

EUTRO À TERRA

Revista Técnico-Científica

<http://www.neutroaterra.blogspot.com>

Voltámos à vossa presença com a vigésima primeira edição da nossa revista semestral. Este semestre um pouco mais tarde que o habitual, pois os afazeres dos responsáveis pela edição da revista no fim de um ano letivo são sempre muitos e complicados. No entanto, entendemos que a qualidade dos artigos publicados nesta edição seguramente que compensarão a curiosidade e o interesse de todos os nossos habituais leitores, que nos privilegiam com o seu interesse desde o início das nossas publicações. Já são 11 anos em que sem interrupções honramos o compromisso que temos convosco.

José Beleza Carvalho, Professor Doutor



Máquinas e Veículos Elétricos



Produção, Transporte e Distribuição Energia



Instalações Elétricas



Telecomunicações



Segurança



Gestão de Energia e Eficiência Energética



Automação, Gestão Técnica e Domótica

Página deixada intencionalmente em branco!

Índice

- Editorial	5
- Máquinas Elétricas de Corrente Contínua. Reação Magnética do Induzido e Comutação. José António Beleza Carvalho	9
- A Tecnologia LED nas Redes de Iluminação Pública. Resultados de um Caso Prático. Madalena Camões, Teresa Nogueira	23
- Comparação de Tecnologias em Veículos Automóveis António Carvalho de Andrade	29
- Conceção de um sistema fotovoltaico híbrido. Térmico e elétrico. José Maurício, Teresa Nogueira	37
- Reforço de potência de Venda Nova III Nuno Eduardo Ribeiro	43
- Energy Storage in isolated electrical system. Miguel Miguel; Teresa Nogueira; Florinda Martins	51
- Mechanical power remote transmission António Quadros Flores	61
- Desenvolvimento do ARS Simulator. Seleção de comercializadores de energia. Allon Soares da Silva; Rodrigo Luiz Joench; Samuel Sandmann Cembranel; Judite Ferreira	69
- iTCalc. Desenho e Cálculo de Infraestruturas de Telecomunicações Hélder Martins; Sérgio Filipe Carvalho Ramos	75
- Autores	79

FICHA TÉCNICA

DIRETOR:	José António Beleza Carvalho, Doutor
SUBDIRETORES:	António Augusto Araújo Gomes, Eng. Roque Filipe Mesquita Brandão, Doutor Sérgio Filipe Carvalho Ramos, Doutor
PROPRIEDADE:	Área de Máquinas e Instalações Elétricas Departamento de Engenharia Electrotécnica Instituto Superior de Engenharia do Porto
CONTATOS:	jbc@isep.ipp.pt ; aag@isep.ipp.pt
PUBLICAÇÃO SEMESTRAL:	ISSN: 1647-5496

Página deixada intencionalmente em branco!

Estimados leitores

Voltámos à vossa presença com a vigésima primeira edição da nossa revista semestral. Este semestre um pouco mais tarde que o habitual, pois os afazeres dos responsáveis pela edição da revista no fim de um ano letivo são sempre muitos e complicados. No entanto, entendemos que a qualidade dos artigos publicados nesta edição seguramente que compensarão a curiosidade e o interesse de todos os nossos habituais leitores, que nos privilegiam com o seu interesse desde o início das nossas publicações. Já são 11 anos em que sem interrupções honramos o compromisso que temos convosco.

Ao longo dos últimos anos o interesse pela nossa revista foi crescendo gradualmente, destacando-se o aumento da procura por parte de leitores de países estrangeiros. Este facto leva-nos a publicar com alguma regularidade artigos em língua Inglesa, especialmente os de carácter mais científico. Nesta edição publicamos dois artigos em língua Inglesa, um intitulado “Energy Storage in Isolated Electrical System”, baseado num estudo efetuado na ilha da Madeira que analisa os benefícios técnicos e ambientais com a introdução de baterias para fortalecer a rede de energia elétrica, quantificando o impacto das baterias nas tecnologias existentes de energia eólica e termoelétrica.

Outro artigo publicado em língua Inglesa, intitulado “Mechanical Power Remote Transmission”, pretende de uma forma simples e clara associar à transmissão remota de energia os fenómenos eletromagnéticos que justificam a conversão eletromecânica de energia, na forma que ela é atualmente obtida e utilizada.

Nesta edição merecem particular destaque os assuntos relacionados com as máquinas elétricas, os veículos elétricos, as energias renováveis, as infraestruturas de telecomunicações, e um artigo sobre redes de iluminação pública baseados nas tecnologias inerentes às lâmpadas LED.

Outro assunto muito interessante publicado nesta edição da nossa revista, tem a ver com o projeto de reforço de potência da central de Venda Nova, intitulada Venda Nova III. Nesta central foram instalados dois grupos assíncronos de indução, reversíveis com uma potência de cerca 495 MVA cada. Neste artigo apresentam-se os principais passos do desenvolvimento do projeto que, neste âmbito, foi inovador a nível mundial.

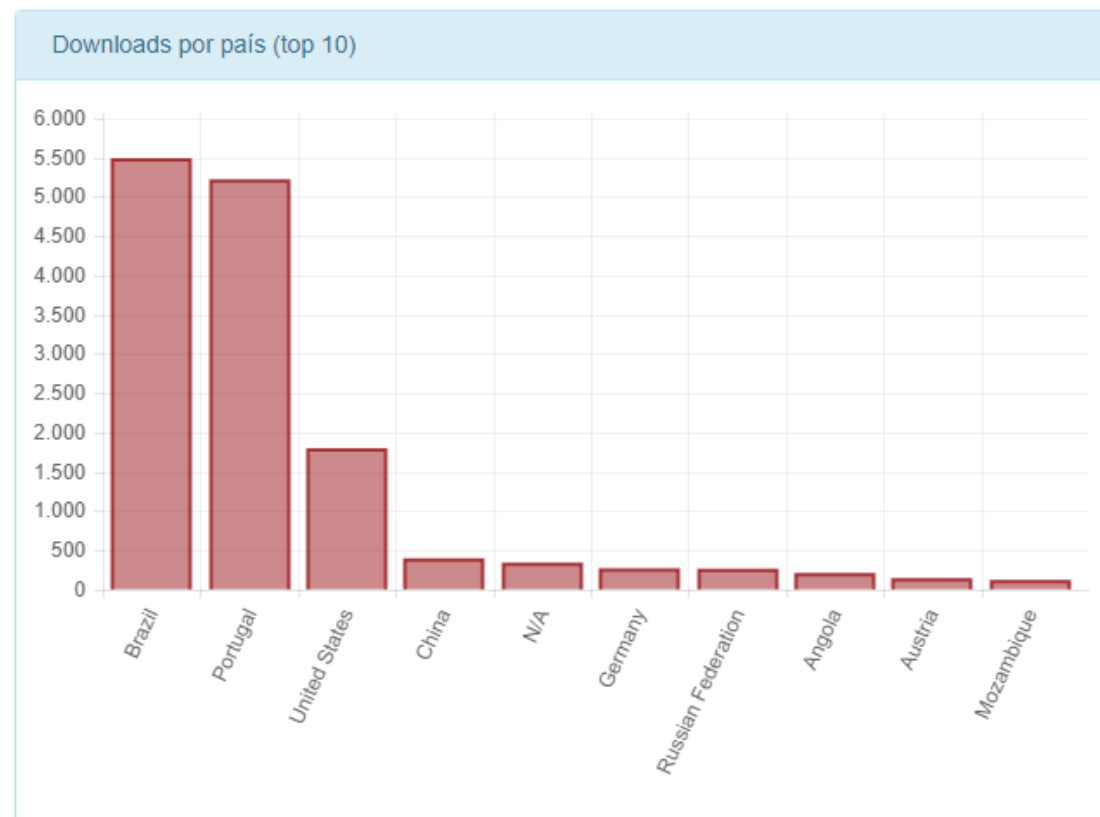
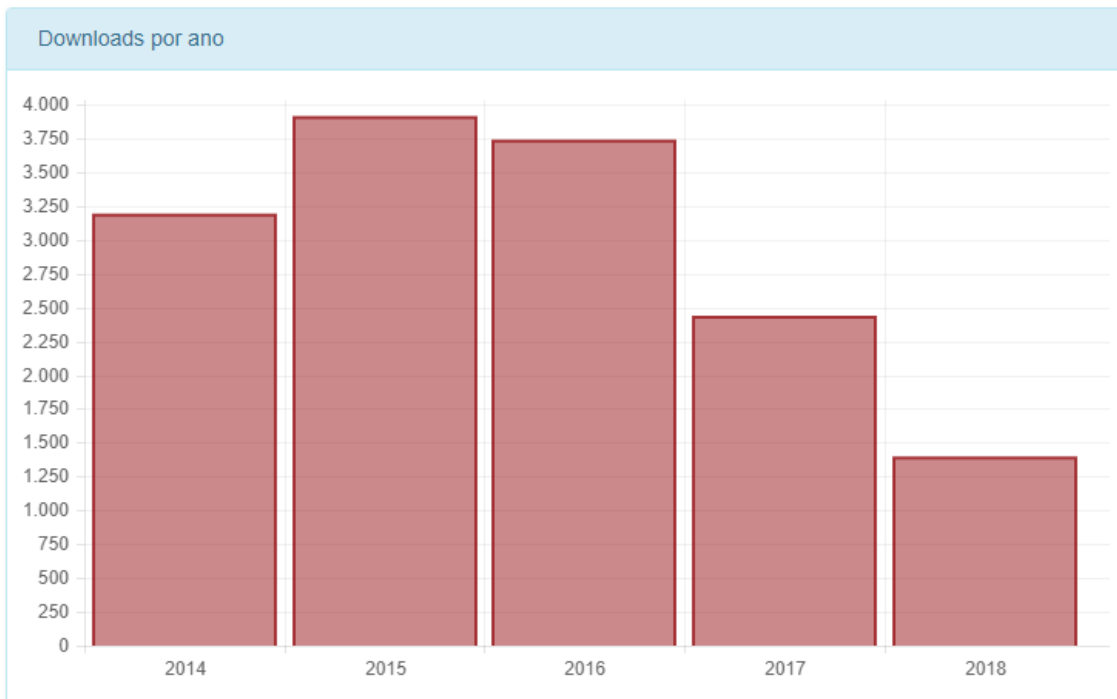
Fazendo votos que esta edição da revista “Neutro à Terra” vá novamente ao encontro das expectativas dos nossos leitores, estes semestre um pouco mais tarde que o habitual, apresento os meus cordiais cumprimentos.

Porto, julho de 2018
José António Beleza Carvalho

Página deixada intencionalmente em branco!

Repositório Científico do Instituto Politécnico do Porto:

<http://recipp.ipp.pt/>



Blog:

www.neutroaterra.blogspot.com

Histórico de visualizações

30 776

Entrada	Visualizações de páginas
Portugal	23038
Estados Unidos	2728
Brasil	1714
Alemanha	454
França	432
Rússia	379
Angola	204
Reino Unido	171
Ucrânia	162
Espanha	119



MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE CONTÍNUA

REAÇÃO MAGNÉTICA DO INDUZIDO E COMUTAÇÃO

1. Introdução

Na máquina elétrica de corrente contínua (máquina DC) vai manifestar-se a existência de dois campos magnéticos que vão compor-se entre si originando um campo resultante no entre ferro da máquina, cuja amplitude direção e sentido tem fortes consequências no funcionamento da máquina, particularmente no que diz respeito ao fenómeno da comutação da máquina de corrente contínua.

Estes campos magnéticos são devidos à excitação do circuito indutor e do circuito induzido da máquina. A excitação do circuito indutor e o respetivo campo magnético obtido, são uma condição fundamental para o funcionamento desta máquina elétrica. Quando não existe corrente no induzido (ou armadura) da máquina DC, o campo magnético na máquina são devidos apenas à excitação magnética do



circuito indutor principal da máquina, como se apresenta na Figura 1.

Este campo apresenta-se na máquina numa direção longitudinal ao entre ferro da máquina. É denominado campo indutor principal, ou campo longitudinal da máquina DC.

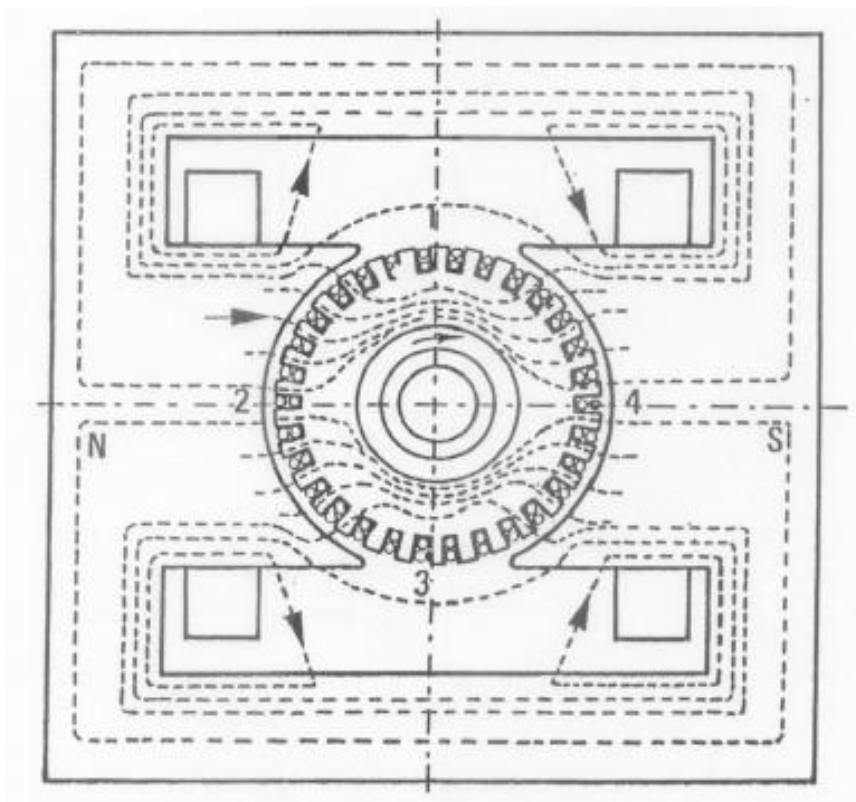


Figura 1. Campo indutor principal da máquina DC. Percurso das linhas de força do campo magnético

Na Figura 2 apresenta-se a variação deste campo ao longo do entre ferro da máquina.

Este campo é responsável pela manifestação da força eletromotriz em vazio da máquina DC.

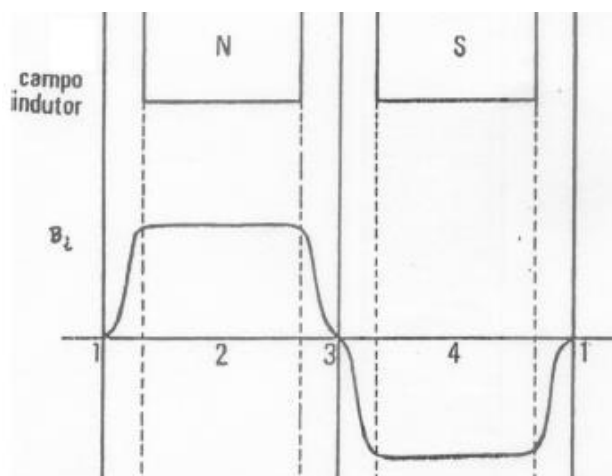


Figura 2. Variação no entre ferro do campo indutor principal da máquina DC

Quando a máquina DC se encontra em carga, flui corrente elétrica no circuito induzido da máquina. Esta corrente originará a excitação magnética do induzido, ou armadura, que se apresentará numa direção perpendicular ao campo indutor principal, que resulta na denominação de reação magnética do induzido ou reação transversal do induzido ou armadura.

A Figura 3 apresenta o campo magnético na máquina DC na hipotética situação de só existir corrente no induzido da máquina.

2. Campo de reação do induzido

Para fazer-se o estudo prático deste campo, admite-se que se faz passar através do induzido a corrente que lá passaria em carga sem que no entanto exista qualquer campo indutor. Deste modo o único campo a assinalar na máquina será o campo de reação do induzido, como se apresenta na Figura 3.

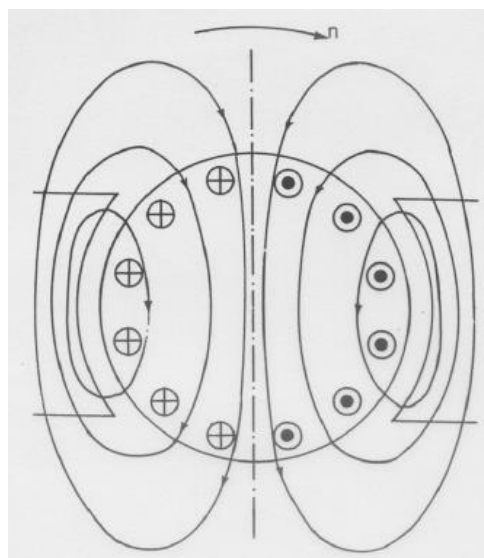


Figura 3. Campo magnético produzido pela reação do induzido na máquina DC

O campo do induzido cujas linhas de força têm o aspeto de feijões, tem, no entre ferro, valor nulo na linha dos pólos, como facilmente se conclui reparando que acima dessa linha o campo tem um dado sinal e abaixo um sinal contrário, como se pode ver na Figura 4. Verifica-se assim, que em metade do pólo o campo de reação do induzido reforça o campo indutor principal e, na outra metade, atenua o campo indutor principal.

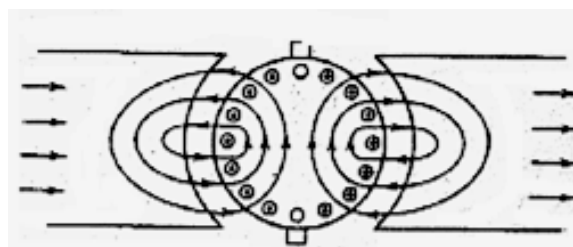


Figura 4. Sentido do campo magnético produzido pela reação do induzido

Partindo do ponto dois da Figura 5, por exemplo, à medida que se aproxima da aresta da expansão polar cada vez será maior a densidade do fluxo, pois que agora cada vez serão em maior número os condutores cujas correntes originarão esse campo.

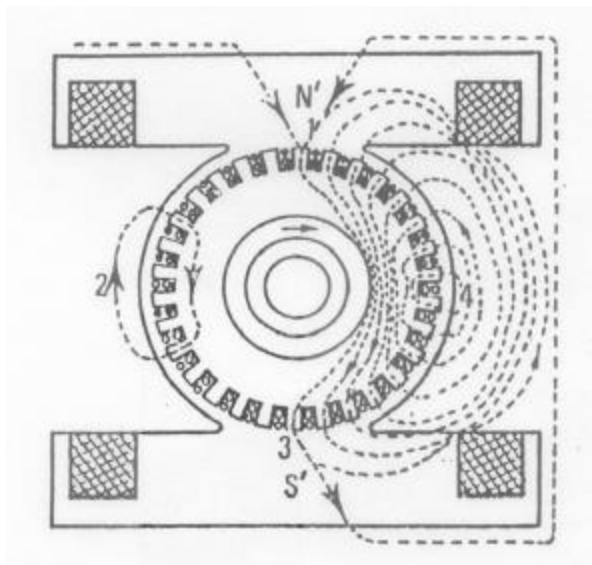


Figura 5. Campo reação do induzido da máquina DC.
Percurso das linhas de força do campo magnético.

De dois até aresta tem-se então um aumento. A partir desta o campo volta a diminuir, pois que embora haja mais condutores em ação, agora as linhas de força são abrigadas a fechar-se, através de um maior entre ferro aumentando consequentemente a relutância e diminuindo a indução. Na linha neutra em vazio, agora já não se pode considerar um campo nulo, como no caso do campo indutor principal, pois não há inversão do sentido dos campos. A variação do campo de reação do induzido tem no entre ferro o aspeto do diagrama representado na Figura 6.

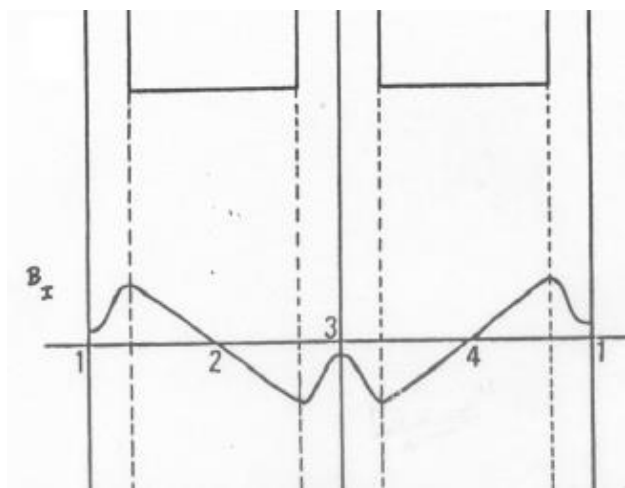


Figura 6. Variação no entre ferro do campo reação do induzido da máquina DC

3. Campo resultante

Considerando agora a presença simultânea dos dois campos magnéticos, vai haver uma nova distribuição das linhas de força, constituindo o campo magnético resultante, como se pode ver na Figura 7. Nas zonas entre 1 e 2, e entre 3 e 4 os dois campos têm o mesmo sinal e então o campo resultante aparecerá reforçado, enquanto que nas zonas 2-3 e 4-1, os campos opõem-se resultando um abaixamento do campo nestas regiões.

Com estas alterações a linha neutra (linha fronteira entre o campo que entra e o que sai do induzido) deixa a posição que tinha em vazio. Aparece uma nova linha neutra, a linha neutra em carga, que como se observa pela composição dos campos magnéticos, aparece deslocada da anterior no sentido do movimento do induzido (ver os novos zeros do campo resultante na Figura 8). Ao longo do entre ferro, o campo resultante obter-se-á, somando para cada abcissa o valor das ordenadas dos campos parciais. Na curva resultante, verifica-se o reforço do campo nas arestas de saída dos pólos e o enfraquecimento nas arestas de entrada dos pólos.

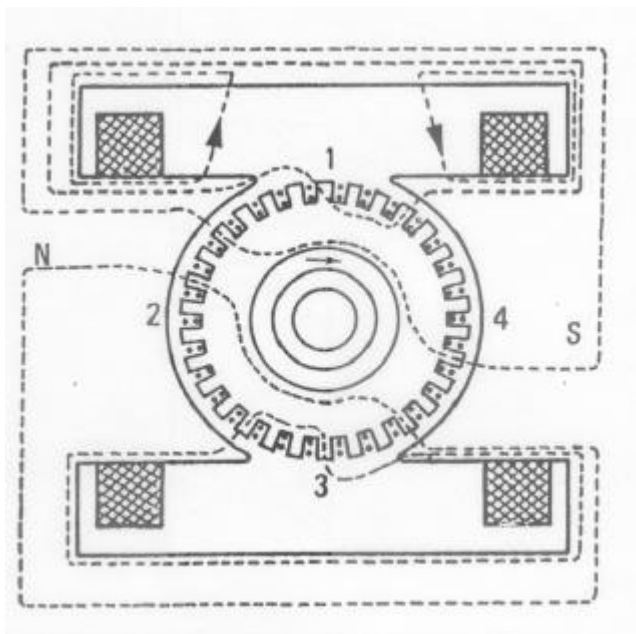


Figura 7. Campo resultante na máquina DC

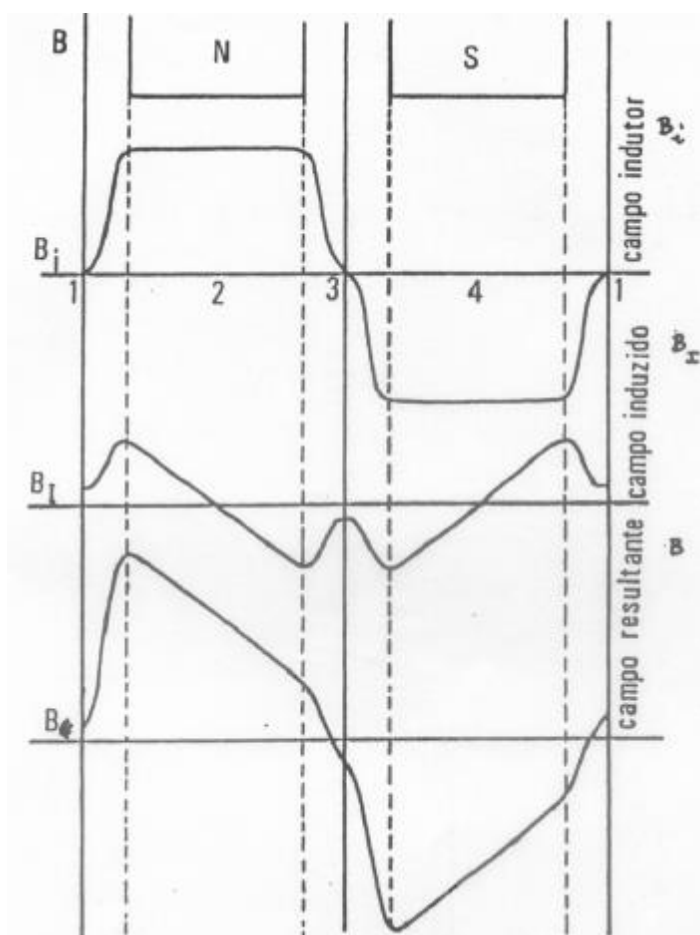


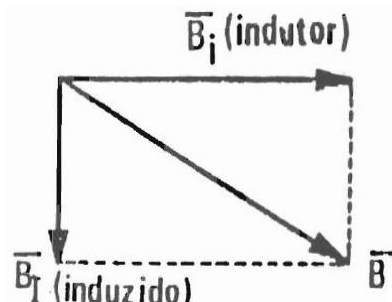
Figura 8. Composição dos campos magnéticos e campo resultante na máquina DC

Se a máquina fosse um motor, como para o mesmo sentido de rotação as correntes no induzido teriam sentido oposto, o reforço dos campos dar-se-á nas arestas de entrada e o enfraquecimento nas arestas de saída.

O reforço dos campos, ao produzir maiores forças eletromotrizes, cria maior diferença de potencial entre secções e, conseqüentemente, entre lâminas do coletor. Isto pode causar o aparecimento de arcos elétricos entre lâminas, se o coletor não estiver em boas condições de funcionamento.

Representando por um vetor o campo indutor e por outro vetor o campo do induzido, verifica-se a perpendicularidade entre os dois. Tudo se passa como se surgissem dois novos pólos fictícios N' e S' , que representam a reação do campo do induzido.

Dada a posição perpendicular do campo de reação do induzido, resulta na denominação deste campo, campo de reação magnética do induzido ou reação transversal do induzido ou armadura.



Este campo terá um sentido de acordo com o movimento de rotação do induzido.

O campo resultante será a soma vetorial dos dois, aparecendo as linhas neutras perpendiculares aos respectivos vetores.

4. Influência da saturação magnética

Na curva das induções ao longo do entre ferro soma-se ordenada por ordenada as induções parciais dos campos indutor e induzido. Ora este processo nem sempre é lícito. Quando existem correntes no indutor e no induzido manifesta-se uma excitação indutora e uma excitação induzida e a excitação total será em cada ponto a soma algébrica das duas; porém, para se passar de excitação para indução, há que contar com a permeabilidade do material e esta pode não ser constante quando varia o valor da excitação H . Supor que o material da expansão polar tem uma curva de magnetização como se apresenta na Figura 9.

Seja a excitação indutora H_i e a excitação do induzido H_l , a que correspondem separadamente as induções B_i e B_l . Nas zonas em que os campos se somam (arestas de saída dos pólos) as excitações também se somam, sendo a excitação total $H_t = H_i + H_l$. Porém, a esta excitação H_t corresponde uma indução B_t , bastante inferior ao valor da soma das duas

induções parciais B_i+B_I . Este facto verifica-se porque a excitação total $H_t=H_i+H_I$ é superior à de saturação e, como tal, vai apanhar a curva de magnetização ou ciclo histerético já na parte menos ascendente. Evidentemente que se não se atingir a curva da saturação, mantendo-se na zona linear, é perfeitamente lógico que se some os campos parciais para se obter o campo total.

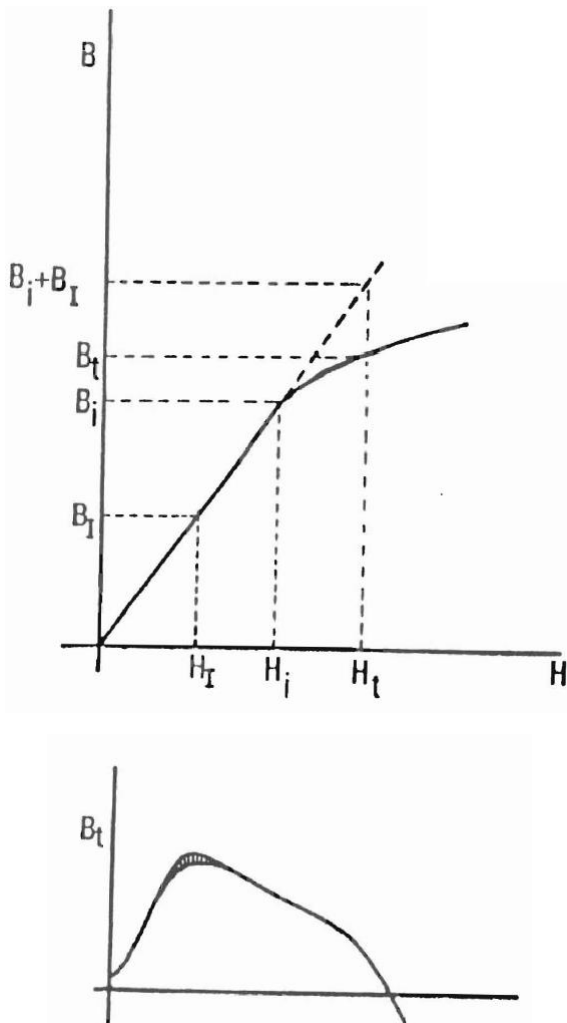


Figura 9. Efeito da saturação devido ao campo de reação do induzido na máquina DC

Pode-se assim constatar que se for atingida a saturação nas zonas das arestas de saída dos pólos em que os campos se somam, aparecerá uma indução inferior à soma das parciais e na curva resultante haverá que registar um abaixamento do valor da indução máxima, com se pode ver na Figura 9.

Assim, sem saturação, o fluxo de reação do induzido que se soma ao do indutor em metade do pólo vai subtrair-se na outra metade e o fluxo resultante será igual ao fluxo em vazio (apenas devido ao campo indutor). Se houver saturação isto já não é verdade e o que se subtrai é mais do que o que se soma, diminuindo o fluxo resultante.

A diminuição do fluxo provoca a diminuição da força eletromotriz gerada pela máquina, consequência importante de haver saturação no ferro das expansões polares ou dos dentes da armadura.

Em resumo, as principais consequências da reação magnética do induzido ou armadura, são:

- Distorção do campo magnético na máquina;
- Deslocamento da linha neutra da máquina;
- Abaixamento do valor da força eletromotriz, se houver saturação;
- Maior diferença de potencial entre lâminas do coletor, na zona de reforço dos campos magnéticos.

5. Modificação da posição das escovas

Até agora tem-se considerado as escovas a curto-circuitar as secções que estão a passar na linha neutra em vazio. Ao variar-se a posição das escovas, altera-se a distribuição das correntes no induzido e conseqüentemente o campo de reação do induzido.

Como exemplo, vai-se supor o induzido de um dínamo com as escovas na linha neutra em vazio, como se apresenta na Figura 10. Nela suprimem-se as ranhuras, considerando-se apenas um condutor a representar todos os condutores alojados na ranhura e colocam-se as escovas diretamente sobre os condutores a que realmente estão ligadas através do coletor.

Desloque-se as escovas de um certo ângulo no sentido do movimento. Houve uma alteração na distribuição das correntes segundo o novo esquema apresentado na Figura 10.

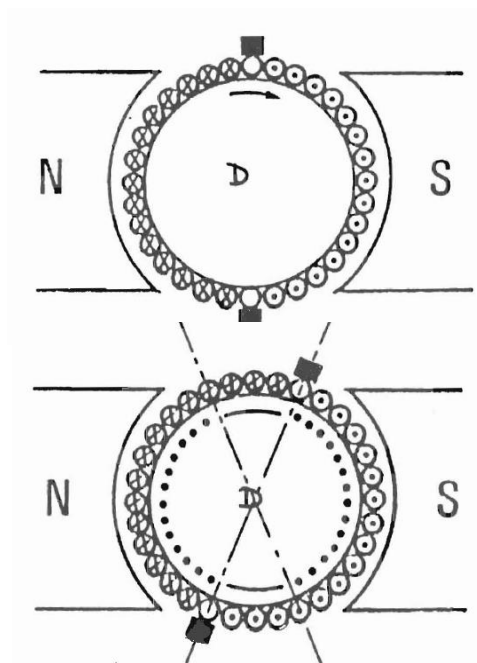


Figura 10. Modificação da posição das escovas na máquina
DC

A direção do campo de reação do induzido, agora já não aparecerá segundo a perpendicular ao indutor, mas segundo uma linha, que é a nova linha das escovas. Querendo, podemos decompor este campo em dois. Um perpendicular ao indutor, a que se chama campo de reação transversal do induzido, e outro colinear com o indutor, que se chama campo de reação longitudinal do induzido. Será responsável pelo primeiro destes campos, os condutores marcados no setor a pontuado, e pelo segundo o dos setores a cheio. O diagrama vetorial será o da figura 11.

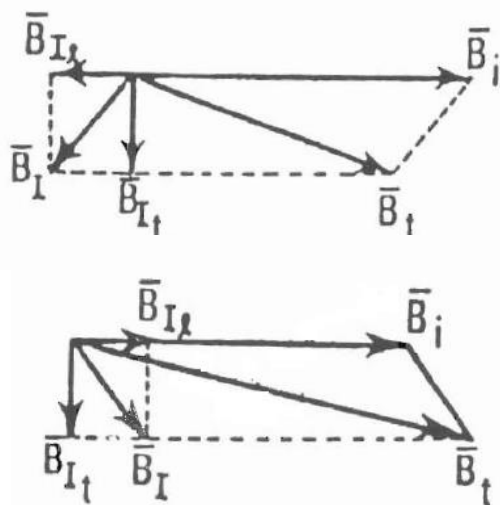


Figura 11. Diagrama fasorial

Se o deslocamento das escovas em vez de ser feito no sentido do movimento fosse no sentido contrário ao do movimento, os condutores dos setores a cheio apareciam percorridos por correntes de sentidos contrários aos do caso anterior e então o sentido do campo de reação longitudinal, em vez de ser de oposição ao do indutor, como se viu antes, aparecia a reforça-lo tal como mostra a figura acima apresentada.

Ao verificar-se que a deslocação das escovas no sentido contrário ao do movimento vai aumentar o valor do campo resultante pode pensar-se que essa é uma boa solução, porém, não é assim pois prejudicaria muito a comutação, ponto esse essencial ao bom funcionamento da máquina.

Se a máquina funcionar como motor, as correntes têm o sentido inverso para o mesmo sentido de rotação, logo as conclusões quanto à deslocação das escovas são inversas quanto à situação do funcionamento como dínamo.

Uma das formas de eliminar, ou pelo menos atenuar o efeito da reação magnética do induzido, é utilizar enrolamentos de compensação nas superfícies das massas polares. Este enrolamento é o prolongamento da bobinagem do induzido e, portanto, percorrido pela corrente que circula no induzido e que origina a respetiva reação magnética do mesmo. Este facto, permite que o enrolamento de compensação crie um campo de igual amplitude e com polaridade que permite anular o de reação magnética do induzido, como se pode ver na figura 12.

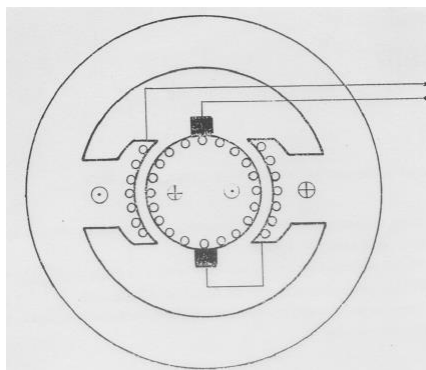


Figura 12. Utilização de enrolamentos de compensação nas
superfícies das massas polares

6. Comutação

O fenómeno da comutação verifica-se quando uma secção passa duma via para a via seguinte e em que, portanto, o sinal da intensidade de corrente que a percorre se inverte. O estudo da comutação é dos mais complexos nas máquinas de corrente contínua e o cálculo duma máquina que apresente boa comutação é uma das preocupações dos construtores.

Considere-se um troço de enrolamento de um dínamo que inclua uma secção em comutação, como se apresenta na Figura 13.

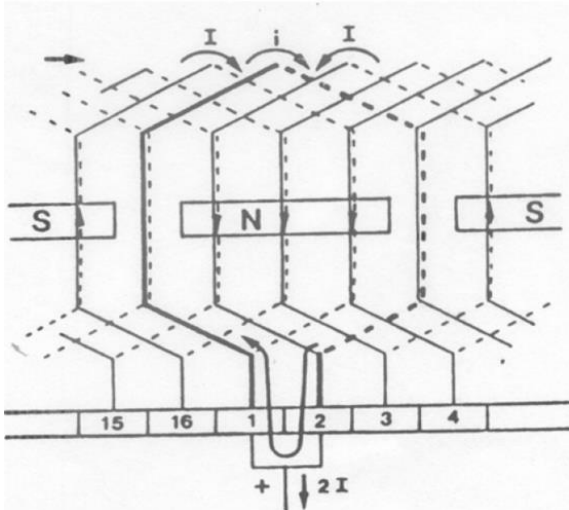


Figura 13. Secção em comutação na máquina DC

Supõe-se que as várias secções figuradas, representam as sucessivas posições tomadas pela secção no seu movimento de rotação. Verifica-se que antes da comutação a secção é percorrida por uma corrente com um determinado sentido e após a comutação quando entra na outra via será percorrida por uma outra corrente igual e de sentido contrário. Enquanto se encontra curto-circuitada pela escova, na secção circula uma corrente i , variável entre o valor da corrente numa via e o valor da corrente na via seguinte, isto é, se fixarmos o primeiro dos sentidos como positivo será entre $+I$ e $-I$.

Relativamente à corrente $2I$ colhida na escova a corrente i não influirá, pois que se vai somar dum lado e subtrair do outro. O estudo do modo como varia a corrente de circulação i , na secção em comutação, é fundamental para o estudo deste fenómeno da comutação.

7. Comutação ideal

Na comutação ideal (ou linear) a que corresponde o diagrama da Figura 14 admite-se uma variação uniforme da intensidade de corrente que percorre a secção desde $+I$ a $-I$. Então, as ordenadas dessa reta indica-nos o valor da corrente i na secção em comutação.

Para cada instante t pode-se saber os valores das correntes convergentes para a escova, respetivamente $I+i$ e $I-i$. Admitindo o induzido a girar com uma velocidade constante, as abcissas de cada ponto considerado serão proporcionais às superfícies de contacto escova-lâminas da secção em comutação.

Assim no instante t , σ_1 indicará a área de contacto da escova com a lâmina 1 e σ_2 a referida área de contacto com a lâmina 2. Como se vê pelo diagrama, quando a lâmina 2 larga a escova (instante T) já na secção em comutação a corrente atingiu o valor $-I$ que vai ter quando pertencer à nova via. Tudo se passaria, assim, sem variações bruscas nem quaisquer outros problemas.

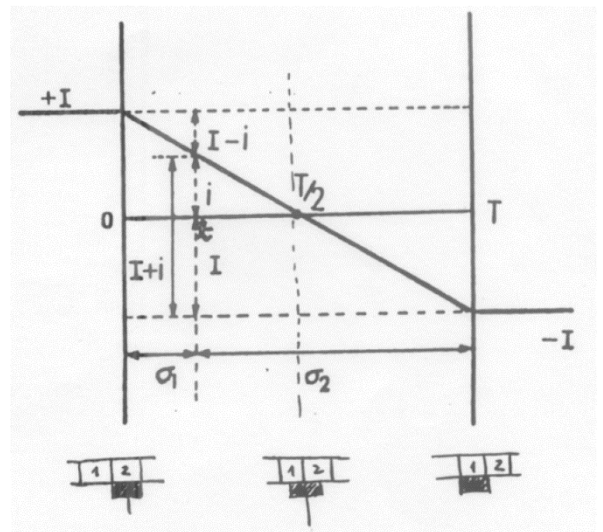


Figura 14. Comutação ideal na máquina DC

8. Comutação real

A comutação não se processa de forma linear e a prática mostra que o diagrama referente à variação da corrente i pode ter o aspeto do da Figura 15.

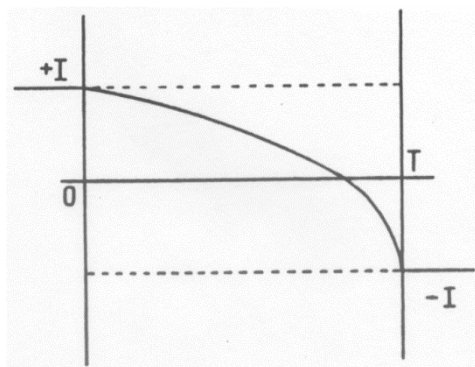


Figura 15. Comutação real na máquina DC

Na parte inicial a curva decresce mais lentamente, devido aos efeitos indutivos gerados na própria secção, para junto do final da comutação, abaixar rapidamente para o valor final $-I$. Muitas vezes este valor não é atingido no tempo T , isto é, até no instante em que a lâmina deixa a escova e então salta uma faísca entre ambos.

De facto se, quando a lâmina deixa a escova, a corrente na secção que estava em comutação ainda não atingiu o valor $-I$ (corrente na nova via onde a secção entrou) vai haver um restabelecimento brusco. Como nessa altura a lâmina deixou de estar em contacto com a escova essa igualização só pode ser feita através do ar e saltará uma faísca. No diagrama, essa variação será representada como mostra o esquema da Figura 16. O aparecimento de faíscas no coletor é indicativo de má comutação. Provoca a deterioração do mesmo, devido à formação dos arcos elétricos.

De qualquer forma, o atraso que provoca o encurvamento final significa que a corrente que passa no contacto entre a escova e a lâmina que vai largar a escova (na figura a lâmina 2) é ainda muito intensa embora o contacto superficial já seja pequeno. Logo, grandes densidades de corrente e aquecimento elevado, que pode vir a danificar o coletor.

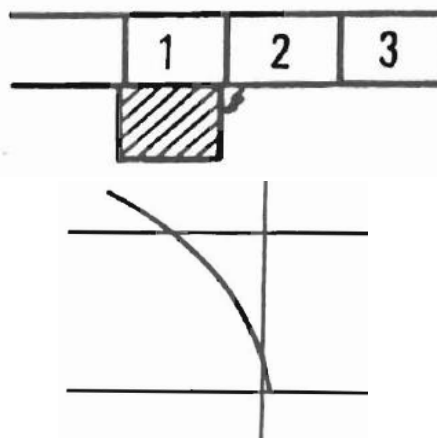


Figura 16. Comutação deficiente na máquina DC

9. Equação geral de Comutação

Para analisar convenientemente o fenómeno da comutação torna-se necessário encontrar uma equação matemática que traduza a variação da corrente i na secção em comutação. Para isso vai-se aplicar a 2ª lei de Kirchoff à dita secção em comutação. Procura-se primeiro determinar com que forças eletromotrizes (f.e.m.) vai-se ter que contar. Como estas são originadas por campos magnéticos, vai-se considerar os existentes na máquina que são o campo indutor principal e o campo de reação do induzido. O campo de reação do induzido pode-se decompor em: Campo da própria secção em comutação, campo das outras secções em comutação e campo das secções não em comutação.

Analise-se agora quais destes campos originarão f.e.m. na secção em comutação que se está a estudar. Como se sabe, para que existam forças eletromotrizes (f.e.m.) é necessário que haja uma variação do campo no espaço ou no tempo. Relativamente ao campo indutor há na realidade um deslocamento da secção durante o tempo de comutação e se o campo não for nulo, na zona em que se encontram as escovas aparecerá uma f.e.m.. O campo da própria secção em comutação e criado pela corrente i que lá passa que, sendo variável, criará uma f.e.m. de auto-indução dada pela conhecida expressão:

$$-L \frac{di}{dt}$$

O campo das secções não em comutação é afinal, aquele que foi considerado no estudo da reacção do induzido e que na zona de comutação terá um certo valor, embora pequeno.

Como a corrente nas secções não em comutação é constante, a distância entre secções também é constante, só haverá f.e.m. por variar o meio devido à expansão polar. Porém, pelo que se disse, incluindo a pequena amplitude do campo, esta f.e.m. é de desprezar.

As outras secções em comutação sendo percorridas por correntes variáveis influenciarão a secção em estudo dum modo distinto, conforme se encontrem mais ou menos perto da secção em estudo que se encontra na comutação.

No caso do enrolamento ser diametral haverá nas mesmas ranhuras onde se encontram os lados da secção em estudo, lados de outras secções em comutação.

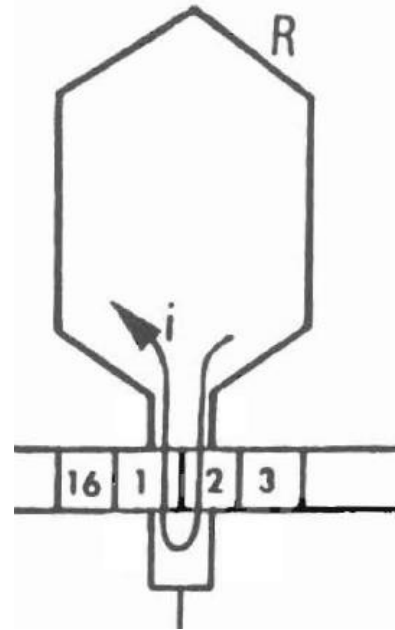
Consequentemente haverá uma forte influência mútua pelo facto dos referidos condutores se encontrarem muito próximos, podendo-se assim simplificar admitindo que o coeficiente de indução mútua é igual ao próprio coeficiente de autoindução, $M=L$.

Esta simplificação equivale a supor os lados coincidentes e então a f.e.m. de autoindução será:

$$-L \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} \cong -2L \frac{di}{dt}$$

Para se determinar a equação de *Kirchhoff* é necessário saber quais as quedas de tensão pois já se conhecem as f.e.m..

Considere-se, então, uma secção em comutação, apresentada na Figura 17 em que:



- R resistência da secção em comutação;
- r_c resistência de cada uma das pontas da secção às lâminas do coletor
- u_{11} tensão de contacto entre a lâmina 1 e a escova;
- u_{12} tensão de contacto entre a lâmina 2 e a escova.

Figura 17. Secção em comutação na máquina DC

Assim, representando-se por ε o valor da f.e.m. criada pelo campo indutor principal e pelo campo das outras secções não em comutação (à soma dos dois chama-se campo de comutação), aparecerá a equação geral da comutação:

$$\varepsilon - L \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} = Ri + 2r_c i + u_{11} - u_{12}$$

A integração desta equação diferencial é muito difícil porque se desconhece como variam as quedas de tensão u_{11} e u_{12} em função da corrente.

A sua integração tem sido feita admitindo hipóteses simplificativas.

² No diagrama está implícito que $|E_s| = |-E_r|$

10. Tensão de reactância

A Tensão de Reactância é um valor relacionado com as f.e.ms. de autoindução e de indução mútua geradas na secção em comutação e que permite avaliar a qualidade da comutação, pois como se viu são as f.e.m. mais perturbadoras da comutação.

Admitindo, que as escovas se encontram na linha neutra em carga o campo de comutação praticamente não terá influência, isto é, $\mathcal{E} = 0$. Ficarão apenas a f. e.m.:

$$-2L \frac{di}{dt}$$

Então, admitindo que \mathcal{E} é nulo, que R_t é a resistência total da secção em comutação, que as densidades de corrente nas lâminas 1 e 2 são iguais $i_{11} = i_{12}$ e que $L = M$, a equação geral de comutação é equivalente a:

$$-2L \frac{di}{dt} = R_t i \rightarrow 2L \frac{di}{dt} + R_t i = 0$$

Atendendo ao valor da corrente na secção no início da comutação ($i(0)=I$), a solução da equação é a seguinte:

$$i(t) = I e^{-(R_t/2L)t}$$

sendo T a duração da comutação, tem-se:

$$i(T) = I e^{-(R_t/2L)T}$$

A existência da f.e.m. de autoindução e de indução mútua na secção em comutação tem como consequência um valor de corrente na secção diferente de $-I$ quando a secção abandona o contacto com a escova. Quanto maior for esta diferença, mais intensas são as consequências nefastas sobre as lâminas do coletor (arcos elétricos mais intensos), logo maior o desgaste provocado no colector.

A solução para este problema passa pelo desenvolvimento na secção em comutação de uma f.e.m. de origem exterior (\mathcal{E}), que permita uma comutação aproximadamente linear como se apresenta na Figura 18.

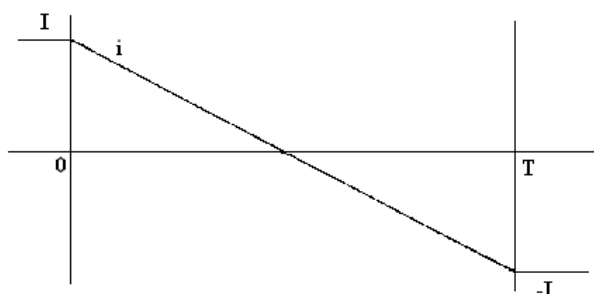


Figura 18. Comutação linear na máquina DC

A equação geral associada à secção em comutação será agora traduzida por:

$$\mathcal{E} - 2L \frac{di}{dt} = R_t i$$

Da Figura 18 pode-se obter a equação da respetiva função linear afim, e a respetiva derivada.

$$i(t) = -\frac{2I}{T}t + I \quad \frac{di}{dt} = -\frac{2I}{T}$$

Substituindo estes valores na equação geral associada à secção em comutação obtém-se:

$$\mathcal{E} - 4L \frac{I}{T} = R_t \left(-\frac{2I}{T}t + I \right)$$

Chama-se Tensão de Reactância ao valor médio da f.e.m. induzida na secção em comutação por efeito da reação do induzido, e será igual:

$$E_r \Rightarrow \mathcal{E} = 4L \frac{I}{T}$$

Foram determinados valores práticos que permitem, pelo conhecimento da tensão de reactância, saber se uma certa comutação é boa ou má. Quando a máquina não apresenta modificações especiais com vista a melhorar a comutação diz-se que tem uma Comutação Natural. Se a máquina possui dispositivos especiais para melhorar a comutação diz-se então que tem uma Comutação Artificial. Os valores práticos referidos dão as seguintes indicações:

- $E_r < 0,5 \text{ V} \rightarrow$ Comutação Natural: máquinas sem dispositivos especiais para criação de f.e.m. exterior;
- $0,5 < E_r < 1 \text{ V} \rightarrow$ Comutação natural razoável, necessário algum cuidado com a escolha das escovas;
- $E_r > 1 \text{ V} \rightarrow$ Comutação Artificial.

11. Processos para melhorar a comutação natural

• Emprego de escovas apropriadas

Já se referiu, a tensão de contacto escova-coletor era, como não podia deixar de ser, ponto fundamental no fenómeno da comutação. Verifica-se na prática que a substituição dum as escovas por outras de maior resistividade consegue, em muitos casos, melhorar suficientemente a comutação. Tal acção poderá explicar-se, sucintamente, pelo aumento da influência da resistência (fundamentalmente ter elevada resistência transversal), relativamente à influência da autoindução, no circuito da secção em comutação, isto é, o circuito fica menos indutivo. De qualquer forma, no caso de se detetar uma má comutação é sempre aconselhável verificar se as escovas em uso são as aconselhadas pelo fabricante da máquina, pois a má comutação pode ser o resultado de a máquina não estar a funcionar com as escovas apropriadas.

• Diminuição do valor da autoindução da secção em comutação

Este processo, só possível na fase de projeto das máquinas, consiste em procurar diminuir o valor da autoindução L .

Da expressão:

$$L = \frac{N^2}{R}$$

se conclui que dois caminhos se podem seguir: ou aumentar a relutância do circuito magnético da secção, ou diminuir o número de espiras. O aumento da relutância é um processo viável dentro de certos limites pois não pode ser feito de modo a aumentar a relutância do circuito magnético do fluxo indutor o que iria diminuir o valor do fluxo e, portanto, da f.e.m. Adiante, ver-se-á a importância que a forma das ranhuras adquire, relativamente a esta questão. A diminuição do número de espiras, é muito mais eficiente, pois N aparece ao quadrado. Se pretender-se do dínamo uma determinada tensão tem-se que manter um certo número de condutores ativos e, conseqüentemente, a diminuição do número de espiras por secção levará à necessidade de aumentar o número de secções. Este facto, irá tornar a máquina mais dispendiosa, por ter de se construir um maior número de secções e de lâminas no coletor.

• Utilização de enrolamentos em corda diminui a tensão de reactância: $L+M < 2L$

Com o enrolamento em corda, isto é, encurtado ou alongado, os lados das secções em comutação não ficarão na mesma ranhura, e o coeficiente de indução mútua será nitidamente inferior ao de autoindução, isto é, $L+M < 2L$ o que vai fazer diminuir a Tensão de Reactância.

12. Comutação artificial

• Calagem das escovas

Um dos processos de realizar uma melhoria na comutação consiste em deslocar as escovas de um certo ângulo (ângulo de calagem) no sentido do próprio movimento para que a f.e.m. desenvolvida na secção em comutação e devida ao campo de comutação (ϵ) se vá opor ao de autoindução com um valor suficiente para que sejam anuladas os seus efeitos (ver equação geral da comutação).

Como se pode ver raciocinando com o sentido dos fluxos esse deslocamento nos dínamos deverá ser feito no sentido do próprio movimento do induzido pois tem-se de procurar a posição em que os campos indutor e reação do induzido se oponham. Uma dificuldade surge pelo facto do campo indutor variar bruscamente, quando se aproxima a aresta de entrada dos pólos. Daí a enorme dificuldade em regular a posição das escovas, pois se avançar mais que o devido o efeito seria contraproducente. Por outro lado, cada vez que variar a carga da máquina varia o valor do campo de reação do induzido e, portanto, devia modificar-se a calagem das escovas.

Quando anteriormente se apresentou a reação do induzido devido ao deslocamento das escovas referiu-se que aparecia uma reação transversal e outra longitudinal, e que no caso do deslocamento se fazer no sentido contrário ao do movimento, o efeito da reação longitudinal é reforçar o campo indutor. Disse-se também que este efeito à primeira vista benéfico, não se podia aproveitar por prejudicar a comutação. Verifica-se agora que de facto assim é, pois o deslocamento das escovas no sentido contrário ao do movimento, vai criar uma f.e.m. na secção em comutação que se irá somar à de autoindução em vez de a ir compensar como se desejaria. Claro está que, para motores, as deslocações das escovas terão sentidos inversos aos considerados para os dínamos.

- **Pólos auxiliares de comutação**

No caso anterior fazia-se a calagem das escovas para procurar um fluxo que gerasse na secção em comutação uma f.e.m. de oposição à de autoindução. Com os pólos auxiliares de comutação não é necessário deslocar as escovas pois que esses pólos são colocados na própria zona de comutação e fornecerão o fluxo necessário para a desejada compensação.

Estes pólos auxiliares, de menor volume, são colocados entre os pólos principais e, como é óbvio, a sua polaridade será tal que o campo por eles criado, se oponha ao campo de reação do induzido na zona de comutação.

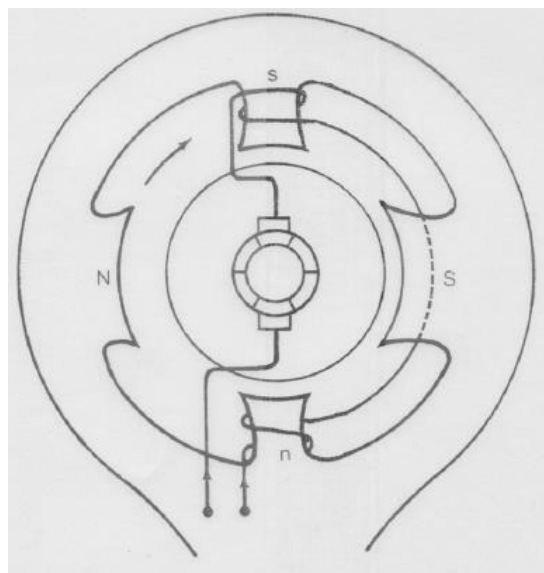


Figura 19. Pólos auxiliares de comutação na máquina DC

O fluxo destes pólos é criado por uma corrente que é função da própria corrente de carga da máquina o que permite manter a compensação mesmo com variações de carga. Por outro lado, o sistema além de ser independente do sentido de rotação, também permite que a máquina funcione quer como dínamo quer como motor sem qualquer modificação, pois nos motores, como se sabe, para um mesmo sentido de rotação a corrente no induzido tem o sentido contrário da que aparece nos dínamos. Como o fluxo dos pólos de comutação é criado por essa mesma corrente, havendo inversão na reação do induzido também haverá neste fluxo, como se pode ver na Figura 18.

- **Influência da largura das escovas**

Tem-se até agora raciocinado supondo as escovas com uma largura mínima. Analise-se agora as consequências na comutação se aumentar a largura das escovas. Se assim acontecer, entram em comutação várias secções ao mesmo tempo, aumenta a autoindução e a indução mútua, e pode parecer que aumenta a tensão de reactância. Acontece, porém, que pelo facto da escova ser mais larga também será maior o tempo de comutação, que começa quando a lâmina entra em contacto com a escova e só acaba quando termina esse contacto.

Como aumenta o numerador e o denominador a tensão de reactância E_r permanecerá sensivelmente constante. Por outro lado o aumento da largura das escovas, trás o benefício da diminuição da densidade de corrente no contacto escova-coletor pelo aumento da superfície de contacto.

O aumento da largura das escovas, terá, porém, um limite pois que não se pode conceber que estejam em comutação condutores diretamente influenciados e destinados à criação de f.e.m., isto é, a largura das escovas é limitada pelo espaço entre as expansões polares, isto é, pela zona neutra, ou quase neutra.

Referências bibliográficas

- Beleza Carvalho, J. A., Máquinas Elétricas de Corrente Contínua. Apontamentos da disciplina de Máquinas Elétricas I. ISEP, Porto, março de 2014.
- Sen, P.C., Principles of Electric Machines and Power Electronics. Editor: John Wiley & Sons.
- Fitzgerald, A.E., Charles Kingsley. Electric Machinery. Editor: McGraw Hill.
- Carlos Ferreira, Máquinas Elétricas de Corrente Contínua. Apontamentos das disciplinas de Máquinas Elétricas. Edição: ISEP.
- M. Kostenko e L. Piotrovski, Máquinas Elétricas volumes I e II. Editor: Lopes da Silva Editora

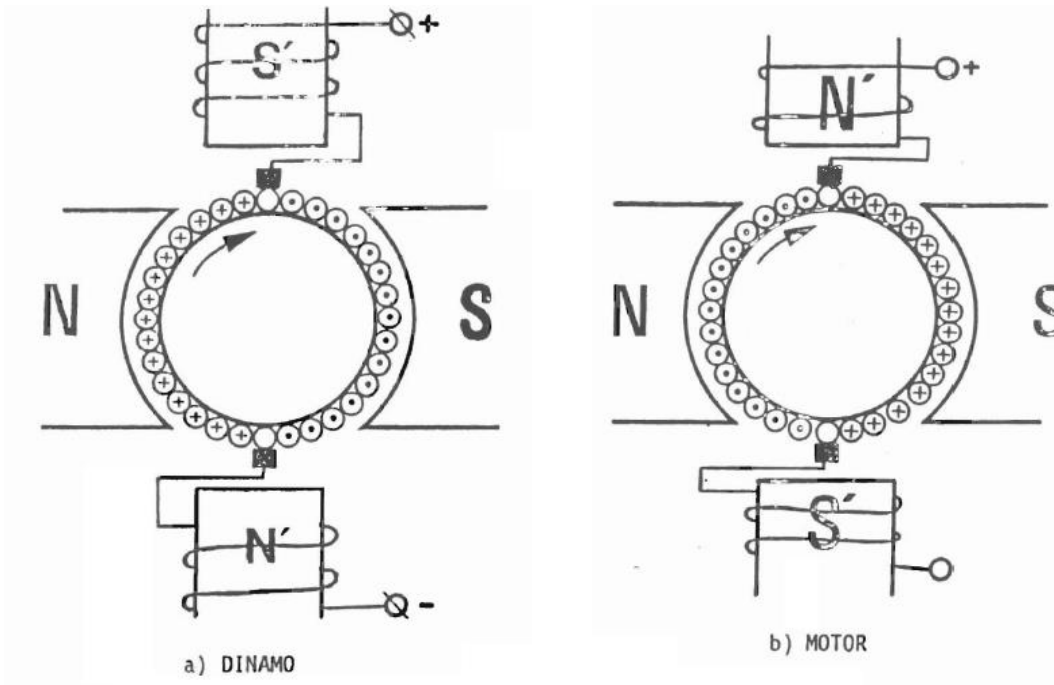


Figura 20. Comutação artificial através de pólos auxiliares na máquina DC

Título: Instalações Elétricas de Média Tensão – Postos de Transformação e Seccionamento
Autor: António Augusto Araújo Gomes, José António Beleza Carvalho
Editora: Publindústria
Data de Edição: 2017
ISBN: 9789897232541
Nº Páginas: 195
Encadernação: Capa mole

Sinopse:

Esta obra pretende ser, acima de tudo, uma ferramenta didática de apoio aos alunos de cursos de engenharia eletrotécnica, bem como a técnicos responsáveis pelo projeto, execução e exploração de instalações elétricas.

Pretende ser ainda uma ferramenta prática de estudo e de trabalho, capaz de transmitir conhecimentos técnicos, normativos e regulamentares sobre o projeto, execução e exploração de postos de transformação e seccionamento aos diversos agentes eletrotécnicos, tornando-os capazes de, para cada instalação na qual sejam intervenientes, maximizar a segurança, a fiabilidade e a funcionalidade, assim como reduzir os custos de execução e exploração das instalações.

António Augusto Araújo Gomes
 José António Beleza Carvalho

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE MÉDIA TENSÃO
POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO E SECCIONAMENTO

Sobre o livro

Esta obra pretende ser, acima de tudo, uma ferramenta didática de apoio aos alunos de cursos de engenharia eletrotécnica, bem como a técnicos responsáveis pelo projeto, execução e exploração de instalações elétricas. Pretende ser ainda uma ferramenta prática de estudo e de trabalho, capaz de transmitir conhecimentos técnicos, normativos e regulamentares sobre o projeto, execução e exploração de postos de transformação e seccionamento aos diversos agentes eletrotécnicos, tornando-os capazes de, para cada instalação na qual sejam intervenientes, maximizar a segurança, a fiabilidade e a funcionalidade, assim como reduzir os custos de execução e exploração das instalações.

Sobre os autores

António Augusto Araújo Gomes

Bacharel em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto, Licenciado e Mestrado (que habilita) em Engenharia Eletrotécnica e Computadores pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Professor adjunto no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 1999. Coordenador de Obras na CEBERES - Engenharia de Segurança, entre 1997 e 1999. Sócio da empresa Neutro à Testa - Gabinete de Engenharia Lda (2002 a 2008). Prestação de serviços de formação e/ou projeto e/ou assessoria e/ou consultoria no âmbito das instalações elétricas, telecomunicações, segurança, gestão de energia, eficiência energética, a diversas entidades, nomeadamente NERMA - Consultores de Engenharia, SA, Schmal - Engenharia e Serviços, Lda; ENERCO - Consultores de Engenharia, Lda; IEG - Instituto de Segurança e Qualidade; Quátros - Fabrica de Quadros Elétricos, SA; EP - Instituto Eletrotécnico Português; CENERTIC - Centro de Energia e Tecnologia; ANACOM - Autoridade Nacional das Telecomunicações; IEL - Instituto para o Desenvolvimento Tecnológico; EDV - Agência de Energia Entre Douro e Vouga.

José António Beleza Carvalho

Bacharel em Engenharia Eletrotécnica pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto, Mestre e Doutor em Engenharia Eletrotécnica na especialidade de sistemas de energia pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, desempenhando as funções de Diretor do Departamento. Integra a direção da Escola Tecnológica de Vale de Cambra como representante do Instituto Politécnico do Porto. É autor de vários artigos publicados em conferências nacionais e internacionais, diretor da revista Neutro à Testa e integrou vários júris de provas públicas de doutoramento e para a carreira do ensino superior.



ENGEBOOK
 ELETROTÉCNICA

ENGEBOOK
 ELETROTÉCNICA

AUTORES**Allon Soares da Silva****1171910@isep.ipp.pt**

Mestrando em Engenharia Eletrotécnica no Instituto Superior de Engenharia do Porto desde de 2018 e graduando em Engenharia Elétrica no Instituto Federal de Santa Catarina desde 2013. Foi representante discente no Conselho Superior (Consup) do IFSC. Atou em pesquisas internacionais desenvolvidas na Finlândia através da HAMK University of Applied Sciences. Desenvolve trabalhos nas seguintes áreas: Internet of Things, Microcontroladores Eficiência Energética, Gerenciamento de Dados, Contratos e Demanda Energética.

**António Carvalho de Andrade****ata@isep.ipp.pt**

Licenciatura. Mestrado e Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
Colaborador da EDP – Energias de Portugal (22 anos)
Professor ajunto do departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do porto.

**António Manuel Luzano de Quadros Flores****aqf@isep.ipp.pt**

Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na Especialidade de Sistemas de Energia pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra; Licenciado e Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; MBA em Gestão na Escola de Gestão do Porto da Universidade do Porto;
Docente do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 1993;
Desenvolveu atividade na SOLIDAL no controlo de qualidade e manutenção, na EFACEC na área comercial de exportação de máquinas elétricas, na British United Shoe Machinery na área de manutenção, na ALCATEL-Austrália na área de manutenção, na ELECTROEXPRESS, em Sidney, na área de manutenção e instalações elétricas.

**Florinda Figueiredo Martins****ffm@isep.ipp.pt**

Licenciatura em Engenharia Química, Mestrado em Engenharia do Ambiente, Doutoramento em Engenharia Química e Biológica, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
Trabalhou na indústria como engenheira de processo e no desenvolvimento de projetos de engenharia. Foi responsável por uma estação de tratamento de águas residuais e atualmente é Professora Adjunta no Instituto Superior de Engenharia do Porto. Desenvolve atividades de investigação no GRAQ/REQUIMTE e é coautora de um livro e de vários artigos publicados em revistas e conferências internacionais.

Áreas de interesse: sustentabilidade, ambiente, LCA, energia, energias renováveis, otimização

COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:

**Hélder Nelson Moreira Martins****helmar@televes.com**

Síntese Curricular: Licenciatura em Engenharia Electrónica e Telecomunicações na Universidade de Aveiro, participou num projeto sobre Televisão Digital Interativa no Instituto de Telecomunicações em Aveiro e possui uma Pós-Graduação em Infraestruturas de Telecomunicações, Segurança e Domótica realizada no Instituto Superior de Engenharia do Porto. Curso Avançado de Marketing Relacional e Fidelização de Clientes na Escola de Negócios Caixa Nova em Vigo. Desempenha funções no Departamento Técnico da Televés Electrónica Portuguesa, S.A. desde 2003 e colabora com diversas entidades na área da Formação ITED e ITUR exercendo esta atividade desde 2006.

**José António Beleza Carvalho****jbc@isep.ipp.pt**

Nasceu no Porto em 1959. Obteve o grau de B.Sc em engenharia eletrotécnica no Instituto Superior de Engenharia do Porto, em 1986, e o grau de M.Sc e Ph.D. em engenharia eletrotécnica na especialidade de sistemas de energia na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em 1993 e 1999, respetivamente.

Atualmente, é Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, desempenhando as funções de Diretor do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia.

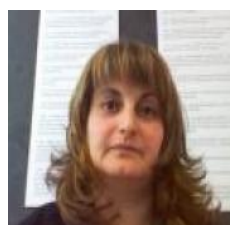
**José Adelino Marçal Maurício****josemauricio1992@gmail.com**

Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica, área científica de Sistemas de Energia e Automação, pelo Instituto Politécnico de Viseu. Aluno de mestrado de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia.

Gestor Operacional na Visabeira Global entre 2013 e 2017.

Vice-presidente da Associação Juvenil Gustavo Filipe.

Áreas de interesse: transporte e distribuição de energia, qualidade de energia, mercados de energia, energias renováveis, automação, home automation, domótica, máquinas elétricas.

**Maria Judite Madureira Da Silva Ferreira****mju@isep.ipp.pt**

Professora Adjunta no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Diretora da Licenciatura de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia (LEE-SEE) no Instituto Superior de Engenharia do Porto – Instituto Politécnico do Porto (ISEP/IPP).

As suas áreas de investigação são relacionadas com Redes Elétricas.

COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:

**Maria Madalena Rodrigues Camões****1900084@isep.ipp.pt**

Aluna do Mestrado de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas de Energia, do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Bacharel e Licenciada (pré-Bolonha) em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Iniciou a carreira profissional em 1995, na EN- Eletricidade do Norte, Centro de Distribuição de Matosinhos, acompanhando a implementação do Sistema de Gestão de Incidentes (SGI) nos concelhos de Matosinhos e Vila do Conde. Técnica Superior da Câmara Municipal de Vila do Conde, desde 1997, desempenhando funções de projetista e fiscalização de obras. Atualmente, acumula as funções de gestão municipal de energia, coordenação técnica de projetos no âmbito da estratégia energética do município, gestão dos contratos de fornecimentos de energia elétrica e de gás natural das instalações municipais, gestão de contratos de manutenção de instalações elétricas, AVAC, elevadores e segurança de edifício municipais, coordenação técnica das inspeções periódicas dos elevadores do concelho e interlocutora municipal junto de entidades externas no âmbito da Energia.

**Miguel José Rodrigues Teixeira Miguel****migueljrtemiguel@hotmail.com**

licenciatura e mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Programa Erasmus na Universidade Politécnica de Madrid em Ingeniería Industrial.

Engenheiro Eletrotécnico na EDP Produção na Área de Engenharia e Otimização de Ativos Hídricos.

Áreas de interesse: energia hidroelétrica, energia geotérmica, armazenamento de energia, energias renováveis, operação de ativos hídricos, sistemas de comando e controlo, mercados de energia, gestão de sistemas elétricos de energia isolados.

**Nuno Eduardo Ribeiro****1990234@isep.ipp.pt**

Aluno do Mestrado em Energias Sustentáveis do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

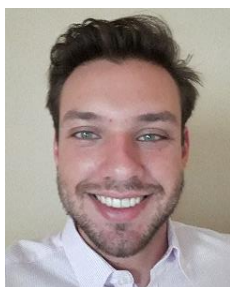
Gestor de Projecto na Siemens S.A., departamento - Power and Gás - CoC Renewables Energies .

**Rodrigo Luiz Joench****rodrigo.joench@gmail.com**

Graduando em Engenharia Elétrica no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e aluno do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Suas principais qualificações relacionam Fontes Renováveis de Energia, Otimização de Recursos de Energia, Smart Grids, Smart Buildings, Sistemas Elétricos de Potência e Conversores Estáticos de Potência.

Fluente em Português e Inglês, e conhecimento intermediário em Alemão.

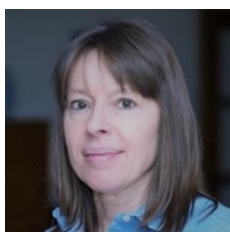
COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:**Samuel Sandmann Cembranel****1171912@isep.ipp.pt**

Graduando em Engenharia Elétrica no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e aluno do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Seus principais interesses em pesquisa incluem Clustering, Data-Mining, Mercados de Energia e Sistemas Elétricos de Potência.

**Sérgio Filipe Carvalho Ramos****scr@isep.ipp.pt**

Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Área Científica de Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa. Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores no Instituto Superior Técnico de Lisboa. Docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 2001. Prestação, para diversas empresas, de serviços de projeto de instalações elétricas, telecomunicações e segurança, formação, assessoria e consultoria técnica. Investigador do GECAD (Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão), do ISEP, desde 2002.

**Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto Nogueira****tan@isep.ipp.pt**

Licenciatura e mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, área científica de Sistemas de Energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Doutoramento em Engenharia Electrotécnica e Computadores, pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Docente no Departamento de Engenharia Eletrotécnica, curso de Sistemas Elétricos de Energia do ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Investigadora no CIETI - Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial.

Áreas de interesse: projeto de transformadores, mercados de energia, operação do sistema de gás natural, energias renováveis, qualidade de energia, produção distribuída e eficiência energética

Página deixada intencionalmente em branco!

