O contador de energia Aron

Quando em 2015 começámos com a ideia de criar o Museu Faraday do IST, a equipa de voluntários começou a procurar equipamentos elétricos antigos que merecessem tratamento museológico. Em diversos locais tivemos surpresas com os vários equipamentos achados. Uma das surpresas aconteceu no Laboratório de Eletrotecnia onde encontrámos um armário fechado, há muito tempo, com mais de duas dezenas de contadores de energia, muito antigos e, principalmente, muito surpreendentes em termos dos princípios de funcionamento e da qualidade de construção usada no seu fabrico.

A equipa do Museu selecionou alguns desses contadores para fazer um painel de exposição onde pudessem ser apreciados a funcionar. Restaurámos alguns destes contadores de modo a salientar o seu princípio de funcionamento, mas também a beleza dos seus mecanismos e das caixas que os envolviam, Fig. 2.



Fig. 1 – Museu Faraday, pesquisa sobre contadores de energia antigos; seleção e preparação de contadores.

Um dos contadores que mais atraiu a nossa atenção foi o contador de corrente contínua Aron, Fig.3, pois era completamente diferente de todos os outros.

Pesquisando na internet informação sobre o contador de Aron, a equipa verificou que tinha sido inventado, em 1882, pelo cientista alemão Hermann Aron (1845 - 1913), que resolveu seguir uma carreira empresarial baseada na sua nova invenção.

Hermann Aron nasceu e cresceu na Alemanha no seio de uma modesta família judaica. Este facto jogou muitas vezes contra Aron não só como empresário, mas também na sua evolução como professor e cientista de Física.

Em outubro de 1867, com 22 anos, Aron completa os seus estudos secundários e inscreve-se na Universidade de Berlim em medicina, onde permaneceu um ano. Depois, mudou-se para a faculdade de filosofia onde estudou física, matemática e química. Em 1870, estudou em Heidelberg, onde frequentou os célebres seminários do professor Gustave Kirchhoff (1824-1887) sobre matemática-física. Aron estudou também com o matemático Leo Königsberger (1837-1921), que foi o autor da Biografia detalhada (em 3 volumes) de Hermann von Helmholtz (1837-1921).

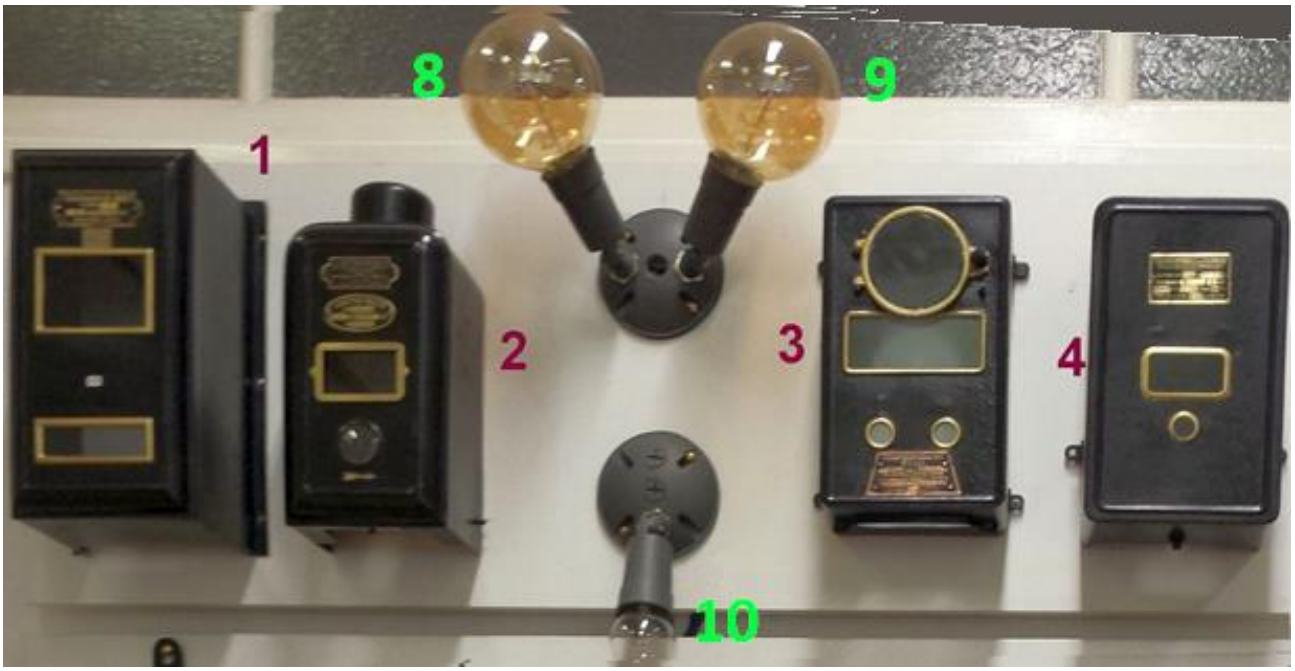




Fig. 2- Museu Faraday - O painel de contadores de energia.

1- Aron , DC 220 V 20 A; 2- Contador; 3- Contador; 4 - Contador
5- Contador; 6- Contador 7- Contador; 8, 9 e 10- Lâmpadas de carga.

Em 1873, sob orientação de Kirchhoff, Aron apresentou a dissertação baseada no estudo matemático da teoria da elasticidade, que tinha sido proposta por Kirchhoff em 1858-59. Aron foi contratado como professor assistente no laboratório de física da Universidade.

Aron teve contribuições muito importantes nas baterias de armazenamento de energia e patenteou várias invenções, entre as quais, um novo tipo de contador de energia elétrica, mais preciso que os existentes[1].

Em 1888, Aron foi nomeado como professor titular.



Fig. 3- Contador de energia Aron.

As invenções de Hermann Aron

Aron, ainda muito jovem, fez melhoramentos, que patenteou, em várias baterias conhecidas, nomeadamente na bateria de chumbo de Planté (1834 - 1889), visando incrementar a capacidade de armazenamento de energia da bateria e a sua longevidade. Pensa-se que foi aqui que Aron, por necessidade, se motivou para criar um novo tipo de medidor de energia e também um novo tipo de relógio elétrico, duas das suas principais invenções.

Em 1873, Aron inventou o seu contador de energia, que era o mais preciso na época.

Em 1882, Aron usou o contador químico de energia sugerido por Edison e verificou que era pouco prático[2] e era pouco preciso, nomeadamente para baixos consumos de energia.

Em 1885, Aron funda a empresa Aronwerke para explorar o negócio dos contadores elétricos.

A veia empresarial de Aron

Em 1888, o contador de Aron foi introduzido na Inglaterra por Hugo Hirst (1863-1943), fundador da General Electric Company.

Em 1890, Hermann Aron fundou a empresa Aron em Paris.

Aron reduziu o seu tempo de lecionação na universidade para apenas uma hora por semana, em modo pro-bono, para se dedicar às suas empresas.

Em 1891, Aron patenteia um novo medidor de energia trifásico, baseado em apenas duas medidas de potência.

Em 1893, Aron criou uma fábrica em Londres.

Em 1895, Aron deixou a lecionação na Universidade, mas continuou a lecionar Física, até 1910, na Escola de Artilharia e Engenharia Militar.

Em 1897, Aron criou uma fábrica na Áustria e abriu outra na Alemanha, em Scheweidnitz na Silésia.

Em 1912, o filho de Hermann Aron, Manfred Aron (1884 – 1967), tomou conta das empresas do pai sobre medidores de energia.

[1] https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/Preprints/P370.PDF.

[2] - Neste Contador, baseado nas Leis de Faraday da galvanoplastia, era necessário pesar dois elétrodos de uma célula eletroquímica para estimar o valor da energia consumida.

Em 1913, Hermann Aron faleceu.

Em 1926, Manfred Aron abriu o negócio às tecnologias de rádio, que estavam em rápido crescimento, produzindo produtos com a marca Nora (Aron lido ao contrário). A marca Nora atingiu um prestígio considerável na indústria da Rádio, chegando a ser a quarta maior empresa alemã na área.

As empresas Aron, em 1926, tinham cerca de 1000 funcionários.

Em 1933, depois da subida de Hitler ao poder, a vida para as empresas de origem judaica ficou muito complicada. A família de Nora fugiu para os EUA. A empresa Haronwerke mudou o nome para Heliowat

Em 1935, a empresa Siemens-Schuckert comprou a empresa de Aron dedicada aos medidores de energia

Depois da 2ª guerra mundial, a marca Nora reapareceu na indústria da Rádio, onde se manteve até 1996, com antigos funcionários.

No século 19, Aron é considerado um caso raro de sucesso de cientistas que fizeram ciência na universidade e passaram desta para a indústria, fundando a sua própria empresa em 1883.

Aron patenteou o seu medidor de energia em junho de 1884 e, em dezembro do mesmo ano, patenteou um novo tipo de relógio elétrico. Estas duas invenções viriam a ser a base para o desenvolvimento de contadores de energia mais precisos.

No outono de 1885, em Berlim, num concurso para a compra de contadores de energia, destinados à iluminação de um bairro com lâmpadas de filamento alimentadas a corrente contínua. A proposta apresentada por Aron foi a escolhida. Aron apresentou o novo de tipo de medidor de energia, mais preciso, vencendo uma proposta feita por Thomas Edison (1847 - 1931). Aron vendeu, assim, as primeiras 100 unidades do seu medidor de energia aos serviços de distribuição de eletricidade de Berlim, a primeira rede pública europeia de distribuição de energia.

A energia elétrica consumida

No final do século XIX, a energia elétrica mais comumente usada era a proporcionada por geradores de corrente contínua, nomeadamente pelos dínamos, que tinham sido anteriormente desenvolvidos, mas tinham sido melhorados pelas invenções do dínamo de Gramme, pelo belga Zénobe Gramme (1826 – 1901). Pode ver no Museu Faraday do IST, o exemplar nº 100 da série de dínamos de demonstração fabricados pela famosa relojoaria Breguet.

Depois da invenção do motor de indução por Nikola Tesla, começaram a aparecer as redes de distribuição de energia em corrente alternada. De qualquer modo, a energia elétrica para ser vendida tem de ser “contada / medida” de forma precisa.

A energia elétrica retirada da rede elétrica por um utilizador durante um certo tempo $t = t_2 - t_1$ é função da tensão de alimentação U e da intensidade I da corrente consumida.

$$W = \int_{t1}^{t2} U\, I\, dt.$$

Como a tensão U das redes era mantida constante (110 V ou 220 V, por exemplo), a energia consumida é dada por

$$W = U \int_{t1}^{t2} I\, dt = UQ.$$

Em que Q é a carga elétrica transportada no intervalo de tempo t.

A maior parte dos contadores de energia é baseada na medida do tempo, da carga Q ou da potência elétrica.

A evolução dos contadores de energia

Com a invenção, em 1861, de um dínamo prático, por Anyos Jedlik (1800 - 1895), e em 1867 por Werner von Siemens e que posteriormente foi melhorado por Gramme em 1882, a energia elétrica pôde começar a ser gerada em grandes quantidades. A primeira aplicação industrial foi na galvanoplastia, mas a iluminação elétrica viria a ser mais importante.

Em 1872, nos EUA, Samuel Gardiner desenvolveu um medidor de horas de utilização de lâmpadas elétricas chamado de "*Lamphour Meter*", mas que apenas media o tempo (*US Patent #132569*). As lâmpadas existentes tinham uma resistência de filamento muito baixa e tinham de ser ligadas em série, pelo que um único contador podia medir o consumo total de uma instalação. Com as inovações de Swam e Edison na lâmpada elétrica, produzindo filamentos de elevada resistência elétrica, as lâmpadas passaram a ser usadas em paralelo e este contador deixou de fazer sentido.

Em 1881, William Ayrton (1847-1908) e o John Perry (1850-1920), assistente de Lord Kelvin (1824 - 1907), que foram os autores do primeiro carro/triciclo elétrico em 1880, idealizaram um medidor de energia baseado num pêndulo mecânico, mas desconhece-se se foi realizado. Ayrton trocou muita correspondência com Elihu Thomson sobre medidores elétricos.

Em 1882, nos EUA, quando Edison começou a querer vender energia de corrente contínua, gerada por dínamos localizados na sua estação de Pearl Street em Nova Iorque, Edison não dispunha de contadores de energia para medir a eletricidade que os seus clientes consumiam tendo forneceu aos utilizadores energia gratuitamente durante cerca de um ano. Edison desenvolveu métodos de realimentação que mantinham a tensão da rede contínua constante em 110 V[3]. Bastaria, portanto, medir a carga Q consumida pelo utilizador para poder calcular a energia consumida.



Fig. 4 – Contador Químico, Museu Faraday.

Dotado de uma notável mente criativa, Edison começou em 1880 a procurar a solução para medir a carga Q, usando as conhecidas leis da galvanoplastia que tinham sido estabelecidas por Faraday (1791 – 1867). De acordo com estas leis, numa célula eletroquímica com elétrodos metálicos, excitada com corrente contínua, existe uma transferência de material de um elétrodo para o outro, sendo a massa transferida proporcional à carga elétrica que atravessa a célula. Edison patenteou várias alterações ao seu contador químico.

Através de uma pequena resistência em série com o circuito do utilizador, Edison retirava uma pequena queda de tensão contínua que alimentava a célula eletroquímica. Em seguida, pesava os dois elétrodos da célula eletroquímica num dado instante de verificação da instalação e, passado algum, tempo, voltava a pesar os dois elétrodos para poder determinar o valor da energia consumida. Edison usou elétrodos de cobre e como eletrólito usou uma solução de sulfato de cobre. No Museu Faraday do IST existe um contador químico que é uma réplica do contador de Edison[4]. O medidor de Edison não oferecia resultados fiáveis e os utilizadores reclamavam muito.

[3] Edison usou o chamado Efeito Edison como sensor de iluminação para controlar os dínamos.

[4] - Esta réplica do Contador químico de Edison, do Museu Faraday, abriu a exposição "Contadores de Histórias" organizada pelo Arq. Joaquim Moreno a pedido do MAAT e que esteve aberta no Museu da Eletricidade desde 24/4/2021 até 7/3/2022.

No princípio da década de 1880, nos EUA, Elihu Thomson (1853-1937) desenvolveu um medidor químico semelhante ao de Edison, mas que usava um eletrólito de sulfato de zinco, que permitia que o contador funcionasse melhor. Edison começou imediatamente a usar o medidor de Thomson[5].



Fig. 5 – Ferraris-1º motor de campo girante.

Em 1884, o alemão Hermann Aron (1845 - 1913) propôs um contador de energia baseado no pêndulo mecânico, desconhecendo as ideias anteriores de Ayrton e Perry.

Em 1884, o francês Lucian Gaulard (1850-1888) e o inglês John Dixon Gibbs (1834-1912) revisitaram o transformador de Faraday e inventaram o "gerador secundário", precursor do transformador moderno. Esta invenção abriu caminho para o uso generalizado da corrente alternada em detrimento da corrente contínua.

Em 1885, três húngaros, Károly Zipernowsky (1853 - 1942), Ottó Titusz Bláthy (1860 - 1939) e Miksa Déri (1854 - 1938) patentearam técnicas de realização de transformadores que os tornaram muito mais eficientes. Estas técnicas basearam-se no uso de núcleos de ferro fechados em anel (toróide) e no uso de chapas finas isoladas entre si para reduzir as correntes de Jean Foucault (1819 - 1868).

Em 1885, a Westinghouse comprou a patente de Gaulard e Gibson e William Stanley (1858-1916) aperfeiçoou o projeto. George Westinghouse (1846-1914) também comprou as patentes AC de Nikola Tesla (1856 - 1943. Abriu-se o caminho vitorioso da energia AC.

Em 1885, Galileo Ferraris (1847-1897), descobriu que dois campos magnéticos alternados desfasados criavam um campo magnético girante que podia fazer rodar um disco ou um cilindro condutor, Fig. 5, tendo proposto o medidor de energia por indução eletromagnética. O binário resistente ao binário motor é feito por um magneto permanente que atua sobre o disco / cilindro, Fig. 6.

Em 1888, Edward Weston (1850-1936) desenvolveu um medidor de energia do tipo galvanómetro de bobina móvel com ímã permanente que se tornou a base dos medidores de corrente, de tensão e de potência usados, quase até aos dias de hoje. Weston é também conhecido pelas primeiras aplicações industriais de dínamos, das suas pilhas padrão e dos medidores precisos de intensidade luminosa.

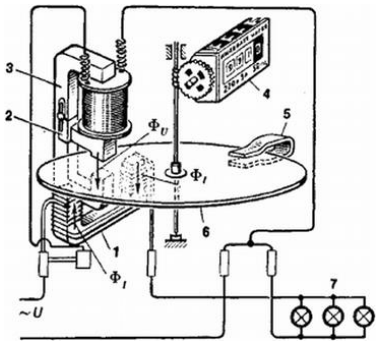


Fig. 6 - Ferraris, contador de indução.
1-Solenoide atuado or corrente
3- Solenoide atuado por tensão
4- Contador (integrador)
5- Travão de disco

Em 1888, Oliver Shallenberger (1860-1898), da Westinghouse, EUA, foi um dos grandes defensores do uso da corrente alternada, tendo desenvolvido um medidor de corrente alternada baseado no seu motor de indução (pat. US449003A). O binário resistente ao motor eletromagnético é feito por um ventilador de pás, Fig. 7. O contador indica numericamente o consumo de energia elétrica.

[5] - Edison e Ehliu acabaram por colaborar e formar a empresa General Electric.

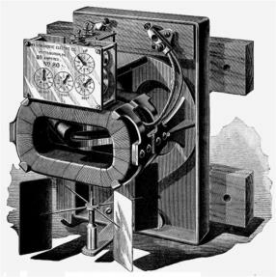


Fig 7. – Shallenberger, contador de indução.

Em 1888, Nikola Tesla também descobriu o campo magnético girante e, com ele, criou motores de indução de elevada potência.

Em 1889, Ottó Bláthy (1860-1939), (Hu), desenvolve o primeiro medidor quilowat-hora patenteado (Alemanha nº 52.793, EUA nº 423.210), Fig. 8.

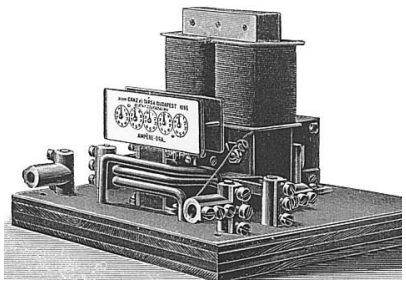


Fig. 8 - Ottó Bláthy, contador de indução.

Em 1889, Elihu Thomson (EUA/ GE) propôs um contador de corrente contínua, com motor calculador de força – rotor acionado por tensão e estator acionado por corrente.

Em 1890, começou a revolução da corrente alternada, AC, com vantagens claras sobre a corrente contínua. São utilizados os novos tipos de contador de energia de corrente alternada.

Em 1890, Elihu Thomson continuou a melhorar os medidores elétricos. Thomson trabalhou com energia AC desde a década de 1870 e acumulou uma grande experiência nesta área.

Em 1890, O *International Electrical Congress*, IEC, criou as normas para regular a medição de eletricidade e a contagem da energia.

Começa aqui a verdadeira corrida aos medidores de energia, ver e ver.

O medidor de energia de Aron

Edison já tinha patenteado o seu contador químico baseado nas leis da galvanoplastia de Faraday que permitia medir a carga elétrica transportada; Aron já o tinha experimentado, mas achou que era pouco prático e muito impreciso e, por isso, seguiu um princípio diferente e que se mostrou ser bastante mais promissor.

Aron baseou o seu medidor na medida de tempos. Usou o mais exato sistema de medida de tempo conhecido na época, o pêndulo associado a um relógio de precisão, Fig. 9.

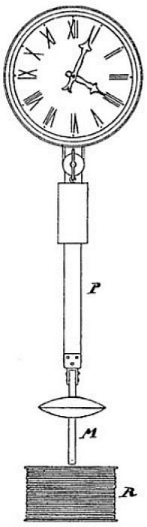


Fig. 9 - Modelo básico do contador Aron.

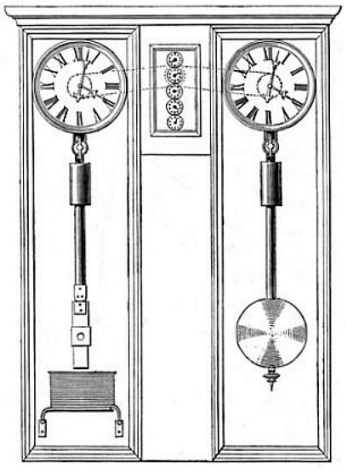


Fig. 10 - Modelo diferencial do contador Aron.

Por ação da força da gravidade, g, o período de oscilação de um dado pêndulo de pende do comprimento do braço, P, e da massa M pendurada no braço. Se o eletromagneto, R, for percorrido por uma corrente elétrica contínua, será gerado um campo magnético que atua sobre o núcleo magnético de R, e a criar uma força com a direção do centro da Terra, que será equivalente a reforçara ou diminuir a força da gravidade local, alterando o período de oscilação do pêndulo. Na Fig.9 pode ver-se um único pêndulo, mas podemos imaginar dois pêndulos mecanicamente iguais, que terão mesmo período de oscilação. Mas se um for retardado ou acelerado pela corrente na bobina R, haverá uma diferença de período de oscilação que é proporcional à corrente que passa na bobina R.

O medidor de pêndulo duplo foi patenteado em 1883 por Hermann Aron (1845-1913),Fig. 11, originando um dos primeiros medidores de eletricidade realmente

precisos e certamente o primeiro verdadeiro medidor de Watt-Hora. O princípio fundamental consiste em que o movimento de dois pêndulos iguais é retardado por correntes proporcionais à corrente consumida pelo utilizador pelas duas grandes bobinas condutoras de corrente: à medida que a corrente de alimentação aumenta, o período de oscilação aumenta proporcionalmente e isso é usado para calcular o número de unidades de eletricidade a ser cobrado.

Os dois pêndulos são usados em relógios; a diferença de movimento (modo diferencial para eliminar erros), e os relógios têm mecanismos de escape de Graham[6], (considerados muito precisos e eficientes) que contam o número de oscilações feitas pelo pêndulo.

Os primeiros medidores de Aron tinham motor de corda manual, para manterem o pêndulo em movimento, mas foram rapidamente substituídos por modelos alimentados diretamente pela rede elétrica, resultantes da sua outra invenção dos relógios elétricos.

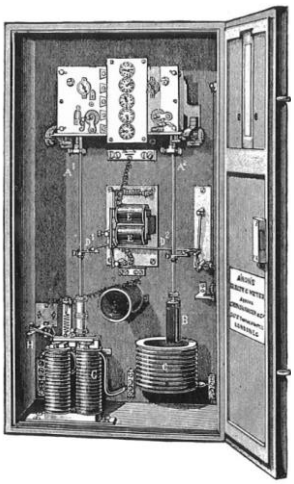


Fig. 11 – Desenho básico do contador Aron.

O medidor contém um solenoide com núcleo de ferro que periodicamente impulsiona os pêndulos e assim elimina a necessidade de fornecer energia aos relógios através do mecanismo de corda manual. Estes medidores de pêndulo tinham elevada precisão, mas foram produzidos durante poucos anos, pois acabaram por ser substituídos por contadores bastante mais baratos e simples, nomeadamente pelo medidor de "disco" ou "roda" que se tornou dominante quando a distribuição de energia elétrica por corrente alternada começou a ter preponderância face à distribuição por corrente contínua.

A teoria do medidor de Aron

O período de oscilação de um pêndulo depende da massa (força) aplicada no seu prumo P, O modelo prático de Aron está representado na Fig. 1.

O número $\mathbf{n_0}$ de oscilações do pêndulo observado num intervalo de tempo **t** é dado por

$$\frac{n_0}{t} = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{PL}{J}}.$$

Em que J é o momento de inércia da estrutura, P é o peso, produto da massa pela aceleração da gravidade, g, e L é a distância entre o eixo de rotação do pêndulo e o seu centro de massa.

O momento de inércia, J, admitindo que toda a massa estaria concentrada em M seria:

$$J = mL^2.$$

O pêndulo, ao oscilar, troca energia gravítica potencial com energia cinética, Fig. 12.

Numa primeira versão do contador, Aron dotou a extremidade do prumo do pêndulo de um material magnetizado (íman permanente) e estudou um modelo teórico em que uma corrente elétrica a passar num solenoide poderia criar um campo magnético e interagir com o íman, acrescentando uma nova força, que faria variar o período de oscilação do pêndulo.

[6] - **O mecanismo de escape é uma peça fundamental num relógio mecânico. É ele que permite contar apenas um impulso sem quase roubar energia ao relógio.**

Sempre que for percorrido por uma corrente I, o eletromagneto R, cria um campo magnético que interage com o magneto permanente M, aplicando uma força de travagem ou de aceleração no prumo P, alterando o período de oscilação do pêndulo, Fig. 9.

Aron previu que o atraso ou avanço do pêndulo deveria ser aproximadamente proporcional à carga elétrica que passou na bobina (integração da corrente no tempo).

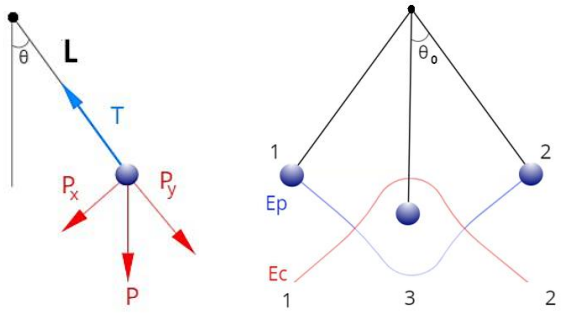


Fig. 12 - Forças sobre um pêndulo e energias: potencial e cinética.

Para determinar este atraso/avanço bastaria comparar os tempos com o de um relógio exatamente igual que não fosse alterado pela corrente I.

Quando é aplicada uma força magnética resultante da corrente I que interatua com o íman do pêndulo o novo número de oscilações n_1, medido no tempo t, será:

$$\frac{n_1}{t} = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{PL + \alpha H * I}{J}}$$

Em que H é o momento do íman do pêndulo e α é uma constante que depende da relação eletromagnética entre a bobina e o íman do pêndulo.

Num modelo mais avançado desenvolvido por Aron, os dois relógios foram combinados num mecanismo diferencial que proporciona a informação exata da carga elétrica que passou na bobina, Fig. 9.

Relacionando as duas equações pode concluir-se que a carga Q = I*t

$$n_1 = n_0\sqrt{1 + I/C}$$

Desenvolvendo em série de Taylor e aproveitando os primeiros termos

$$n_1 \cong n_0\left(1 + \frac{I}{2C} - \frac{I^2}{8C^2}\right)$$

Em que a constante C é:

$$C = \frac{PL}{\alpha H}$$

A carga elétrica Q que passa na bobina é, aproximadamente:

$$2C(n_1 - n_0) = Q\left(1 - \frac{I}{4C}\right);$$

O termo $\frac{I}{4C}$ em face de 1 é um termo de erro que pode ser minimizado através do dimensionamento de C.

Assim, a energia consumida pelo utilizador num dado intervalo de tempo t_2-t_1, é dada por:

$$W = \int_{t1}^{t2} P(t)dt = \int_{t1}^{t2} U * I * dt = V\int_{t1}^{t2} I(t)dt = U * Q \cong U * 2C(n_1 - n_0)$$

Como a tensão da rede é considerada constante, 110 V por exemplo, a energia consumida é proporcional à diferença (n_1-n_0) de impulsos registada pelo mecanismo de relojoaria dos dois relógios.

Devido à aproximação efetuada o erro do contador poderia atingir 2,5% o que tornaria o contador impraticável. Aron trabalhou intensamente em técnicas para corrigir este erro.

Depois de várias experiências tentando validar os modelos teóricos dos corretores de precisão que desenvolveu, Aron chegou à conclusão experimental de que se, em vez do íman permanente usasse um aço duro, o magnetismo induzido temporariamente pela bobina resolveria o problema de linearidade do contador. Assim aconteceu efetivamente: no laboratório Aron obteve a precisão de 0,2 % para o contador com relações de correntes máxima e corrente mínima de 1:24.

A venda dos primeiros contadores

No ano de 1885, abriu em Berlim a primeira central de distribuição de energia pública, três anos depois de redes privadas acontecerem em Londres e em Nova Iorque, onde Edison tinha fornecido contadores de energia.

Aron submeteu o seu medidor ao primeiro concurso para a compra de 100 contadores de energia para fornecer energia a um quarteirão de casas do município de Berlim. Edison foi o concorrente, com contadores mais baratos, mas que eram menos precisos. Aron ganhou o concurso e vendeu os primeiros 100 contadores de energia na Alemanha.

O contador de Aron era muito preciso, mas era muito complicado, delicado e caro. O seu custo andava por volta de dois salários mensais médios de um trabalhador na indústria alemã.

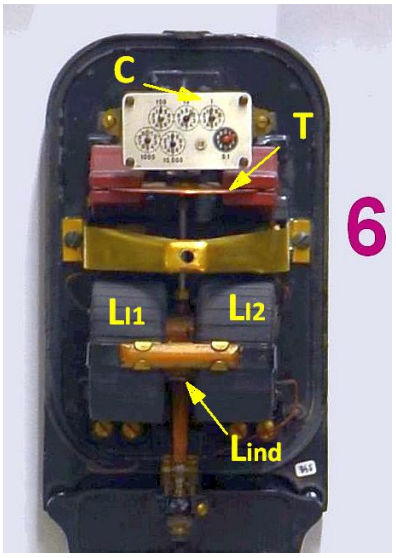


Fig. 13 – Contador de motor DC.

A primeiras versão do contador de Aron não tinham em conta as variações da tensão de alimentação, U, enquanto os contadores concorrentes que começaram a aparecer e que eram baseados em motores de corrente contínua, como o que se representa na Fig. 13 (contador nº 6 do painel da Fig. 2), davam uma informação que dependia do produto da tensão U pela corrente I, embora fossem menos precisos eram muito mais simples e baratos.

Nestes contadores baseados no motor de corrente contínua, a corrente consumida pelo utilizador passa pelas bobinas L_{I1} e L_{i2}, criando um campo magnético indutor. A tensão de alimentação, U, é diretamente aplicada ao enrolamento induzido, L_{ind}, gerando uma corrente que cria um campo magnético que é proporcional à tensão U. O binário de força motora que resulta da interação destes dois campos magnéticos é proporcional ao produto U*I e acelera o rotor do motor. O disco metálico T gera um binário resistente ao mover-se no campo magnético criado pelo íman permanente, criando um efeito de travão. A velocidade de rotação do rotor estabiliza quando os dois binários se igualarem. É esta velocidade de rotação que incrementa o mostrador numérico do contador.

Aron e a correção das variações da tensão de alimentação

Aron trabalhou muito na melhoria da precisão do contador; usou vários truques para poder corrigir erros estáticos, elétricos e mecânicos. Os contadores concorrentes tinham em conta a variação da tensão de alimentação da rede, característica que os contadores de Aron não tinham.

Para resolver este problema Aron substituiu a necessidade de uso de materiais magnéticos no pêndulo e associou a cada pêndulo uma bobina percorrida por uma corrente proporcional à tensão U de alimentação.

O contador do Museu Faraday

O contador de Aron existente no Museu Faraday estava calibrado para a tensão contínua de 220 V e uma corrente máxima de 20 A. A corrente máxima poderá ser aumentada pela ligação externa de uma resistência em paralelo, *shunt*, com o circuito de medida de corrente. Na descrição que se segue, refere-se a Fig. 14 e o esquema elétrico simplificado representado na Fig. 15.

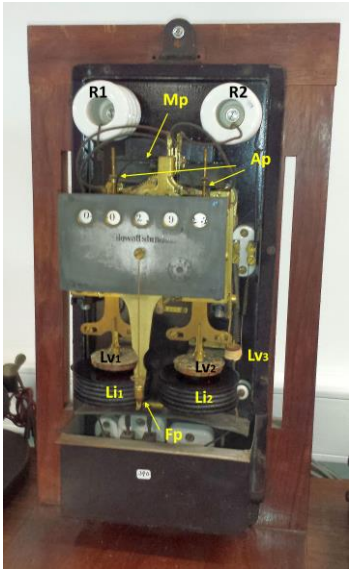


Fig. 14 – Contador Aron no MF.

Os dois relógios do contador recebem energia diretamente da tenção de alimentação, U, através de um motor de impulso, M_p, que enrola momentaneamente uma mola de lâmina de aço, com um período de cerca de 30 s durante 1 s. A mola é libertada e comunica simultaneamente um impulso aos dois relógios através de uma engrenagem diferencial (diferencial motor), que permite fornecer energia aos relógios que estão a funcionar com ritmos diferentes, sem os alterar, enquanto recebem o mesmo binário motor regenerador do seu movimento.

Cada relógio tem um mecanismo de escape[7] do tipo Graham, considerado, na relojoaria, por ser o mais eficiente, e um pêndulo. Na ponta inferior da extremidade de cada pêndulo está uma bobina solenoidal com um grande número de espiras (cerca de 1,3 kΩ de resistência), designada por bobina *shunt*.

Essas bobinas, L_{v1} e L_{v2}, estão ligadas em série conjuntamente com uma resistência R_2 de 10 kΩ e ainda a bobina L_{v3} com cerca de 28 Ω. Esta série é alimentada diretamente com a tensão contínua da rede (220 V DC, no caso do nosso contador), consumindo uma corrente essencialmente constante de 17,4 mA, o que dá uma potência de consumo de cerca de 3,83 W. O motor de impulso, que energiza os relógios compensando as suas perdas, tem uma resistência interna de 915 Ω e tem uma resistência R1 em série. Estimando que atua cerca de 1 s com um período de atuação de 30 s obtém-se uma potência consumida de cerca de 1,8 W. No total, o contador consome cerca de 5,6 W, mas este consumo fica a cargo do distribuidor de energia, dado o modo como as ligações estão feitas.

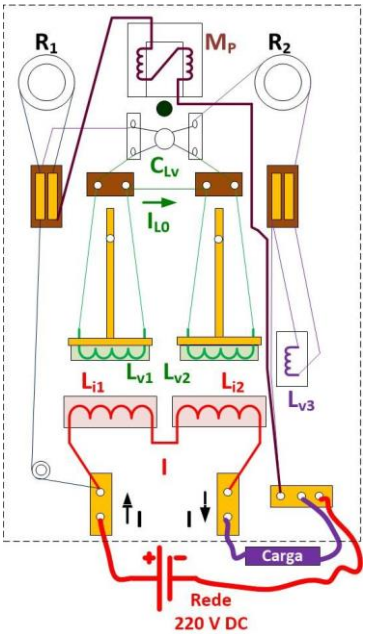


Fig. 15 – Esquema de ligações do contador Aron.
L_{i1} e L_{i2} – bobinas de corrente, R ≅ 0Ω;
L_{v1} e L_{v2} – bobinas de tensão, R = 1,3 kΩ;
Lv3 – bobina de compensação, R = 28 Ω;
R_1 = 1 kΩ; R_2 = 10 kΩ;
M_p = motor de pulso, R = 915 Ω;
C_{LV} = comutador periódico de L_{v1} e L_{v2}.

Por baixo de cada pêndulo há uma bobina fixa L_{i1} (em série com a do outro pêndulo, L_{i2}), realizadas com fio muito grosso por onde passa a corrente I, (20 A no nosso caso), mas que pode ser uma fração da corrente de carga se uma resistência shunt externa for associado ao contador (paralelo com a série L_{v1} e L_{v2}).

Durante a oscilação dos pêndulos, os campos magnéticos das bobinas *shunt* e série interagem acrescentando/ reduzindo a força F_m à força gravitacional que atua sobre os pêndulos e, portanto, aumentam ou

[7] - **O mecanismo de escape é uma peça fundamental num relógio mecânico. É ele que permite contar apenas um impulso sem quase roubar energia ao relógio.**

diminuem a sua frequência de oscilação proporcionalmente à tensão e à corrente ao longo da duração de uma oscilação completa. As polaridades de excitação das bobinas são arranjadas de forma que quando um relógio ganha tempo, o outro perde tempo, fazendo com que a diferença instantânea entre as frequências de oscilação dos pêndulos seja proporcional à potência elétrica instantânea. Outra engrenagem diferencial (o *diferencial de registo*) é ligada entre os dois trens de engrenagens do relógio, disposta neste caso para produzir a diferença em vez da soma. É ela que opera o trem de engrenagens de registo, movimentando os contadores digitais do mostrador, integrando a potência para mostrar os dígitos correspondentes à energia total consumida pelo utilizador.

Correção de erros no contador de Aron do Museu Faraday

Aron fez um longo e continuado trabalho de criação de mecanismos de correção de erros dos contadores que produzia. De seguida referem-se alguns métodos de correção presentes no contador do Museu Faraday.

Os relógios estão regulados para operar com ritmos diferentes na ausência de carga. Esse procedimento minimiza a tendência usual de os relógios se sincronizarem com cargas baixas (e, portanto, falharem no registo de valores) pela transmissão de impulsos de binário através das engrenagens diferenciais que tenderiam a retardar o relógio mais rápido e a acelerar o mais lento de modo a eles se sincronizarem. A diferença nos ritmos é explicada por uma diferença nas relações de transmissão entre os trens em movimento e as rodas planetárias ligadas ao diferencial de registo.

O contador dispões de um mecanismo cancelador de qualquer erro de ritmo estático e que se baseia em que a polaridade das bobinas *shunt,* L_{v1} e L_{v2}, é invertida frequentemente por um comutador elétrico após um número total fixo de oscilações do pêndulo, sendo a direção do trem de registo mecânico simultaneamente invertida em relação ao diferencial de registo. Assim, como cada movimento do relógio serve igualmente nas funções de 'ganho' e 'perda' de ritmo, qualquer erro de ritmo estático acumulado durante um período é automaticamente subtraído durante o próximo, enquanto a integração do consumo de energia continua a ser feita de forma perfeita.

A inversão de direção ocorre aproximadamente a cada dez minutos sob o controle de um mecanismo de escape ligado ao diferencial motor, fornecendo simultaneamente uma indexação de meia volta do comutador e trocando uma roda extra para dentro ou para fora do acionamento do trem de registo.

O peso da massa M decompõe-se nas parcelas ortogonais, P_y e P_x, que originam forças centrifugas e centrípetas no movimento do prumo de comprimento L. A massa M desloca-se com velocidade variável trocando energia cinética; E_c, com energia potencial, E_p, e vice-versa, ver Fig. 12.

Quando Aron introduziu no contador as bobinas solenoidais L_{v1} e $L_{v2,}$ excitadas com uma corrente I_{L0} dependente da tensão U de entrada, acrescentou uma força magnética de atração / repulsão, F_m, Fig. 16, sobre os pêndulos e esta atrasará / adiantará os pêndulos mudando a sua frequência de oscilação.

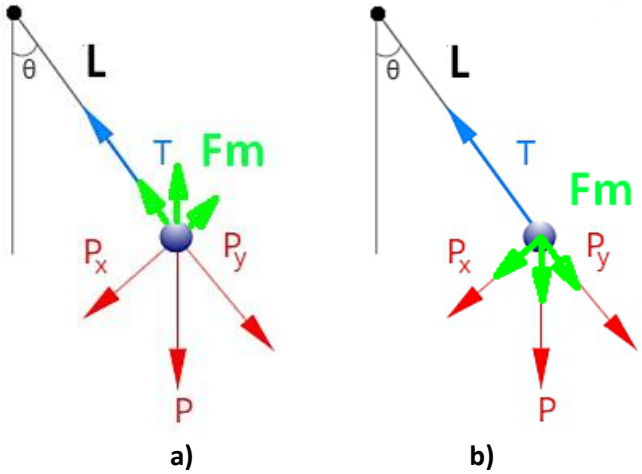


Fig. 16 - Força magnética, F_m, criada no pêndulo.
a) - pela interação da bobina L_{v1} com L_{i1};
b) - pela interação da bobina L_{v2} com L_{i2}.

Quando não há corrente I ou tensão U, a força magnética F_m será nula e os pêndulos oscilarão com a mesma frequência (frequência nominal) e atuarão sobre o **contador diferencial mecânico,** que não atualizará os números indicados no visor do contador. Estando a tensão U sempre aplicada ao contador só haverá contagem se houver corrente I nas bobinas de corrente L_{i1} e L_{i2}. Aqui será gerada uma força magnética F_m proporcional ao produto de U por I, ou seja, à potência consumida pela carga; os pêndulos oscilarão com um desvio de frequência relativamente à frequência nominal (um pêndulo acelera e o outro trava) que é proporcional a esta potência, atuando sobre o relógio diferencial que faz mover os dígitos do mostrador (operação de integração).

Anexo – Pendulando

A equação do pêndulo envolve alguma matemática complicada que, no entanto, fica simples pelas aproximações que se podem fazer quando as oscilações do pêndulo são pequenas em torno da posição de equilíbrio, $\Theta = 0$. Aron usou a aproximação linear do período do pêndulo de Christiaan Huygens (1629 – 1695),

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}.$$

Foi Galileu (1564-1642) que, em 1602, observou experimentalmente que o período de oscilação de um pêndulo mecânico não dependia da amplitude das oscilações nem da massa pendurada. Esta afirmação é aproximadamente verdadeira para pequenas oscilações. Só 57 anos depois, em 1659, o matemático e físico holandês Christiaan Huygens (1629-1695), estabeleceu a formulação correta das leis do pêndulo simples, ao demonstrar matematicamente que só no caso de a trajetória ser cicloidal[8] é que o período do pêndulo é independente de sua amplitude de oscilação. Huygens determinou a relação entre o tempo de queda de um corpo ao longo de uma cicloide e o tempo da sua queda ao longo do diâmetro do círculo gerador da cicloide. De posse dessa relação, obteve pela primeira vez a expressão para o período T (metade do tempo de uma oscilação completa) de um pêndulo simples com angulo inicial de deslocamento Θ_0 e, a partir dela, determinou o valor da aceleração da gravidade, ou seja: g = 9,806 m/s.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left(1 + \frac{\theta_0^2}{16} + \frac{11\theta_0^4}{3072} + \cdots\right)$$

Referências

Neste trabalho foram usadas várias referências bibliográficas, mas, sem dúvida, a informação mais relevante sobre a vida de Hermann Aron foi divulgada pelo Prof. Shaul Katzir, na obra:

- Shaul Katzir – "From academic physics to invention and industry: the course of Hermann Aron's (1845 – 1913) career" - Max Planck Institute for the History of Science (Preprint 370).
- http://www.electrokinetica.org/d1/4/1.php

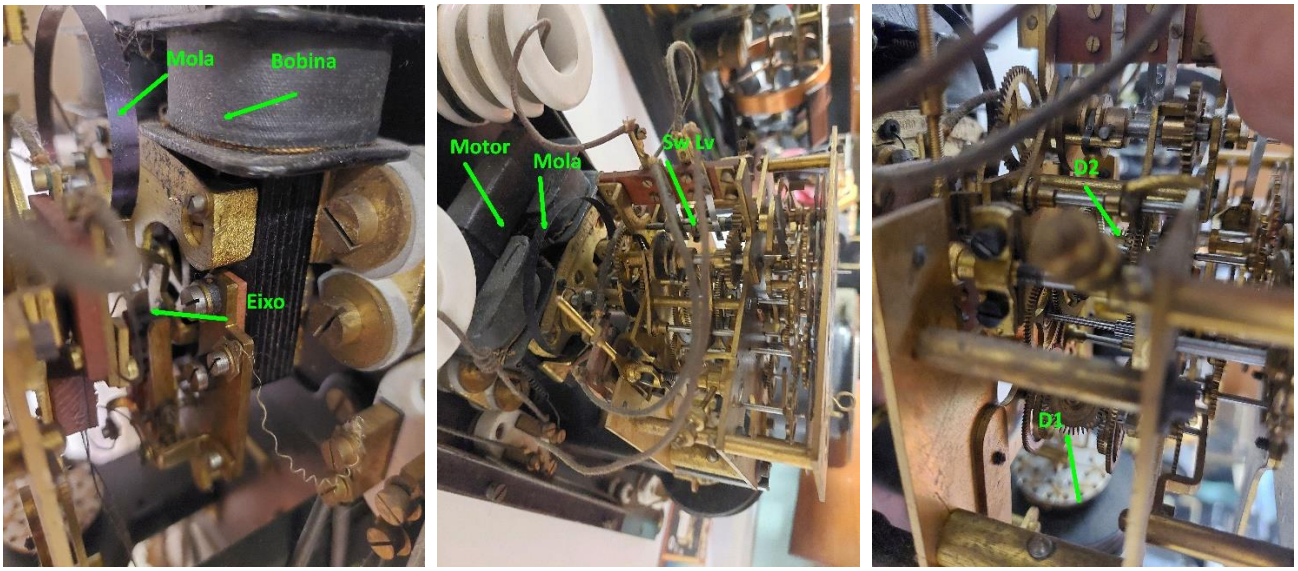
Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Carlos Fernandes o cuidado tido na revisão deste documento. Agradeço a ajuda dos voluntários do Museu Faraday Jorge Amarante, Albano Santos e Rui Louro na preservação e instalação deste notável contador de energia, o contador de Aron, e na elaboração do painel de contadores de energia.

O contador de Aron (Podcst)

[8] -Curva gerada por um ponto situado sobre um círculo que se desloca ao longo de uma linha reta.

Anexo- Alguns detalhes do contador



a) b) c)

Fig. 14 – Detalhes do mecanismo de relojoaria.
a) - Motor de pulso; b) - Motor e Comutador de L_{v1} e L_{v2} (SwLv); c) - Diferenciais de movimentos.

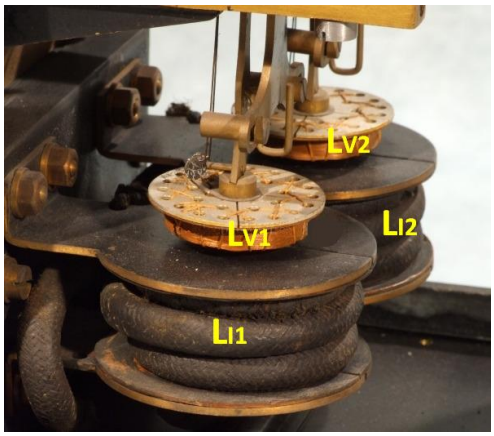


Fig. 17 – Detalhes das bobinas L_I e L_V.