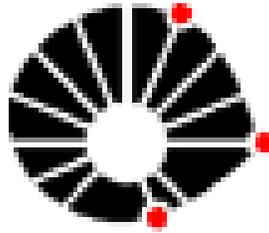


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



UNICAMP

F 609 – Instrumentação para Ensino I
Professor: José J. Lunazzi

Relatório Final

**ESTUDO E COMPARAÇÃO DE SISTEMAS
DE CAPTAÇÃO DE ENERGIAS HIDRÁULICA
E EÓLICA**



Aluno: Bruno Giacomini

RA: 031510

Orientador: Juan C. P. Campoy

Campinas, 2007

1. Resumo

Como proposto, foi construído um dispositivo capaz de gerar eletricidade a partir de energias eólica e hidráulica, com base na Lei de Indução de Faraday. O dispositivo consta de um galão de cloro (5L) com algumas pás em seu interior que giram com o fluxo de água ou vento, fazendo girar ímãs, através de um eixo de rotação, próximos a quatro bobinas. A saída de tensão pode ser ligada a um LED ou a um voltímetro. Foram feitas medidas de voltagens obtidas nos terminais do LED para diferentes fluxos de água ou vento, juntamente com a frequência de rotação do disco que contém os ímãs. Também foram feitos, um cálculo de rendimento para nosso dispositivo e uma comparação entre os sistemas eólico e hidráulico.

2. Introdução[2]

Vivemos em uma época em que a obtenção de energia e seus gastos são preocupação mundial. O homem vem acabando com a natureza e seus recursos há muito tempo sem se preocupar com suas conseqüências. Esse tipo de preocupação é recente, sendo que vários estudos estão sendo feitos a fim de se desenvolver novos métodos na obtenção de energia.

Além do petróleo, que demora milhares de anos para se reconstituir na natureza, e de seus derivados - a gasolina, o óleo diesel, o óleo combustível, o GLP ou gás de cozinha - são recursos não-renováveis outros combustíveis fósseis, como o carvão e o gás natural, e a energia produzida nas usinas nucleares. A obtenção de energia "limpa", ou renovável, como é dito, já existe em vários lugares do mundo, mas nem sempre são viáveis economicamente ou tecnologicamente.

Entre as fontes renováveis encontram-se o sol (energia solar), o vento (energia eólica), os oceanos e a biomassa (bioenergia ou agroenergia). As hidrelétricas são também consideradas fontes de energia renovável.

Segundo o Greenpeace, os ventos são capazes de suprir 10% da demanda por eletricidade no mundo, a energia solar poderá suprir até 25% da demanda energética mundial em 2040 e a energia gerada a partir da biomassa, se explorada com cuidado e com os recursos tecnológicos necessários, será equivalente à que seria gerada por hidrelétricas e usinas nucleares até 2050. O Greenpeace considera essas usinas verdadeiras ameaças, graças ao lixo atômico que produzem e ao risco de acidentes que proporcionam.

O fato de ser classificada como "renovável", no entanto, não é suficiente para que determinada fonte

se apresente como uma boa alternativa à necessidade de se obter energia. Há sempre outras questões a serem avaliadas. A mais discutida delas é a dos prejuízos que uma determinada forma de geração de energia traz ao meio ambiente. As hidrelétricas, por exemplo, apesar de estarem na categoria de renováveis e até não-poluente, trazem complicações porque exigem o alagamento de áreas muito extensas. Com isso, a biodiversidade local fica desequilibrada e famílias precisam se desalojar. Os prejuízos para a agricultura também são grandes. Por essas razões o Greenpeace e outras organizações pró-natureza se opõem à construção de grandes hidrelétricas, propondo a instalação e utilização apenas de usinas desse tipo, porém, pequenas. O que acontece é que mesmo a alternativa energética aparentemente mais natural pode ser excelente para determinado local ou grupo de pessoas e de difícil aceitação e adaptação para outros. Enquanto a energia nuclear está atrelada à produção do lixo nuclear, danoso à saúde e que precisa ser isolado das pessoas, a instalação do princípio inofensivo equipamento produtor de energia eólica vem originando críticas, por exemplo, na Espanha [2]. As razões seriam o fato de as instalações serem barulhentas e poluírem visualmente o ambiente.

Energia Eólica

O vento nada mais é do que o movimento de partículas que constituem o ar (nitrogênio, oxigênio, argônio, etc.) devido às diferenças de temperaturas, isto é, o resultado da radiação solar incidente na superfície do planeta e também à sua rotação.

A captação de energia eólica começa com o sol. Quando o sol aquece certa região da terra a massa de ar em torno dessa região absorve parte da energia depositada pelo sol. A certa temperatura essa massa de ar começa a subir rapidamente, pois um volume de ar aquecido é mais leve do que um mesmo volume de ar frio. Então, uma massa de ar frio rapidamente desce para ocupar o espaço deixado pela massa de ar quente.

Isto que é chamado de vento. Se for colocado um objeto com pás na frente do vento, haverá uma transferência de energia do vento para as pás, que entrarão em movimento, é deste modo que as turbinas capturam energia.

O projeto mais simples de um gerador de energia eólico consiste em um conjunto formado por pás rotativas para capturar a energia do vento, um eixo para transmitir essa energia para geradores e estes últimos para fazerem a conversão em energia elétrica (usando princípios de indução eletromagnética para gerar tensão elétrica).

É interessante notar que a obtenção desse tipo de energia tem ficado cada vez mais eficiente e barato como decorrer do tempo. A figura abaixo mostra a variação de custo dessa energia durante o período de 1980 a 2000.

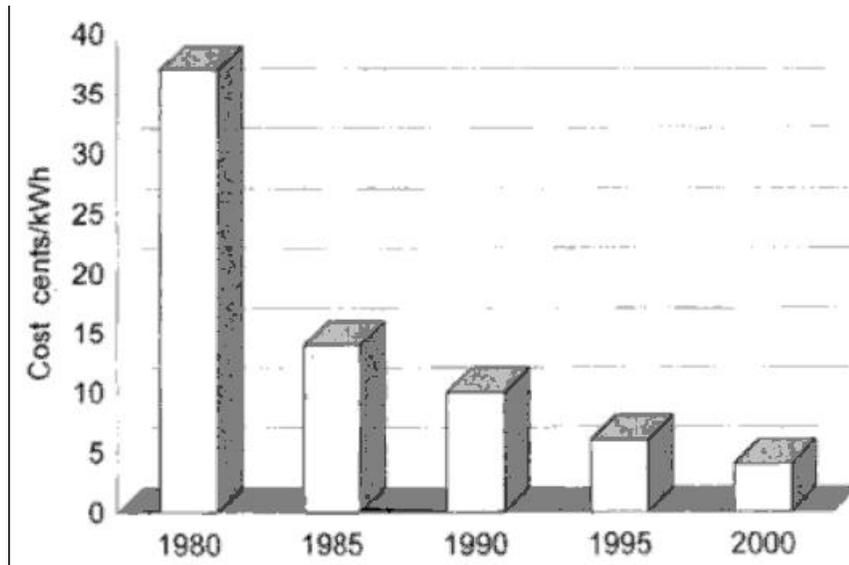


Fig. 2.1 - Custo decrescente da energia gerada pelo vento [4].

Energia Hidráulica

O uso da energia hidráulica foi uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico, particularmente para bombeamento de água e moagem de grãos. Tinha a seu favor, para tanto, as seguintes características: disponibilidade de recursos, facilidade de aproveitamento e, principalmente, seu caráter renovável.

É a energia obtida a partir da energia potencial de uma massa de água. A forma na qual ela se manifesta na natureza é nos fluxos de água, como rios e lagos e pode ser aproveitada por meio de um desnível ou queda d'água. Pode ser convertida na forma de energia mecânica (rotação de um eixo) através de turbinas hidráulicas ou moinhos de água. As turbinas por sua vez podem ser usadas como acionamento de um equipamento industrial, como um compressor, ou de um gerador elétrico, com a finalidade de prover energia elétrica para uma rede de energia. As turbinas hidráulicas são projetadas para transformar a energia mecânica (a energia de pressão e a energia cinética) de um fluxo de água, em potência de eixo.

A figura abaixo mostra a evolução da potencia adquirida pelas instalações nas usinas hidrelétricas da CESP (Companhia Energética de São Paulo) no período de 1995 a 2005.

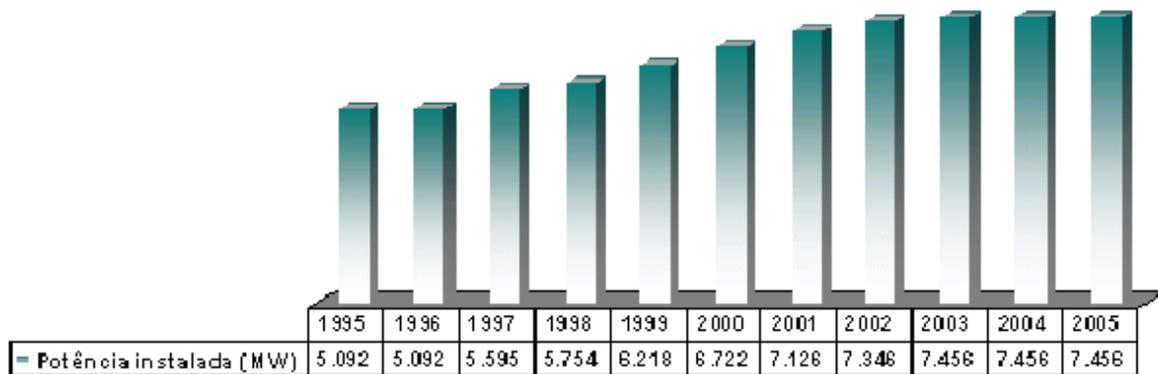


Figura 2.2 - Evolução da potência instalada nas Usinas Hidrelétricas da CESP (MW) [5]

3. Teoria [1]

Para entendermos o funcionamento de um gerador de eletricidade, seja ele por energia eólica ou hidráulica, precisamos primeiramente os mecanismos físicos envolvidos nesses sistemas.

3.1 - Um pouco de história

Não se sabe quando foi observada, pela primeira vez, a existência do magnetismo. Há mais de 200 anos, porém, os gregos sabiam que um certo tipo de pedra da região da Magnésia (a magnetita) atraía pedaços de ferro. Existem também registros escritos sobre a utilização de magnetos na navegação, datados do século XII.

Em 1269, Pierre de Maricourt descobriu que uma agulha colocada em diversas posições sobre um magneto natural esférico orientava-se ao longo de curvas que passavam por pontos diametralmente opostos na esfera. Esses pontos foram denominados por ele, os pólos de um magneto, ou ímã. Depois, muitos experimentadores verificaram que todo ímã, qualquer que fosse a sua forma, tinha dois pólos, o norte e o sul, onde a força exercida pelo ímã era mais intensa. Também se observou que os pólos de mesmo nome de dois ímãs de repeliam mutuamente, e que os de nomes diferentes se atraíam.

Em 1600, William Gilbert descobriu que a Terra era um ímã natural, com pólos magnéticos nas vizinhanças dos pólos norte e sul geográficos (Uma vez que o pólo norte da agulha de uma

bússola aponta para o pólo norte, o que denominamos pólo norte magnético, é na realidade um pólo sul).

Em 1750, aproximadamente, John Michell fez uma investigação quantitativa sobre a atração e a repulsão de pólos magnéticos, com uma balança de torção. Descobriu que a força exercida por um pólo sobre outro, é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os pólos. Pouco depois, Coulomb confirmou esses resultados.

Embora a força entre dois pólos magnéticos seja semelhante à que existe entre duas cargas elétricas, há uma diferença importante entre as cargas elétricas e os pólos magnéticos – estes pólos estão sempre aos pares. Se um ímã for quebrado na metade, aparecerão dois pólos iguais na quebradura, isto é, de um ímã se fazem dois, cada qual com um pólo norte e um sul. Ao longo dos anos tem sido bastante grande a especulação sobre a existência de um pólo magnético isolado, e nos anos mais recentes, um esforço experimental considerável foi dedicado à busca desta identidade. Até hoje, porém, não parece haver evidência conclusiva sobre a existência de um pólo magnético isolado (mono-pólo magnético).

A relação entre a eletricidade e o magnetismo não foi conhecida até o século XIX, quando Hans Christian Oersted descobriu que uma corrente elétrica afetava a orientação da agulha de uma bússola. Experiências posteriores, de André-Marie Ampère e outros, mostraram que as correntes elétricas atraíam pequenos fragmentos de ferro e que correntes elétricas paralelas se atraíam mutuamente, assim como correntes antiparalelas se repeliam mutuamente. Ampère propôs um modelo teórico do magnetismo que ainda serve como base para a teoria moderna do magnetismo. Segundo sua proposta, a fonte fundamental do magnetismo não é o pólo magnético, mas sim a corrente elétrica. Propôs ainda que o magnetismo dos ímãs permanentes fosse explicado pelo alinhamento de correntes circulares fechadas no interior do material. Sabemos, nos dias de hoje, que estas correntes circulares resultam, em parte, do movimento dos elétrons nos átomos e em parte também do spin do elétron, que é uma propriedade quântica do elétron. A interação magnética básica é a força magnética que uma carga elétrica em movimento exerce sobre outra carga em movimento. Esta força atua além da força elétrica entre as cargas. Como no caso da força elétrica, admitimos que a força magnética seja transmitida por um outro agente, o campo magnético. A carga móvel gera um campo magnético e o campo, por sua vez, exerce uma força sobre outra carga elétrica em movimento. Uma vez que uma carga em movimento constitui

uma corrente elétrica, a interação magnética pode ser imaginada, também, como a interação entre duas correntes elétricas.

Por volta de 1830, Michael Faraday e Joseph Henry demonstraram, mediante experiências independentes, que a alteração de um campo magnético provoca um campo elétrico. Alguns anos depois (aproximadamente 1860), James Clerk Maxwell desenvolveu uma teoria completa da eletricidade e do magnetismo, na qual mostrava que um campo elétrico variável gera um campo magnético.

3.2 - Linhas de campo

As linhas de campo são linhas utilizadas para representar o campo magnético, tal como as linhas de força de um campo elétrico. Por convenção, elas são orientadas do pólo norte para o pólo sul dos ímãs. Dizemos que as linhas de campo nascem no pólo norte e morrem no pólo sul.

3.3 – Campo magnético uniforme

Denomina-se campo magnético uniforme aquele campo no qual a intensidade é a mesma em todos os seus pontos, bem como são constantes a direção e o sentido desse campo.

3.4 - A força exercida por um campo magnético

Se uma carga q , positiva, é lançada num campo magnético \mathbf{B} com uma velocidade \mathbf{v} com um ângulo θ , uma força \mathbf{F} de origem magnética é exercida sobre a carga que sobre um desvio em sua trajetória. As características dessa força são:

- é proporcional à carga q . A força sobre uma carga negativa tem direção oposta à força sobre uma carga positiva que tenha a mesma velocidade \mathbf{v} .
- é proporcional ao módulo da velocidade \mathbf{v} .
- é perpendicular ao campo magnético \mathbf{B} e à velocidade \mathbf{v} .
- é proporcional a $\text{sen}\theta$. Se \mathbf{v} for paralela ou antiparalela a \mathbf{B} , a força é nula.

Com base nesses resultados experimentais, a intensidade, ou módulo da força magnética é:

$$F = q.v.B.\text{sen } \theta$$

(equação 3.1)

3.5 – Movimento de uma carga num campo magnético

A força magnética altera a trajetória de uma partícula carregada, mas não altera o módulo de sua velocidade, por tanto, não altera sua energia cinética.

Na Dinâmica, aprendemos que se uma força tem direção perpendicular à velocidade v , ela é uma resultante centrípeta. É este o caso da força magnética, pois como vimos, a força magnética é perpendicular à v .

A força centrípeta tem módulo:

$$F_{cp} = mv^2/R,$$

Onde R é o raio da órbita, m a massa da partícula e v sua velocidade.

Igualando essa força centrípeta à força magnética e isolando R , temos:

$$R = mv/qB$$

(equação 3.2)

O período de revolução de uma partícula é:

$$T = 2\pi R/v$$

Utilizando R da equação 3.2, temos:

$$T = 2\pi m/qB$$

(equação 3.3)

A frequência de revolução é:

$$f = 1/T$$

Então:

$$f = qB/2\pi m$$

(equação 3.4)

3.6 – Força magnética sobre um condutor retilíneo

Consideremos um condutor metálico, retilíneo, percorrido por uma corrente elétrica, atravessando a região de um campo magnético.

Não estando o fio paralelo às linhas de campo, surgirá em cada um das partículas que constituem a corrente, uma força magnética parcial \mathbf{f} e a soma de todas essas forças parciais são a força magnética \mathbf{F} . Elas têm a mesma direção e mesmo sentido.

Sendo e a carga do elétron, v o módulo da velocidade da partícula, B a intensidade do campo magnético e θ o ângulo entre o fio e as linhas de campo, a força \mathbf{f} em cada partícula terá módulo:

$$f = e.v.B.\text{sen}\theta$$

e a força magnética total terá módulo igual a:

$$F = \Sigma f = n.f = n.(e.v.B.\text{sen}\theta)$$

Seja ainda:

$$v = \Delta s / \Delta t = l / \Delta t,$$

onde l é o comprimento do fio

Manipulando essas equações:

$$F = n.e.(l / \Delta t).B.\text{sen}\theta$$

Observemos que, no intervalo Δt , passam por uma seção reta do fio n partículas eletrizadas, transportando uma carga $Q = n.e$, e a intensidade de corrente no fio é:

$$i = Q / \Delta t = n.e / \Delta t$$

Dessa forma, a força magnética F fica:

$$F = B.i.l.\text{sen}\theta$$

(equação 3.5)

Assim dizemos que a intensidade da força magnética que atua num fio retilíneo imerso em um campo magnético uniforme é proporcional ao comprimento do trecho de fio imerso no campo, à intensidade da corrente elétrica que percorre e ao módulo do campo magnético.

3.7 – Direção e sentido da força magnética no fio

A força magnética no fio tem direção ortogonal às linhas de campo e ainda é perpendicular ao próprio fio retilíneo.

O sentido da força magnética obedece a uma regra prática chamada *regra da mão esquerda* que é definida assim:

- *Dedo polegar*: indica o sentido da força magnética;
- *Dedo indicador*: indica o sentido do campo magnético **B**;
- *Dedo médio*: indica o sentido da corrente elétrica i .

3.7 – Fontes de campo magnético

Independentemente da forma do condutor, a corrente elétrica que nele circula gera em torno dele um campo magnético.

A primeira prova experimental da existência do campo magnético envolvendo o condutor de corrente elétrica ocorreu em 1820, e foi realizada pelo professor de física Hans Christian Oersted. Sua experiência foi muito simples: esticou um fio metálico sobre uma bússola horizontal e fez passar nele uma corrente elétrica contínua. Imediatamente, a agulha magnética da bússola movimentou-se em torno de seu eixo, comprovando a existência do campo magnético em torno do fio percorrido pela corrente.

Relativamente ao sentido do campo magnético, Oersted verificou que ele dependia do sentido da corrente no fio. Com a corrente no sentido utilizado, a agulha girou anti-horário. Invertendo-se o sentido da corrente no fio, ela gira no sentido horário. Estas conclusões são tiradas a partir do sentido do deslocamento do pólo norte da agulha magnética.

Resumindo, quando o fio é atravessado pela corrente elétrica, surge no espaço, em torno dele, um campo magnético capaz de agir sobre uma agulha magnética. O sentido do campo depende do sentido da corrente elétrica.

Sentido do campo

Assim como para a direção da força magnética, a direção do campo magnético tem uma regra prática denominada *regra da mão direita*, onde:

- *Dedo polegar*: indica o sentido da corrente elétrica i ;
- *Demais dedos*: indicam o sentido do vetor indução magnética **B**.

Direção do campo

Em torno do espaço que envolve o fio, o campo magnético tem direção ortogonal a ele. O vetor **B** é definido como perpendicularmente ao papel e, portanto, ortogonalmente ao fio. Para desenhar o vetor campo **B** num ponto da circunferência, basta traçarmos uma tangente e usarmos o sentido obtido pela *regra da mão direita*.

Módulo do campo

Constata-se experimentalmente que o módulo do vetor indução magnética **B** depende:

- da intensidade da corrente **i** no condutor;
- da distância **d** de um ponto P ao condutor;
- e do meio que o envolve.

O meio é caracterizado magneticamente por uma grandeza física escalar denominada *permeabilidade magnética do meio* μ . Para o vácuo, essa grandeza tem valor $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{T.m/A}$.

A expressão que relaciona essas grandezas é:

$$B = \mu \cdot i / 2 \pi \cdot d \quad (\text{lei de Biot-Savart})$$

(equação 3.6)

3.8 – Campo magnético em uma espira circular, em uma bobina chata e em um solenóide retilíneo

Espira Circular

A direção do campo magnético em uma espira circular é perpendicular ao plano da espira. Esse campo tem sentido dado pela regra da mão direita. Dispõe-se do polegar indicando o sentido do campo magnético, e os demais dedos indicam, curvadamente, o sentido da corrente elétrica.

O módulo desse campo **B** é:

$$B = \mu \cdot i / 2R$$

(equação 3.7)

Onde R é o raio da espira circular

Bobina Chata

Bobina chata é o conjunto de N espiras justapostas. As espiras são idênticas, isto é, têm o mesmo raio R . O campo magnético no centro de cada espira tem módulo:

$$B = (\mu \cdot i / 2R) \cdot N$$

(equação 3.8)

Solenóide Retilíneo

O solenóide retilíneo é um fio condutor enrolado em forma de hélice. É muito semelhante a uma mola helicoidal. Ele também é formado por N espiras idênticas, e n a densidade de espiras por unidade de comprimento, porém elas não são justapostas, mas ligeiramente afastadas.

Ao ser percorrido por corrente elétrica, o solenóide gera um campo magnético. Dentro do solenóide, as linhas de indução são praticamente retas e paralelas, significando que o campo magnético é semelhante ao produzido por um ímã em forma de barra. Quanto mais longo o solenóide, mais fraco torna-se o campo externo e mais uniforme torna-se o campo interno.

Por extensão, denominamos por solenóide ideal aquele de comprimento infinito e cujo campo interno é perfeitamente uniforme. No solenóide ideal, não existe campo externo.

Na prática, obtém-se um campo magnético uniforme no interior do solenóide sempre que o seu comprimento l for muito maior que o raio de uma espira.

A direção do campo no solenóide é a mesma do eixo do solenóide reto ou sempre perpendicular ao plano das espiras deste. O sentido do campo também é obtido pela regra da mão direita.

O módulo do campo magnético em um solenóide é dado pela expressão:

$$B = \mu \cdot n \cdot i$$

(equação 3.9)

3.9 – Indução eletromagnética

Em 1830, Michael Faraday, na Inglaterra, e Joseph Henry, nos Estados Unidos, descobriram, independentemente um do outro, que um campo magnético pode induzir uma corrente num fio, mas que isso só ocorre quando o campo magnético estiver *alterando*. Muitas vezes, ao se tirar o plugue de um fio ligado a uma tomada, observa-se uma pequena centelha. Antes de o fio ser desligado, conduzia corrente, que como vimos, tem um campo magnético que envolve o fio com

uma corrente. Quando se corta a ligação, puxando o plugue da tomada, a corrente cessa bruscamente e o campo magnético se desfaz. A variação do campo magnético provoca uma *fem* (força eletro-motriz) no condutor, que visa manter a corrente original; há então a centelha no plugue. Uma vez tenha o campo magnético atingido o valor nulo, e não mais estiver se alterando, a *fem* é nula. As forças eletro-motrices e as correntes provocadas por um campo magnético variável são denominadas *fems induzidas* e *correntes induzidas*. O processo em si é denominado *indução magnética*.

No caso de um fio elétrico que se desliga da fonte de energia, o campo magnético variável é provocado por uma variação de correntes elétricas. É possível também que o campo magnético variável seja provocado por um ímã em movimento. Também há corrente induzida se uma bobina for aproximada ou afastada de um ímã em repouso, ou se a bobina girar num campo magnético fixo. Uma bobina que gira num campo magnético é o elemento básico num gerador, que converte a energia mecânica em energia elétrica. Numa usina hidrelétrica, um curso de água é represado e a água flui, de maneira controlada, para movimentar as bobinas. No caso de nosso experimento, as bobinas ficam paradas e os ímãs são movimentados ou pela água ou pelo vento, que girando as pás, ligadas aos ímãs por um eixo.

Todos os diversos métodos de indução magnética podem ser resumidos numa relação conhecida como *Lei de Faraday*, que relaciona a *fem* induzida num circuito à variação do fluxo magnético através do circuito.

Fluxo do vetor indução magnética

Consideremos uma espira de área A colocada dentro de um campo magnético uniforme de indução \mathbf{B} , de tal forma que o vetor normal \mathbf{n} à superfície da espira faça um ângulo α com as linhas de indução. Define-se *fluxo do vetor indução \mathbf{B}* , através da espira, como sendo a grandeza escalar dada por:

$$\Phi = B.A.\cos \alpha$$

(equação 3.10)

No sistema internacional de unidades, a unidade de fluxo magnético denomina-se **weber** (Wb), onde $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T.m}^2$.

Sentido da corrente induzida – Lei de Lenz

Sabemos que uma corrente elétrica é capaz de entregar energias; as correntes induzidas são capazes de entregar energia: pode-se ligar na espira induzida uma pequena lâmpada, que se acenderá ao se produzir a corrente induzida.

De onde sai essa energia das correntes induzidas? A energia é algo q na pode surgir do nada; a que é entregue pela corrente induzida deve provir de alguma parte. Numa primeira experiência, ao se aproximar o ímã, produzia-se uma corrente induzida com determinado sentido. Essa corrente induzida cria seu próprio campo magnético, de modo que a espira se comporta com o um ímã. De acordo com a *regra da mão direita*, a corrente induzida cria um pólo norte na face da espira que está voltada para o ímã, e esse pólo repele o do ímã indutor, de modo que devemos despende certa energia para aproximar o ímã. A energia assim despendida não se perde; reaparece na espira sob a forma de energia elétrica. Isto explica outro fato curioso constatado: ao afastar-se o ímã, a corrente troca de sentido. Se troca de sentido, quer dizer que um pólo sul formar-se-á frente ao pólo norte do ímã indutor. Esse pólo sul atrairá o pólo norte e será necessário despende certa energia para afastar o ímã. Tampouco essa energia é perdida: também reaparece na espira sob a forma de energia elétrica.

Disso, obteve-se uma regra, consequência do princípio da conservação da energia, útil para determinar o sentido das correntes induzidas e que se chama *Lei de Lenz*, que diz que “*o sentido da corrente induzida é tal que seus efeitos se opõem às ações que a originam*”.

A lei de Lenz também pode ser enunciada assim: “*O sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor*”.

Lei de Faraday

Recordando outro resultado experimental muito importante, que a corrente induzida é tanto mais intensa quanto mais rapidamente varia o fluxo de indução concatenado. Este resultado pode ser expresso quantitativamente, como veremos a seguir.

Suponhamos que em um solenóide o fluxo de indução valha Φ_1 no instante t_1 . Fazendo-se crescer até atingir o valor Φ_2 , no instante t_2 , chamaremos de *variação do fluxo de indução*, $\Delta\Phi$, à diferença entre o fluxo final e o inicial.

Se essa variação necessitou do intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$ para se produzir, chamaremos de *rapidez de variação do fluxo* ao quociente $\Delta\Phi/\Delta t$. Medindo-se essa variação de fluxo em weber

(Wb) e o intervalo de tempo em segundos (s), a rapidez de variação do fluxo vem expressa em Wb/s, que corresponde ao volt (V).

Faraday procurou a relação quantitativa entre a rapidez da variação do fluxo e a força eletromotriz induzida e suas experiências permitiram-lhe a lei que leva seu nome que é enunciada da seguinte forma: “*A fem induzida média é proporcional à rapidez de variação do fluxo*”.

$$E_m = -\Delta\Phi/\Delta t$$

(equação 3.11)

Observemos que a lei de Lenz comparece na expressão acima por meio de um sinal negativo. A polaridade da fem induzida deve ser tal que seus efeitos se oponham à variação de fluxo que a gera.

3.10 – Geradores [3]

Todo dispositivo cuja finalidade é produzir energia elétrica à custa de energia mecânica constitui uma máquina geradora de energia elétrica (diz-se também, impropriamente, máquina geradora de eletricidade - eletricidade não é uma grandeza física, é um ramo da Física).

O funcionamento dessas máquinas se baseia ou em fenômenos eletrostáticos (como no caso do *gerador Van de Graaff*), ou na indução eletromagnética (como no caso do *disco de Faraday*).

Nas aplicações industriais a energia elétrica provém quase exclusivamente de geradores mecânicos cujo princípio é o fenômeno da indução eletromagnética (e dos quais o disco de Faraday é um simples precursor); os geradores mecânicos de corrente alternante são também denominados alternadores; os geradores mecânicos de corrente contínua são também denominados dínamos. Vale, desde já, notar que: "dínamo" de bicicleta *não é dínamo* e sim 'alternador'.

Numa máquina elétrica (seja gerador ou *motor*), distinguem-se essencialmente duas partes, a saber: o estator, conjunto de órgãos ligados rigidamente à carcaça e o rotor, sistema rígido que gira em torno de um eixo apoiado em mancais fixos na carcaça. Sob ponto de vista funcional distinguem-se o indutor, que produz o campo magnético, e o induzido que engendra a corrente induzida.

No dínamo o rotor é o induzido e o estator é o indutor; nos alternador dá-se geralmente o contrario.

A corrente induzida produz campo magnético que, em acordo com a Lei de Lenz, exerce forças contrárias à rotação do rotor; por isso em dínamos e alternadores, o rotor precisa ser acionado mecanicamente. O mesmo concluímos do Princípio de Conservação da Energia: a energia elétrica extraída da máquina, acrescida de eventuais perdas, é compensada por suprimento de energia mecânica.

Princípio de Funcionamento dos Alternadores

Para esclarecer o princípio de funcionamento dos alternadores, descrevamos inicialmente o mais simples deles (usado em faroletes de acionamento manual e de bicicleta, e em ignição de motores de explosão para motonetas). A figura 3.1 ilustra a situação.:

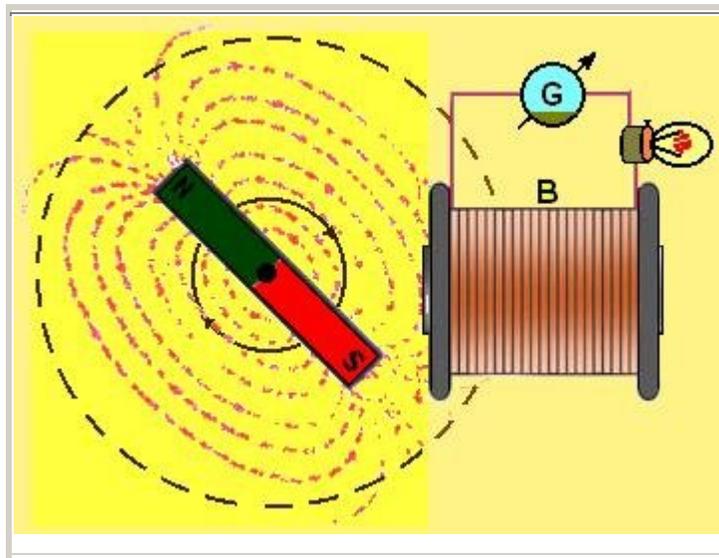


Figura 3.1 – ilustração de um alternador

Diante de uma bobina fixa **B** (induzido) põe-se a girar um ímã **SN** (indutor), como ilustrado acima. O ímã mantém um campo do qual o fluxo concatenado com a bobina varia periodicamente, com a mesma frequência de revolução do ímã. Se a rotação do ímã for lenta, um galvanômetro sensível **G** indica aproximadamente a corrente instantânea no decurso do tempo; se a rotação for rápida, é necessário um osciloscópio.

Na ilustração abaixo (figura 3.2) representamos fases consecutivas do fenômeno.

Convenção: Corrente positiva, vetor unitário, fluxo positivo.

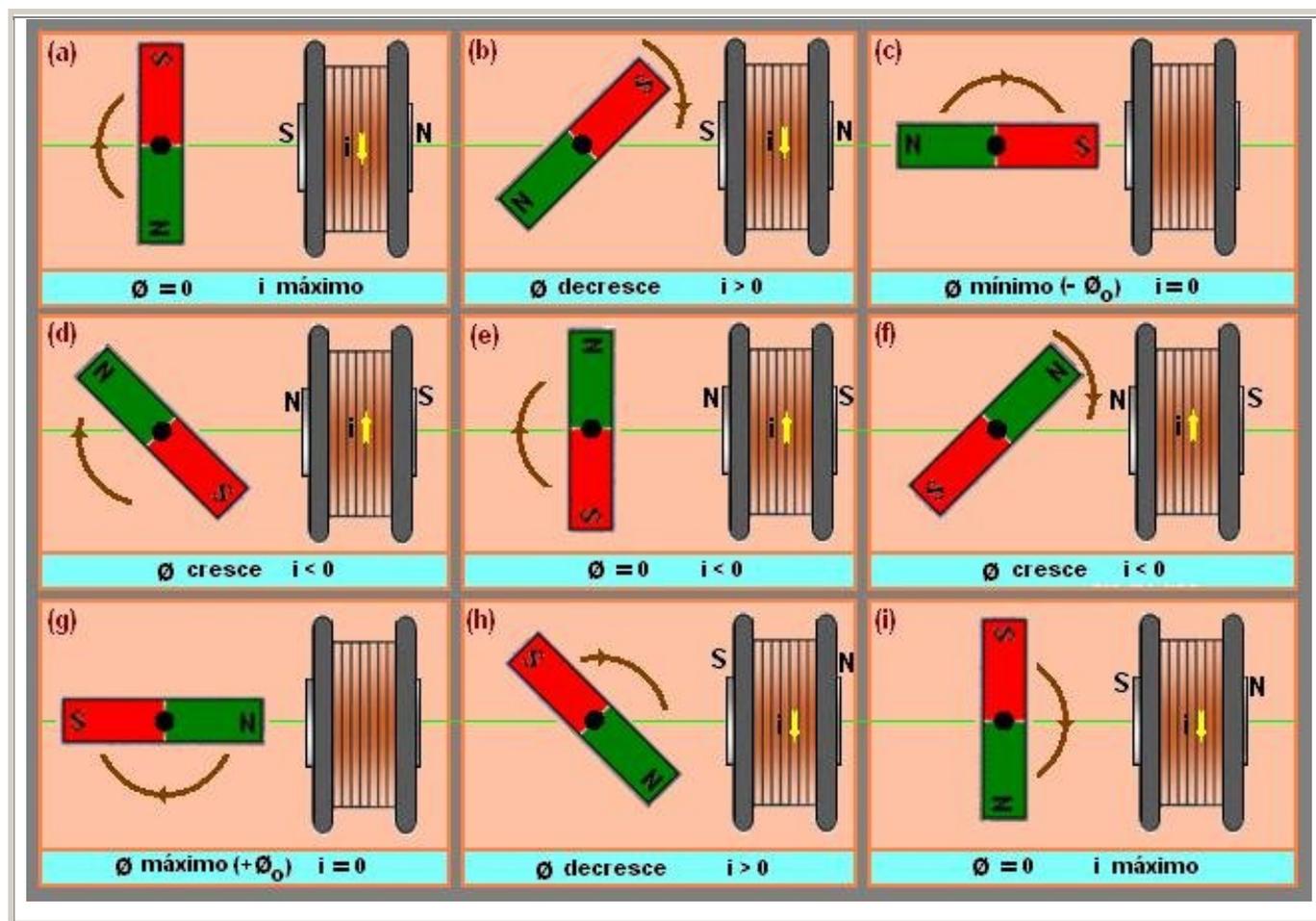
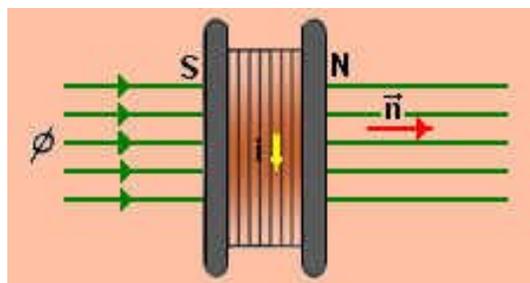


Figura 3.2 – rotação de um ímã gerando corrente elétrica

Nessa seqüência de ilustrações acima apresentamos as fases mais representativas no funcionamento de um alternador. É a variação de fluxo (ver seção 3.9) que induz corrente. O

fluxo varia enquanto aumenta ou diminui. Quando o fluxo é máximo, ele não varia; a FEM induzida (equação 3.11) é nula; a corrente é nula e muda de sentido. O campo magnético produzido pela corrente induzida exerce no ímã forças contrárias a sua rotação (Lei de Lenz).

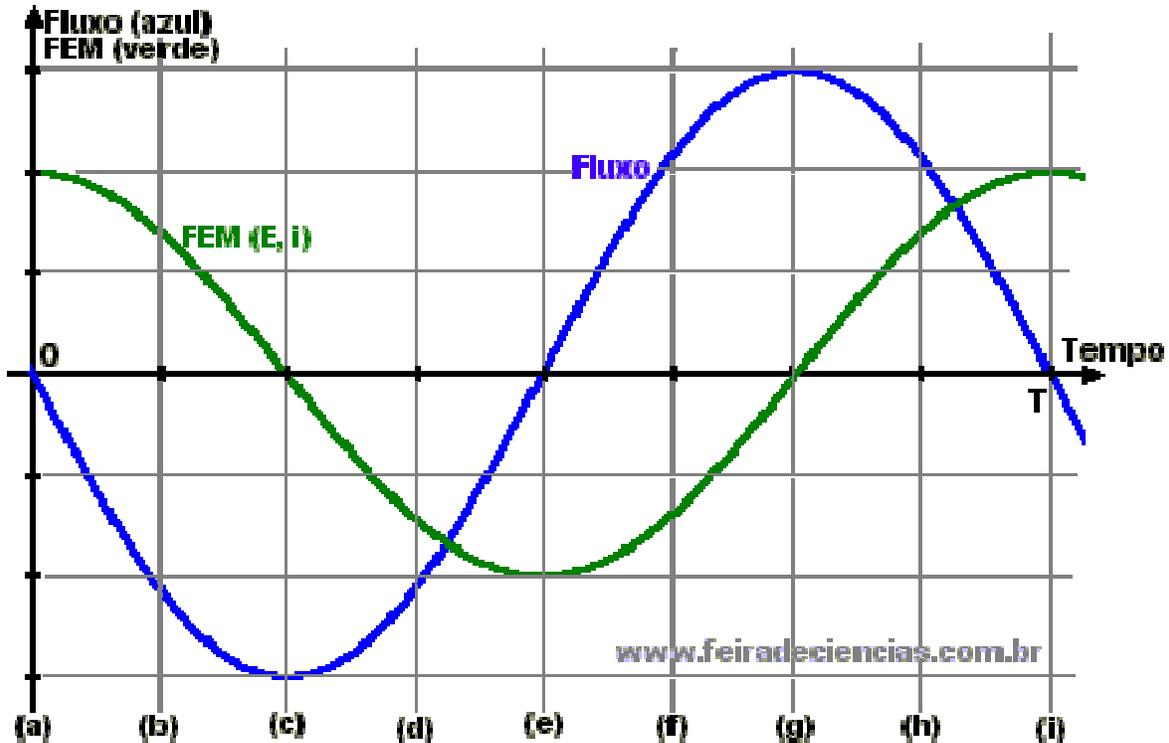


figura 3.3 – gráfico do fluxo magnético e da fem induzida pelo tempo.

A FEM induzida não é senoidal, mas segue, grosso modo, o gráfico posto acima, onde ilustramos no mesmo par de eixos, o fluxo de indução e a corrente induzida em um alternador, em um período (T).

Enquanto o fluxo de indução diminui, a corrente é positiva; quando o fluxo aumenta, a corrente é negativa, segundo a convenção apresentada. Fluxo máximo ou mínimo corresponde a corrente induzida nula. O fluxo de indução varia mais acentuadamente quando próximo de zero; então a corrente tem intensidade máxima (com sinal + ou -).

Mais perfeito é o sistema que examinaremos em seguida. Consideremos um a espira plana de forma qualquer, abrangendo uma área A ; seja r uma reta no plano desta espira. Introduzamos a espira em um campo de indução B uniforme, dispendo a reta r perpendicularmente ao campo B . Façamos a espira girar em torno da reta r como eixo, com velocidade angular ω constante. Determinemos a força eletromotriz induzida na espira girante.

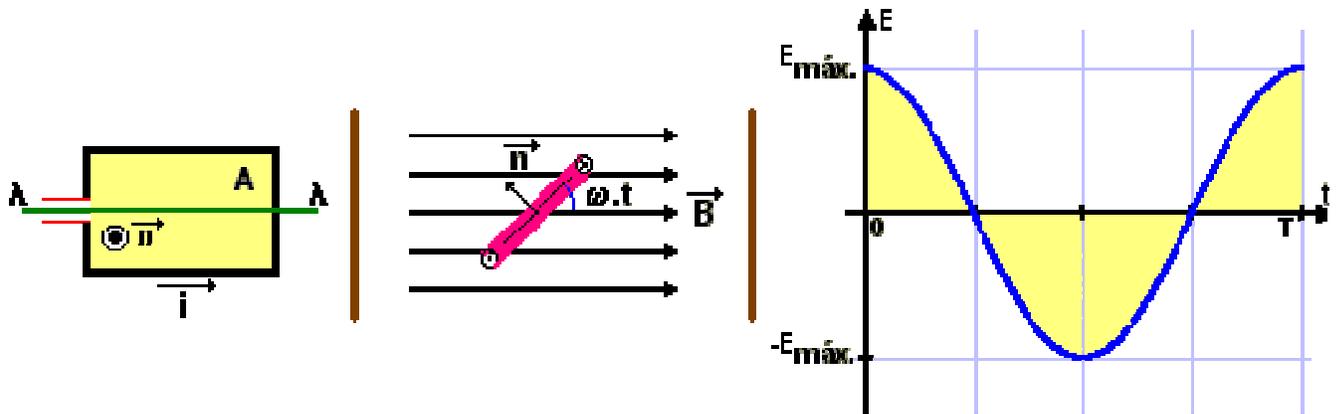


figura 3.4 – esquerda: sentido do ímã e do campo **B**; direita: a força eletromotriz induzida em função do tempo.

Adotemos como origem dos tempos um dos instantes em que a normal **n** à espira forma com o campo de indução **B** ângulo igual a um reto, passando de agudo para obtuso.

Com a notação da ilustração acima, o fluxo de indução na espira em qualquer instante é dado por:

$$\Phi = B.A.\cos(\omega.t + \pi/2) = - B.A.\sen \omega.t$$

(equação 3.12)

Sendo $E = - d\Phi/dt$, vem:

$$E = \omega.B.A.\cos \omega.t$$

(equação 3.13)

Se a espira for substituída por uma bobina de N espiras, a força eletromotriz induzida é:

$$E = N. \omega.B.A.\cos \omega.t$$

(equação 3.14)

Como vemos, esta força eletromotriz induzida obedece a uma lei harmônica cuja amplitude é:

$$E_{máx.} = N.\omega.B.A$$

(equação 3.15)

Em função do tempo, a força eletromotriz induzida tem a representação cartesiana dada na figura 4.3 (figura da direita). A mudança de sinal da força eletromotriz significa fisicamente

que ela muda de polaridade, impulsionando uma corrente elétrica ora em um sentido, ora em sentido oposto.

Uma força eletromotriz que muda de polaridade periodicamente é designada como força eletromotriz alternante; no caso presente, trata-se de uma *força eletromotriz alternante harmônica*.

A força eletromotriz que impele a corrente em nossas instalações elétricas domiciliares é do tipo alternante harmônica; em São Paulo, a força eletromotriz eficaz é igual a 110 volts.

4. Materiais e Métodos

Nosso dispositivo foi construído apenas com materiais de baixo custo, que são listados a seguir, e ele é mostrado na figura 4.2.

4.1 – *Materiais*

Os materiais utilizados foram:

- Discos de vinil – para os suportes dos ímãs e bobinas;
- Quatro ímãs de discos rígidos (HD) de computadores – devido ao intenso campo magnético por ele gerado;
- Fios de cobre (28 gage) – para a construção das quatro bobinas (350 voltas cada uma);
- Cola quente (silicone) – para colar as bobinas no vinil e outros materiais;
- Pás de ventilador caseiro – para utilizar como pás (que giram com o movimento da água ou vento);
- Fita isolante – para fixar as espiras nas bobinas;
- LED - para mostrar a corrente elétrica gerada;
- Multímetro – para calcular d.d.p. nos terminais do LED e medidas;
- Haste de madeira – para o eixo de rotação das pás e ímãs;
- Junta de estante desmontável – para fixar as pás e o eixo de rotação;
- Galão de cloro (5L) - para o “corpo” do aparato.
- Garrafa pet 2L para fazer o bocal (para que não molhe as bobinas e ímãs).

4.2 – Métodos

A construção do dispositivo foi iniciada pelo disco que contém as bobinas que foram feitas com os fios de cobre, com 350 espiras (voltas) cada uma. Anteriormente, foi feito um disco com bobinas de 200 voltas, mas resolvemos fazer outro com bobinas de 350 voltas para obtermos melhor efeito de indução. Essas bobinas são ligadas em série entre si (ver figura 4.1) e seus terminais são ligados ao LED. As bobinas foram feitas enrolando o fio de cobre em uma haste circular de papelão com aproximadamente 1,5 cm de diâmetro e depois de dadas as 350 voltas para cada bobina, sem contar o fio, a haste foi retirada restando apenas as bobinas ligadas em série, com intervalo de aproximadamente 5 cm de fio. Para o tal, foi recortado um círculo em um disco de vinil com 10 cm de diâmetro. Essas bobinas, juntas, têm uma resistência de 26,2 Ω .



Figura 4.1 – esquema do sentido das bobinas

Um outro círculo de 10 cm de diâmetro foi feito de outro disco de vinil, e neles foram fixados com fita adesiva os quatro ímãs de HD em 4 extremidades desse círculo, sendo que seus pólos ficaram alternados (as bobinas também têm sentidos alternados). Esses ímãs são girados pelo eixo de rotação do sistema, que são girados pelo movimento das pás giradas pela água (ou vento).

A figura a seguir mostra o dispositivo já montado.



Figura 4.2 – foto do dispositivo montado

Para a construção das pás (ver figura 4.3), utilizamos pás de ventilador recortadas com tesoura. São oito pás no total e são unidas por uma junta de estante desmontável (um objeto cilíndrico e leve de plástico), coladas com cola quente.

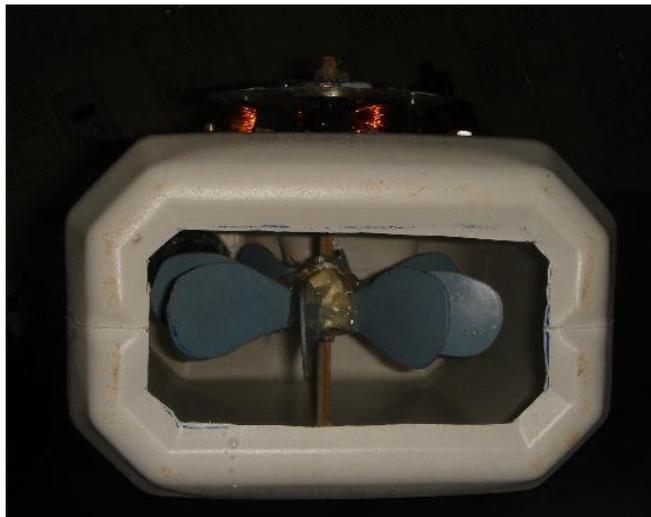


Figura 4.3 – visão de baixo do dispositivo para ver as pás giratórias

5. Análise de dados

Para caracterizarmos nosso dispositivo, fizemos várias medidas de voltagem nos terminais do LED. Com água, fixamos vários fluxos em diferentes alturas. Filmamos o disco que contém os ímãs girando para passar no computador em slowmotion para podermos contar a frequência de rotação do disco, pois somente a olho nu não era possível. Isso foi feito da seguinte forma: sabíamos o tempo do vídeo e contamos quantas voltas o disco deu durante todo o vídeo, depois dividimos o número de voltas pelo tempo de vídeo e assim obtemos a frequência de rotação. Esses valores são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 1 – Valores da voltagem nos terminais do LED em volts e suas respectivas frequências angulares em voltas por segundo. Valores obtidos com água.

Frequência de Rotação W (voltas/s)	Voltagem no LED (V)
2,79	0,5
2,96	0,5
4,09	0,7
3,94	0,7
4,28	0,8
4,28	0,8
4,66	0,8
4,71	0,9
5,40	1,0
5,59	1,0
5,93	1,1

A tabela a seguir mostra os mesmos valores, porém obtidos com vento, utilizando um secador de cabelos.

Tabela 2 - Valores da voltagem nos terminais do LED em volts e suas respectivas frequências angulares em voltas por segundo. Valores obtidos com vento.

Frequência de Rotação W (voltas/s)	Voltagem no LED (V)
1,40	0,1
1,76	0,2
1,89	0,3
3,21	0,5
3,84	0,7
4,36	0,8

Esses valores foram plotados em um só gráfico de frequência angular W (voltas/s) por voltagem, obtidas nos terminais do LED (V).

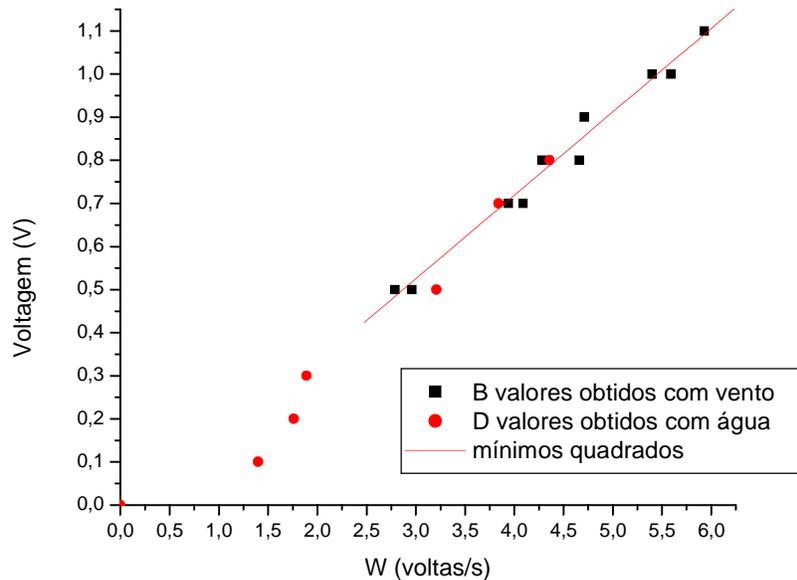


Figura 5.1 – voltagem medida em função da frequência angular para água e vento.

Observamos da figura 5.1 a dependência linear entre as grandezas, em acordo com a equação 3.15.

A seguir, mostramos uma tabela com valores da potência gerada em função da tensão medida nos terminais do LED. Esses valores de potência foram obtidos a partir da equação $P = V^2/R$.

Tabela 3 – valores de voltagens medidas em função da potência gerada.

Voltagem (V)	Potência gerada (mW)
0,1	0,38
0,2	1,52
0,3	3,44
0,5	9,54
0,7	18,70
0,8	24,40
0,9	30,92
1,0	38,17
1,1	46,18

Com os valores da Tabela 3, plotamos o gráfico a seguir.

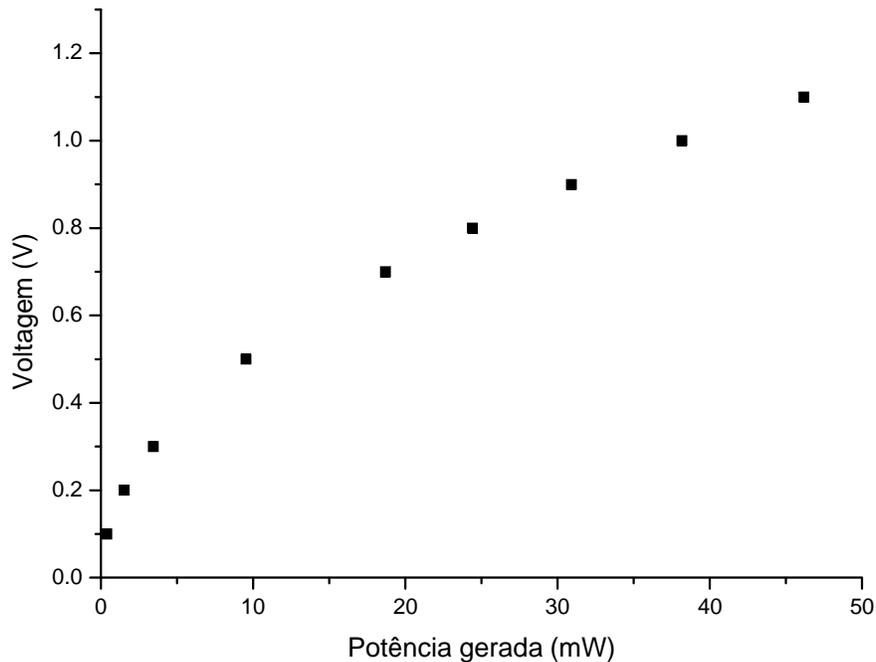


Figura 5.2 – potência gerada em função da voltagem medida

A energia potencial é transformada em energia elétrica durante o processo. A energia potencial pode ser estimada a partir da altura da qual deixamos cair a massa de água ($E_p = mgh$). Isso pode ser associado a um fluxo líquido de água atingindo as pás. No segundo caso, quem proporciona a energia é o fluxo de ar gerado, pelo secador de cabelos, por exemplo. A distância entre secador e o sistema determina a variação do fluxo.

Uma maneira de estimar o rendimento do dispositivo é o de estabelecer alguma relação entre os fluxos (de água e de ar) com a potência de saída calculada no nosso sistema. Para estimar o rendimento do dispositivo utilizamos os dados obtidos com a água. Como temos vários valores de fluxo de água relacionados com diferentes alturas, e conseqüentemente diferentes voltagens de saída, podemos calcular a energia potencial por segundo que da água que é transformada em energia cinética das pás giratórias, que transformam em energia elétrica quando movimentam os ímãs próximos às bobinas. Assim, podemos comparar a energia potencial por segundo que colocamos no sistema com a potência de saída, que também é uma energia por segundo. Para isso, utilizamos os dados mostrados na tabela a seguir.

Tabela 4 – Valores da energia potencial por segundo cedida ao sistema, valores das potências geradas associadas e rendimento.

Ep/s (W)	Voltagem	Potência gerada (mW)	Rendimento (%)
0,41	0,7	18,70	4,56
0,30	0,5	9,54	3,18
0,70	0,9	30,92	4,42
0,50	0,8	24,40	4,88
0,80	1,0	38,17	4,77
0,58	0,8	24,40	4,21
0,31	0,5	9,54	3,08
0,43	0,7	18,70	4,35
0,55	0,9	30,92	5,62
0,67	1,0	38,17	5,70
0,79	1,1	46,18	5,84
0,63	1,0	38,17	6,05
0,49	0,8	24,40	4,98
0,36	0,7	18,70	5,19

6. Conclusões

A baixa eficiência do sistema é explicada pelo fato de ser necessária muita energia para fazer com que as pás girem, pois estas têm grande momento de inércia devido à sua massa, peso e geometria. Também contribuem para isso, o atrito entre o eixo e as paredes do galão, causado pelo peso do conjunto pás-eixo-ímãs. Há também as partículas de água ou vento que geram turbulência no interior do galão, atrapalhando a rotação e que sofrem colisões não elásticas.

Como podemos ver dos gráficos acima, o sistema se comporta da mesma maneira em ambos os casos (água ou vento), portanto, a energia eólica (do vento) deve ser da mesma ordem de grandeza da energia potencial da água. Isto implica em determinar a velocidade do vento necessária para obter esta energia eólica.

Assim, teríamos:

$$m_{\text{água}} \cdot g \cdot h = 1/2 m_{\text{vento}} \cdot v_{\text{vento}}^2$$

então,

$$v_{\text{vento}} = (2 \cdot g \cdot h \cdot m_{\text{água}} / m_{\text{vento}})^{1/2}$$

7. Referências

- [1] *Tipler, Paul*. Eletricidade e Magnetismo. 3ª Edição. 1995;
- [2] Revista Exame nº25, 20 de dezembro. 2006;
- [3] site da CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica –RS);
- www.cee.com.br
- [4] M. R. Patel, Wind and Solar Power Systems, CRC Press (1999)
- [5] site da CESP (Companhia Energética do Estado de São Paulo)
- www.cesp.com.br