



**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA (GGH)**

APLICAÇÃO DE PTFE (TEFLON®) EM MANCAIS DE ESCORA DE HIDROGERADORES

Lucas André Kunz* Lamartine Célio C. da S. M. e Silva Moysés Vainstein - SIEMENS LTDA
Robert T. Knox – MICHELL BEARINGS

RESUMO

O trabalho apresenta a tecnologia da utilização de PTFE (Politetrafluoretileno), mais conhecido pela marca registrada de Teflon® (Du Pount), na cobertura de segmentos de escora de hidrogeradores verticais, em lugar do tradicional metal patente a base de liga de chumbo (Pb) ou estanho (Sn).

A partir das experiências práticas de aplicação de russos e chineses durante mais de 20 anos, que introduziram esta solução devido a problemas como impureza do óleo lubrificante no sistema de injeção de óleo a alta pressão para partida e parada da máquina, o trabalho apresenta a associação entre um fabricante de mancais e uma concessionária elétrica para encontrarem uma solução economicamente viável para resolver graves problemas de manutenção em segmentos de escora de uma usina hidroelétrica com operação de fornecimento de energia garantida.

O objetivo final do trabalho é mostrar a viabilidade de utilização desta tecnologia em novos projetos permitindo redução de diversos componentes relacionados com o mancal, eliminação completa do sistema de injeção de óleo a alta pressão e ganhos no rendimento devido a redução das perdas no mancal.

PALAVRAS-CHAVE

Teflon®, Mancais, Politetrafluoretileno, Hidrogeradores, Usinas hidrelétricas.

1.0 - INTRODUÇÃO

1.1 Características do material

O PTFE é uma resina termoplástica conhecido principalmente pelo seu coeficiente de fricção

excepcionalmente baixo, no entanto outras características também são notadas, como: de autolubrificante, imunidade para quase todos tipos de ataque químico (inércia química) e habilidade de operar em uma grande faixa de temperaturas.

1.2 Tipos de aplicações existentes

Aplicações com sucesso incluem mecanismos de pedal, atuadores lineares, válvulas de vedação, juntas e articulações automotivas, máquinas têxteis e agrícolas e acessórios de aviões. Um importante uso é na indústria de alimentos onde a maioria dos lubrificantes é proibida por razões sanitárias. Sendo usado desde a fabricação de painéis até como isolante na indústria elétrica.

2.0 – TECNOLOGIA ATUAL

2.1 Mancais revestidos com Metal Patente (Babbit)

A maioria dos mancais de escora de hidrogeradores emprega metal patente (babbit) como a superfície de deslizamento e esta permaneceu a escolha preferida do mundo como o material de revestimento para a maioria das aplicações pesadas em mancais hidrodinâmicos. As vantagens e desvantagens do material são bem conhecidas.

Em particular, o metal patente permite um superfície dimensionalmente estável que é reparada ou substituída facilmente. O material é forjável no sentido de ser capaz de absorver em sua superfície pedaços duros de detritos sem causar danos adicionais.

Por outro lado o metal patente tem um ponto de fusão relativamente baixo que impede ultrapassar um limite superior em sua temperatura operacional.

Se esta temperatura é excedida, é provável que dentro de um período muito pequeno de tempo resulte em um arraste catastrófico do metal patente.

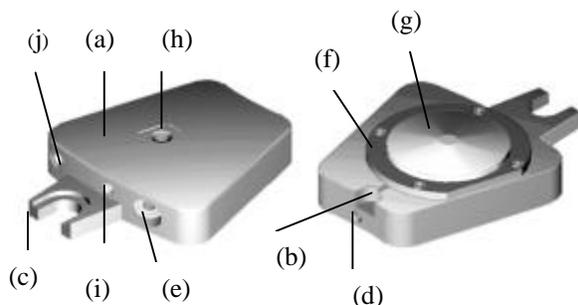
O efeito do limite de temperatura do metal patente é restringir a utilização máxima (expressa como uma combinação de velocidade e carga) permissível em qualquer mancal.

Como uma consideração adicional pode ser notado que o componente principal do metal patente é o estanho, um artigo caro que esteve freqüentemente em disponibilidade limitada em muitas partes do mundo.

Os segmentos do mancal de escora são geralmente fabricados de aço laminado ou forjado (Figura. 1). A superfície de deslizamento (a), é revestida com metal patente de alta qualidade.

A rugosidade das duas superfícies de deslizamento (segmento – parte estática / bloco de escora – parte rotativa) asseguram a formação do filme de óleo entre elas e, portanto, a permanência de um atrito fluído, tanto na velocidade nominal quanto na velocidade mínima.

Os segmentos do mancal de escora são suportados por molas-prato (g) que garantem uma distribuição uniforme de carga axial em todos os segmentos.



- a - Superfície de deslizamento
- b - Rebaixo para guia do segmento de escora
- c - Apoio do guia do segmento de escora
- d - Furo para fixação do dispositivo de montagem
- e - Entrada de óleo a alta pressão
- f - Anel de fixação da mola prato
- g - Mola-prato
- h - Saída de óleo a alta pressão
- i - Poço para instalação de termômetro / termostato

FIGURA 1 – SEGMENTO DO MANCAL DE ESCORA

2.2 Mancais revestidos com PTFE

Como um material de engenharia os benefícios de PTFE são bem conhecidos: um coeficiente de fricção extremamente baixo quando comparado com o aço (0.04~0.09); estabilidade química sem igual; propriedades dielétricas excelentes; e boa força mecânica. Uma característica negativa de PTFE é que

suas propriedades mecânicas são altamente dependentes da temperatura. Assim, uma subida de temperatura de 20 °C para 80 °C ocasiona uma diminuição na resistência a compressão em três vezes. Ainda mais significativa, o PTFE está sujeito a um excessivo deslizamento, ou seja a sofrer deformação devido a carga, até mesmo em baixas temperaturas. Estas últimas propriedades impediram o uso do PTFE como um material de revestimento para mancal em sua forma original.

O projeto do mancal de PTFE, que evoluiu por causa destas limitações, envolve a aplicação de uma camada de 3 mm de espessura de PTFE sobre uma manta aramada de cobre e bronze de aproximadamente 7 mm de espessura. O PTFE é aplicado sobre pressão, que provoca a sua penetração nos vazios da manta de arame até uma profundidade de 1 a 1,5 mm. Deste modo um laço firme é formado entre a cobertura de PTFE que penetra a manta de arame.

A capa composta de PTFE/arame é então suavemente soldada a superfície da placa de aço do segmento de escora. A penetração parcial do PTFE nas malhas de arame permite que o segmento mantenha sua elasticidade. Isto reduz tensões de contato na superfície e assegura uma carga uniforme em cima de toda a face do segmento, até mesmo na presença de irregularidades na face do colar de escora.

Todas experiências informadas com este tipo de segmento de escora indicam uma operação satisfatória e vantagens claras que derivam do uso de mancais revestidos com PTFE. Particularmente, partidas e operação com cargas significativamente mais altas, na faixa de $5,0 \times 10^{-6}$ a $6,5 \times 10^{-6}$ N/m², foram informadas as quais são muito vantajosas em comparação a carga específica típica de $3,5 \times 10^{-6}$ N/m² (em operação) para mancais de metal patente. Além disso a necessidade de alta pressão de lubrificação na partida e parada é eliminada com a redução de custos consideráveis.

A admissão de maiores cargas operacionais específicas conduzem a segmentos de áreas menores para mesmas cargas e em troca obtemos a redução nas perdas de energia no atrito do mancal. Pode ser demonstrado que a redução de perdas de 20~30% é alcançada facilmente pelo uso de mancais de escora revestidos com PTFE. O clássico arraste de metal patente que é seguido freqüentemente por uma falha catastrófica é bem conhecido. No caso de mancais revestidos com PTFE contatos localizados ainda pode acontecer, mas o aquecimento por fricção resultante é muito mais baixo. O PTFE tem uma temperatura de funcionamento muito mais alta que o metal patente, e com isto a falha catastrófica não acontece. Ao contrário, o modo de falha, revelado por trabalho experimental descrito

adiante, é um modo muito gradual associado com desgaste progressivo.

Uma preocupação evidente com o uso do PTFE é do desgaste da superfície. Porém evidência extensa está disponível para mostrar que o uso de PTFE não é nem sequer uma preocupação principalmente devido ao fato destes mancais estarem operando com cargas específicas muito mais altas, além da ausência de alta pressão de lubrificação na partida e parada. Consciente do fato que o menor atrito será sempre uma exigência, desenvolvimentos mais recentes trabalham no uso de PTFE combinado com outras substâncias. Substâncias como carbono, fibra de vidro, e grafite são todos candidatos possíveis para ajudar a melhorar a resistência ao atrito.

3.0 – EXEMPLOS PRÁTICOS

3.1 Experiência prática de chineses e russos em mais de 20 anos

De acordo com engenheiros tanto na antiga União soviética como na China, mancais de metal patente operam bem até que a necessidade de aumentar a capacidade geradora obriga a um aumento da utilização, isto levou a uma série de destruições de mancais. Juntando a isto foram associados falhas nos sistemas de lubrificação de óleo de alta pressão usados para parada e partida das máquinas.

Como consequência destes problemas, em ambos países, o PTFE vem sendo amplamente utilizado em mancais de hidrogeradores como material de revestimento, porém muito poucos desenvolvimentos aconteceram em relação a definição de parâmetros operacionais.

Uma lista de referência de mancais de escora com EMP (elastic metal plastic) instalados em usinas hidroelétricas na Rússia apresenta mancais com carga total variando de 5 a 32 MN e com carga específica variando de 3.8×10^{-6} a 7.0×10^{-6} N/m².

3.2 Experiência entre um fabricante e uma concessionária no desenvolvimento de tecnologia

Dado as vantagens óbvias do PTFE, as duas empresas começaram um programa de desenvolvimento em 1995 visando produzir um mancal que operaria de maneira típica em aplicações de hidrogeradores.

Os objetivos principais do programa eram:

- por um lado, desenvolver a tecnologia de fixação do PTFE sobre o metal e encontrar as suas limitações para garantir a sua aplicação;
- e por outro, encontrar uma solução economicamente viável para resolver graves

problemas de manutenção em segmentos de escora de uma usina hidroelétrica reversível com operação de fornecimento de energia garantida.

3.2.1 Mancal de Teste Piloto

O trabalho de desenvolvimento começou com a fabricação de um mancal de teste piloto. O projeto destes segmentos foi baseado em informações coletadas de bibliografias existentes juntamente com a considerável experiência prévia no projeto de mancais de metal patente. O segmento é composto de uma base de aço laminado, uma malha intermediária de arame e da superfície do mancal feitas de uma placa de PTFE. Os apoios dos segmentos são usinados com pivôs deslocados do centro.

Abaixo encontram-se as características pertinentes ao mancal.

Segmentos de escora:

Superfície do mancal (4 segmentos) - $6,094 \times 10^{-2}$ m²

Diâmetro Médio de Pressão (DMP) - 0,464 m

Pivôs deslocados do centro

Óleo lubrificante - ISO VG 32 @

temperatura de entrada - 43 °C

Condições de operação:

Pressão aplicada - 1.4×10^{-6} a 10.1×10^{-6} N/m²

Rotação periférica no DMP - 10 a 36 m/s

Os segmentos foram projetados para serem instalados em um mancal vertical de escora e guia, tamanho 14 da série standard da Michell Bearings. Para alcançar as cargas específicas mais altas o mancal foi testado com apenas quatro segmentos de escora, do conjunto normal de oito. Uma carga vertical de empuxo foi aplicada por meio de um módulo hidráulico independente de carga.

O mancal de teste piloto revestido com PTFE foi sujeitado a uma grande variação de condições operacionais com cargas específicas até $10,1 \times 10^{-6}$ N/m² e rotações de 25 s^{-1} equivalente a uma velocidade periférica de 36 m/s no diâmetro médio de pressão do mancal. A Figura 2 apresenta um jogo típico de resultados experimentais na forma de registro da temperatura máxima do segmento como uma função da carga aplicada para uma variação de velocidades. Com a finalidade de comparação uma série paralela de experiências foi executada usando segmentos de metal patente com uma geometria semelhante aquelas dos segmentos recobertos com PTFE. As temperaturas dos segmentos resultantes foram quase idênticas nos dois casos.

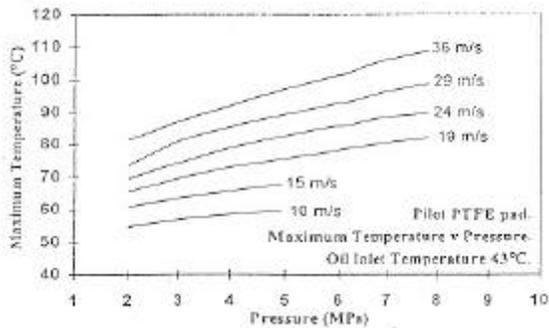


FIGURA 2 – TEMPERATURA MÁXIMA SEGMENTO DE ESCORA COMO UMA FUNÇÃO DA PRESSÃO E DA VELOCIDADE PARA O MANCAL DE TESTE PILOTO

Os segmentos piloto com PTFE suportaram bem ao longo do programa de testes mesmo com a pressão máxima aplicada, a mais de $10,0 \times 10^{-6}$ N/m², estando bem acima da pressão de serviço máxima habitual para mancais de metal patente de $3,5 \times 10^{-6}$ a 4×10^{-6} N/m². Em conclusão das experiências foram inspecionados os segmentos de perto, e foi considerado que estavam em condição excelente com sinais insignificantes de desgaste na superfície e, mais importante, sem nenhuma redução mensurável na espessura.

O programa de testes nestes segmentos em pequena escala continuaram após os testes piloto. Pressões de até $20,0 \times 10^{-6}$ N/m² foram alcançadas. Adicionalmente as placas de aço dos segmentos foram deliberadamente reduzidas na espessura, numa tentativa de produzir um coroamento excessivo e assim induzir à falha. Pode ser reportado que mesmo com pressões extremamente altas e o perfil pesadamente coroado os segmentos testados não chegaram a produzir uma falha catastrófica. Quando examinados os segmentos mostraram o desgaste nas áreas com espessura mínima do filme de óleo, porém com o retorno a utilização em condições menos árduas, os segmentos continuaram operando satisfatoriamente. É provado que os segmentos de escora revestidos com PTFE têm uma tolerância de utilização muito alta.

Os resultados do programa de testes piloto, como descrito, foram suficientemente promissores para encorajar a decisão de proceder com o início de aplicação industrial em usinas hidroelétricas

3.2.2. A usina de energia hidroelétrica de Ffestiniog

Usina Hidroelétrica de Ffestiniog, Gales Norte, é um armazenamento hídrico de geração e bombeamento completado no início dos anos 60, atualmente dirigida e operada, como sua vizinha Usina Hidroelétrica de Dinorwig, Llanberis, Gales Norte, pela First Hydro

Company, um empresa da Edison Mission Energy. A usina de Ffestiniog tem um registro longo de operação satisfatória e performance do mancal de escora que faz dela um local ideal para a primeira aplicação de segmentos de escora recobertos com PTFE. A usina de Ffestiniog inclui quatro turbinas/bombas centrífugas uni-direcionais de 90 MW cada as quais são chamadas em uma base intermitente para operar em geração de eletricidade ou no modo de bombeamento, conforme exigido. Cada conjunto bomba/gerador é composto de um eixo vertical principal apoiado em segmentos basculantes do mancal de escora,. Sistema de injeção de óleo a alta pressão é utilizado na partida e parada da máquina.

Os segmentos revestidos com PTFE projetados para a usina de Ffestiniog, eram semelhante a aqueles usados no trabalho experimental anterior, mas em tamanho maior. Porém neste caso nenhuma provisão foi feita para permitir injeção forçada. Os segmentos foram instalados na Unidade 4 de Ffestiniog, e comissionados em 27 de setembro de 1996. A unidade voltou a operação imediatamente e durante os sete meses seguintes, em mais de 2900 horas de operação, o mancal foi sujeito a todo tipo de condições de funcionamento. Este programa incluiu perto de 900 partidas com carga em modos de geração e bombeamento. A unidade ficou em operação em média dezesseis horas por dia e durante este tempo com várias partidas em determinados dias. Temperaturas dos segmentos de escora e do óleo foram medidas ao longo do período mas nada desfavorável foi observado. Temperaturas típicas do segmentos de escora e do óleo do tanque foram respectivamente 53°C e 50°C.

No geral a instrumentação foi composta de termômetros de resistência montados nos segmentos e no óleo circulante. Uma monitoração útil em Ffestiniog foi o uso de sondas de proximidade por indução fixadas às extremidades de arraste dos segmentos. As sondas monitoraram o entreferro entre os segmentos e o colar de escora e deram uma boa indicação de qualquer desgaste possível do PTFE. Além disto elas também permitiram visualizar o comportamento dos segmentos em relação ao colar e foi possível calcular a espessura do filme de óleo.

A unidade foi parada e os segmentos removidos para inspeção em 4 de maio de 1997, quando a unidade acumulava 2903 horas de operação com quase 900 partidas. Cheques visuais e dimensionais foram executados mas não foi detectado nenhum sinal de dano ou desgaste. Os segmentos deram a aparência de estarem em perfeitas condições. Era de se esperar ver alguns sinais de marcas circunferenciais devido às diversas partidas e paradas, mas elas estavam ausentes., as únicas marcas na superfície do segmento

eram radiais e portanto aquelas produzidas durante a operação de retífica para obter a espessura e acabamento final da superfície.

Quando a inspeção foi completada os segmentos foram adequadamente rearranjados no mancal e a unidade voltou ao serviço. Ao término de dezembro de 1998 os dados acumulados para o mancal já eram de 9315 horas operacionais e 5074 partidas e paradas, sem dano informado ou sinais de uso. Uma segunda inspeção está programada para acontecer em Abril/Maio 1999.

Deve ser lembrado que os mancais revestidos com PTFE montados em Ffestiniog não têm nenhuma injeção de óleo de alta pressão, mesmo com uma pressão superficial média de 2.8MPa.

Os resultados da instalação experimental e primária de Ffestiniog são muito encorajadores para a utilização de segmentos de escora revestidos com PTFE em um número maior de hidrogeradores e outras aplicações. Como descrito anteriormente, e demonstrado por testes, os segmentos de escora revestidos com PTFE têm um potencial de carga de trabalho significativamente maior do que aquele habitual para segmentos de metal patente.

4.0 NOVOS PROJETOS

4.1 Utilização da tecnologia em novos projetos

Até este ponto apenas apresentamos a substituição do revestimento de metal patente pelo de PTFE em máquinas existentes, ou para testes, ou para tentar solucionar problemas de desgaste prematuro nos mancais originais.

Utilizamos o projeto do hidrogerador de Porto Estrela, ainda em estudo, com as seguintes características:

| | |
|---------------------------------|-----------------------|
| Potência nominal | 60 MW |
| Rotação nominal | 3.53 s^{-1} |
| Rotação de disparo | 7.82 s^{-1} |
| Peso das partes rotativas (G+T) | 1873 kN |
| Empuxo hidráulico (Kaplan) | 5194 kN |

para comparar os resultados que poderiam ser obtidos com a utilização de todas as vantagens do PTFE em um projeto novo, variando a pressão específica no cálculo dimensional.

TABELA 1 – COMPARAÇÃO (VALORES ESPECÍFICOS PARA PORTO ESTRELA)

| ITEM | Mancal | Mancal |
|------|--------|--------|
|------|--------|--------|

| | standard | PTFE |
|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Pressão específica | $4,0 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ | $8 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ |
| Bloco de escora | 17300 kg | 7850 kg |
| Acessórios | 12410 kg | 4980 kg |
| Segmento de escora+molas prato | 2000 kg 10 Segm. | 560 kg 10 Segm. |
| Segmento de guia | 1190 kg | 720 kg |
| Perda total para mancal combinado | 291 KW | 203 KW |
| Diâmetro do assento do bloco no eixo | 0,870 m | 0,870 m |
| Altura total do bloco de escora | 1,085 m | 0,950 m |
| Sist. injeção de óleo | Sim | Não |

Além dos valores apontados na Tabela 1, pode ser notado nas Figuras 4 e 5 que, apesar de não haver nenhuma modificação nas partes ativas do gerador, a redução no tamanho do tanque da cruzeta de escora inferior e no bloco de escora é visível.

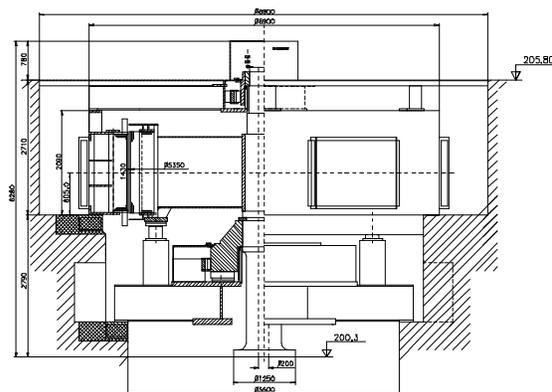


FIGURA 3 – DIMENSIONAL COM MANCAL STANDARD

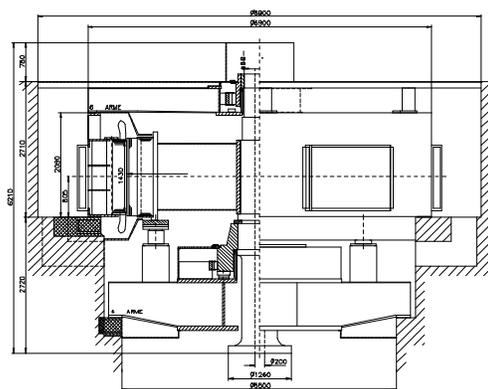


FIGURA 4 – DIMENSIONAL COM MANCAL PTFE
4.2 Redução de perdas

Experiências feitas com os segmentos do teste piloto revestidos com PTFE e com metal patente demonstraram, conforme apresentado na Figura 5, que

independente do material que reveste o segmento, as perdas aumentam com a velocidade, quando se mantém as outras variáveis fixas.

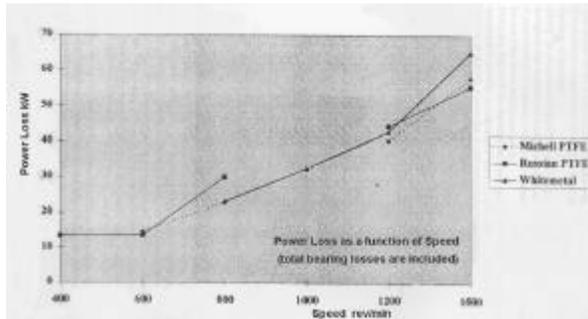


FIGURA 5 – PERDAS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE (PERDAS TOTAIS DOS MANCAIS)

As perdas por atrito são calculadas de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Perdas} = K_1 \times R \times A \times S, \quad \text{e} \quad R = K_2 \times [V \times P \times S / W]^{0.5}$$

Onde:

- R - esforço cortante do óleo
- A - área do segmento de escora
- S - velocidade de deslizamento no diâmetro médio
- P - pressão média (= F / A)
- F - carga aplicada no segmento
- V - viscosidade do óleo
- W - largura radial do segmento
- K_i - constantes

Assim temos:

$$\text{Perdas} = K_3 \times [V \times F / W]^{0.5} \times S^{1.5} \times A^{0.5}$$

Notamos que, em uma substituição de segmentos em máquina existente, onde as condições de operação da máquina (óleo - V, rotação - S e carga - F) serão mantidas, podemos reduzir a área do segmento e com isto estaremos reduzindo as perdas no mancal.

5.0 CONCLUSÃO

Como primeiro ponto temos a eliminação completa do sistema de injeção de óleo a alta pressão para partida e parada da máquina, juntamente com a redução da velocidade de aplicação dos freios e do desgaste dos mesmos.

Tanto em novos projetos, quanto em repotenciações, a capacidade de suportar maiores cargas e temperaturas permite: a redução da área dos segmentos trazendo de 20 a 30% de redução nas perdas do mancal de escora; e aumenta a margem de segurança de operação e de disponibilidade da máquina.

Com as reduções de perdas temos ainda uma economia na redução de todos os componentes relacionados com o mancal, ou seja, podemos reduzir proporcionalmente o bloco de escora, o tanque de óleo, os trocadores de calor.

Executando o segmento de guia também revestido com PTFE, os sistemas de isolamento do eixo ou do mancal podem ser eliminados.

Apesar do custo superior do PTFE em relação ao metal patente tradicional, as reduções relativas aos pontos mencionados acima, permitem obter ganhos no custo geral do equipamento.

No entanto, o ponto positivo principal é a confiabilidade, devido a quase impossibilidade de ocorrer um arraste do material, mesmo em casos extremos de sobrecargas por falhas.

6.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) MOSS, W.O. AND KNOX R.T. PTFE Thrust bearings for hydrogenerators and their application to Dinorwig & Festiniog pumped storage power plants, UK. Published in Technical Papers-Hydro Vision 98 July 28-31, 1998, Reno, Nevada, USA.
- (2) SIMMONS, J.E.L., KNOX, R.T., AND MOSS, W.O. The development of PTFE-faced hydrodynamic thrust bearings for hydrogenerator application in the United Kingdom. Published in the Proceedings of Institute of Mechanical Engineers Vol 212 Part J 1998.
- (3) CATÁLOGOS DE PRODUTOS SIEMENS – D-340PI; D-343PI; D348PI