

SRED aplicado ao aproveitamento da energia das ondas marítimas

1 Breve descrição das energias renováveis.

Com a cada vez maior consciencialização sobre os problemas ecológicos da degradação do meio ambiente, e o facto assente de que mais tarde ou mais cedo as fontes convencionais de energia esgotar-se-ão, as energias não poluentes e renováveis têm vindo a assumir um papel cada vez mais importante na política energética dos países desenvolvidos ou em vias de desenvolvimento.

Existem inclusive casos onde é mais favorável (técnica e economicamente) ter fontes alternativas de energia do que instalar sistemas convencionais. É o caso de pequenos aglomerados populacionais onde é inviável levar a rede eléctrica e onde o combustível diesel para os grupos geradores é demasiado caro. Dependendo do tipo de energias renováveis existentes no local, o sistema de geração poderá ser um simples complemento ao grupo gerador convencional, ou substituí-lo na totalidade.

Existem várias formas de energia renovável, mais ou menos viáveis, com mais ou menos impactos ambientais:

- Solar directa.
- Eólica.
- Geotérmica.
- Biomassa.
- Hídrica.
- Oceânica

A biomassa e a hídrica são as únicas energias renováveis que actualmente possuem algum protagonismo na energia consumida.

A hídrica contribui em cerca de um quinto para a energia eléctrica consumida no mundo, mas menos de 3% para a energia total. O único problema associado com este recurso é o impacto ambiental que as barragens representam.

A biomassa é actualmente o recurso mais importante de energia renovável, contribuindo em cerca de 14% para a energia total consumida. Grande parte desta energia é consumida nos países em desenvolvimento, normalmente de uma forma insustentável, quer para a manutenção do recurso, quer para a degradação do meio ambiente.

A energia de biomassa é fornecida fundamentalmente pela madeira. Uma infinitésima parte é fornecida por biogás produzido através de excrementos de animais. O principal problema da biomassa reside na gestão dos terrenos onde a madeira cresce e nos resíduos resultantes da sua queima.

A energia solar pode ser utilizada para aquecimento ou para produção de electricidade através de máquinas térmicas ou através de células fotovoltaicas. Como aquecimento, a luz solar já é bastante usada nas casas, permitindo poupanças. Para produzir energia eléctrica surge o problema do espaço necessário para se produzir uma pequena quantidade de electricidade quer através de processos térmicos, quer através das células fotovoltaicas.

A energia geotérmica é fundamentalmente usada para gerar electricidade em regiões com recente actividade vulcânica.

Para aproveitar a energia eólica, a imagem romântica que os antigos moinhos de vento nos transmitiam, foi substituída pelas inúmeras torres com grandes pás que produzem electricidade. A energia eólica além de ocupar grandes extensões de terreno é caracterizada por uma grande variabilidade durante intervalos de tempo curtos e longos.

Existem basicamente três formas de produzir energia eléctrica a partir dos oceanos:

- através da ondulação marítima.
- aproveitando o desnível periódico devido às marés.
- utilizando a diferença de temperaturas existente entre a superfície e o fundo do mar.

O último caso, apesar de ser um conceito bastante antigo, não se revela muito promissor uma vez que a baixa diferença de temperatura dá origem a uma máquina térmica de baixo rendimento. Além disso, parte da energia produzida tem de ser utilizada para bombear a água quente do fundo do mar, baixando ainda mais o rendimento final.

As características da energia da ondulação marítima são muito semelhantes às da energia eólica.

A maior parte dos sistemas de pequena dimensão (mini - hídricas, eólicas, ondas marítimas, marés, solar, etc.) destinados a produzir electricidade têm o problema da inconstância no tempo. Mesmo quando produzem energia durante um certo tempo, a variação do nível de potência disponível varia muito durante curtos intervalos de tempo. Isto levanta o problema do armazenamento, disponibilidade e qualidade da energia produzida.

Os problemas das mini-hídricas são semelhantes aos das marés, na medida em que a disponibilidade de energia é previsível (sazonalmente no caso das mini-hídricas e pelo período das marés neste caso) e praticamente constante durante grandes períodos de tempo.

Já a energia das ondas e a eólica são caracterizadas por variarem de forma aleatória no tempo. Repare-se que mesmo durante os períodos de produção, a energia disponível varia significativamente. Naturalmente isto coloca um sério problema ao sistema gerador que tem de se adaptar a estas fortes variações de forma a gerar electricidade com uma qualidade

aceitável. Naturalmente a disponibilidade da energia é um factor de extrema importância e levanta o problema do armazenamento destas energias altamente instáveis na produção.

2 O aproveitamento da energia das ondas oceânicas.

Ao longo dos últimos anos foram objecto de investigação numerosos dispositivos para extracção de energia das ondas. A maior parte pode incluir-se em dois tipos genéricos: corpos oscilantes (flutuantes ou submersos) e coluna de água oscilante.

O método mais promissor e com mais protótipos realizados até hoje é o sistema de coluna de água oscilante (*oscillating water column - OWC*).

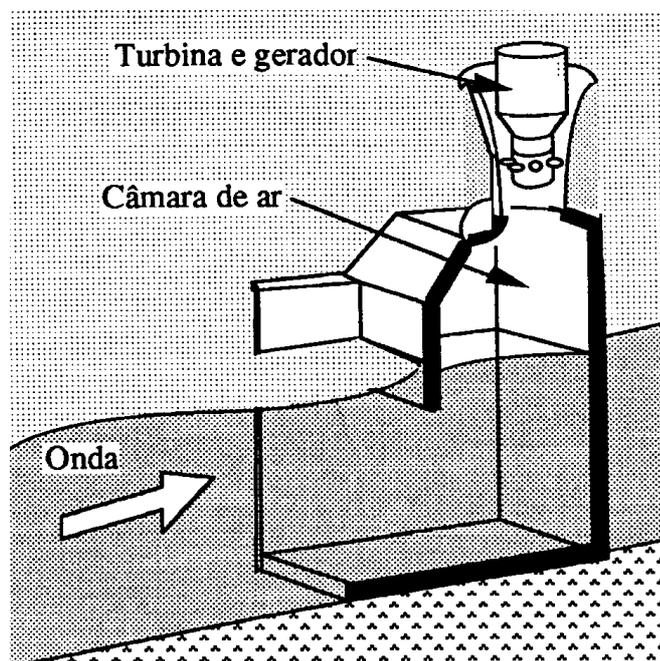


Figura 2.1 - Esquema do sistema de coluna de água oscilante [5].

O **OWC** baseia-se numa câmara que possui uma abertura para o mar abaixo do nível da água. Pode ser construído à beira mar ou afastado da costa em mar aberto.

Quando a onda se desloca em direcção à plataforma do **OWC**, o nível da água dentro e fora da câmara sobe. A subida do nível de água faz com que a pressão no interior da câmara suba provocando um fluxo de ar. Quando a onda se retira, o nível da água baixa provocando uma depressão que faz com que o ar circule na direcção contrária à anterior.

O movimento do ar é usado para accionar uma turbina de ar acoplada a um gerador eléctrico.

A turbina pode ser direccionada sendo neste caso necessário recorrer a válvulas para fazer a rectificação do ar, de modo a que a turbina rode sempre no mesmo sentido quer a onda se aproxime quer a onda se afaste.

Neste trabalho é usada uma turbina Wells que sendo autorectificadora dispensa o sistema de válvulas. Embora não atinja rendimentos tão altos, tem a vantagem de permitir uma

velocidade de rotação elevada com velocidades de escoamento do ar relativamente baixas. Isto torna possível o seu acoplamento directo ao gerador sem o recurso a engrenagens que encareceriam o sistema e o tornariam menos fiável.

Uma turbina de pás móveis poderá adaptar-se às variações da energia disponível aumentando o rendimento e a produção para uma central de iguais dimensões. No entanto a construção de tal turbina é mais complexa.

3 Central construída.

Anos de estudo do potencial das ondas ao longo da costa continental e insular culminaram com a consideração de construir uma central para recuperar energia das ondas oceânicas em Portugal.

Para além de produzir energia, esta central está vocacionada para o estudo desta forma de energia e sua viabilidade.

Foi escolhido o local de Porto Cachorro na ilha do Pico no arquipélago dos Açores por várias razões:

- haver elevado potencial médio anual de energia das ondas nos Açores;
- haver uma zona de profundidade elevada de água junto à costa favorável à construção da central em terra;
- haver uma comunidade populacional que se abastece de energia eléctrica a um custo de produção elevado, face à importação de combustível para a central diesel existente.

A central é do tipo coluna de água oscilante (OWC) e possui o grupo turbina - gerador montado dentro de uma conduta horizontal na parte de cima da câmara.

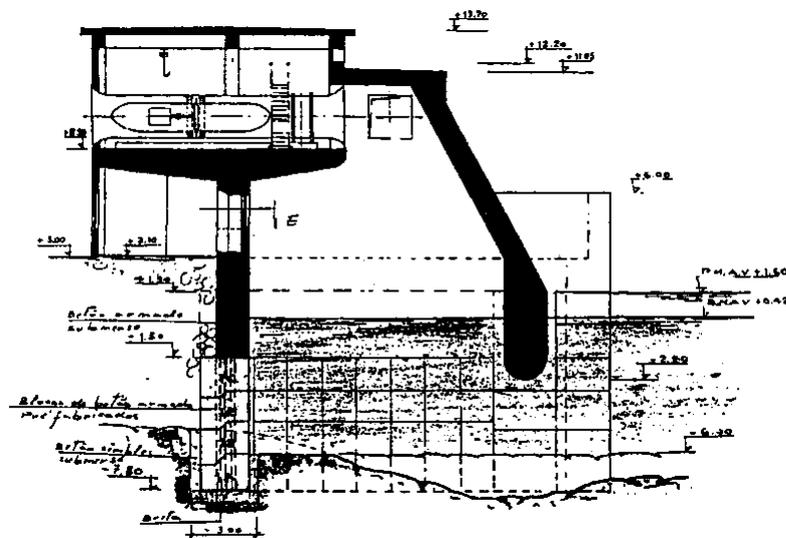


Figura 2.2 - Perfil da central [9].

A turbina é do tipo Wells constituída por uma jante em disco com 8 pás planas e que permitirá atingir velocidades entre 1500 e 3000rpm. Dum lado e doutro da turbina são instaladas pás directrizes para melhorar a incidência do ar sobre as pás. Uma válvula de isolamento do tipo borboleta permitirá o fecho da conduta em situações de manutenção ou reparação.

A turbina é autorectificadora pelo que dispensa o sistema de válvulas de rectificação do fluxo de ar. A sua velocidade de rotação permite-lhe ser acoplada directamente ao gerador sem o recurso a engrenagens.

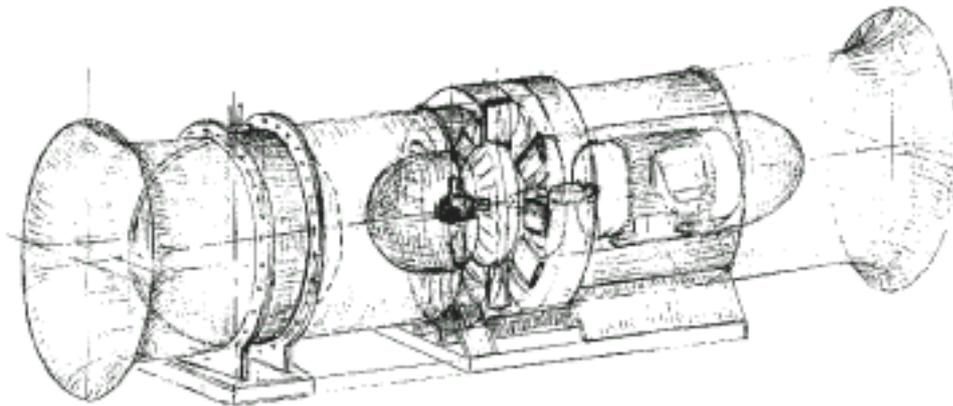


Figura 2.3 - Esquema do conjunto turbina - gerador [9].

Este trabalho destina-se a conceber e implementar o gerador e seus componentes auxiliares que permitam produzir energia eléctrica e enviá-la à rede de distribuição pública.

4 Armazenamento e disponibilidade de energia.

Como a potência disponível em cada momento varia fortemente, levanta-se o problema do armazenamento e disponibilidade da energia. É necessário algo que armazene a energia em excesso e que não é consumida no momento pelas cargas, complementando a alimentação das cargas no caso da energia disponível ser insuficiente. Naturalmente o sistema de geração deve tirar o máximo partido da energia disponível em cada momento armazenando a energia que não é consumida no momento.

Para este recurso existem apenas 2 alternativas de armazenamento da energia:

- baterias de acumuladores;
- rede de distribuição pública de electricidade,

uma vez que as restantes formas não são viáveis neste recurso:

- compressão de ar,
- elevação de água,
- electrólise de água,

- acumulação térmica, etc.

O uso de baterias apenas é possível (pelo menos economicamente) no caso da potência ser baixa e em casos onde o recurso é a principal fonte de energia (em situações de isolamento geográfico).

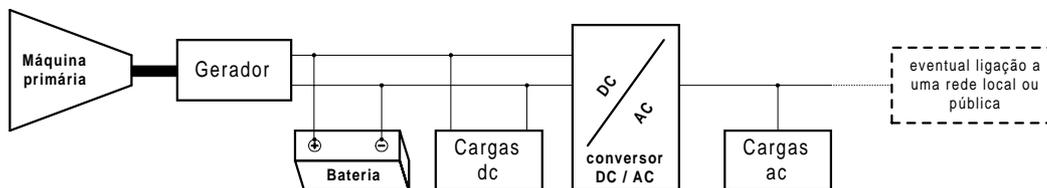


Figura 2.4 - Utilização de baterias de acumuladores para armazenar energia.

À primeira vista, a utilização da rede como um sistema de armazenamento é no mínimo estranho.

A rede pode ser vista como uma fonte uma vez que as suas características - tensão e frequência -, não se alteram com a corrente que lhe é retirada ou injectada. Por outras palavras, a rede permanece sempre igual independentemente do nível e das variações da potência que ela fornece ou absorve.

Obviamente isto refere-se ao caso da rede ser ideal. No entanto se a potência consumida e/ou fornecida for apenas uma pequena parte da potência disponível na rede, esta aproxima-se bastante do caso ideal.

A qualificação “pequena parte” pode ser quantificada através das relações entre:

- a potência gerada pelos meios convencionais e a rapidez com que estes se adaptam às variações de consumo;
- a potência gerada pelo recurso em questão e a taxa de variação de potência entregue à rede;
- a potência consumida pelas cargas.

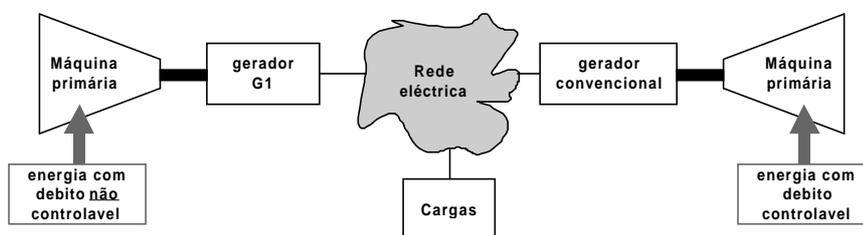


Figura 2.5 - A rede vista como um sistema de armazenagem para o gerador G1.

Aqui o gerador convencional é visto como o equivalente de todos os geradores que se podem adaptar ao fornecimento variável de potência eléctrica através da regulação das suas potências primárias. Isto é, controlam o consumo de energia primária em função das necessidades. O

gerador G1 está sempre a fornecer à rede a máxima potência que o estado do mar lhe permite obter. Isto é, controla a potência fornecida à rede em função da energia primária disponível.

Para alimentar as cargas, quando a potência das ondas sobe, o consumo de energia convencional baixa e vice-versa, de forma a igualar o consumo com a produção.

O nível máximo de variações de potência entregue à rede são impostas pela capacidade dos geradores convencionais variarem a sua produção de forma a manter as características da rede inalteráveis.

Naturalmente a potência entregue à rede deve ser “filtrada” no caso das variações de produção serem muito grandes e de frequência elevada. Isto pode ser conseguido através de baterias ou de outro método de pequena armazenagem. Neste projecto utiliza-se a inércia do conjunto turbina - motor para armazenar energia.

Neste trabalho a energia que se retira das ondas é injectada na rede de distribuição pública.

5 Requisitos para o gerador.

A velocidade do ar que impulsiona a turbina é variável em função da agitação marítima e consequentemente em função da potência disponível.

Para se tirar o máximo partido da energia disponível em cada momento, a turbina deve ajustar-se às condições de fluxo do ar.

Isto é conseguido através do ajustamento das pás da turbina e/ou através da variação de velocidade de rotação da turbina.

No caso presente a turbina é de geometria fixa, pelo que a adaptação às condições do mar tem de ser feita exclusivamente a partir da variação da velocidade de rotação.

O binário motor que a turbina fornece ao gerador para o caso ideal de ondas incidentes monocromáticas tem a forma indicada na figura seguinte:

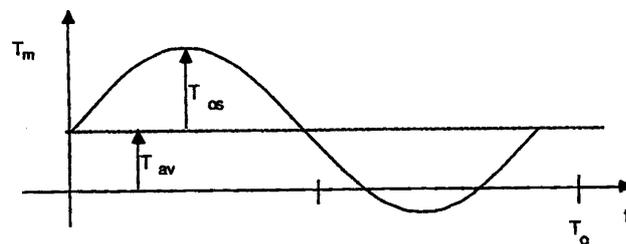


Figura 2.6 - Binário transmitido pela turbina ao gerador [5]

O valor médio e o valor oscilatório deste binário variam consoante o estado meteorológico do mar. Admite-se que a componente oscilatória possa atingir 110% da componente média. O período do binário é igual ao período das ondas marítimas.

Como é óbvio, não é aceitável que a rede receba variações tão grandes de potência (T_0 pode variar entre 6 a 15 segundos). Desta forma, a grande componente oscilatória é filtrada com recurso a um volante de inércia, através da variação de velocidade.

Enquanto o binário médio da turbina (T_{av}) se mantiver constante, o gerador deve entregar uma potência constante à rede (P_{rede}) com a turbina a rodar a uma velocidade média (ω_{av}).

Isto é conseguido permitindo que o conjunto *turbina - volante de inércia - gerador* rode a uma velocidade ($\omega(t)$) em torno de ω_{av} , acelerando e acumulando energia no volante de inércia quando o binário da turbina (T) for superior a T_{av} e desacelerando retirando energia ao volante de inércia quando T for menor que T_{av} .

Deste modo, apenas a potência resultante do binário médio é transformada em energia eléctrica e entregue à rede. A potência devida à componente oscilatória é ciclicamente entregue e retirada ao volante de inércia.

Como é óbvio, se o conjunto turbina - gerador tiver um momento de inércia suficiente, o volante de inércia é desnecessário. A amplitude da variação da velocidade depende do valor do momento de inércia do conjunto.

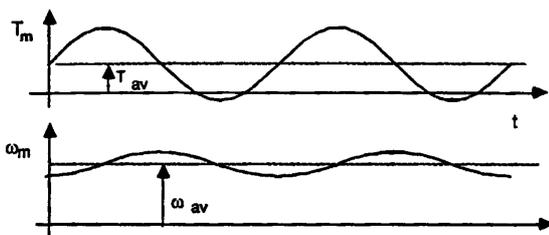


Figura 2.7 - Binário da turbina e velocidade [5].

As variações do binário médio e portanto da potência realmente disponível, são compensadas através da maior ou menor potência entregue à rede.

A velocidade média do conjunto turbina - gerador determina a potência entregue à rede, e depende da potência disponível nas ondas marítimas. Se existir apenas uma baixa potência disponível, então o sistema funcionará a uma velocidade baixa, funcionando com uma velocidade alta para potências altas. É possível demonstrar que a relação entre a potência entregue à rede e a velocidade média para um funcionamento óptimo segue uma lei cúbica:

$$P_{av} = k \times W_{av}^3 \quad (2.1)$$

onde k é uma constante dependente do sistema.

Isto leva à necessidade do uso de um gerador que funcione a velocidade variável¹ e que forneça uma corrente alternada de frequência e tensão fixas atendendo a que vai estar ligado à rede de distribuição pública de electricidade.

¹ sem o uso de componentes mecânicos que mudem a velocidade efectiva, uma vez que o gerador deve estar acoplado directamente à turbina.

Os tradicionais geradores síncronos ligados directamente à rede estão postos de parte uma vez que a frequência da tensão gerada é imposta pela velocidade de rotação, que é controlada através da máquina primária.

A necessidade de geradores que funcionem a velocidade variável e frequência de tensão constante (**VSCF** - Variable Speed, Constant Frequency) leva à necessidade de juntar componentes electrónicos a uma máquina convencional, criando assim um novo tipo de máquina com características próprias.

Na realidade, com a introdução de electrónica nas máquinas convencionais, conseguem-se praticamente todas características que se queiram.

O uso de geradores **VSCF** em aproveitamentos de energia com ligação à rede veio permitir o uso de turbinas com uma construção mais simples e um melhor aproveitamento da potência disponível através da introdução de um controlo óptimo com ajuste da velocidade às condições variáveis do recurso actuando unicamente no gerador.

5.1 Escolha do gerador.

Algumas opções para o gerador de velocidade variável e frequência fixa estão expostas na seguinte figura.

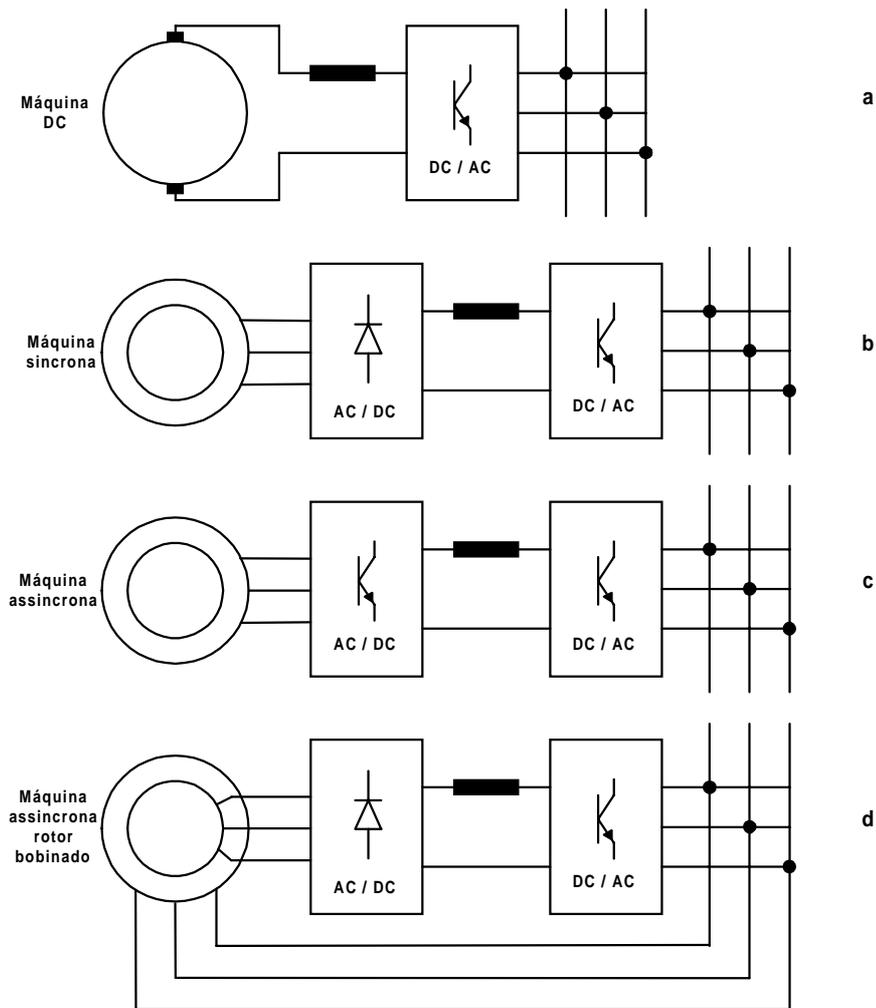


Figura 2.8 - Alternativas para um gerador de velocidade variável e frequência constante (VSCF).

Os problemas associados ao colector das máquinas DC por si só excluem a sua escolha.

A opção (c) tem necessidade de dois conversores de comutação forçada, mas emprega uma máquina muito robusta sem colectores ou anéis. A máquina de indução é controlada em corrente. Tem o grave problema de dissipar muita energia no circuito rotórico.

No entanto, a grande vantagem da opção (d) face às (b) e (c) é a potência que atravessa os conversores ser metade da potência total gerada. Isto acontece porque parte da energia é enviada à rede através do estator da máquina.

No entanto este sistema não pode funcionar sem que a rede esteja presente, uma vez que a máquina tem que receber sempre energia reactiva para ser magnetizada.

Para este projecto utilizou-se a opção (d).

Este agrupamento é conhecido como *sistema de recuperação de energia de deslizamento (SRED)* (*Slip Energy Recovery System - SERS*), uma vez que a energia transferida do estator para o rotor (energia de deslizamento) é recuperada através do sistema electrónico.

Para funcionar como gerador a máquina assíncrona tem de funcionar a velocidades acima da velocidade de sincronismo. A velocidade máxima depende dos esforços mecânicos a que o rotor fica sujeito, mas a limitação principal advém dos limites de tensão que os conversores suportam (a tensão gerada no rotor acima da velocidade de sincronismo cresce à medida que a velocidade aumenta). Normalmente limita-se a velocidade a 2 vezes a velocidade de sincronismo, onde a tensão gerada pelo rotor é a mesma do que quando a máquina está parada. A máquina usada neste trabalho possui 4 pares de pólos pelo que a velocidade de funcionamento como gerador situa-se entre as 750rpm e as 1500rpm.

Como a potência deve ser uma função cúbica de velocidade (eq 2.1) e a velocidade tem uma variação de 1:2, a potência apresenta uma relação de 1:8 entre a velocidade mínima e máxima.

6 O sistema de recuperação de energia de deslizamento (SRED)

Uma das formas de controlar a velocidade de rotação de uma máquina assíncrona é através da variação da resistência rotórica. Isto é conseguido com resistências exteriores ligadas aos anéis da máquina de rotor bobinado. Antes do uso generalizado de componentes de electrónica de potência, este era um dos principais métodos de controlo de máquinas assíncronas e de limitação da corrente de arranque. Com a introdução de electrónica de potência obtêm-se variantes da montagem inicial constituída apenas por 3 resistências variáveis.

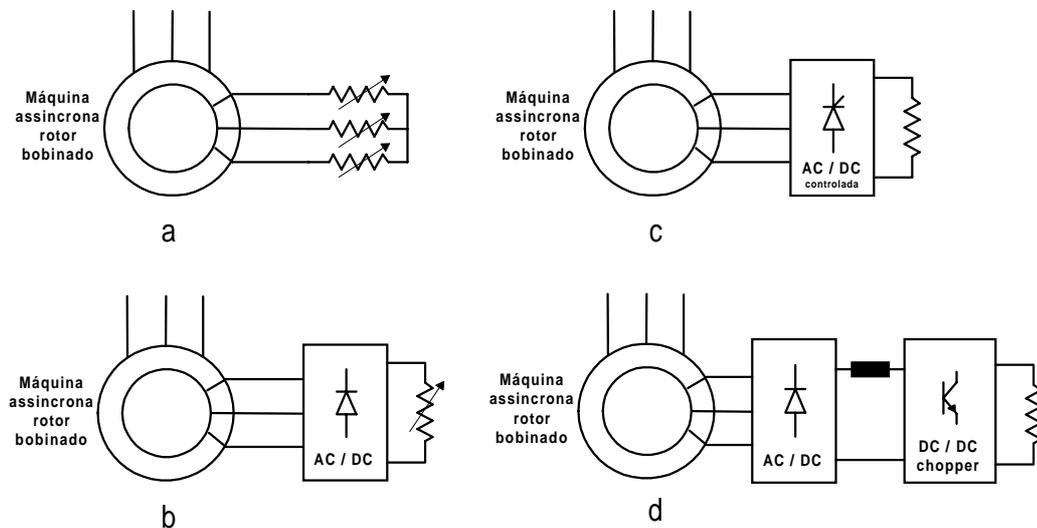


Figura 2.9 - Esquemas para controlo de velocidade da máquina assíncrona de rotor bobinado através da variação da resistência rotórica.

As montagens com comutadores electrónicos emulam a resistência vista pelos anéis do rotor.

A montagem com uma ponte rectificadora a díodos e uma resistência variável elimina o perigo de desequilíbrio entre fases devido a diferenças entre o valor das 3 resistências. No entanto o uso do rectificador provoca a introdução de harmónicos na corrente do rotor que são injectadas na rede através da máquina.

A introdução de uma ponte rectificadora controlada evita o uso de uma resistência variável mas os harmónicos tornam-se um autêntico quebra-cabeças.

O uso do chopper leva-nos à era da comutação forçada e permite controlar o valor equivalente da resistência rotórica mantendo os harmónicos num nível equivalente à montagem (b). A bobina garante a forma de onda contínua da corrente no circuito intermédio.

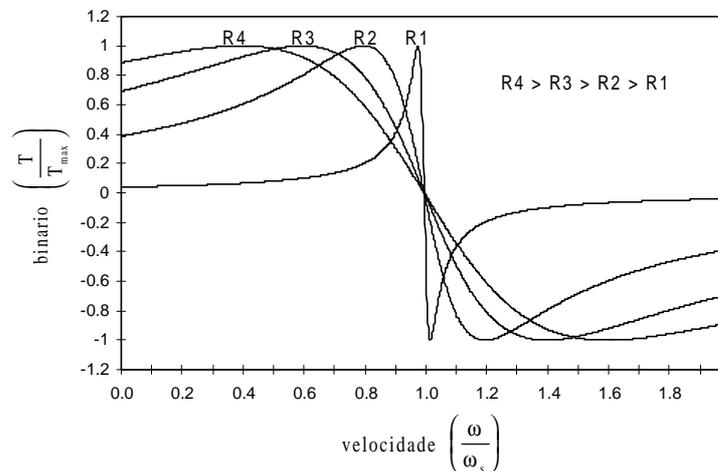


Figura 2.10 - Características binário - velocidade em função da resistência rotórica.

A regulação de velocidade é conseguida através da variação do efeito de carga. Como é óbvio a velocidade final depende da curva de binário - velocidade da carga. Repare-se que se a carga for nula (motor em vazio) a velocidade final é sempre a de sincronismo (a menos das perdas), por maior que seja a resistência introduzida.

Com os esquemas que utilizam conversores controlados (rectificador ou chopper) é simples introduzir um controlo em malha fechada que minimize a influência da carga na velocidade.

A máquina funciona como motor a velocidades abaixo da de sincronismo e como gerador acima desta. Em qualquer dos casos, parte da energia (consumida ou gerada consoante o caso) é dissipada na resistência rotórica.

Naturalmente, a evolução foi no sentido de a energia dissipada na resistência rotórica ser recuperada e reutilizada. Surge assim o sistema de recuperação da energia de deslizamento (SRED).

O SRED consiste numa montagem que utiliza uma máquina assíncrona de rotor bobinado que se controla retirando mais ou menos energia do rotor, entregando-a à rede.

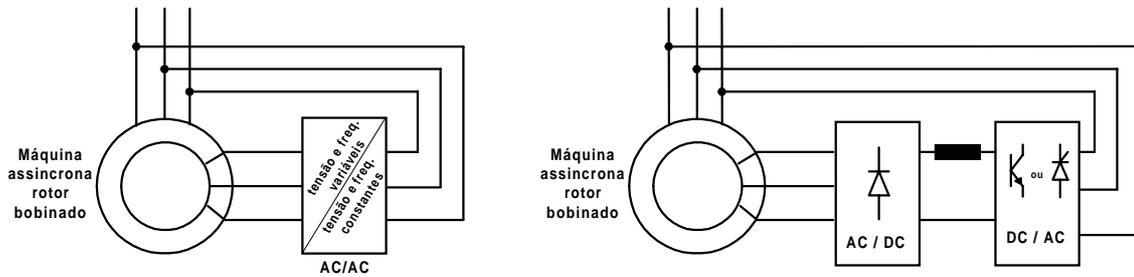


Figura 2.11 - Princípio do sistema de recuperação da energia de deslizamento.

Tal como na maior parte dos conversores AC/AC também aqui a conversão passa por um circuito intermédio DC. Para se garantirem as formas de onda de corrente no rotor a grandeza fundamental do circuito DC é a corrente. A garantia de que I_{dc} é contínua sustenta o correcto funcionamento do conversor AC/DC (normalmente uma ponte de díodos) e a forma de onda da corrente no rotor que deve ter um conteúdo harmónico tão baixo quanto possível de modo a minimizar as perdas por harmónicos, as pulsações de binário e o conteúdo harmónico injectado na rede pelo estator. Deve ser notado que os harmónicos da corrente do rotor são transferidos para o estator.

O uso de um andar DC em corrente também permite utilizar como conversor DC/AC um rectificador controlado de tirístores a funcionar como ondulado não autónomo. A bobina garante uma conveniente filtragem da corrente I_{dc} .

O uso de um andar DC em corrente para se garantirem as formas de onda da corrente no rotor pode cair em desuso com o surgimento de novos rectificadores que usam comutação forçada e consomem à sua entrada uma corrente praticamente sinusoidal independentemente da corrente fornecida na sua saída.

Todas as montagens de SRED baseiam-se na ideia base de retirar energia do rotor, e as suas características:

- funcionamento como motor e/ou gerador;
- gama de variação de velocidade;
- consumo de energia reactiva;
- injeção de harmónicos na rede,

dependem apenas do tipo de conversores utilizados e de modificações no rotor da máquina tais como o uso de dois enrolamentos rotóricos independentes, como será explicado no Capítulo 3.

Se os conversores, além de retirarem energia do rotor, permitirem o trânsito de potência da rede para o rotor, ficando assim a máquina alimentada pelo estator e pelo rotor, a máquina pode funcionar como motor acima da velocidade de sincronismo.

Uma das primeiras montagens de SRED utilizava um rectificador a díodos como conversor AC/DC e um rectificador controlado a tirístores a funcionar como ondulado não autónomo, como conversor DC/AC. O comando do sistema é efectuado através do ângulo de disparo dos

tirístores que condicionam e definem a tensão que aparece aos terminais do rectificador e obviamente no rotor. Um transformador ligado entre a ponte a tirístores e a rede adapta a tensão da rede à tensão conveniente na ponte tiristorizada. O seu uso depende da variação requerida ao ângulo de disparo e à razão de transformação estátor/rotor da máquina assíncrona.

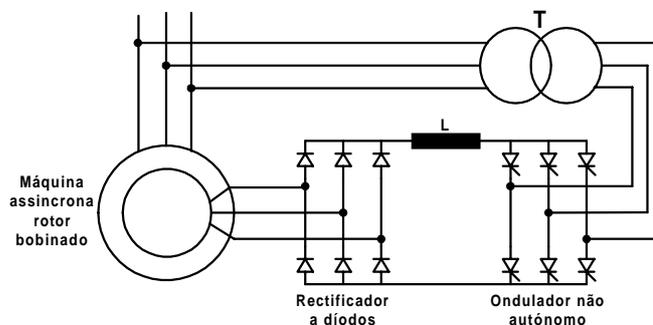


Figura 2.12 - SRED com ponte de díodos como conversor AC/DC e ponte a tirístores como conversor DC/AC.

O sistema é bastante utilizado como motor em aplicações de velocidade variável para potências elevadas (>20MW) como em bombas centrífugas, ventiladores, moinhos, etc.

Tem o problema de possuir um factor de potência baixo e um conteúdo harmónico elevado dependentes da velocidade (dependente do ângulo de disparo). Como a situação piora a baixas velocidades, as variações de velocidade estão limitadas inferiormente.

Repare-se que assim, além do estátor consumir a energia reactiva de magnetização e de fugas, o ondulador não autónomo também consome energia reactiva.

A abaixamento da tensão do lado do ondulador pelo transformador permite que este funcione com ângulos de disparo mais altos¹ para a mesma velocidade (mesma tensão DC), melhorando assim o factor de potência.

Repare-se que nas aplicações típicas deste SRED as cargas não exigem grandes variações de velocidade para serem controladas. Pode-se demonstrar que no caso de uma bomba centrífuga o volume de fluido deslocado depende do cubo da velocidade de rotação da bomba. Ou seja, para uma variação de 1:2 da velocidade o fluido deslocado tem uma variação de 1:8.

Nas situações em que o arranque da máquina não pode ser feito através dos conversores electrónicos é colocada uma resistência de arranque para lançar o sistema até à velocidade acima da qual os conversores têm condições para funcionar. A resistência é depois retirada de serviço através de contactores ou interruptores electrónicos. O dimensionamento térmico desta resistência deve atender a que ela serve apenas para o arranque, sendo vulgar que a energia dissipada no arranque permaneça no seu interior através do aumento temporário da sua temperatura. Se os arranques forem muito frequentes, em vez de se utilizar uma resistência, é preferível dimensionar os conversores para o efeito.

¹ A tensão é nula para um ângulo de 90° e máxima para 180°.

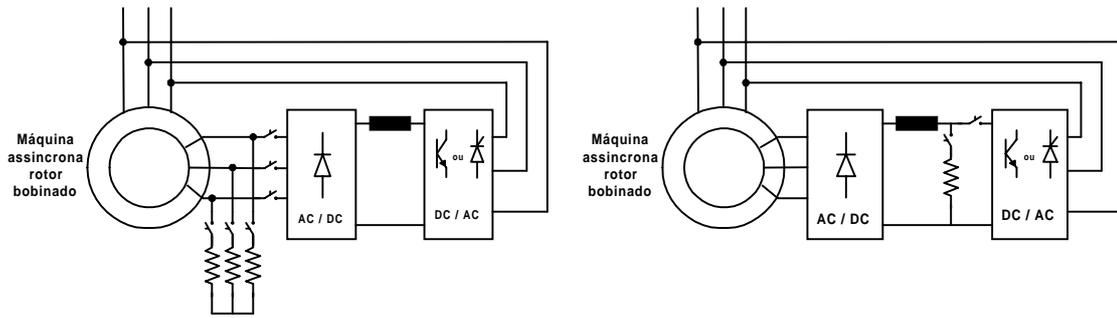


Figura 2.13 - Arranque do SRED através de uma resistência auxiliar.

Se em vez de se utilizar um ondulator não autónomo a tirístores como conversor DC/AC se usar um conversor com comutação forçada devidamente controlado, consegue-se eliminar o consumo de energia reactiva do conversor e enviar à rede uma corrente com um conteúdo harmónico mais baixo. Naturalmente é necessário introduzir um filtro de corrente entre o conversor e a rede de modo a eliminar as altas frequências produzidas pelo conversor.

O conversor AC/DC deve introduzir o menor conteúdo harmónico possível no rotor da máquina, uma vez que estes harmónicos são injectados na rede através do estator.

6.1 Princípio de funcionamento do SRED.

O princípio de funcionamento do SRED pode ser explicado de uma forma grosseira, mas muito simples se se considerarem as seguintes simplificações:

- todas as perdas do sistema são desprezadas;
- a máquina tem um igual número de espiras no rotor e no estator (razão de transformação estator/rotor unitária);
- os conversores não originam harmónicos nem consomem energia reactiva. (a corrente e a tensão do lado AC estão em fase).

Assim a máquina assíncrona é vista como um transformador de razão variável e modificador de frequência:

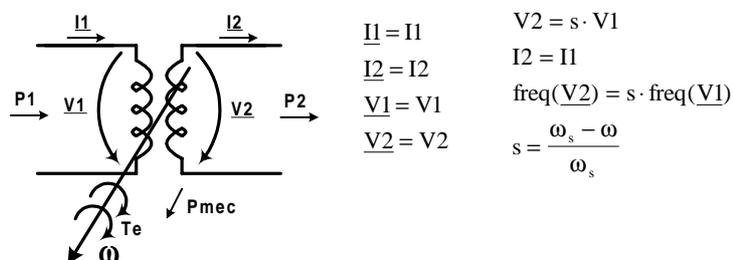


Figura 2.14 - Modelo por fase da máquina assíncrona.

Os conversores são vistos como blocos de conversão ideal (Esta modelação dos conversores é muito próxima da realidade):

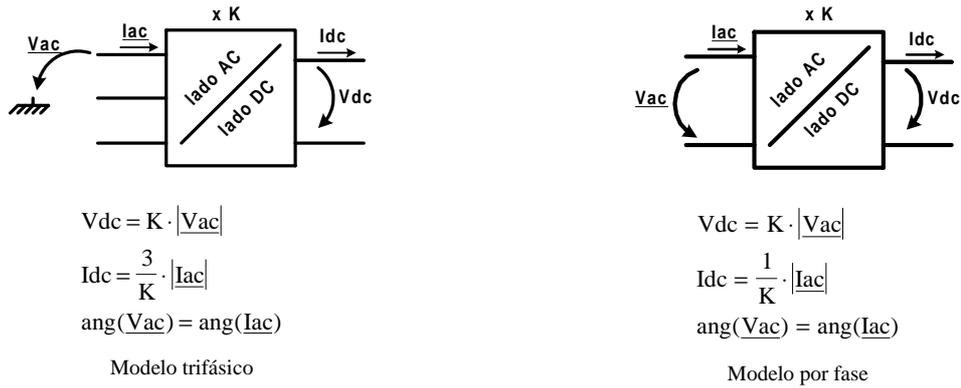
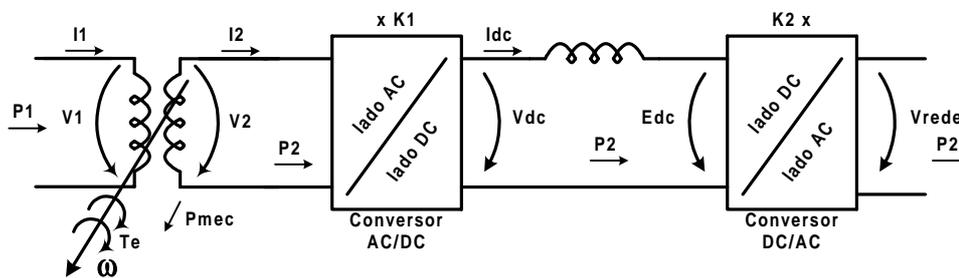


Figura 2.15 - Modelo dos conversores.



V_1 ; V_{dc} ; I_{dc} e E_{dc} são sempre positivos

Figura 2.16 - Modelação do SRED.

Em regime permanente a corrente I_{dc} é constante pelo que a tensão aos terminais da bobina deve ser nula implicando que as tensões U_{dc} e E_{dc} sejam iguais:

$$V_{dc} = E_{dc} \tag{2.2}$$

Dos modelos do motor e dos conversores tira-se que:

$$I_2 = I_1 \tag{2.3}$$

$$V_2 = s \cdot V_1 \tag{2.4}$$

$$I_{dc} = \frac{1}{K_1} |I_2| \tag{2.5}$$

$$V_{dc} = K_1 \cdot |V_2| \tag{2.6}$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \tag{2.7}$$

Das expressões 2.2 , 2.4, e 2.6 obtêm-se:

$$E_{dc} = V_{dc} = K_1 \cdot |V_2| = K_1 \cdot |s| \cdot |V_1| = K_1 \cdot |s| \cdot V_1$$

$$\Leftrightarrow |s| = \frac{E_{dc}}{K_1 \cdot V_1}$$

$$\Leftrightarrow s = \frac{E_{dc}}{K_1 \cdot V_1} \quad \text{ou} \quad s = -\frac{E_{dc}}{K_1 \cdot V_1} \quad (2.8)$$

de onde se conclui que o deslizamento (velocidade) pode ser controlado a partir da tensão (**E_{dc}**) gerada no lado DC pelo conversor de corrente DC/AC. Os dois pontos possíveis: um acima da velocidade de sincronismo e outro abaixo, correspondem respectivamente às situações de gerador e motor conforme vai ser confirmado a seguir, a partir da análise das potências em jogo.

A potência entregue ao estátor (**P₁**) e a retirada do rotor pelos conversores (**P₂**) são dadas por (convenção motor):

$$P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \quad (2.9)$$

$$P_2 = 3 \cdot V_2 \cdot I_2 \quad (2.10)$$

Das expressões 2.9, 2.10, 2.3 e 2.4 conclui-se que:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{3 \cdot V_2 \cdot I_2}{3 \cdot V_1 \cdot I_1} = \frac{V_2}{V_1} = s$$

$$\Leftrightarrow P_2 = s \cdot P_1 \quad (2.11)$$

A potência mecânica (**P_{mec}**) (convenção motor) é dada pela diferença entre a potência fornecida à máquina pelo estátor e a retirada pelo rotor:

$$P_{mec} = P_1 - P_2 \quad (2.12)$$

Das expressões 2.12 e 2.11 conclui-se que:

$$P_{mec} = P_1 \cdot (1 - s) \quad (2.13)$$

Finalmente de 2.13 e 2.11 conclui-se que:

$$P_1 = \frac{1}{(1 - s)} \cdot P_{mec} \quad (2.14)$$

$$P_2 = \frac{s}{(1 - s)} \cdot P_{mec} \quad (2.15)$$

No gráfico seguinte é possível analisar a relação entre as potências do estátor e do rotor face à mecânica segundo as expressões 2.14 e 2.15 para velocidades entre 0 e 2 vezes a de sincronismo. Deve ser notado que à velocidade de sincronismo (**s=0**), as expressões não têm significado uma vez que a esta velocidade a máquina assíncrona não desenvolve qualquer potência mecânica (nem binário). O mesmo se passa para a velocidade zero onde toda a potência do estátor é novamente enviada à rede pelo rotor (no entanto existe binário).

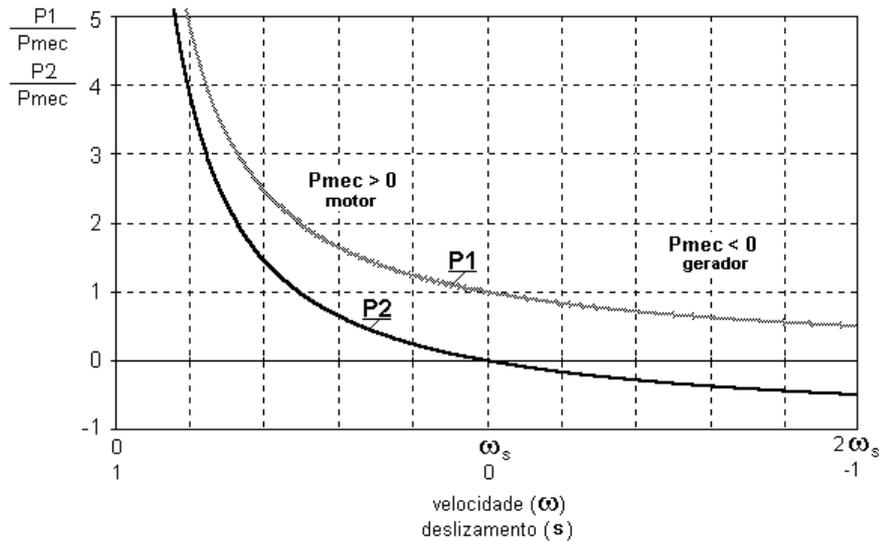


Figura 2.17 - Relação entre as potências do estator e do rotor face à mecânica.

Como os conversores não permitem injectar potência no rotor, **P2** é sempre positiva e dada por:

$$P2 = 3 \cdot Udc \cdot Idc \quad (2.16)$$

donde se tira que:

$$P2 = 3 \cdot K1 \cdot V1 \cdot s \cdot Idc \quad (2.17)$$

$$P1 = 3 \cdot K1 \cdot V1 \cdot Idc \quad (2.18)$$

$$Pmec = 3 \cdot K1 \cdot V1 \cdot (1 - s) \cdot Idc \quad (2.19)$$

Da expressão 2.15 conclui-se que a relação (**P2 / Pmec**) é negativa para velocidades superiores à de sincronismo. Como **P2** é sempre positivo, conclui-se que **Pmec** é negativo. Desta forma conclui-se que para velocidades acima da de sincronismo (**s < 0**) a máquina funciona como gerador.

O gráfico seguinte é semelhante ao gráfico na Figura 2.17, indicando a relação entre **P1** e **P2** face ao modulo de **Pmec** e fazendo **Pmec** negativo para **s < 0**. Desta forma **P1** e **P2** ficam com o sinal correcto: **P2** sempre positivo e **P1** positivo no caso motor e negativo no caso gerador. Naturalmente, nos casos de **s=0** e **s=1** o gráfico não tem qualquer sentido.

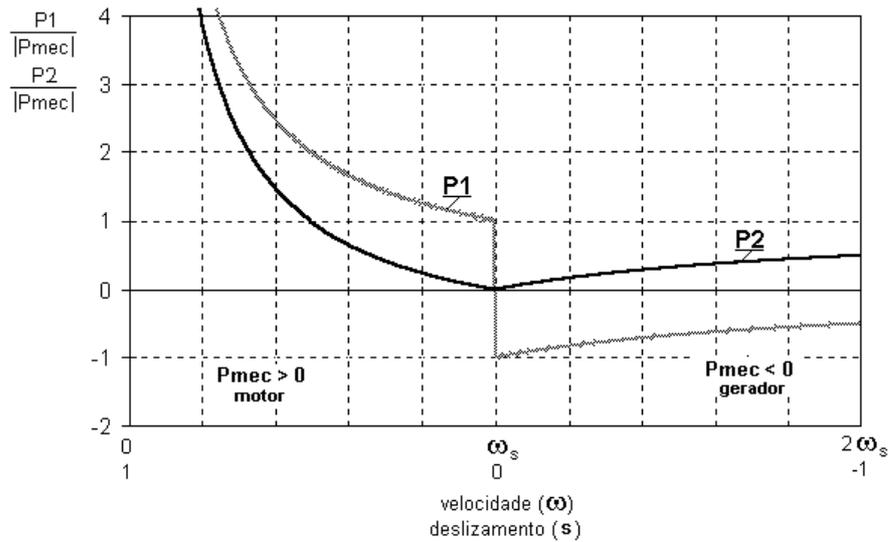


Figura 2.18 - Relação entre as potências do estátor e do rótor face à potência mecânica absoluta.

Na situação motor ($s > 0$) a máquina absorve pelo estátor uma potência (**P1**) proporcional à corrente **Idc** no circuito intermediário. Dependendo do deslizamento da máquina, parte desta potência ($s \cdot P1$) é devolvida à rede através do rótor (**P2**). S a potência $(1-s)P1$ é retirada da rede e transformada em potência mecânica. Se a máquina estiver parada ($s=1$), toda a potência recebida pelo estátor é devolvida de novo à rede pelo rótor, não existindo potência mecânica.

$$P_{mec} > 0, \quad P1 > 0, \quad P2 > 0 \quad e \quad |P_{mec}| = |P1| - |P2|$$

Na situação gerador ($s < 0$) a máquina absorve da máquina primária a potência **Pmec**. Parte desta potência $(1/(1-s))$ é entregue à rede pelo estátor e outra $(s/(1-s))$ é entregue pelos conversores ligados ao rótor. Neste caso:

$$P_{mec} < 0, \quad P1 < 0, \quad P2 > 0 \quad e \quad |P_{mec}| = |P1| + |P2|$$

Perto da velocidade de sincronismo, toda a energia produzida é enviada à rede predominantemente pelo estátor. À medida que a velocidade sobe, a energia produzida e enviada à rede começa a repartir-se pelo estátor e pelo rótor, até que ao dobro da velocidade de sincronismo se reparte de igual modo entre os dois.

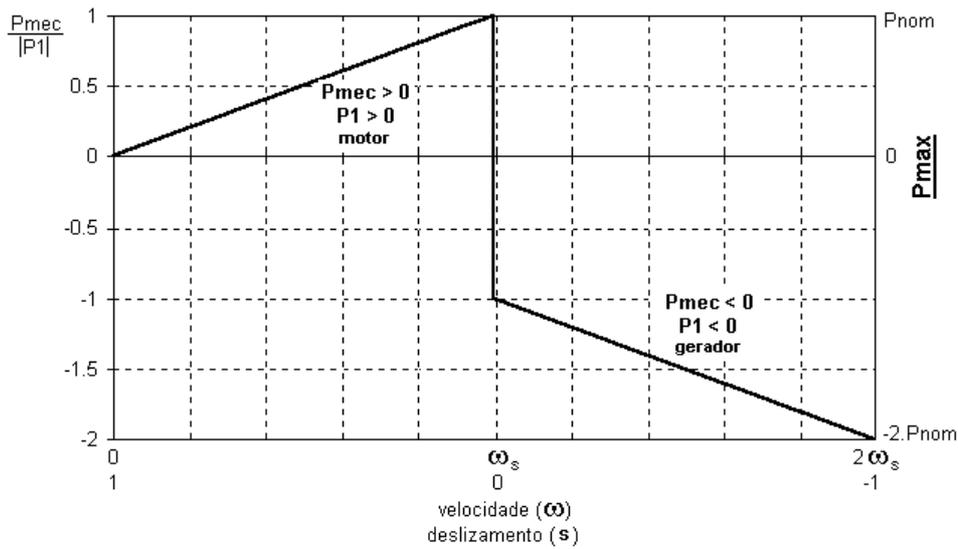


Figura 2.19 - Relação entre a potência mecânica e a potência absoluta do estátor (eq.2.13).

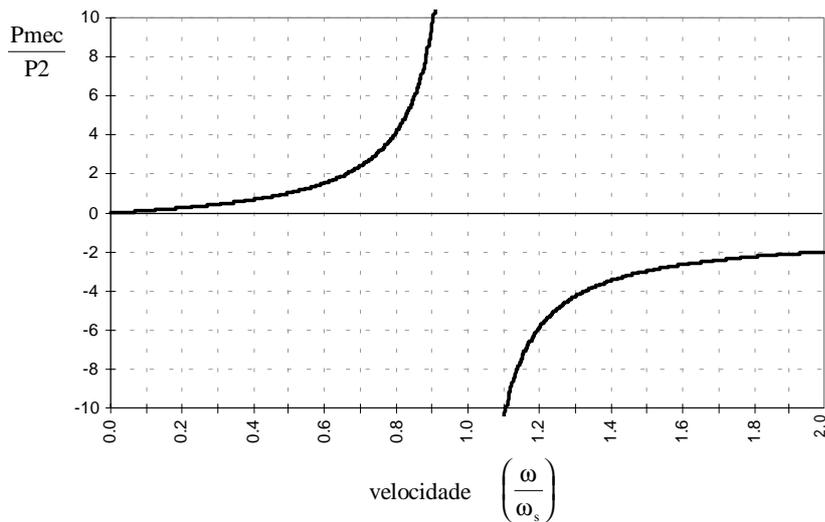


Figura 2.20 - Relação entre a potência mecânica e a potência do rotor (eq.2.15).

Pela Figura 2.19 e pela expressão 2.13 pode-se constatar que uma máquina assíncrona regulada por um SRED permite produzir o dobro da energia nominal (P_{nom}) uma vez que a máquina é dimensionada para uma dada potência estatórica (P_1). Se em cada instante P_1 se mantiver igual à máxima potência P_{nom} , o gráfico passa a indicar a máxima potência que se pode gerar em função da velocidade.

Repare-se que para manter a máquina na potência nominal, é necessário que I_{dc} se mantenha no seu valor nominal (eq. 2.19). Mais uma vez, o gráfico não tem significado para $s=0$, uma vez que a esta velocidade a tensão U_{dc} é nula, pelo que, para haver corrente I_{dc} , E_{dc} teria que ser negativo. O problema é que neste caso a corrente fechar-se-ia pelos díodos do rectificador e não circulava no rotor. Esta é uma consequência dos conversores não permitirem a injeção de potência no rotor.

Se a máquina funcionar sobre uma curva do tipo “otimização da potência-velocidade” para a energia das ondas:

$$P_{mec} = K \cdot \omega_s^3 \quad (2.20)$$

enviará à rede pelo estátor e pelo rótor as potências indicadas na próxima figura.

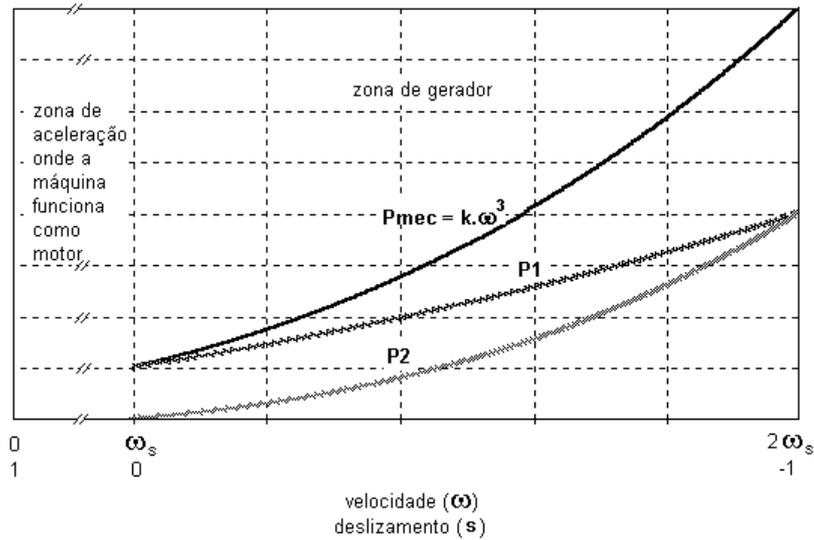


Figura 2.21 - Potências entregues à rede pela máquina (P_{mec}), pelo estátor (P_1) e pelo rótor (P_2).

O binário da máquina (T_e) é dado pela potência mecânica e pela velocidade:

$$T_e = \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (2.21)$$

Das expressões 2.21, 2.15, 2.7 tira-se que:

$$T_e = \frac{P_{mec}}{\omega} = \frac{1-s}{s} \cdot P_2$$

$$T_e = \frac{1}{s} \cdot \frac{P_2}{\omega_s} \quad (2.22)$$

e das expressões 2.22, 2.16 e 2.4 obtêm-se:

$$T_e = \frac{1}{s} \cdot \frac{P_2}{\omega_s} = \frac{1}{s} \cdot \frac{U_{dc} \cdot I_{dc}}{\omega_s} = \frac{1}{s} \cdot \frac{K_1 \cdot |s| \cdot V_1 \cdot I_{dc}}{\omega_s}$$

$$T_e = \frac{K_1 \cdot V_1}{\omega_s} \cdot I_{dc} \cdot \frac{|s|}{s} \quad (2.23)$$

$$T_e = \frac{K1 \cdot V1}{\omega_s} \cdot Idc \cdot \text{sinal}(s)$$

Das expressões 2.8 e 2.23 conclui-se que o binário é proporcional à corrente I_{dc} e que tem a forma indicada na figura seguinte.

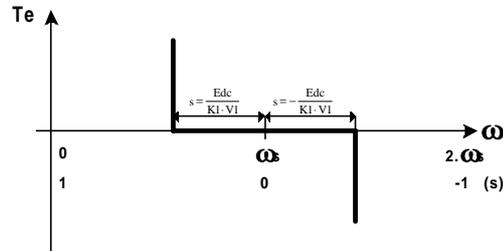


Figura 2.22 - Curva ideal de binário para o SRED.

Na verdade, devido às resistências e indutâncias de fugas o binário sofre uma regulação com a velocidade e a corrente I_{dc} , sendo igual à conhecida curva das máquinas assíncronas para $E_{dc}=0$.

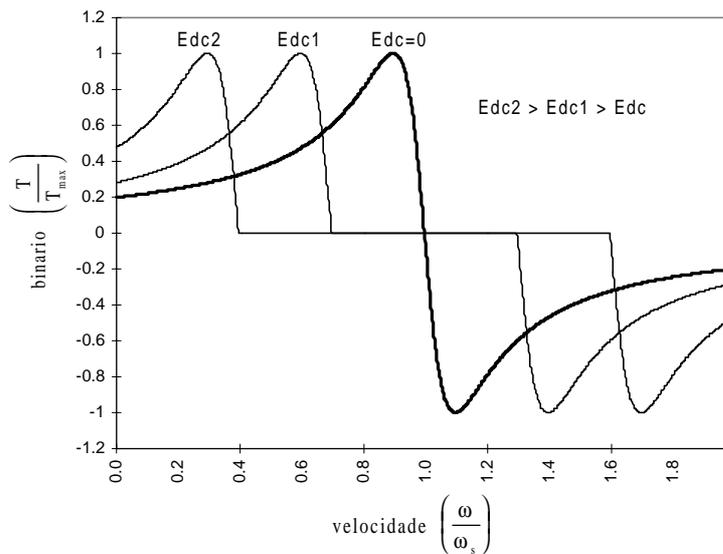


Figura 2.23 - Curva de binário para o SRED.

A zona morta com binário nulo, corresponde à altura em que a potência P_2 se inverte, o que não é possível porque a corrente I_{dc} não pode ser negativa devido aos conversores. Nesta zona a tensão gerada pelo rotor é inferior à tensão E_{dc} gerada pelo conversor DC/AC.

Uma análise mais completa do SRED utilizado é efectuada no Capítulo 5.

Deve ser notado que se os conversores permitirem que P_2 possa ser negativo, a máquina pode funcionar como gerador e como motor acima e abaixo da velocidade de sincronismo:

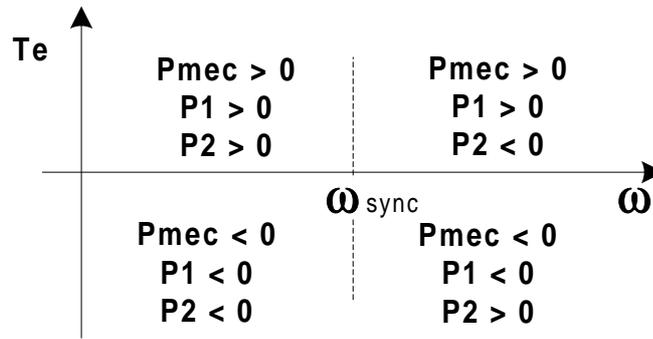


Figura 2.24 - Regime de funcionamento se os conversores permitirem a injeção de energia no rotor.

7 Sistema de recuperação de energia de deslizamento utilizado.

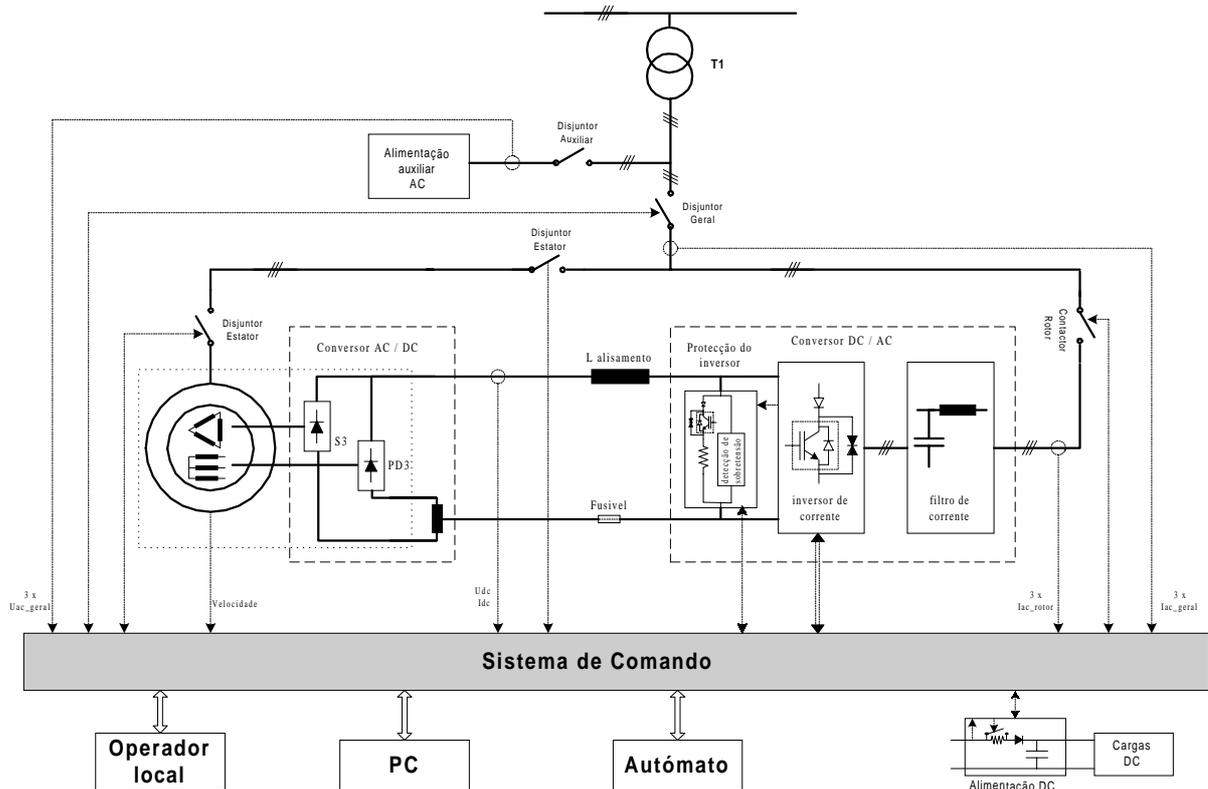


Figura 2.25 - Esquema global do sistema de recuperação de energia de deslizamento usado neste projecto para o aproveitamento da energia das ondas.

O SRED cujo projecto e desenvolvimento são objecto desta dissertação e apresentados nos capítulos seguintes é constituído pelos seguintes elementos:

- Transformador de isolamento e adaptação da tensão no ponto de acesso à rede pública.

- Gerador constituído por uma máquina assíncrona de rotor bobinado e dois enrolamentos rotóricos.
- Conversor AC / DC
 - Rectificador *Paralelo Duplo 3 (PD3)*
 - Rectificador *Série 3 (S3)*
 - Bobina interfásica para realizar o paralelo dos dois rectificadores
- Barramento DC
 - Filtro de corrente constituído por uma bobina de alisamento
 - Fusível de protecção contra sobrecorrentes.
- Conversor DC / AC
 - Inversor de corrente constituído por semicondutores *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)*
 - Filtro de corrente para minimizar os harmónicos produzidos pelo inversor
- Protecção de inversor
 - detecção de sobretensão
 - circuito para formar um caminho alternativo à corrente da bobina constituído por um IGBT, um díodo e uma resistência.
- Sistema de comando responsável por todo o controlo do sistema. É constituído por uma placa com vários circuitos de aquisição e condicionamento de sinais, com sinais de actuação, com um microcontrolador, etc.
- Vários componentes auxiliares: alimentação DC e AC, disjuntores, contactores, etc.

Para reduzir o conteúdo harmónico das correntes do rotor “vistas” pelo estator (correntes injectadas na rede via estator), é utilizada uma máquina com 2 enrolamentos rotóricos: um em estrela e o outro em triângulo. O número de espiras do enrolamento em triângulo tem $\sqrt{3}$ vezes o número de espiras do enrolamento em estrela. Cada enrolamento alimenta um rectificador: um PD3 e um S3. Os dois rectificadores são ligados em paralelo através de uma bobina interfásica. Esta montagem permite que a tensão rectificada (**U_{dc}**) seja mais “lisa” (com 12 arcadas por período) e elimina os harmónicos n.º 5 e n.º 7 das correntes rotóricas “vistas” pelo estator. Para um funcionamento correcto dos rectificadores (e para se verificarem as características acima mencionadas) a corrente no barramento dc (**I_{dc}**) deve ser superior a um determinado nível. Esse nível é imposto pela corrente de circulação que existe entre os dois rectificadores (que é limitada pela bobina interfásica).

Para se reduzirem o número de anéis na máquina assíncrona, os rectificadores estão montados no rotor da máquina nos 3 anéis existentes. Um anel liga a parte positiva dos dois rectificadores ao exterior e os outros dois ligam a parte negativa dos respectivos rectificadores. Se os rectificadores estivessem montados no exterior da máquina seriam necessários 6 anéis para ligar o exterior às 6 fases do rotor (3 fases por enrolamento).

A bobina de alisamento garante que a corrente que flui no barramento DC seja praticamente constante. Isto permite definir com precisão as formas de onda da corrente consumida no rotor pelos rectificadores, garantindo as características de corrente “vistas” pelo estator.

O fusível no barramento DC serve para evitar que a corrente **Idc** suba demasiado por defeito do inversor ou pela actuação do circuito de protecção do inversor enquanto a tensão rotórica não se anula pela abertura da alimentação do estator.

Como conversor DC / AC é utilizado um inversor de corrente com comutação forçada constituído por IGBTs. A elevada frequência de comutação dos IGBTs (2,25KHz)¹ e a técnica de controlo utilizada (PWM) permite “transportar” as componentes harmónicas para altas frequências, simplificando a acção de filtragem que pode ser feita por um filtro mais simples.

O uso de um inversor de corrente é necessário uma vez que a bobina de alisamento impõe uma determinada corrente à entrada do inversor. Também é mais fácil ligar uma fonte de corrente (inversor de corrente) em paralelo com uma fonte de tensão (rede) do que duas fontes de tensão (inversor de tensão e rede) em paralelo devido às correntes de circulação. Como o conversor não tem de impor e controlar a tensão, limitando-se a seguir a tensão imposta pela rede, um inversor de corrente é a opção mais viável.

A protecção do inversor serve para proteger os componentes deste contra sobretensões em caso de avaria. No caso de em algum momento a corrente deixar de ter por onde fluir, a bobina criará um sobretensão de modo a “abrir caminho” para a corrente, o que levará à destruição do inversor. Neste caso a protecção detecta a sobretensão e fecha um caminho alternativo para a corrente. A resistência em serie com o diodo e o IGBT serve para limitar a corrente que fluirá quando o caminho alternativo se fechar. O diodo serve para proteger o igbt contra as tensões negativas que podem surgir no barramento DC.

O transformador serve para isolar e adaptar a tensão do ponto de acesso à rede à tensão requerida pela máquina assíncrona e pelo conversor DC / AC (380V).

O disjuntor geral serve para isolar todo o sistema da rede pública em caso de manutenção ou reparação do sistema. Só pode ser ligado manualmente e depois do controlador o permitir. É desligado manualmente, por ordem do controlador ou por excesso de corrente.

O disjuntor auxiliar serve para alimentar os sistemas auxiliares de consumo AC. Este disjuntor é ligado à rede antes do disjuntor geral (**dg**) porque para se fechar o **dg** é necessário existir tensão AC para accionar a bobina que permite o fecho do **dg**.

Os contactores do rotor e do estator servem para ligar as respectivas partes de uma forma controlada pelo comando do sistema.

¹ Elevada para os níveis de corrente utilizados (500A) uma vez que para níveis mais baixos a frequência usada pode ser mais alta.

O disjuntor do estátor serve para limitar a corrente absorvida por ele, e só é comandado manualmente. O controlador apenas tem conhecimento do seu estado.

A alimentação DC é fornecida por uma fonte DC externa ao sistema em análise (A fonte DC é da responsabilidade da central) e passa por uma bateria de condensadores que garantem durante algum tempo o fornecimento de energia para uma paragem do sistema segura no caso da fonte DC externa falhar.

O sistema de comando é responsável por todo o controlo do SRED que inclui o controlo do inversor, a actuação dos sistemas auxiliares (reles, contactores, disjuntores), aquisição e análise das várias medidas (corrente e tensão DC, correntes do estátor e do rotor, tensão da rede, velocidade da máquina), a definição e controlo da potência enviada à rede, as comunicações com o operador, com PC e com o autómato, etc.