinas industriais, Fig. 5.

Os motores feitos por esses inventores eram alimentados por simples baterias e eram muito pouco eficientes. Para estes motores trabalharem em aplicações industriais faltava um conversor eficiente de energia mecânica⁶ em tensão contínua - o dínamo.

Em 1860, o físico italiano Antonio Pacinotti (1841-1912), Fig. 6, que foi professor de Física na Universidade de Bolonha, com apenas 23 anos, e que viria também a ser o professor responsável pela Física na Universidade de Pisa, apresentou um novo tipo de dínamo em que o enrolamento do induzido⁷ era bobinado sobre um anel (toroide de ferro) com 16 enrolamentos separados mas em que todos estavam ligados em série (formando um conjunto sem fim). Dois enrolamentos vizinhos eram ligados a uma tomada externa; o induzido dispunha de 16 tomadas que estavam ligadas a um anel de comutação cilíndrico com 16 superfícies de contato verticais isoladas. Este comutador era acedido através de duas lâminas condutoras, designadas por escovas, paralelas à direção do campo magnético gerado por dois eletroimanes ligados as terminais de saída do dínamo, Fig. 7.

A grande vantagem desta estrutura do induzido, com um enrolamento feito sobre um anel de ferro, é a de que reparte o campo magnético proveniente das peças polares dos eletroimanes (indutores) em duas parcelas, em que cada uma caminha por uma das metades do toro magnético. Como consequência, o campo magnético que atravessa cada enrolamento é essencialmente constante e é ortogonal ao plano dos enrolamentos (condição que é necessária para gerar a máxima força eletromotriz induzida).

⁴ - Conversão de tensão alternada sinusoidal $V_{\max} \sin(\omega t)$ numa tensão $|V_{\max} \sin(\omega t)|$ que tem valor médio constante (tensão contínua).

⁵ - Nos EUA nunca tinha sido registada uma patente de um aparelho elétrico o que causou a recusa do serviço de registo de patentes.

⁶ - Energia que até poderia ser obtida de uma máquina a vapor.

⁷ - O magneto permanente é o indutor e o induzido é o enrolamento móvel, onde vai ser induzida uma força eletromotriz.

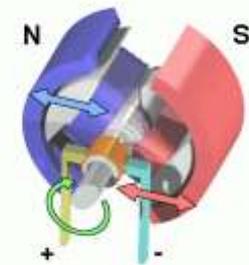


Fig. 4 – Estrutura de dínamos e de motores de corrente contínua.



Fig. 5 – Motor de Paul Froment



Fig. 6 – Antonio Pacinotti.

Pela lei de Faraday e como os enrolamentos são submetidos sempre a um campo magnético constante cada um gera a mesma força eletromotriz. Esta estrutura constitui uma inovação fundamental, relativamente ao que era clássico, em que os enrolamentos, na rotação do rotor, eram submetidos a campos magnéticos constantes mas os enrolamentos não recebiam este campo de forma perpendicular, pelo que a força eletromotriz gerada dependia do ângulo que o plano do enrolamento faz com o campo magnético.

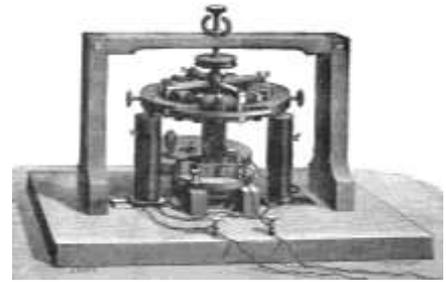


Fig. 7 – Dínamo de Pacinotti.
Apresentado na Exposição de Paris de 1867.

O resultado obtido com esta inovação do induzido em anel foi que o dínamo passou a produzir uma tensão contínua quase perfeita (com poucas variações temporais, quando era rodado a velocidade constante).

O efeito gerador/ motor.

Pacinotti, ao tentar carregar uma bateria de chumbo com o seu dínamo, verificou que, quando parava o movimento da manivela esta rodava em sentido contrário, sem a sua intervenção; concluiu, assim, que o seu dínamo também funcionava como motor elétrico de corrente contínua. Esta reversibilidade de funcionamento, ou seja o funcionamento como motor / gerador é uma propriedade extremamente importante que permite fazer a recuperação de energia nos modernos sistemas de mobilidade elétrica.

O inventor belga Zenobe Gramme (1826 – 1901), Fig. 8, que não tinha qualquer formação científica, mas tinha uma grande facilidade de execução de trabalhos manuais, especialmente na área da marcenaria, interessou-se pelos aparelhos elétricos. Gramme trabalhou no domínio da marcenaria em Bruxelas, Marselha e em Paris. Em Paris empregou-se como modelista na Alliance, uma empresa de eletricidade. Nesta empresa Gramme acabou por fazer vários desenvolvimentos que patenteou. Entre estes desenvolvimentos de Gramme consta uma melhoria no processo de fabricação de lâmpadas de arco voltaico.



Fig. 8 – Zenobe Gramme.

Gramme também trabalhou para Heinrich Ruhmkorff, o maior especialista em bobinas de indução, dispositivos que conseguiam produzir tensões extremamente elevadas. Ruhmkorff já tinha uma relação de trabalho com a família Breguet que produzia os famosos relógios Breguet.

Em 1867, Gramme apresentou uma nova patente que incluía melhorias na máquina de corrente contínua baseada no trabalho do físico italiano Antonio Pacinotti e, em 1868, Gramme construiu o primeiro dínamo Gramme. Depois de muitos refinamentos e dos atrasos temporais causados pela Guerra Franco-Prussiana (1870-1871), a máquina de Gramme foi finalmente apresentada em 1871 ao físico Jules Jamin na Academia de Ciências de Paris. Gramme patenteou a ideia nos EUA, [patente n. 120057](#), em 17 de outubro de 1871.

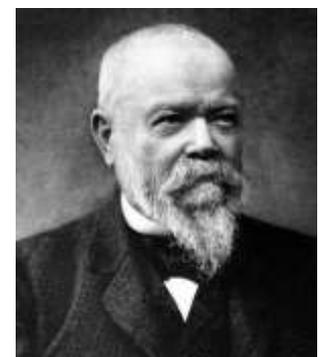


Fig. 9 – Hippolyte Fontaine.

Gramme, depois de patentear a sua máquina, estabeleceu uma parceria com o engenheiro electricista Hippolyte Fontaine (1833-1910), Fig. 9, que também fez desenvolvimentos notáveis em dínamos e motores elétricos. Formaram a empresa “*Gramme Magnetolectric Machine Company*”. A máquina de Gramme constituiu um enorme avanço, pois conseguia produzir tensão contínua quase perfeita, com elevada potência, o que abriu a possibilidade prática do uso de motores elétricos em diversas aplicações industriais.



Fig. 10 – Protótipo do Dínamo de Gramme.

A fama de Gramme atingiu uma enorme dimensão e visibilidade internacionais, depois da apresentação do seu dínamo/motor na Exposição Universal de Viena em 1873, Fig. 10. O seu associado Hippolyte Fontaine fez, pela primeira vez, uma demonstração de transmissão de energia elétrica à distância (de 2 km)⁸ entre dois dínamos Gramme e mostrou que um podia ser gerador e o outro, a 2 km, ser usado como motor (e vice-versa).

Em 1876, na exposição centenária de Filadélfia, EUA, Gramme voltou a fazer a demonstração das potencialidades do seu novo gerador e este rapidamente atingiu um grande sucesso.

O dínamo de manivela de Zenobe Gramme é considerado um marco extremamente importante no desenvolvimento não só dos geradores de corrente contínua mas também dos motores de corrente contínua.

Ainda em 1875, um jovem talento chamado Nikola Tesla assistiu a uma palestra que incluía uma demonstração da “Gramme Machine” na “Graz University of Technology”. A mente brilhante de Tesla começou logo a imaginar como seria possível construir um motor que funcionasse sem o coletor e as escovas deslizantes, como o dínamo de Gramme usava, e que pudesse trabalhar com corrente alternada. Em 1884 Tesla emigrou para os EUA e em 1887 conseguiu construir e demonstrar esse motor.

Por seus trabalhos, Gramme foi presenteado com a Legion d'Honneur em 1877, assim como o seu parceiro Hippolyte Fontaine em 1881. O primeiro também recebeu o prémio Volta em 1888.

Dínamos Gramme / Breguet

Em 1875, a empresa Gramme fechou um acordo de fabricação com Antoine Breguet, bisneto de Abraham Breguet⁹, para a produção dos dínamos Gramme. O nome Breguet estava associado à relojoaria de alta tecnologia e à fabricação dos relógios e jóias dotados da mais elevada sofisticação. Para Gramme, Breguet parecia ser o parceiro certo, pois permitia associar a tecnologia mais avançada de geração de energia elétrica contínua com o nome da mais prestigiada indústria de relojoaria.

[Pode ver aqui informação sobre o maior relojoeiro de todos os tempos, bem como a história do relógio mais famoso do mundo.](#)

Mas esta associação durou somente entre os anos 1875-1885 devido à morte prematura de Antoine Breguet, que não deixou descendentes seguidores desta atividade. Foram produzidos poucos dínamos Gramme/Breguet e, por isso, são muito raros. Hoje em dia, estes dínamos atingem preços

⁸ - Considera-se que esta foi a primeira rede elétrica à distância.

⁹ - Que é considerado o maior relojoeiro de todos os tempos.

de algumas dezenas de milhares de euros em leilões internacionais. Felizmente temos uma unidade no Museu Faraday do IST – O dínamo Gramme / Breguet n. 100, Fig. 11.

O Dínamo Gramme/Breguet do Museu Faraday

Este dínamo foi realizado pela empresa Breguet entre 1882 e 1885. Em 1885 esta atividade da empresa Breguet fechou devido à morte súbita de Antoine Breguet, vítima de um ataque de coração¹⁰. Os herdeiros de Antoine Breguet, 2 filhos, tinham menos de 4 anos e esta atividade da empresa não teve continuidade, mas a atividade de relojoaria continuou.



Fig. 11 – Dínamo Gramme/Breguet n. 100.
Museu Faraday, objeto col. Nº 175.

Os dínamos de demonstração de Gramme eram movidos a manivela para que as pessoas pudessem experimentá-los. Gramme criou o magneto permanente a partir de lâminas de aço magnetizadas à parte e que depois eram agregadas através de abraçadeiras metálicas de modo a constituir um magneto mais potente. Neste Gramme / Breguet n. 100, o magneto permanente é constituído por 30

¹⁰ - Resultante de excesso de trabalho devido à pressão de ampliação rápida das suas instalações fabris, segundo os médicos.

lâminas magnetizadas, mas cerca de 140 anos depois da sua fabricação, quando o restaurámos, o magneto permanente produzia um campo magnético fraco pelo que tivemos de o reforçar com dois grandes imanes de neodímio e uma barra de ferro, que constituem um circuito magnético, R_m , que reforça o campo magnético remanescente original, Fig. 11. As escovas são constituídas por um conjunto de fios de cobre rígido, que facilitam o contacto com as lâminas do coletor, Fig.12.



Fig. 12 – Coletor e escovas do dínamo Gramme / Breguet n. 100.

Nos ensaios experimentais realizados verificámos as vantagens do dínamo Gramme, nomeadamente o facto de que cada enrolamento produz uma tensão essencialmente constante, apenas se verificando alguns regimes transitórios na transição do contacto das escovas de uma lâmina do coletor para a seguinte. Estes regimes transitórios seriam atenuados se o dínamo estivesse em carga a gerar uma potência elétrica razoável, ver Fig.13.

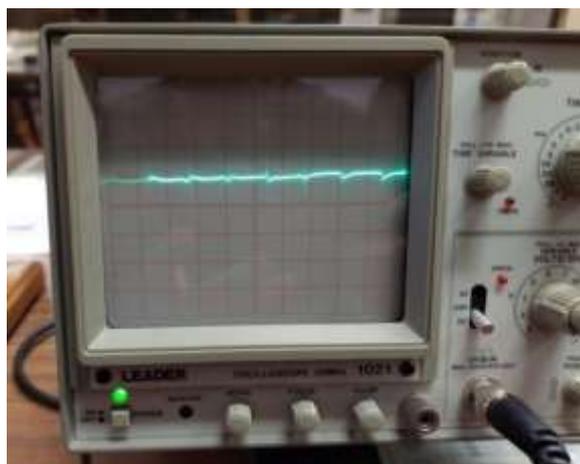


Fig. 13 – Tensão contínua (quase) de 5V gerada pelo dínamo Gramme / Breguet n. 100.

Pode ver, a seguir, o dínamo a funcionar convertendo a energia mecânica, do nosso voluntário Eng^o Rui Louro, em energia elétrica para alimentar uma lâmpada de automóvel de 12 V.

https://museufaraday.ist.utl.pt/Experiences/DinamoGramme_work.mp4