

# REVISTA

# SODEBRAS

SOLUÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DO PAÍS

VOLUME 1 - Nº 01 - Janeiro/ 2006  
ISSN - 1809-3957

## ARTIGOS PUBLICADOS

PUBLICAÇÃO MENSAL  
Nesta edição

PERFIS VERTICAIS DE ENERGIA ESTÁTICA DA ATMOSFERA SOBRE O NORTE E NORDESTE DO BRASIL EM EPISÓDIOS ANÔMALOS – Ana Cleide Nascimento Bezerra; Daniel Gonçalves das Neves; Enilson Palmeira Cavalcanti .....	03
RESULTADOS PRELIMINARES DA ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO DIURNO USANDO IMAGENS DO SENSOR MODIS (TERRA E AQUA) PARA DIAS DE CÉU CLARO – Kleber Renato da Paixão Ataíde; Bernardo Barbosa da Silva; Enilson Palmeira Cavalcanti .....	08
HOTFILE SOFTWARE FOR DETERMINATION OF THICKNESS, TOTAL STRESS (THERMAL AND INTRINSIC) AND THE USEFUL MASS OF CVD DIAMOND FILMS DEPOSITED BY HOT FILAMENT REACTOR – Teófilo Miguel de Souza .....	15
CVD DIAMOND FILM DEPOSITION ON Ti6Al2Sn4Zr2Mo ALLOY ASSISTED BY MICROWAVE PLASMA REACTOR UNDER LOW TEMPERATURES – Teófilo M. de Souza; Alix Gicquel; François Silva; Sandrine Gay .....	24
PROGRAMA PARA CARACTERIZAÇÕES DE FILMES DE DIAMANTE CVD DEPOSITADOS A PLASMA DE MICROONDAS – Teófilo M. de Souza; Alix Gicquel .....	32
DIAMANTE CVD - O MATERIAL DO SÉCULO 21 – Teófilo Miguel de Souza; Jomar Esteves Bueno .....	37
DISSIPADORES DE CALOR COM DIAMANTE CVD – Teófilo Miguel de Souza; Wellington Pascoal de Santana .....	49
DEPOSIÇÃO DE FILME DE DIAMANTE CVD SOBRE IMPLANTES DENTÁRIOS COM LIGAS DE TITÂNIO LISA – Teófilo Miguel de Souza; Joanisa Possato .....	55
TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES DE DIAMANTE CVD – Teófilo Miguel de Souza; Joelma Mello; Jomar Esteves Bueno .....	62

SOFTWARE PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO – Teófilo Miguel de Souza; José Feliciano Adami; Inácio Bianchi .....	74
SOFTWARE PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS POR PÁRA-RAIOS – Teófilo Miguel de Souza; Inácio Bianchi .....	84
ANÁLISE DO RENDIMENTO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES EM SISTEMAS ALTERNATIVOS QUE UTILIZAM INVERSOR DE ONDA SENOIDAL MODIFICADA PARA GERAÇÃO DE TENSÃO AC – Esdras Evangelista Silva; Teófilo Miguel de Souza .....	90
TEMPERATURE PROFILES OBTAINING ON HEAT SINKS RECOVERED WITH CVD DIAMOND FILM FOR SEMICONDUCTORS CIRCUITS UTILIZING THERMOCOUPLES – T. M. Souza; E. Sakai .....	97
DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO PLANILHA ELETRÔNICA – Jomar Esteves Bueno; Arsênio de Paiva Lopes; Teófilo Miguel de Souza .....	104
DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS ACIONADOS POR RODA D'ÁGUA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E BOMBEAMENTO DE LÍQUIDOS, UTILIZANDO PLANILHA ELETRÔNICA – Teófilo Miguel de Souza; Jomar Esteves Bueno; Arsênio de Paiva Lopes .....	109
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA ATRAVÉS DA ENERGIA SOLAR – PROCEDIMENTOS PARA VISTORIA VISANDO À PERÍCIA TÉCNICA – Arsênio de Paiva Lopes; Jomar Esteves Bueno; Teófilo Miguel de Souza .....	114
SISTEMA DE MULTIPLICAÇÃO DE VELOCIDADES PARA MOTORES EÓLICOS E RODA D'ÁGUA – Teófilo Miguel de Souza; Marco Aurélio Ferla de Oliveira .....	120
UTILIZAÇÃO DE MATERIAL ALTERNATIVO PARA FABRICAÇÃO DE RODA D'ÁGUA PARA AMBIENTES QUIMICAMENTE AGRESSIVOS – Teófilo Miguel de Souza; Vinícius Lourenço dos Reis Silva; Carlos Alberto Junqueira Branco Junior; Murillo dos Santos Menezes; Ederaldo Godoy Júnior; José Luz Silveira .....	129
SOLAR PARABOLIC CYLINDRICAL HEATER WITH FILM OF POLYETHYLENE FOR HEATING OF WATER AND DRYING OF GRAINS – Teófilo Miguel de Souza; Fernando de Haro Moraes; Leandro Yossida; Murillo dos Santos Menezes .....	139
CATA-VENTO: MÉTODO DE SELEÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS PELO CENTRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS DA UNESP – CAMPUS GUARATINGUETÁ – Luis Fernando Silva Moura; Teófilo Miguel de Souza	146

Atendimento:  
sodebras@sodebras.com.br  
Acesso:  
<http://www.sodebras.com.br>



## PERFIS VERTICAIS DE ENERGIA ESTÁTICA DA ATMOSFERA SOBRE O NORTE E NORDESTE DO BRASIL EM EPISÓDIOS ANÔMALOS

**Ana Cleide Nascimento Bezerra**

Universidade Federal de Campina Grande Av. Aprígio Veloso, 882-Bodocongó - 58109.970 - Campina Grande-PB

Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA)

E-mail: [anameteoro@yahoo.com.br](mailto:anameteoro@yahoo.com.br)

**Daniel Gonçalves das Neves**

Universidade Federal de Campina Grande Av. Aprígio Veloso, 882-Bodocongó – 58109.970 - Campina Grande-PB

Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA)

E-mail: [daniel\\_neves@hotmail.com](mailto:daniel_neves@hotmail.com)

**Enilson Palmeira Cavalcanti**

Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882 – Bodocongó - 58109.970 - Campina Grande/PB

Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA)

E-mail: [enilson@dca.ufcg.edu.br](mailto:enilson@dca.ufcg.edu.br)

**Abstract.** In this work we presented the vertical profiles of static energy of the atmosphere on the areas the north (area1) and Northeast of Brazil (area2) in years of extreme events of anomalies of Sea of the Surface of the Temperature (SST) of the adjacent oceans. It was used monthly data of National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) of reanalysis, spaced in a grating of 2.5° by 2.5° of latitude and longitude. Using data of SST averages for selection of the events on areas of occurrences of the El Niño 3 and 3.4 (areas that supply with more certainty the intensity of the events) and of Atlantic Dipole, and the criteria: the anomalies of SST  $\geq 1.0^{\circ}\text{C}$  ( $\leq -1.0^{\circ}\text{C}$ ) for characterization of an event of El Niño (La Niña), b) anomalies of SST that simultaneously presented opposite anomalies on the north basin and south basin of Atlantic Ocean, for the period of February to April. Four episodes of ENSO and four of dipolo pattern were selected like this. Calculating the static energies evaporates, humid and saturated in each pressure level (925-100hPa) resulting in a vertical profile of the energies for the areas 1 and 2 and selected years. It was observed in the climatological vertical profiles of the medium energies, that on the area 1 the atmosphere came lightly more humid than on the area 2 (black line with open circles). During the years of El Niño (La Niña) and positive Phase of Dipolo (negative Phase of Dipolo), they were visualized in the areas 1 and 2, less humid atmospheres (more humid). the static dry energy didn't present prominence variations during the studied years. They were visualized in the profiles of humid static energy during the years of El Niño and positive Dipolo (La Niña and negative Dipolo) values above (below) of the average. Therefore, the vertical profile of the static energy during the rainy period, in the areas north and NEB comes more sensitive to Oceano Pacific's phenomena, mainly in your positive phase.

*Keywords:* Profile Vertical, Static energy, ENSO, Atlantic Dipole

### 1. Introdução

Em quatro décadas, vem se acumulando importantes conhecimentos sobre as influencias dos oceanos no clima regional. Fenômenos catastróficos ocorrem e em alguns casos tido como resposta da natureza à ação humana. Os danos causados ao setor social e econômico são os mais preocupantes levando a necessidade, cada vez crescente, de se conhecer melhor esse processo numa tentativa de prevenção ou ate mesmo evitá-los.

Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o sistema meteorológico causador de chuvas mais importante no setor norte da Amazônia e norte do Nordeste do Brasil. A ZCIT é uma banda de nebulosidade na faixa equatorial em torno do globo terrestre, formada pela confluência dos ventos alísios de nordeste (trazido do hemisfério norte) com os ventos alísios de sudeste (hemisfério sul), a convergência desses ventos faz com que o ar, quente e úmido ascenda, levando umidade do oceano para níveis mais altos da atmosfera favorecendo a formação das nuvens. Sua localização é mais significativa sobre os Oceanos, sendo a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) um dos fatores determinantes na posição e intensidade deste fenômeno. É caracterizada pelo deslocamento norte-sul ao longo do ano, migrando de sua posição mais ao norte, cerca de 10°N-14°N em agosto-setembro, para a posição mais ao sul, cerca de 4°S, durante março-abril.

Várias análises observacionais demonstram que a posição latitudinal da ZCIT é diretamente dependente das características climáticas associadas aos gradientes de TSM do Atlântico Norte e Sul os quais controlam os padrões de pressão e vento sobre o Atlântico Tropical (Souza e Nobre, 1998; Sousa, 2003).

Marengo *et al.*, (1993), observou que durante anos de grande aquecimento das águas do Pacífico equatorial central (fenômeno do El Niño), a ZCIT encontra-se anormalmente mais ao norte de sua posição normal sobre o oceano Atlântico tropical, assim os ventos alísios de NE são mais fracos, reduzindo a umidade que penetra para o interior da região Amazônica.

Esses estudos, além de Hastenrath and Heller (1977), Moura e Shukla (1981), Brabo *et al.* (1993), Marengo *et al.*, (1993), Souza e Nobre (1993), Uvo (1998), Nobre (2003), entre outros, são contribuições que auxiliam entender as influências dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais no regime chuvoso do outono no Leste da Amazônia (LAM) e Nordeste Brasileiro (NEB).

Neste trabalho objetiva-se apresentar os perfis verticais de energia estática da atmosfera sobre as regiões do LAM e NEB em anos de eventos extremos de anomalias de TSM dos oceanos adjacentes.

## 2. Materiais e Método

### 2.1. Dados

São utilizados dados mensais de reanálises do *National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), espaçados em uma grade de 2,5° por 2,5° de latitude e longitude, Kalnay *et al.* (1996), Kistler *et al.* (2001). Os dados de temperatura da superfície do mar são médias de observações locais espaçadas em uma grade de 2° por 2° de latitude e longitude, discutidas serem adequadas para descrever os padrões de TSM entre 30°S e 60°N excluindo a área central e leste tropical e sul do Pacífico (área de fortes anomalias de TSM), detalhes em Reynolds (1988).

### 2.2. Metodologia

Para seleção dos eventos, foram calculadas as médias mensais de TSM sobre áreas de ocorrências dos El Niño 3 e 3.4 (áreas que fornecem com mais certeza a intensidade dos eventos) e Dipolo do Atlântico (Fig. 1a), assim como, a delimitação das áreas para as quais foram construídos os perfis verticais de energia estática (Fig. 1b). As escolhas dos episódios estudados foram feitas a partir da série temporal das anomalias, conforme mostram as Fig. (2) e (3).

A seleção dos episódios seguiu os seguintes critérios: a) anomalias de TSM  $\geq 1.0^{\circ}\text{C}$  ( $\leq -1.0^{\circ}\text{C}$ ) para caracterização de um evento de El Niño (La Niña), b) anomalias de TSM que simultaneamente apresentaram anomalias opostas sobre a bacia norte e bacia sul do Atlântico, para o período de fevereiro a abril.

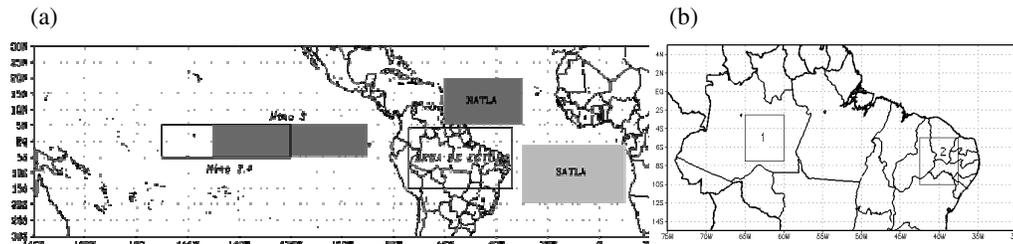


Figura 1 – (a) Área de localização do El Niño 3 (5°N-5°S, 150°W-90°W) e 3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W), Dipolo do Atlântico (Norte: 5°N-20°N, 30°E-60°W; Sul: 0°-20°S, 30°W-60°W), (b) Área 1 e 2

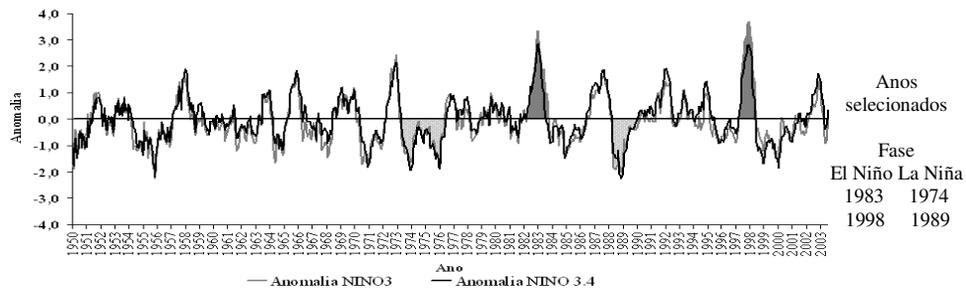


Figura 2 - Anomalias mensais de TSM do Oceano Pacífico Tropical na área do El Niño 3 e 3.4 com os episódios selecionados e preenchidos em cinza escuro (El Niño) e cinza claro (La Niña)

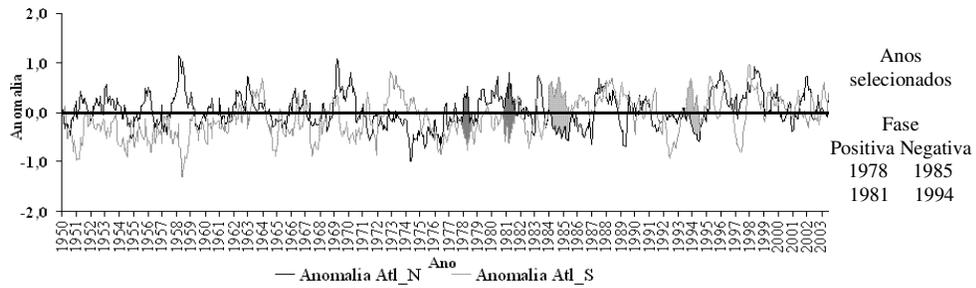


Figura 3 – Anomalias mensais de TSM do Oceano Atlântico Norte (linha preta) e Sul (linha cinza) com os episódios selecionados no quadro ao lado e preenchidos em cinza escuro (Dipolo positivo) e cinza claro (Dipolo negativo)

Seguindo os critérios de seleção, foi possível selecionar quatro episódios de ENSO e quatro de padrão de dipolo.

A delimitação das áreas (Figura 1b) são de  $5^\circ \times 5^\circ$  de latitude e longitude, sobre a região Norte ( $2^\circ\text{S}-7^\circ\text{S}$  e  $60^\circ\text{W}-65^\circ\text{W}$ ) e NEB ( $5^\circ\text{S}-10^\circ\text{S}$  e  $37,5^\circ\text{W}-42,5^\circ\text{W}$ ) chamadas de área “1” e área “2”.

A expressão das energias estáticas seca (S), úmidas (U) e saturada ( $U_s$ ) são dadas, respectivamente, por:

$$S = c_p T + \phi \quad (1)$$

$$U = S + L_v q \quad (2)$$

$$U_s = S + L_v q_s \quad (3)$$

em que  $c_p = 1005 \text{ JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  é o calor específico a pressão constante,  $T$  é a temperatura do ar,  $\phi$  é o geopotencial,  $L_v = 2462 \text{ kJ kg}^{-1}$  é o calor latente de vaporização e  $q$  e  $q_s$  são a umidade específica para o ar úmido e saturado, respectivamente.

Usando as Eq (1), (2) e (3) calculou-se as energias estáticas seca, úmida e saturada média do trimestre de fevereiro a abril em cada nível de pressão (925, 850, 700, 500, 300, 250, 200 e 100hPa) resultando em um perfil vertical das energias para as áreas 1 e 2 e anos selecionados.

### 3. Resultados

Observa-se nos perfis verticais climatológicos das energias médias, que sobre a área 1 (linha preta com círculos fechados) a atmosfera apresenta-se ligeiramente mais úmida do que sobre a área 2 (linha preta com círculos abertos). Essa característica já era esperada, pois a área 1 localiza-se sobre a região da maior floresta tropical úmida e a área 2 sobre a região semi-árida. Sabe-se que a atmosfera sobre floresta é bastante úmida, devido a sua alta evapotranspiração chegando a ser responsável por cerca de 50% das chuvas que a floresta recebe, o restante é originário de águas trazidas pelo vento do Oceano Atlântico, como parte do ciclo hidrológico da região (Salati *et al.*, 1979).

Essa observação pode ser comprovada com facilidade visualizando a área entre os perfis verticais das energias estáticas úmida e saturada. Quanto menor a área, mais úmida se apresenta a atmosfera, ou seja, mais próxima da saturação. Logo, seguindo este critério, percebe-se que área entre os perfis das energias estáticas úmida e saturada é menor sobre a área 1 do que a observada sobre a área 2. Embora a área 1 seja de características semi-árida observa-se que a energia estática úmida se aproxima do observado para a área 2, provavelmente devido ao suprimento de energia latente para o NEB pelo Oceano Atlântico.

Durante os anos de El Niño (La Niña) na Figura 5 e Fase positiva do Dipolo (Fase negativa do Dipolo) na Figura 6, foram visualizadas nas áreas 1 (Figura 5a e 6a) e 2 (Figura 5b e 6b), atmosferas menos úmida (mais úmidas).

A energia estática seca não apresentou variações de destaque durante os anos estudados, porém as pequenas variações visualizadas acima (abaixo) da média foram mais fortes durante os anos com episódios de El Niño (La Niña) do que durante os anos de Dipolo positivo (Dipolos negativos).

Com relação ao perfil vertical da energia estática úmida, valores máximos em baixos e altos níveis e mínimos nos níveis médios verificam-se coerência tanto em ordem de grandeza quanto ao perfil vertical encontrados por Silva Marques (1983) e Cavalcanti (1986) sobre o NEB, embora esses estudos terem sido realizados com valores médios mensais.

Foram visualizados nos perfis de energia estática úmida durante os anos de El Niño e Dipolo positivo (La Niña e Dipolo negativo) valores acima (abaixo) da média, sendo que na área 2 os valores mínimos observados em níveis médios da atmosfera não variaram tanto quanto os encontrados na área 1, exceção apenas para o ano de 1985 (ano de Dipolo negativo) em que, para níveis acima 850hPa, apresentou o perfil da energia úmida acima da média.

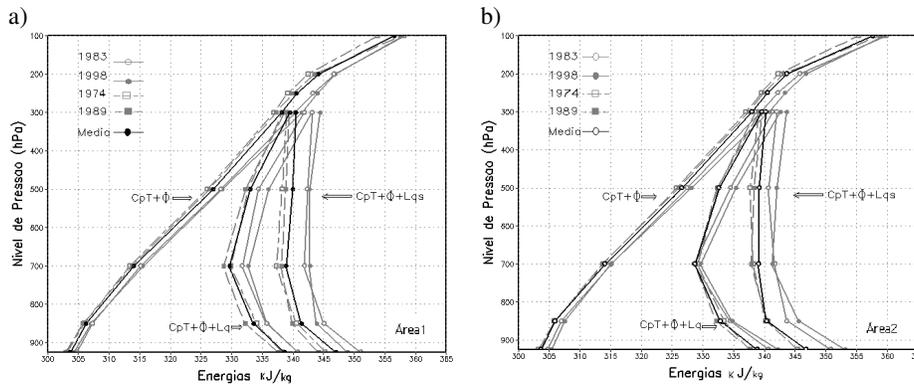


Figura 5 – Perfil vertical das energias estáticas seca, úmida e saturada média do trimestre fevereiro-abril. Climatologia - linha preta continua, El Niño - linhas continua cinza e La Niña - linha tracejada cinza nas áreas (a) 1 e (b) 2

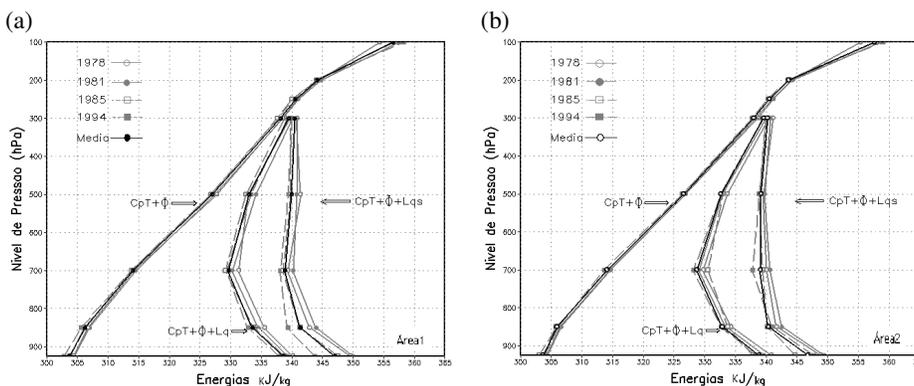


Figura 6 - Perfil vertical das energias estáticas seca, úmida e saturada média do trimestre fevereiro-abril. Climatologia - linha preta continua; Dipolo positivo - linhas continua cinza e Dipolo negativo - linha tracejada cinza nas áreas (a) 1 e (b) 2.

#### 4. Conclusão

Durante o período chuvoso, a atmosfera já se encontra ligeiramente úmida sobre as regiões norte e NEB, no entanto, os episódios de El Niño, La Niña e Dipolos positivo e negativo atuam na região tornando os períodos chuvosos mais ou menos intensos. Sabe-se que o evento La Niña no Brasil causa menos danos que o El Niño, nos perfis verticais de energias estáticas pode-se visualizar essa característica, pois durante os episódios de El Niño, foram visualizadas as maiores variações. Nos anos de Dipolo também foi observado um comportamento semelhante, ou seja, na fase negativa apresentou menor variação do que os anos de fase positiva, porém com uma menor intensidade. Logo, o perfil vertical da energia estática durante o período chuvoso, nas regiões norte e NEB se apresentam mais sensíveis aos fenômenos do Oceano Pacífico, principalmente na sua fase positiva.

#### 5. Referências Bibliográficas

- Cavalcanti, E. P., 1986, "Aspectos Energéticos da Atmosfera sobre o Nordeste do Brasil", Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Curso de Mestrado em Meteorologia - Departamento de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, Paraíba.
- Hastenrath, S.; Heller, L., 1977, "Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil", *J. Royal Meteorologic Sociedad.*, 103: 77-92.
- Kistler, R., Eugenia Kalnay, William Collins, Suranjana Saha, Glenn White, John Woollen, Muthuvel Chelliah, Wesley Ebisuzaki, Masao Kanamitsu, Vernon Kousky, Huug van den Dool, Roy Jenne and Michael Fiorino, 2001, "The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 82, No. 2, pp. 247-267.
- Marengo, J.; Druyan, L.; Hastenrath, S., 1993, "Observational and modeling studies of Amazonia interannual climate variability", *Climatic Change*, 23 (3), 267-286 p.
- Marengo, J.; Druyan, L.; Hastenrath, S., 1993, "Observational and modeling studies of Amazonia interannual climate variability", *Climatic Change*, 23 (3), 267-286 p.
- Moura, A. D.; Shukla, J., 1981, "On the dynamics of the droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulations mode", *Journal of the Atmospheric Science*, 38(12):2653-2673.

- Nobre, P. A., 1996, "Variabilidade interanual do Atlântico Tropical e sua influência no clima da América do sul", *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - (CPTEC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)*, Disponível em: < [http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliensp10a/clmse\\_pn.html](http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliensp10a/clmse_pn.html)> Acesso em: 23 Mar. 2005.
- Nobre, P.; Shukla, J., 1996, "Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America", *Journal of Climate*: Vol. 9, No. 10, pp. 2464–2479.
- Rao, V. B.; Chapa, S. R.; Franchito, S. H., 1999, "Variação Decadal da Interação Oceano-Atmosfera no Atlântico Tropical e a relação para a Precipitação do Neb, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 77, n. 1, p. 63-75.
- Reynolds, R. W., 1983, "A real-time global sea surface temperature analysis", *J. Climate*, 1, 75–86.
- Reynolds, R. W., Marsico, D. C., 1992, "An Improved Real-Time Global sea surface temperature analysis", *J. Climate*, 6, 114–119.
- Silva Marques, V.; Rao, V. B. And Molion, L. C. B., 1983, "Interrannual and seasonal variations in the structure and energetics of atmosphere over Northeast Brazil", *Tellus*, vol 35, N° 2, pp. 136-148. 1983.
- Souza, E. B.; Alves, J. M. B.; Nobre, P., 1993, "Anomalias de precipitação nos setores norte e leste do nordeste brasileiro em associação aos eventos do padrão dipolo na bacia do atlântico tropical", *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.13, n2, 45-55.
- Souza, E. B.; Alves, J. M. B.; Nobre, P., 1998, "Anomalias de precipitação nos setores norte e leste do Nordeste brasileiro em associação aos eventos do padrão dipolo observados na bacia do Atlântico tropical", *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 13, N° 2, p. 45-55.
- Souza, Everaldo B., 2003, "Variabilidade Pluviométrica Intrasazonal sobre a Amazônia Oriental e Nordeste Brasileiro durante o outono austral: Mecanismos Atmosféricos de baixa e alta frequência", Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo.
- Uvo, C. B., 1998, "Influence of Sea Surface Temperature on Rainfall and Runoff in Northeastern South America: Analysis and Modeling", Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Lund, Sweden, Departamento de Engenharia de Recursos de Água.

## VERTICAL PROFILES OF STATIC ENERGY OF THE ATMOSPHERE ON THE NORTH AND NORTHEAST OF BRAZIL IN ANOMALOUS EPISODES

**Abstract** Abstract. In this work we presented the vertical profiles of static energy of the atmosphere on the areas the north (area1) and Northeast of Brazil (area2) in years of extreme events of anomalies of Sea of the Surface of the Temperature (SST) of the adjacent oceans. It was used monthly data of National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) of reanalysis, spaced in a grating of 2.5° by 2.5° of latitude and longitude. Using data of SST averages for selection of the events on areas of occurrences of the El Niño 3 and 3.4 (areas that supply with more certainty the intensity of the events) and of Atlantic Dipole, and the criteria: the anomalies of SST  $\geq 1.0^{\circ}\text{C}$  ( $\leq -1.0^{\circ}\text{C}$ ) for characterization of an event of El Niño (La Niña), b) anomalies of SST that simultaneously presented opposite anomalies on the north basin and south basin of Atlantic Ocean, for the period of February to April. Four episodes of ENSO and four of dipolo pattern were selected like this. Calculating the static energies evaporates, humid and saturated in each pressure level (925-100hPa) resulting in a vertical profile of the energies for the areas 1 and 2 and selected years. It was observed in the climatological vertical profiles of the medium energies, that on the area 1 the atmosphere came lightly more humid than on the area 2 (black line with open circles). During the years of El Niño (La Niña) and positive Phase of Dipolo (negative Phase of Dipolo), they were visualized in the areas 1 and 2, less humid atmospheres (more humid). the static dry energy didn't present prominence variations during the studied years. They were visualized in the profiles of humid static energy during the years of El Niño and positive Dipolo (La Niña and negative Dipolo) values above (below) of the average. Therefore, the vertical profile of the static energy during the rainy period, in the areas north and NEB comes more sensitive to Oceano Pacific's phenomena, mainly in your positive phase.

*Keywords: Profile Vertical, Static energy, ENSO, Atlantic Dipole*

### 6 - DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



## RESULTADOS PRELIMINARES DA ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO DIURNO USANDO IMAGENS DO SENSOR MODIS (TERRA E AQUA) PARA DIAS DE CÉU CLARO

### **Kleber Renato da Paixão Ataíde**

Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Avenida Aprígio Veloso, 882, Bloco CL, 58.109-080 Campina Grande/PB.  
Email: kleberataide@msn.com

### **Bernardo Barbosa da Silva**

Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Avenida Aprígio Veloso, 882, Bloco CL, 58.109-080 Campina Grande/PB.  
Email: bernardo@dca.ufcg.edu.br

### **Enilson Palmeira Cavalcanti**

Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Avenida Aprígio Veloso, 882, Bloco CL, 58.109-080 Campina Grande/PB.  
Email: enilson@dca.ufcg.edu.br

**Abstract.** The method use a algorithm which primarily uses remote sensing information and eliminates the need for ground information as model input, by using various land and atmospheric data products available from Terra and Aqua–MODIS. A sinusoidal model is utilized to estimate diurnal cycle of net radiation through a simple scheme proposed to estimate instantaneous net radiation over large heterogeneous areas for clear sky days using only remote sensing observations. The sinusoidal model is capable of retrieving the diurnal variations of net radiation with a single instantaneous net radiation estimate from the satellite. Preliminary results, using data over the farm Frutacor in Quixerê in the Ceará State, which show good agreement with ground-based observations. It appears that the methodology presented here can estimate instantaneous and diurnal net radiation with comparable accuracy to those of current methods that use ground-based observations and mainly provide point estimates. It explicitly recognizes the need for spatially varied parameters and provides a distributed net radiation map over large heterogeneous domain with fine spatial resolution.

*Keywords:* MODIS, saldo de radiação, sensoriamento remoto, Aqua e Terra.

### **1. Introdução**

O saldo de radiação ( $R_n$ ) representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre. Essa energia é a diferença entre os fluxos de radiação que chegam e que saem da superfície terrestre, incluindo radiação de ondas curtas e ondas longas. Isto é uma componente fundamental para estimativa do balanço de energia na superfície, previsão do tempo e meteorologia agrícola. Ao longo do dia, nas horas de brilho solar, o saldo de radiação em uma superfície qualquer tende a ser positivo, pois os fluxos incidentes (global e atmosférico) são superiores às frações refletidas e emitidas. Por outro lado, durante a noite, é comum que esses valores sejam negativos, pois o fluxo incidente passa a ser apenas atmosférico e a energia emitida pela superfície, superior a este, resultando em um saldo de radiação negativo (Geiger, 1961; Monteith e Unsworth, 1990; Pezzopane *et al.*, 1995).

O sensoriamento remoto provê inigualáveis coberturas espaciais e temporais de atributos da superfície, assim sendo, vários estudos tentam estimar o saldo de radiação ou seus componentes por combinação de observações de sensoriamento remoto com dados de superfície e da atmosfera (Diak & Gautier, 1983; Gautier *et al.*, 1980; Jacobs *et al.*, 2000; Ma *et al.*, 2002). O saldo de radiação ( $R_n$ ) combinado com o fluxo de calor no solo assim como disponibilidade de energia, é capaz de estimar a evapotranspiração (ET). Bastiaanssen *et al.*, 1996; Jackson *et al.*, 1977; Seguin *et al.*, 1989, elaboraram nos últimos anos vários modelos para estimar a evapotranspiração baseados em observações de superfície. Vários dos recentes modelos de ET usam dados de sensoriamento remoto para estimativa de ET (por exemplo, Jiang & Islam, 2001, Nishida *et al.*, 2003; Norman *et al.*, 2003). Contudo, todos estes modelos de ET requerem estimativas de saldo de radiação ( $R_n$ ).

O objetivo deste trabalho é explorar uma metodologia proposta por G. Bisht *et al.*, 2005 para gerar a distribuição espacial de saldo de radiação sobre áreas heterogêneas em dias de céu claro. A proposta de aproximação pretende eliminar ao máximo a necessidade de dados obtidos em superfície assim como contribuição de dados gerados por modelos.

A área de estudo compreende os diversos projetos de irrigação, localizados na região do Baixo Jaguaribe, mais precisamente no município de Quixeré, no estado do Ceará no Nordeste do Brasil, conforme é apresentado na Fig.(1).



Figura 1 – Local de estudo na fazenda Frutacor no município de Quixeré no Estado do Ceará.

Segundo informações do DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra a Seca), o clima da região é do tipo BSw'h' de acordo com a classificação climática de Köppen. A temperatura média anual é de 28,5°C, com mínima de 22° C e máxima de 35°C. A precipitação média anual é em torno de 772 mm, com distribuição de chuvas muito irregular, através dos anos. A umidade relativa média anual é de 62%, a velocidade média dos ventos é de 7,5 m.s<sup>-1</sup> e a evapotranspiração atinge a média anual de 3.215 mm. A região tem uma insolação de 3.030 horas.ano<sup>-1</sup>.

## 2. Material e métodos

Os dados para validação, da estimativa do saldo de radiação por satélite, utilizados neste trabalho referem-se a uma série horária de saldo de radiação obtidos através das componentes do balanço de radiação, radiação de onda curta incidente ( $R_C^\downarrow$ ), radiação de onda curta refletida ( $R_C^\uparrow$ ), radiação de onda longa incidente ( $R_L^\downarrow$ ) e radiação de onda longa emitida ( $R_L^\uparrow$ ), medidos pelo saldo radiômetro instalado no local do experimento e durante o dia 25 de outubro de 2005, dia juliano 298, devido este dia apresentar o céu da região livre de nuvens.

Para estimativa do saldo de radiação por sensoriamento remoto, foram utilizados produtos MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – Imageador Espectroradiômetro de Resolução Moderada), que é um dos 5 instrumentos a bordo dos satélites TERRA e AQUA com uma altitude de 705km e tem uma cobertura global a cada 1 a 2 dias com 36 bandas espectrais entre 0,405 e 14,385  $\mu\text{m}$  cuja resoluções espaciais são de 250, 500 e 1000m. Atualmente ele possui 44 dados de produtos e eles são divididos em cinco secções – calibração, atmosfera, superfície, criosfera e oceano. Neste estudo foram usados dados dos produtos atmosfera e superfície, os quais são disponíveis em formato de dados hierárquicos (HDF) e foram obtidos junto ao EOS Data Gateway (site: <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>). Uma breve descrição dos produtos usados está na Tab. (1).

Tabela 1- Produtos MODIS (AQUA/TERRA) utilizados no cálculo do saldo de radiação (Rn)

AQUA	TERRA	Produto	Resolução
MCD43B3	MCD43B3	*Albedo TERRA+AQUA	1km (espacial) Média de 16 dias (temporal)
MYD11A1_L2 MYD11B1	MOD11A1_L2 MOD11B1	*Temperatura da superfície e emissividade das bandas 29, 31 e 32. Hora de passagem do satélite.	1km (espacial) Diariamente
MYD07_L2	MOD07_L2	**Temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e ângulo zenital.	5km (espacial) Diariamente

\*Produto MODIS/ superfície

\*\*Produto MODIS/ atmosfera

### 2.1. Estimativa do saldo de radiação instantânea

O saldo de radiação (Rn) na superfície pode ser expresso em termos de seus componentes como

$$Rn = R_C^\downarrow - R_C^\uparrow + R_L^\downarrow - R_L^\uparrow \quad (1)$$

Onde  $R_C^\downarrow$  e  $R_C^\uparrow$  são fluxos de radiação de onda curta incidente e emitida ( $\text{Wm}^{-2}$ ), respectivamente e  $R_L^\downarrow$  e  $R_L^\uparrow$  são fluxos de radiação de ondas longas incidentes e emitidas ( $\text{Wm}^{-2}$ ), respectivamente.

As radiações de onda curta podem ser expressas como

$$R_C^\downarrow - R_C^\uparrow = (1-\alpha) R_C^\downarrow \quad (2)$$

Onde  $\alpha$  é a refletância da superfície terrestre (albedo).

Várias parametrizações para a radiação de onda curta incidente têm sido apresentadas na literatura. Em essência, radiação de onda curta incidente pode ser expressa como:

$$R_C^\downarrow = S_0 \tau_{sw} \cos\theta \quad (3)$$

Onde  $\tau_{sw}$  é o fator de transmissividade de onda curta da atmosfera de céu claro,  $S_0$  é a constante solar no topo da atmosfera, a qual é em torno de  $1367 \text{ Wm}^{-2}$  e  $\theta$  é o ângulo zenital solar.

Para esse estudo, foi usado o esquema de parametrização desenvolvido por Zillman (1972), o qual utiliza pressão de vapor  $e_0$  (hpa), dado pela Eq (4). Niemelä *et al.* (2001b) mostrou que o desempenho do esquema de parametrização de Iqbal's (1983) é melhor que o de Zillman(1972), porém ele requer informação a transmitância por espalhamento de Rayleigh, mistura de gases, vapor de água, aerossóis e ozônio. Tais informações não estão prontamente disponíveis, então foi usado o esquema de Zillman's (1972) no presente estudo.

$$R_C^\downarrow = \frac{S_0 \cos^2 \theta}{d} \quad (4)$$

Onde  $d=1,085\cos\theta+ e_0(2,7+\cos\theta)\times 10^{-3}+0,1$ .

A radiação de onda curta pode se expressa usando a equação de Steffan-Boltzmann como

$$R_L^\downarrow - R_L^\uparrow = \sigma \varepsilon_a T_a^4 - \sigma \varepsilon_s T_s^4 \quad (5)$$

Onde  $\varepsilon_a$  é a emissividade do ar,  $\varepsilon_s$  é a emissividade da superfície,  $T_a$  é a temperatura do ar (Kelvin) no nível de 1000mb,  $T_s$  é a temperatura da superfície (Kelvin) e  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ , é a constante de Steffan-Boltzmann. Prata (1996) desenvolveu um esquema de parametrização para radiação de onda longa incidente usando pressão de vapor d'água e temperatura do ar pela Eq (6), para simplificar o método apresentado aqui, foi usado o esquema de Prata's (1996).

$$R_L^\downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (6)$$

Onde  $\varepsilon_a = [1-(1+\xi)\exp\{-(1,2+3 \xi)^{1/2}\}]$ , e  $\xi=46,5e_0/T_a$ . Outros parâmetros são obtidos usando dados dos produtos terrestres do Terra e Aqua - MODIS (temperatura da superfície terrestre, emissividade para bandas 31, 32 e 29, e albedo de céu claro e escuro e hora de passagem dos satélites) e dados dos produtos atmosféricos do Terra e Aqua - MODIS (Ângulo zenital solar, temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho).

## 2.2. Estimativa do ciclo diurno do saldo de radiação (SR)

Mapas de  $R_n$  diários certamente tem mais aplicações que mapas de saldo de radiação instantâneo, especialmente para modelos que tentam calcular a evapotranspiração (Jiang & Islam, 2001; Nishida et al., 2003; Norman et al., 2003). Usando uma aproximação similar, como a metodologia de Lagourade e Brunet's (1983), foi proposto um modelo senoidal para estimar o ciclo diurno do SR para dias de céu claro como:

$$Rn(t) = R_{n\_max} \text{sen} \left[ \left( \frac{t - t_{nasc}}{t_{pôr} - t_{nasc}} \right) \pi \right] \quad (7)$$

Onde  $R_{n\_max}$  é o valor máximo de  $R_n$  observado durante o dia,  $t_{nasc}$  e  $t_{pôr}$  é o tempo local em UTC no qual o valor do saldo de radiação se torna positivo e negativo, respectivamente.

O saldo de radiação máximo ( $R_{n\_max}$ ) pode ser dado pela Eq(8):

$$R_{n\_max} = \frac{RnI}{\text{sen} \left[ \left( \frac{t_{passagem} - t_{nasc}}{t_{pôr} - t_{nasc}} \right) \pi \right]} \quad (8)$$

Onde RnI é o saldo de radiação instantâneo e  $t_{passagem}$  é a hora de passagem do satélite (UTC).

O dia estudado, os horários de passagem dos satélites, do nascer e do pôr do sol, latitude e longitude da cidade de Quixeré estão listados na Tab. (2).

Tabela 2 – Características gerais do dia e local do estudo.

Local	Quixeré-CE	Fazenda Frutacor
Latitude	05 04 23,49S	
Longitude	37 51 31,25W	
Data	25/10/2004 (dj=298)	dj=dia juliano
Hora nascer do sol	05:27h	5,456h (décimos)
Hora pôr do sol	17:35h	17,594h (décimos)
Hora de passagem do satélite TERRA	10:18h	10,30h (décimos)
Hora de passagem do satélite AQUA	13:06h	13,10h (décimos)

### 3. Resultados e discussões

Representa-se na Figura (2) o comportamento do saldo de radiação estimado pelo satélite TERRA para o período diurno, com início às 5h e término às 18h, comparado com os valores de saldo de radiação medidos instantaneamente a cada hora cheia pela estação automática. Dá-se ênfase aos valores medidos e estimados na hora aproximada da passagem do satélite, visto que o satélite TERRA passa pela região às 10h e 18min, porém a Fig.(2) marca às 10h.

É possível observar que os valores estimados mostraram comportamento semelhante aos valores medidos em superfície, porém os valores obtidos pelo satélite TERRA foram superestimados.

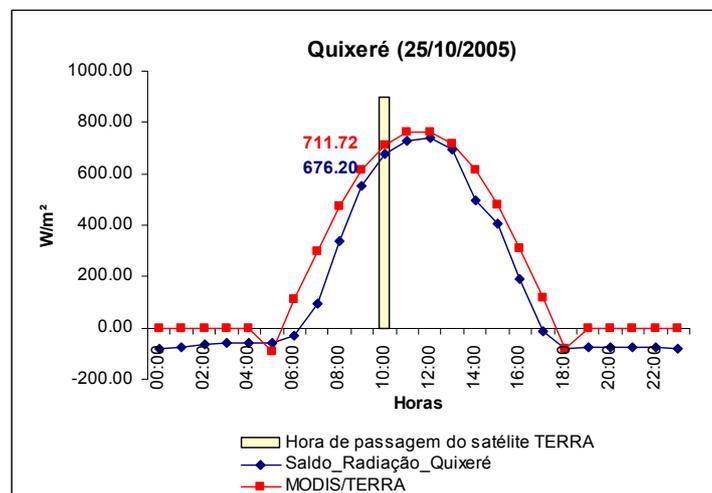


Figura 2 – Comparação entre o saldo de radiação estimado pelo satélite TERRA e a medida feita na estação.

Na Figura (3) mostra-se a porcentagem de aproximação entre os valores estimados pelo satélite TERRA e pela estação automática para cada hora do período diurno, onde é notada uma boa aproximação entre os valores estimados e os valores medidos, ocorrendo melhor aproximação das estimativas feitas para 9h, 10h, 11h, 12h, 13h, 15h e 18h com aproximação de 88,7%, 94,7%, 94,9%, 96,2%, 96,6%, 81,3% e 99,5% dos valores medidos respectivamente.

As estimativas feitas para as 5h, 6h, 7h, 8h, 14h, 16h e 17h apresentaram valores em 39,9%, 0%, 0%, 60,3%, 75,2%, 35,7% e 0% respectivamente, dos medidos na estação, mostrando não haver boa aproximação para valores de saldo de radiação nestes horários.

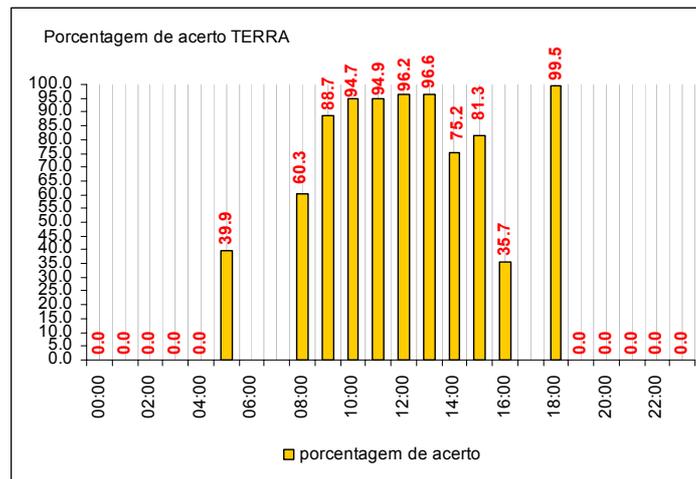


Figura 3 – Porcentagem entre os resultados obtidos pelo satélite TERRA e os valores medidos na estação automática.

Observa-se na Figura (4) o comportamento do saldo de radiação estimado pelo satélite AQUA também para o período diurno, com início às 5h e término às 18h, comparado com os valores de saldo de radiação medidos instantaneamente a cada hora cheia pela estação automática. Na Figura 4 também se dá ênfase aos valores medidos e estimados na hora aproximada da passagem do satélite, visto que o satélite AQUA passa pela região às 13h e 06min, porém a figura marca às 13h.

É possível observar que os valores estimados mostraram comportamento semelhante aos valores medidos em superfície, porém os valores obtidos pelo satélite AQUA foram superestimados para todo período diurno.

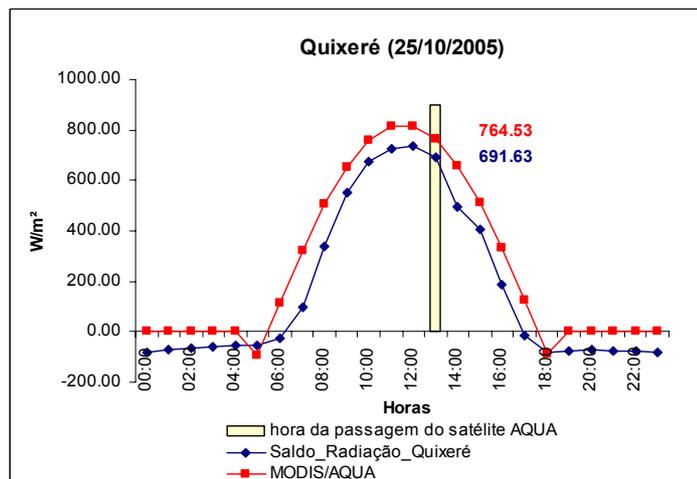


Figura 4 - Comparação entre o saldo de radiação estimado pelo satélite AQUA e a medida feita na estação.

A Figura (5) mostra a porcentagem de aproximação entre os valores estimados pelo satélite AQUA e pela estação automática para cada hora do período diurno e reforça a boa estimativa para os horários onde é notada uma boa aproximação entre os valores estimados e os valores medidos, ocorrendo melhor aproximação das estimativas feitas para 9h, 10h, 11h, 12h, 13h, 15h e 18h com aproximação de 81,0%, 87,5%, 87,7%, 89,1%, 89,5%, 73,2% e 93,6% dos valores medidos respectivamente.

As estimativas feitas para as 5h, 6h, 7h, 8h, 14h, 16h e 17h apresentaram valores em 32,4%, 0%, 0%, 50,7%, 66,6%, 24,4% e 0% respectivamente, dos medidos na estação, mostrando também não haver uma boa aproximação para valores de saldo de radiação nestes horários, assim como nos valores obtidos pelo satélite TERRA para esses horários, porém deve-se levar em consideração que durante esses horários pode ter ocorrido presença de nuvens e que o modelo com certeza não cobre. Observou-se também que os valores de saldo de radiação não se tornam positivos logo após o nascer do sol e nem negativos logo assim que o sol se põe, mas sim que, ocorre um atraso e um adiantamento em torno de 45 minutos na resposta do Rn em relação ao nascer e pôr do Sol respectivamente.

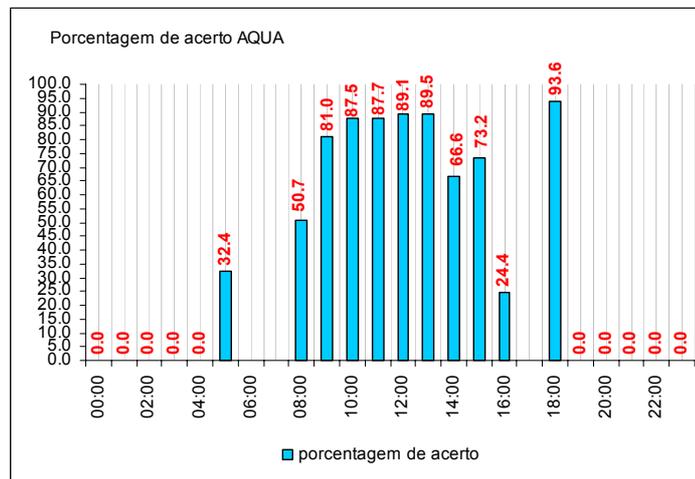


Figura 5 - Porcentagem entre os resultados obtidos pelo satélite TERRA e os valores medidos na estação automática.

#### 4. Conclusões

Os resultados mostraram que o saldo de radiação estimado para o dia 25 de outubro de 2005 por técnicas de sensoriamento remoto e usando dados do sensor MODIS, a bordo dos satélites TERRA e AQUA, possui uma boa aproximação dos valores medidos em superfície na estação automática.

O Sensor à bordo do satélite Terra apresentou erros menores que 13% para às 9h, menor que 6% para 10h, 11h, 12h, 13h, 18h e menor que 20% para às 15h. Os demais horários (5h, 6h, 7h, 8h, 14h, 16h e 17h) foram superestimados acima de 25%. A técnica conseguiu estimar com boa precisão o saldo de radiação instantâneo (RnI) no local de estudo na hora da passagem do satélite TERRA (94,7%), demonstrando ser viável o uso de produtos do Sensor MODIS/TERRA para estimar o saldo de radiação em grandes áreas.

O Sensor à bordo do satélite AQUA apresentou valores superestimados menores que 20% para às 9h, menor que 13% para 10h, 11h, 12h, 13h, 18h e menor que 27% para às 15h. Os demais horários (5h, 6h, 7h, 8h, 14h, 16h e 17h) foram superestimados acima de 34%. A técnica conseguiu estimar com boa precisão o saldo de radiação instantâneo (RnI) no local de estudo na hora da passagem do satélite AQUA (89,5%), demonstrando ser viável o uso de produtos do sensor MODIS/AQUA para estimar o saldo de radiação em grandes áreas.

Os valores estimados com dados dos produtos do satélite TERRA foram mais precisos do que os estimados com os dados dos produtos do AQUA para esse dia, porém seriam necessários mais dias de estudos para que mostrasse qual satélite obtém melhores resultados, basicamente em função da sua hora de passagem, pois o sensor é consideravelmente o mesmo.

#### 5. Referências

- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Menenti, M., & Feddes, R. A., 1996, "Estimation of surface resistance and Priestley–Taylor a-parameter at different scales", In J. Stewart, E. Engman, R. Feddes, & Y. Kerr (Eds.), *Scaling up in hydrology using remote sensing* (pp. 93–111). New York: Wiley.
- Bisht, G.; Venturini, v.; Islama, S., Jiang, LE., 2005, "Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days", *Remote Sensing of Environment* 97, 52 – 67.
- Diak, G. R., & Gautier, C., 1983, "Improvements to a simple physical model for estimating insolation from GOES data", *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, 505–508.
- Gautier, C., Diak, G., & Mase, S., 1980, "A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data", *Journal of Applied Meteorology*, 19, 1005– 1012.
- Geiger, R., 1961, "Manual de microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo", 3.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 556p.
- Iqbal, M., 1983, "An introduction to solar radiation" (pp. 169–213). Academic Press.
- Jackson, R. D., Reginato, R. J., & Idso, S. B., 1977, "Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements". *Water Resources Research*, 13, 651– 656.

- Jacobs, J. M., Myers, D. A., Anderson, M. C., & Diak, G. R. 2000. "GOES surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration". *Journal of Hydrology*, 266, 53– 65.
- Jiang, L., & Islam, S., 2001, "Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data", *Water Resources Research*, 37(2), 329–340.
- Lagouarde, J. P., & Brunet, Y., 1983, "A simple model for estimating the daily upward longwave surface radiation flux from NOAA–AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, 14(5), 907–925.
- Ma, Y., Su, Z., Li, Z., Koike, T., & Menenti, M. 2002, "Determination of regional net radiation and soil heat flux over a heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau", *Hydrological Processes*, 16, 2963–2971.
- Monteith, J.L.; Unsworth, M.H., 1990, "Principles of environmental physics", 2.ed. London: Edward Arnold, 291p.
- Niemelä, S., Raisanen, P., & Savijarvi, H., 2001a, "Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part I. Longwave radiation", *Atmospheric Research*, 58, 1– 18.
- Niemelä, S., Raisanen, P., & Savijarvi, H., 2001b, "Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part II. Shortwave radiation", *Atmospheric Research*, 58, 141–154.
- Nishida, K., Nemani, R. R., Running, S. W., & Glassy, J. M., 2003, "An operational remote sensing algorithm of land evaporation", *Journal of Geophysical Research*, 108(D9), 4270.
- Norman, J. M., Anderson, M. C., Kustas, W. P., French, A. N., Mecikalski, J., TORN, R., *et al.*, 2003, "Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions", *Water Resources Research*, 39(8), 1221.
- Pezzopane, J.E.M.; Pedro Júnior, M.J.; Ortolani, A.A.; Meyer, N., 1995, "Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno", *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria*, v.3, p.1-4.
- Prata, A. J., 1996, "A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 1127– 1151.
- Seguin, B., Assad, E., Freaud, J. P., Imbernon, J. P., Kerr, Y., & Lagouarde, J. P., 1989, "Use of meteorological satellite for rainfall and evaporation monitoring", *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1001– 1017.
- Zillman, J. W., 1972, "A study of some aspects of the radiation and heat budgets of the southern hemisphere oceans", *Meteorol. Studyl 26, Bur. Of Meteorol.. Canberra, Australia' Dept. of the Inter.*



Revista SODEBRAS –Volume 1 – Nº 1 - Janeiro / 2006

## **HOTFILA SOFTWARE FOR DETERMINATION OF THICKNESS, TOTAL STRESS (THERMAL AND INTRINSIC) AND THE USEFUL MASS OF CVD DIAMOND FILMS DEPOSITED BY HOT FILAMENT REACTOR**

**Teófilo.Miguel de Souza, Prof. Dr.**

<sup>1</sup>Virtual Materials Research Center – CVMAT  
Electrical Engineering Dept. – FEG – UNESP - Guaratinguetá Campus  
Brazil

**E-mail: teófilo@feg.unesp.br**

### **Summary**

HOTFILA is a dedicated software assigned to help researchers and other people engaged to activities of developing data before and after the essays of CVD Diamond deposition on the square/rectangular, circular or triangular substrate surface samples in order to provide quick and dependable calculations involving parameters related to CVD diamond film deposited by hot filament reactor. The software describes all the main parameters of the sample as: the basic material being analysed, its geometrical dimensions, densities, thermal expansion coefficient, peak values and Raman scattering displacement. It also allows to describe the mixture components, mainly formed of Hydrogen, Methane and other gas so as to define a better quality of the CVD diamond and its volume percentage, the gas flux, the deposition time, the reactor internal pressure and the CVD diamond deposition temperature. Equally, the software gives the film deposition rate, the deposited mass by area/hour, the total and intrinsic stress, whether it is by compression, null or by traction. All of the results of the calculations are displayed in an organized form and automatically saved in a \*.txt format file

**Keywords:** Diamond growth, characterization, CVD diamond, hot filament, useful mass

### **Introduction**

This work presents the software HOTFILA, Windows version, for calculating the thickness, the total stress, both thermal and intrinsic, of CVD diamond films

deposited on alloys. It has been developed to run in any PC compatible computer. The operator has two choices to run the program: One, inserting the floppy disk into the drive and using the Windows' option: "execute". The only restriction to work directly into the floppy is its limited available free space. The best way is to open a new directory (folder in Windows) and copy the executable program into it.. A double click on the icon puts it to work. As a straightforward, self-explanatory program, filling in data the software processes all the equations, and the results are demonstrated in an organized form. Once you read the results, you have automatically saved them in a \*.txt format file whose name and number you furnished at first..

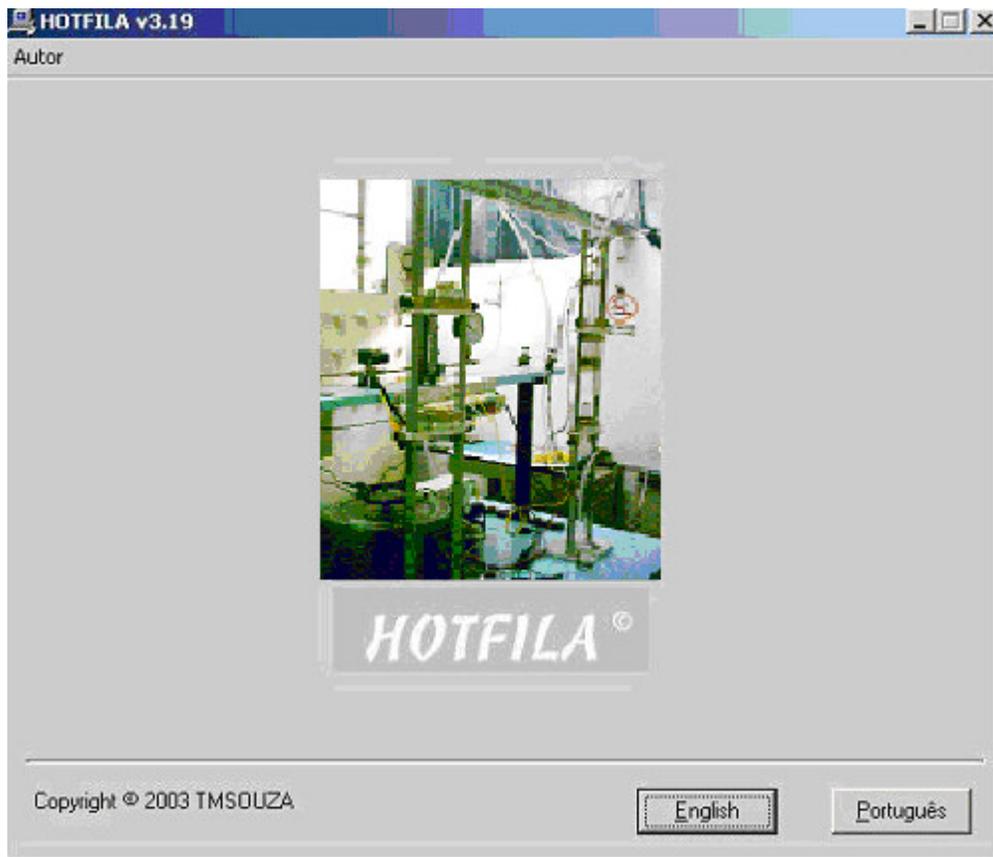


Figure 1 - the software opening display

Figure 1 shows the opening presentation of the program which informs the current version, about the author, copyrights and the available languages: English and Portuguese. Once chosen the option, the next display (figure 2) instructs on the disclaim policy: if the operator agrees with "yes", the program continues, otherwise the program ends.

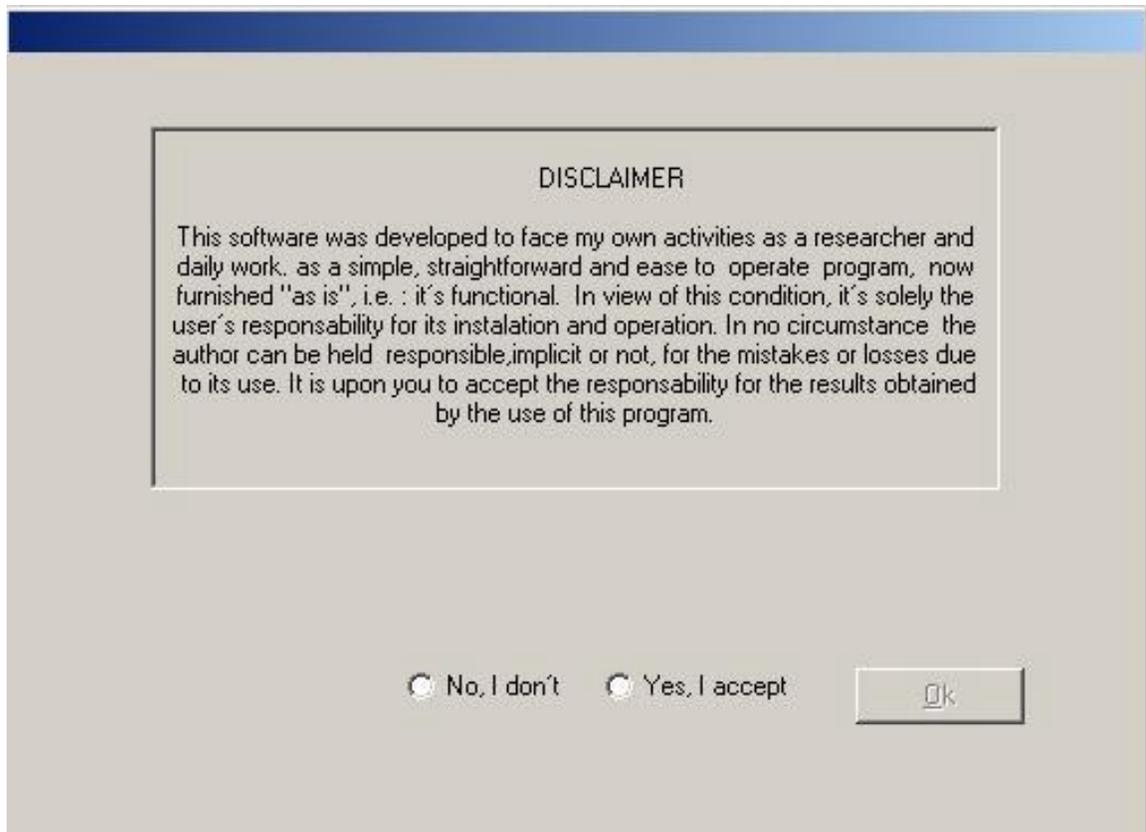


Figure 2 – Disclaimer policy

The next display (figure 3) opens to the first three data to be entered: Name-number of the sample, its qualification and date of the experiments. It also defines which sample option to be processed: circular, square/rectangular or triangular. In case the operator does not define a Name-number for the sample, and tries to go on, the program alerts about it, because once the calculations are processed, automatically they are saved on a file of same name-number.

The screenshot shows a software window titled "HOTFILA v3.17" with a subtitle "About the author". The main content area contains the following text:

**Determination of Thickness, Total Stress (thermal and intrinsic) and the useful Mass of CVD Diamond Films Deposited by Hot Filament Reactor**

**Enter data as required. Browse with TAB key or mouse:**

**Sample name and number (Ex: Ti-03):** [Text input field]

**Substrate material name (Ex: Ti6Al4V):** [Text input field]

**Date (dd/mm/yyyy):** [Text input field]

**Sample:**

- Circular
- Rectangular or square
- Triangular

[Continue-> button]

Figure 3 – Sample identification

The next screen (figure 4) presents a sequence of data to be entered as: substrate mass, environmental temperature, deposition temperature on substrate Hydrogen gas concentration, Methane gas concentration, Other gas concentration, gas total flux, pressure used inside reactor, DC voltage between filament terminals, current ion each filament and diameter of each filament

The screenshot shows a window titled "HOTFILA v3.17" with a subtitle "About the author". The window contains a list of parameters for data entry, each with a corresponding text input field. The parameters and their current values are as follows:

Parameter	Value
Substrate mass (in grams):	0,0
Environmental temperature (in Celsius):	0,0
Deposition temperature on substrate (in Celsius):	0,0
Hydrogen gas concentration (%vol):	0,0
Methane gas concentration (%vol):	0,0
Other gas concentration (%vol):	0,0
Gas total flux (in sccm):	0,0
Pressure used inside reator (in mbar):	0,0
DC voltage between filam. terminals (in volts):	0,0
Current in each filament (in Ampère):	0,0
Diameter of each filament (in cm):	0,0

At the bottom right of the form is a button labeled "Continue->".

Figure 4 – Sample data condition details

The next display (figure 5) completes the data to be entered as: distance between filaments and substrate, diamond film deposition time, sample total mass after deposition of diamond, percentage of deposited film laterally, diamond peak reference value, peak value with displacement, adopted displacement to stress, Young's Biaxial Module of film, environment-to-substrate thermal expansion coefficient, environment-to-film thermal expansion coefficient, sample diameter and sample height.

The screenshot shows a software window titled "HOTFILA v3.17" with a subtitle "About the author". The main area contains a list of parameters, each with a corresponding input field containing the value "0,0". The parameters are:

- Distance between filaments and substrate (cm): 0,0
- Diamond film deposition time (hours): 0,0
- Sample total mass after deposition of diamond (g): 0,0
- Percentage of deposited film laterally (%): 0,0
- Diamond peak reference value (cm<sup>-1</sup>): 0,0
- Peak value with displacement (cm<sup>-1</sup>): 0,0
- Adopted displacement/GPa (cm<sup>-1</sup>) to stress: 0,0
- Young's Biaxial Module of film (GPa): 0,0
- Environment-to-substrate thermal expansion coeff. (°C<sup>-1</sup>): 0,0
- Environment-to-film thermal expansion coeff. (°C<sup>-1</sup>): 0,0
- Sample diameter (cm): 0,0
- Sample height (cm): 0,0

A "Process->" button is located at the bottom right of the input area.

Figure 5 – Final data to be entered

Figure 6 presents the calculation results processed. At this point, the program automatically saves these results in a \*.txt format file of same name-number. Now, three options are prompting: “print” as an output hard-copy of the results, or “return”, to go back to a new calculations procedure or “exit” to end the program.



**DETERMINATION OF THICKNESS, TOTAL STRESS (THERMAL AND INTRINSIC) AND THE USEFUL MASS OF CVD DIAMOND FILMS DEPOSITED BY HOT FILAMENT REACTOR**  
CVD DIAMOND DEPOSITION ON SQUARE/RECTANGLE SAMPLE

Sample Number: Ti1 Date:30/11/2003  
 Substrate material : Ti6Al4V  
 Length of sample : 2.0001 cm  
 Width of sample : 1.999372 cm  
 Height of sample : .21103 cm  
 Means density of substrate : 2.369187 g/cm<sup>3</sup>  
 Mass of substrate : 1.99935 g  
 Volume of substrate : .8438971 cm<sup>3</sup>  
 Gas: 98.3 %H<sub>2</sub> ; 1.699997 %CH<sub>4</sub> ; .2 % Other gas ; Flux: 100 sccm Tsub: 800 C

Reactor Pwr: 862.92 W Filam. diam.: .015 cm Current dens/fil: 79789.69 A/cm<sup>2</sup>

Supply voltage: 15.3 Vdc Filam. current: 14.1 A x 4 filaments= 56.4 A

Sub-Filament distance: .8 cm

Total mass of sample after diamond deposition : 2.011516 g

Theoretical mass density of diamond : 3.51524 g/cm<sup>3</sup>

Diamond deposited mass : 1.216614E-02 g

Diamond deposited volume : 3.460971E-03 cm<sup>3</sup>

Total percentage of deposited film laterally : 50 %

Diamond film growth on sample : 7.146407 micra

Diamond film deposition time : 10 h

Diamond film deposition velocity : .7146407 micra/h

Diamond usable mass: 1.004588E-02 g .0502294 quilates a 251 (microg/h)/cm<sup>2</sup>

Alfa Subst	Alfa film	Young biaxial Mod. (/C)	Peak of diamond (GPa)	Peak of displacement (cm <sup>-1</sup> ) ref. (cm <sup>-1</sup> )
0000094	.000001	1230	1332.5	1345.4

Ts(C)	Tamb(C)	Displ(cm <sup>-1</sup> )	Stotal(GPa)	Sterm(GPa)
800	800	25	-12.90002	-4.134624
8.007299	3.872676			

|Type |  
 |compression |

## **Conclusions**

HOTFILA is a dedicated software assigned to provide quick and dependable calculations involving parameters related to CVD diamond film deposited by hot filament reactor. It allows detailed analysis of the CVD diamond film main characterizations in an efficient manner, which results in gathering data for many essays in a very short time.

## **References**

Davis, Robert F. Diamond Films and Coatings Development, Properties, and Applications. Noys Publications. NJ, USA 1992.

Ohring, Milton. The Materials Science of Thin Films. Academic Press. NY,USA 1995.



Revista SODEBRAS –Volume 1 – N° 1 - Janeiro / 2006

**CVD DIAMOND FILM DEPOSITION ON  
Ti6Al2Sn4Zr2Mo ALLOY ASSISTED BY MICROWAVE-  
PLASMA REACTOR  
UNDER LOW TEMPERATURES**

---

**Teófilo M. de Souza, PhD (1,2)**  
**Alix Gicquel, PhD (1)**  
**François Silva, PhD (1)**  
**Sandrine Gay, PhD (1)**

---

(1) LIMHP, CNRS – UPR 1311 Université Paris 13 – France

(2) CNPQ SEPN 509 – Bloco “A” – Ed. Nazir I 70750-901 – Brasília – DF – Brazil

E-mail: [teofilo@feg.unesp.br](mailto:teofilo@feg.unesp.br)

## **INTRODUCTION**

This research looks forward to the development of new materials to ensure protection for the Titanium alloys in relation to the wear, thus increasing its usable lifetime. Deposition of CVD diamond thin films have been studied on Titanium alloys, to reach further objectives as in the mechanics industry and biomedical implants. Titanium alloys are biocompatible, though not being hemocompatible. Deposition of a material with exceptional organic and mechanical properties as is diamond, brings the best solution to that challenge. Another important factor is the combination between the high traction force (or compression) and the low density of the titanium alloys (between 4,37 g/cm<sup>3</sup> and 4,85 g/cm<sup>3</sup>), resulting in an extremely high ratio between force and density for the alloys. This relation is practically higher than all other metals, thus allowing to be applied in many applications.

Several depositions were made and the characterization of the CVD diamond films on Ti6Al2Sn4Zr2Mo alloy at LOW TEMPERATURES (between 400 and 600 C) . Both stress and qualitative adherence were evaluated. Films were deposited using the assisted technique of microwave plasma [2-4]. Various techniques were tested in the preparation of the substrate surface [5-6] before depositing the films, promoting its modification. Data for analysis are being obtained using Raman Scattering Spectroscopy, X-rays diffraction and Microscopic Electronic Sweep.

Based in the singular properties of the CVD diamond and its potential in the condition of a new material, many basic studies and consequent applications in areas such the mechanical, electronics, optical, biological etc are being evidenced in the related literature [7-16]. A general study was carried out giving emphasis to the most evident applications [17-21]. Particularly, studies of adherence and stress phenomena are appearing in the research lines [22-24] bearing in mind the wide applications that can be obtained with diamond films

of high adherence and low stress in various substrates. Additionally, in the last years, besides the better refinements in the CVD technique, demonstrating that it is possible to work with simple systems for growing diamond [2, 19, 37-43], where various applications are presented [26-30, 47-50]. Thus, it is shown that the predictions made of the contributions within the basic research field for worldwide applications are now becoming real [31].

Therefore, it is so much evident that all the study about film adherence to several types of substrates and also the stress that the film is submitted, besides the immediate applications in the general industry, it is also closely related with the Brazilian academic needs, considering its mission in developing new materials and human resources in strategic areas.

The qualitative adherence and the stress calculus that the film is submitted, both are related with the parameters of growing, substrate preparation, type of substrate, film quality, roughness and grain size. Following is the technical presentation of the research, its justifications, the developing of the experiments and the results obtained insofar.

## **MATERIAL CHARACTERISTICS**

### **Titanium Ti6Al2Sn4Zr2Mo alloy**

The Titanium Ti6Al2Sn4Zr2Mo alloy presents high strength-to-weight ratios (highest strength/low density); Relative low thermal expansion coefficient; Low elastic modulus; Mechanical devices; Non-magnetic character; Bio-compatible (in bio-implants and surgical devices); Nickel free (proving to be non-dermatitis). On the other hand, it is non-hemocompatible and shows low resistance against wear. The Ti6Al2Sn4Zr2Mo Titanium alloy has various skin applications.

### **CVD diamond film**

The CVD diamond film shows extreme hardness; Highest heat conductivity; Low friction coefficient and is hemocompatible.

## **EXPERIMENTAL**

### **Pretreatment of surface substrates**

- 1 – Start: .....400, 600, 1000 grids + H<sub>2</sub>O  
Felt + Oxalic Acid (10% volume in H<sub>2</sub>O)
- 2 – Final: a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3 μm) + felt + Oxalic Acid (10% volume in H<sub>2</sub>O)  
b) Diamond Powder (0,10μm) + felt + Oxalic Acid  
c) Diamond Powder (45 μm – 2g) + Ethanol (20 ml) in  
Ultrasound bath – Time: 1 hour  
d) Diamond Powder (45 μm – 2g) + N-Hexane (20 ml) in  
Ultrasound bath – Time: 1 hour
- 3 – Cleaness: Nitrogen gas flow

## **Microwave-Plasma CVD Reactor**

Power: 1000 W  
Power Density: 15 W/cm<sup>3</sup>  
Pressure: 50 mbars  
%CH<sub>4</sub> in H<sub>2</sub>: 1,0 to 4,0 %  
Ts: 500 to 600° C



Fig. 1 – Microwave-Plasma CVD Reactor

## **Characterization Means**

Quality: Raman Spectroscopy (FWHM and Fp)  
Stress: Raman Spectroscopy (Shift Raman)  
Surface Morphology and quality adhesion: SEM  
Interface Analysis: X-ray Diffraction  
Thickness: (weight)

## **EXPERIMENTAL**

Namely two experiments were proceeded with the Ti<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>Sn<sub>4</sub>Zr<sub>2</sub>Mo alloy, besides more than over sixty experimental tests performed with the Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V. In both cases, both alloys were submitted to same criteria as follows:

### **Substrate surface preparation before diamond deposition**

Every substrate were cut to same dimensions: 1,5x1,5x0,2 cm and submitted to a preliminary surface treatment in order to build a great concentration of germinant nuclei in the CVD diamond, so as to obtain a continuous film aspect in the less possible time of deposition [5-6]. Four types of surface treatment were made on the substrate to where diamond deposition was applied.

1. Polishment by scratching was made using 400, 600 and 1000 mesh sand, distilled water and the process completed with oxalic acid (10%vol) and felt.

2. One of the following procedures was employed to complete the surface preparation:

a) Scratching polishment with felt, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3 um grain) and oxalic acid (10% Vol in

distilled water)

b) Scratching polishment with felt, diamond powder (0,10  $\mu\text{m}$  grain) and oxalic acid (10 %Vol in distilled water)

c) Diamond powder (45  $\mu\text{m}$  grain) and ethanol in ultrasound bath during one hour in the proportion of 2 grams of diamond powder to each 20 ml of ethanol.

d) Diamond powder (45  $\mu\text{m}$  grain) and n-hexano in each ultrasound bath during one hour in the proportion of 2 grams of diamond powder to each 20 ml of ethanol.

Each sample was cleaned and dried with nitrogen gas flow.

## RESULTS

The results are present in Tables I and II

Table I – Typical RAMAN spectrum peaks for films on Ti6Al2Sn4Zr2MoAlloy

Peaks	Center	Height	Width	Area	Attributions
1	1108,52	73,30	59,05	4606,41	Nano or microcrystalline diamond
2	1196,24	123,25	95,49	13457,85	Microcrystalline diamond
3	1345,32	194,33	25,15	6519,39	CVD diamond peak w/ stress
4	1350,67	281,44	177,69	53234,51	D polycrystalline graphite peak
5	1497,63	402,68	167,65	71874,21	Amorphous graphite or amorphous carbon sp <sup>2</sup>
6	1568,69	413,22	87,15	40422,04	G graphite peak
Ref shift	1336,50 - 8,82			Fp=81,32	

Table II – Results: Stress, Adherence and FP for films on Ti6Al2Sn4Zr2Mo alloy

Temp (° C)	CH4 (%)	Surface Treatment	Fp (%)	Total Stress $\sigma$ (Gpa)	Thermal Stress $\Sigma_{\text{therm}}$ (Gpa)	Intrinsic Stress $\Sigma_{\text{int}}$ (Gpa)	Adherence (Quality)
600	1,0	b	81,32	-3,07	-5,85	2,78	Yes
		c	72,19	-0,94	-5,85	4,91	Yes
		d	77,83	-0,24	-5,85	5,61	Yes
	2,5	b	68,29	-4,68	-5,85	1,17	Yes
		c	-	-	-	-	
		d	31,95	-1,39	-5,85	4,46	Yes
		b	82,06	-5,74	-5,85	0,11	Yes
		c	73,11	-5,76	-5,85	0,09	Yes
		d	69,10	-5,75	-5,85	0,10	Yes
500	2,5	c	68,37	-2,59	-4,84	2,25	Yes

## COMMENTARY AND CONCLUSIONS

- Surface modification precedes diamond nucleation;
- Deposition rate augments as function of increasing percentage of CH<sub>4</sub> and temperature;
- Film promotes "pull off" during long deposition time, such as 24 hours and augmenting percentage of CH<sub>4</sub>;
- Nucleation is enhanced if the surface is polished or after scratching with diamond powder in ultrasound bath;
- The initial stages of film growth play an important role in determining the morphology of the film;
- Film morphology is undefined for little % CH<sub>4</sub>;
- Regions on substrate with diamond film are observed after 40 minutes exposure to growth ("d" treatment? 4,0 % CH<sub>4</sub>)
- Films have good adherence on alloy, but are non-homogeneous when used 2,50 % CH<sub>4</sub> in gas mixture after 8 hours deposition;
- All bulk alloys present TiC after diamond film deposition;
- Raman scattering proved to be the most used method of characterizing the carbon bonding in CVD diamond thin films;
- Computer deconvolution is required to determine integrated linewidths;
- Spectral Raman corrections for absolute intensities must be determined;
- Features identified for diamond, graphite, microcrystalline graphite and amorphous carbon;
- Shift Raman was used for total stress calculus;
- The diamond peak and graphite peaks ratios show the factor of the crystal's purity Fp. Best Fp=82,06;
- The observed thermal stress in CVD diamond films is consistent with the difference in the coefficient of thermal expansion of diamond and the substrate;
- Other responsible for stress: variation of the interatomic spacing with the crystal size; recrystallization processes; microscopic voids; special arrangements of dislocations and incorporation of other non-diamond atoms.

## BIBLIOGRAPHY

- 1- ASM "Handbook, Metallography and Microstructures". Materials Park. Oh. ASM, 9, (1985) p.453-490.
- 2- A. Cicquel, E. Anger, M. F. Ravet, D. Fabre, G. Scatena, **Z.Z.** Wang "Diamond deposition in a bell jar reactor: Influence of the plasma and substrate parameters on the microstructure and the growth rate"; Diamond and Related Materials, 2,417-424 (1993)
- 3- F. Silva, A. Cicquel, A. Tardieu, P. Cledat; "Control of a MPACVD Reactor for polycrystalline textured diamond films synthesis: role of the microwave power density" Diamond and Related Materials Vol 5(1996) pp 338-344
- 4- E. Anger, A. Cicquel, M. F. Ravet, Z.Z. Wang, F. Rousseaux, J. Pernere, F. Rossi, D. Fournier, K. Plamann ; "Optimisation de la fabrication de films et de membranes en diamant par methode CVD assistee par plasma microonde"; Vide, Science, technique et applications, vol 51, n<sup>o</sup>276 (1995) revetements 2,139-164, ed. SFV
- 5- E. Anger, A. Cicquel, **Z. Z.** Wang, M. F. Ravet ; "Chemical and Morphological Study of Silicon Substrates treated by Ultrasonic Impact of Powders: Consequences on Diamond Nucleation". Diamond and Related Materials, 4, 759-764 (1995)

- 6- R.C. Mendes de Barros, E. J. Corat, T. M. de Souza et al; "Dispersion liquid properties for efficient seeding in CVD diamond nucleation enhancement". *Diamond and Related Materials* 5(1 996C1 323-1332).
- 7- D.V. Fedoseev, B.V. Deryagin, I.C. Varshankaya, A.V. Lauretev e V.V.:Sov. Phys. JETP, vol 53(1), 210 (1981).
- 8- S. Matsumoto, Y. Sato, M. Tsutsumi e N. Setaka: *J. of Mat. Science*, vol 17, 3106 (1982).
- 9- J.C. Angus e C.C. Hayman: *Science*, vol 241,913(1988).
- 10- Y. Lou, A. Inspektor, R. Weimere R. Messier: *App. Phys. Lett.*, vol 55(7), 631(1989).
- 11-R.W. Prior, R.L. Thomas, R.K. Kuo e L.D. Farro, *SPIE-Proceeding*, vol 1146 in *Diamond Optics II*, 68 (1989).
- 12-K.V. Ravi, C.A. Koch, H.S. Hu e A. Joshi: *J. of Mat. Res.*, vol 52356 (1990).
- 13-N. Ohtake e M. Yoshikawa: *J. of Electrochem. Soc.* vol 137(2), 717 (1990).
- 14-S.J. Harris: *J. Mat. Res.* Vol 5(11), 2313 (1990).
- 15-D.C. Coodwin: *AppI. Phys. Lett.*, vol 59, 277 (1991).
- 16-V.J. Trava-Airoldi, C.R. Rodrigues, M. Fukui e V. Baranauskas: *SPIE*, vol 1759 in *Diamond Optics V*, 87 (1992).
- 17-P. Bachmann e D.U. Wiechert, *Diamond and Diamond-like Film and Coatings*, editado por R.E. Causing et al. Plenum Press, N.York, 677 (1991).
- 18-S.J. Bull, P.R. Chalker e C. Jojnston: *Mat. Sci. and Techn.* vol 8, 679 (1992).
- 19-T.H. Huang, CI. Kuo, IS. Lin e C.S. Chang: *Diamond and Related Materials*, vol.2.928 (1993).
- 20-S.
- 21-E.R. Kupp, W.R. Drawl e K.E. Spear: *Surf. and Coat. Iechn.* vol.68/69 (1994).
- 22-T. Isozaki, Y. Saito, A. Masuda, K. Fukumoto, M. Chosa, I. Ito, E.J. Oles, A. Inspector e C.E. Bauer: *Diamond and Related Materials*, vol.2,1156(1993).
- 23-M. Nesladek, J. Spinnewyn, C. Asinari, R. Lebout e R. Lorent: *Diamond and Related Materials*, vol 3, 98 (1993).
- 24-M.A. laher, J.L. Shultz, S. Nasrazadani, H.A. Naseen, W.D. Brown e A.P. Maishe: *Electroch. Soc. Proc.*, vol.95, 615 (1995).
- 25-M.A. Brewer., I.C. Brown, M.R. Dickinson, J.E. Calvin, R.A. Macgill e M.C. Salvadori. *Rev. Sc. Instrum.* Vol.63(6), 3389 (1992).
- 26- C.Wild, W. Muller-Seben, T. Echemann e P. KoidI<sub>1</sub> *Proc. in Applications of Diamond Films and Related Materials*, Edited by Elsevier Science Publishers, 197(1991).
- 27- P.Bachmann e W. van Enchevort, *Diamond and Related Materials*, Vol.1.1021(1992).
- 28- R. Erz, W. Doffer, k. Jung e H Ehrhardt, *Diamond and Related Materials*, 2449, (1993).
- 29- V.J. Trava-Airoldi, E.J. Corat, A.F.V. Pena, N.F. Leite, V. Baranauskas e M.C. Salvadori, "Columnar Diamond-OVO Growth Struture on irregular Surface Substrate", *Diamond and Belated Materials* (1995).
- 30- V.J. Trava-Airoldi, C.F.M. Borges and M. Moisan, "Improved Optical Diamond Film Coating on Fused Silica Using a Surface-wave-sustained Plasma", *Applied Physics Letters*, (1995).
- 31- V.J. Trava-Airoldi, "Diamante-CVD: Desenvolvimento e Aplicações no Mundo e no Pais" *Proc. do 11~ CBCIMAT*, Aguas de .Sao Pedro, SP, (1994) e *I Encontro da Sociedade Brasileira de Crescimento de Cristais*, Belo Horizonte-MG (1994).
- 32- V.J. Trava-Airoldi, E.J. Corat, N.F. Leite, B.N. Nobrega, V. Baranauskas "Crescimento de Filmes de Diamante Utilizando Tocha de Oxigenio-acetileno". *Revista Brasileira de Aplicações de Vacuo*, Vol.11(2), 67 (1994).

Kubelk

- 33- P.R.P. Barreto, E.Del Bosco, V.J. Trava-Airoldi, "Fonte de Plasma Tipo Arcjet Para Sintetização de Filmes de Diamante", *Hevista Brasileira de Aplicações de Vacuo*, Vol.11 (2)71(1994).
- 34- V.J. Trava-Airoldi, E.J. Corat, E. Del Bosco e Nelia Ferreira Leite, "Hot filament scaling-up for CVD diamond burs manufacturing". *Aceito no Surface & Coating Technology* (1995).
- 35- V.J. Trava-Airoldi, E.J. Corat, A.F.V. Fena, N.F. Leite, M.C. Valera, J.R. Freitas, "Pontas de Diamante-CVD: urn Novo Conceito" *Revista Gaucha de Pesquisas Odontologicas* (1995).
- 36- V.J. Trava-Airoldi, E.J. Corat, A.F.V. Pena, M.C. Valera, N.F. Leite, e V. Baranauskas, "Development of Diamond-CVD Burs Using Hot Filament Reacto('), *Rev. Sci. Instrum* (1995).
- 37 V.J. Trava-Airoldi, E.J. Corat, A.F.V. Pena, M.C. Valera, N.F. Leite, M.C. Nono e V. Baranauskas, "Brocas para uso odontologico ou uso correlato de desgaste ou perfuração revestidas com diamante obtido com as Tecnicas Quimicas de Crescimento a partir da Fase Vapor-CVD (Chemical Vapor Deposition)" - Registro INPI n<sup>o</sup> Fl 9500865
- 38- V.J. Trava-Airoldi, B.N. Nobrega, E.J. Corat, E.Del Bosco, N.F. Leite e V. Baranauskas. "Adherence Studies of CVD-Diamond Films on Carbides Surface in Low Substrate Temperature When CF<sub>4</sub> is Used as Gas Doping". 2nd International Conference on Diamond Films and Related Materials, Tokio, Japao - 1993.
- 39-V. Baranauskas, A. Peled, V.J. Trava-Airoldi, C.A.S. Lima, I. Doi e E.J. Corat. "Morfolological Studies of Laser Etching Process in Self Sustained CVD Diamond Wafers", *Applied Surface Science*, 79/SO 129 (1994).
- 40- V.J. Trava-Airoldi, B.N. Nobrega, E.J. Corat, E.Del Bosco, N.F. Leite. e V. Baranauskas, <sup>1</sup>"Low Temperature Chemical Vapour Deposition of Diamond on Tungsten Carbides Using CF<sub>4</sub> as Gas Doping for Machine Tool Applications", *Vacuum* Vol.46 (1), 5 (1995).
- 41- V.Snitika, V.J. Trava-Airoldi and V. Baranauskas, "The Ultrasound Effects on the Tribological Properties of Synthesizes Diamond Films". *Vacuum Science and Techonology*, (1995).
- 42- C.F.M. Borges, V.J. Trava-Airoldi, E.J. Corat e M. Moisan, "influence of the Substrate Parameters on the Roughness of Diamond Films", *Applied Physics Letters*, (1995).
- 43- C. F. Borges, M. Moisan, A. Gicquel "A Novel Technique for Diamond Film Deposition using Surface Wave Discharges"; *Diamond and Related Materials*, n<sup>o</sup> 4,149-154(1995)
- 44- C. F. M. Borges, L. St-Onge, M. Moisan, A. Gicquel, "Influence of process parameters on diamond film OVD in a surface-wave driven microwave plasma reactor" ; *Thin Solid Films*<sub>1</sub> 274, 3-17 (1995)
- 45- S. Illias G. Sene', P. Moller<sub>1</sub> V. Stambouli, J. Pascallon, D. Bouchier, A. Gicquel, A. Tardieu, E. Anger, M. F. Ravet, ; " Planarization of diamond thin film surfaces ion beam etching at grazing incidence angle" ; *Diamond and Related Materials* , vol 5, (1996) pp 835-839
- 46- C. Vivensang, L. Ferlazzo-Manin, M. F. Ravet, F. Rousseaux, G. Turban, A. Gicquel "Surface soothing of Diamond Membranes by reactive ion etching processes' *Diamond and Related Materials* , vol 5, (1996) pp 840-844
- 47- M. F. Havet, A. Gicquel, E. Anger, Z. Z. Wang, Y. Chen, F. Rousseaux "Realization of Xray Lithography Masks based on Diamond Membranes" ; *Mat. Res. Symp. Proc.* Vol 306-. p. 103-9,(1993)

- 48- Ch. Chardonnet, V. Bernard, Ch. Daussy, A. Gicquel, E. Anger "Polarization properties of thin films of diamond "; Applied Optics Vol 35, n<sup>o</sup> 34, 6692-97 (1996)
- 49-C. Jany, F. Foulon, P. Bergonzo, A. Brambilla, F. Silva, A. Gicquel, T. Pochet "Influence of CVD diamond film crystalline structures on the electrical properties of CVD Diamond Diamond and Related Materials vols, (1996) pp 741-746
- 50- F. Foulon, P. Bergonzo, C. Jany, A. Gicquel, T. Pochet "CVD diamond photoconductors for picosecond radiation pulse characterization "; Diamond and Related Materials, vo 5, (1996) pp 732-736
- 51 E. Gheeraent, A. Deneuille, A. M. Bonnot, "Defects and stress analysis of the Raman spectrum of diamond films", Diamond Relat. Mater., 1(1992) p.525-528.
- 52 Souza, T. M., Leite, N. F., Trava-Airoldi, V. J., Corat, E. J. "Studies on CVD-diamond on Ti6Al4V alloy surface using hot filament assisted technique" Thin Solid Films 308-309 (1997) p.472-475.
- 53 Nakamura, Y.; Sakagami, S.; Amamoto, Y.; Watanabe, Y., "Measurements of Internal Stresses in CVD Diamond Films, Thin Solid Films 308-309 (1997) 249-253.
- 54- Windischmann, H.; Epps, C. F.; Cong, Y., Collins; R. W. J. App. Phys. 69, n<sup>o</sup> 4, (1991).
- 55- Touloukian, Y. S. "Thermophysical Properties of Matter", 12, Thermal Expansion, IFI/Plenum, New York. 1975.



Revista SODEBRAS –Volume 1 – Nº 1 - Janeiro / 2006

## **PROGRAMA PARA CARACTERIZAÇÕES DE FILMES DE DIAMANTE CVD DEPOSITADOS A PLASMA DE MICROONDAS**

**Teófilo M. de Souza**

Centro Virtual de Pesquisas em Materiais – CVMAT - Unesp  
Departamento de Engenharia Elétrica, Unesp-Campus de Guaratinguetá

**Alix Gicquel**

CNRS-1311-Université Paris XIII- France

### **Resumo**

O programa PLASMIC, versão Windows, foi desenvolvido para processar dados relativos às caracterizações de filmes de diamante CVD depositados a plasma de microondas. O programa é de fácil operação, em si, auto-explicativo. Requer a digitação de alguns dados de controle, dos quais: a pressão interna do reator para uma determinada potência de microondas; o fluxo de gases; a mistura gasosa de hidrogênio metano, numa proporção adequada a temperatura do substrato e a vazão de água específica para a refrigeração do reator. Para os dados de entrada do programa são necessários os seguintes parâmetros: o nome da amostra; o número da amostra; a forma geométrica da amostra; a massa do substrato; a temperatura ambiente; a temperatura de deposição sobre o substrato; a concentração dos gases hidrogênio e metano; o fluxo total de gases; a pressão utilizada dentro do reator; o tempo de deposição do filme de diamante; a massa total da amostra após a deposição do diamante; a porcentagem do filme depositado lateralmente; o valor de referência do pico de diamante; o valor do pico com deslocamento; o deslocamento adotado/GPa para o stress e os coeficientes de dilatação térmica do substrato e do filme. Todos esses parâmetros estão reunidos no programa. Uma vez fornecidos os dados, o aplicativo executa os cálculos, automaticamente salva em um arquivo recuperável e apresenta os dados em tela. O programa também oferece a opção de imprimir todos os resultados dos cálculos.

### **Introdução**

O software PLASMIC, versão Windows, permite determinar todas as características dos filmes de diamante depositados, utilizando a técnica assistida por plasma de microondas. Este aplicativo foi desenvolvido para computadores compatíveis PC. O objetivo principal do programa é obter, calcular e fornecer os resultados de pesquisa, para serem anexadas ao relatório diário do processo de deposição.

## Operação

O software pode ser operado diretamente a partir do disquete (1,44 Mb) ou ser copiado, primeiro, para uma nova pasta do HD (Winchester), criada especificadamente para armazenar tanto o programa como os arquivos criados. No primeiro caso, a operação do programa é mais lenta, pelo fato de estar sendo lido em disquete e, também, o processo de gravação automática dos resultados serem salvos no próprio disquete. Uma vez inserido o disquete no “drive A”, rode o programa a partir da opção “Executar” do Windows.

A operação a partir de um diretório do HD, todas as operações se processam mais rapidamente, bastando entrar no diretório próprio e clicar duas vezes sobre o executável. Uma vez carregado o programa, todas as operações são auto-explicativas.

## Entrada de dados

Os dados solicitados pelo programa devem ser digitados nos campos: o nome da amostra; o material da amostra; o formato e as dimensões da amostra; a massa da amostra antes e após a deposição do filme de diamante CVD; a mistura gasosa utilizada; o fluxo de gases; as temperaturas ambiente e de deposição; o tempo de deposição e a pressão interna ao reator de microondas; as posições dos picos de diamante CVD, com o deslocamento referente ao pico sem stress; os coeficientes de dilatação térmica da amostra e do filme e o módulo de Young biaxial do filme.

## Processamento e resultados

Uma vez completada a entrada dos dados, clicando-se o botão “processar”, são apresentados os resultados dos dados calculados em função dos parâmetros introduzidos. Assim, tem-se: a potência requerida para o reator de microondas; a densidade de potência; a massa útil em gramas e quilates do diamante depositado; a espessura média do filme de diamante sobre a amostra; a taxa de deposição do filme em micra/h e em (microgramas/h)/cm<sup>2</sup> o volume do filme depositado; o deslocamento do pico de espalhamento Raman; o stress total (térmico e intrínseco) e o tipo de stress (se de compressão, nulo ou de tração).

O programa automaticamente gera um arquivo com o mesmo “Nome-número” digitado na entrada de dados. O programa oferece, ainda, a opção de imprimir o próprio arquivo salvo com os resultados processados. De operação simples e amigável, o programa exige mínimos recursos computacionais, fornecendo os dados que permitem caracterizar um filme de diamante CVD.

Alguns parâmetros possuem valores default. Em não sendo digitando nenhum outro valor dentro do campo, é usado este valor default. A navegação pelos campos é feita pela tecla TAB ou através do mouse.

Nome do arquivo de saída: (Ex: nome.txt)  
Nome do material do substrato: (Ex: Ti8Al.....)  
Nome e número da amostra: (Ex: Ti-03.....)

Data dos experimentos: (dd/mm/aaaa)  
 Forma da amostra: R (redonda)  
 Q (quad/retang)  
 T (triangular)  
 Massa do substrato em gramas (default = 1 )  
 Temperatura ambiente (Graus Celsius): (Ex: 19 )  
 Temperatura de deposição (em Celsius): (Ex: 200 )  
 Concentração do gás hidrogênio em % vo: (default= 99,9  
 Concentração do gás metano em % vol: .... (0.2, 1, 5,...)  
 Concentração de outro gás em % vol: (Ex: 0.1, 0.5, 2,...)  
 Fluxo total de gases em sccm: (Ex: 50, 100, 200,...)  
 Pressão utilizada dentro do reator em mbar: (Ex: 1,14...,120)  
 Tempo de deposição do filme de diamante em horas: (Ex: 1,0 8,30)  
 Massa total da amostra após a deposição do diamante em gramas: (Ex: 46, 74)  
 Porcentagem do filme depositado lateralmente (Ex: 20,50,...)  
 O valor de referência do pico de diamante em  $\text{cm}^{-1}$ .. (default= 1332.50,...)  
 O valor do pico com deslocamento em  $\text{cm}^{-1}$ : .. (default=1341.012)  
 O deslocamento adotado/GPa em  $\text{cm}^{-1}$  para o stress .... (Ex: 2.87, 3.12...)  
 O módulo biaxial de Young do filme em GPa: .. (Ex: 1230, 1345, ...)  
 Coeficiente de dilat. térmica AMBIENTE-substrato em  $\text{C}^{-1}$ : (Ex: 9.4E-06)  
 Coeficiente de dilat. térmica AMBIENTE-filme em  $\text{C}^{-1}$  .... .. (Ex: 0.8E-06,...)

### Geometria das amostras:

O programa oferece cálculos para as três geometrias clássicas. Fora estas, não há processamento previsto

#### DEPOSIÇÃO DO FILME DE DIAMANTE SOBRE AMOSTRA REDONDA

O diâmetro da amostra em cm :  
 A altura da amostra em cm :

#### DEPOSIÇÃO DO FILME DE DIAMANTE SOBRE AMOSTRA RETANGULAR OU QUADRADA

O comprimento da amostra em cm :  
 A largura da amostra em cm :  
 A altura da amostra em cm :

#### DEPOSIÇÃO DO FILME DE DIAMANTE SOBRE AMOSTRA TRIANGULAR

Comprimento da amostra em cm :  
 Base da amostra em cm :  
 Altura da amostra em cm :

### Exemplo de caracterizações

EXEMPLO DE FILME DE DIAMANTE CVD DEPOSITADO A PLASMA DE MICROONDAS SOBRE AMOSTRA RETANGULAR OU QUADRADA

Amostra numero: Ti1 Data da experiência:30/11/2003  
 O nome do material do substrato : Ti  
 O comprimento da amostra : 2 cm  
 A largura da amostra : 2 cm  
 A altura da amostra : .196899 cm  
 A densidade media do material do substrato : 2.540642 g/cm<sup>3</sup>  
 A massa do material do substrato : 2.001 g  
 O volume do material do substrato : .787596 cm<sup>3</sup>  
 Gás: 98.3 %H2 1.699997 %CH4 .2 % Outro gás Fluxo: 100 sccm Tsub: 800 C  
 Reator= P: 1003 W Pressão: 50 mbar Densidade de potência: 15 W/cm<sup>3</sup>  
 A massa total da amostra após a deposição do diamante : 2.015 g  
 A densidade media teórica do diamante : 3.51524 g/cm<sup>3</sup>  
 A massa depositada do diamante : 1.400018E-02 g  
 O volume do filme de diamante depositado : 3.982709E-03 cm<sup>3</sup>  
 A porcentagem total de filme depositado lateralmente : 50 %  
 A espessura media do filme de diamante sobre a amostra : 8.318808 micra  
 O tempo de deposição do filme de diamante : 10 h  
 A velocidade de deposição do filme : .8318807 micra/h  
 A massa útil do diamante: 1.169704E-02 g 5.848521E-02 quilates a 292  
 (microg/h)/cm<sup>2</sup>

Alfa Subst	Alfa filme	Mod d'Young biaxial	Pico do diamante	Pico do diamante		
(/C)	(/C)	do filme (GPa)	referencia(cm <sup>-1</sup> )	deslocado(cm <sup>-1</sup> )		
.00001	.000001	1230	1332	1341		
Ts(C)	Tamb©	Desloca(cm <sup>-1</sup> )	Stotal(GPa)	Sterm(GPa)	Sint(GPa)	Tipo
800	25	-9	-3.135889	-8.579249	5.443361	compressivo

## Conclusões

O programa dedicado **PLASMIC** é de operação rápida e direta, requerendo um mínimo de estrutura em hardware para sua instalação e operação em um computador compatível PC. Uma vez digitados os dados solicitados, os resultados são rapidamente informados, além de serem automaticamente salvos em arquivo tipo \*.txt.

Pode-se obter a potência adequada, a densidade de potência por volume e a pressão interna do reator para deposição do filme de diamante CVD, assim como todos os dados de caracterização dos filmes. O programa oferece, também, a opção de impressão dos resultados para análise e arquivamento. Num todo, o aplicativo reúne objetividade com qualidade nos cálculos para os principais parâmetros envolvidos na deposição de filmes de diamante CVD com reator a plasma de microondas.

## Referências

- Ohring, Milton. The Materials Science of Thin Films. Academic Press. NY,USA 1995.

Davis, Robert F. Diamond Films and Coatings Development, Properties, and Applications. Noys Publications. NJ, USA 1992



## DIAMANTE CVD - O MATERIAL DO SÉCULO 21

### **Jomar Esteves Bueno**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: jomar.bueno@uol.com.br

### **Teófilo Miguel de Souza**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

**Resumo.** *Bem mais que uma pedra preciosa, o diamante vem sendo admirado ao longo da história da Humanidade também por suas características, contendo, do ponto de vista científico e tecnológico, algumas das propriedades mais peculiares dos materiais até então conhecidos. Sua utilização na ciência e na engenharia ainda é limitada, devido à sua escassez e alto custo. Com o avanço tecnológico foi possível desenvolver técnicas para obtenção do diamante sob a forma de filmes finos através da deposição a partir da fase vapor (CVD) sobre vários tipos de materiais. Para estas deposições são empregados reatores sendo os mais utilizados os de filamento quente e de plasma de microondas. A obtenção de filmes com várias morfologias de superfície e espessura têm ampliado as possibilidades de aplicações nas indústrias eletro-eletrônica, bio-materiais, mecânica, óptica e acústica. Neste trabalho estão apresentados as tendências de sua utilização, seu potencial de aplicabilidade nas diversas áreas de conhecimento Humano, os processos de deposição e as diversas técnicas de caracterização tornando o diamante CVD um dos materiais de maior interesse científico e tecnológico do Século 21.*

**Palavras - Chaves:** *Diamante, CVD, Filmes*

## **1. INTRODUÇÃO**

O trabalho apresenta uma descrição histórica dos estudos relevantes relacionados com a obtenção do diamante sintético, os pontos principais da evolução das pesquisas e resultados obtidos utilizando filmes de diamante CVD. Nos tópicos que seguem, serão apresentados também os objetivos e aplicações imediatas dos filmes crescidos sobre os principais materiais.

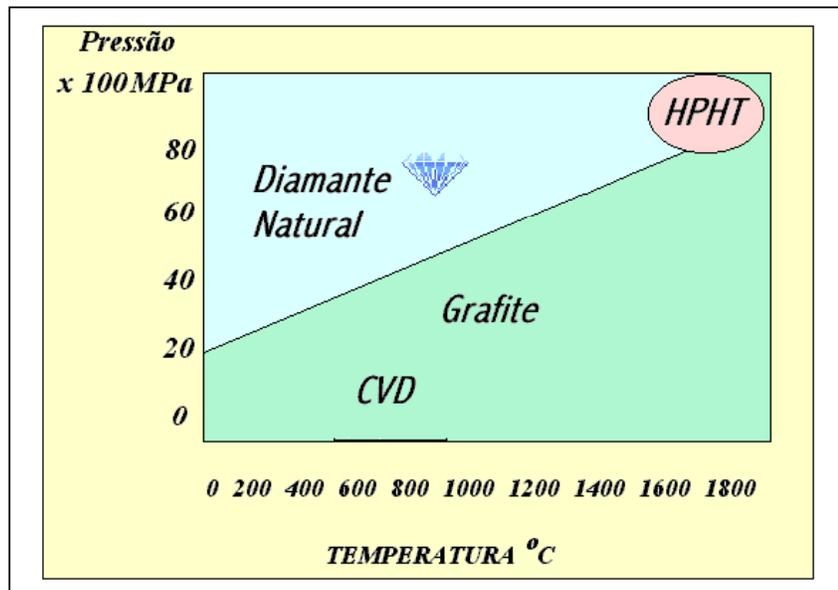
## **2. DESCRIÇÃO HISTÓRICA DOS ESTUDOS RELACIONADOS COM O DIAMANTE SINTÉTICO.**

O uso do diamante natural em larga escala para muitas aplicações tecnológicas é absolutamente inviável, devido não somente ao seu alto custo, mas principalmente às limitações técnicas. Por isto,

é de grande importância o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de métodos de produção de diamante sintético. Dentre os métodos de produção de diamantes artificiais existentes atualmente, daremos maior ênfase a dois métodos básicos: o de alta pressão e alta temperatura, HPHT ("High Pressure High Temperature") e a deposição química a partir da fase vapor, CVD ("Chemical Vapor Deposition"). Destes métodos, o HPHT é o de tecnologia mais antiga, que vem sendo usada há mais

de quarenta anos para a produção industrial, alcançando cerca de 75 toneladas de diamante por ano, suprimindo a maior parte das necessidades de diamante no mercado de ferramentas de corte, de usinagem para a indústria mecânica e de pós de granulometria classificada para o polimento de materiais. A técnica de deposição CVD, embora tenha tido o seu início de desenvolvimento na mesma época do HPHT, é uma tecnologia que ainda está em desenvolvimento propiciando uma pesquisa altamente atraente, devido ao fato dos fenômenos físicos e químicos envolvidos nesses processos não serem totalmente entendidos. Entretanto, o que é mais fascinante nas técnicas CVD é a possibilidade de crescer diamantes ou outros materiais, em diversas formas, sobre diferentes materiais, tanto na forma de filmes finos como filmes auto-sustentados, com espessura superior a 2mm e em áreas superiores a 500 cm<sup>2</sup>. Estes fatos tornam a obtenção do filme de diamante CVD para aplicações tecnológicas uma área de grande interesse industrial, que envolve a maioria das áreas do conhecimento.

Os primeiros esforços para a obtenção do filme de diamante em baixas pressões, metaestável, datam do final da década de 40 e o início da década de 50 e mais posteriormente, no Instituto de Físico-Química de Moscou, a partir do início da década de (60 Angus, J. C., 1991). O trabalho de William G. Ervesole na Union Carbide Corporation, de 1953, não foi divulgado naquela época. Nesta mesma linha trabalharam os grupos de Angus na Case Western Reserve University nos Estados Unidos (Angus, J. C., 1991). Estes trabalhos mostraram que é possível crescer diamante em condições em que este é metaestável, conforme se verifica a partir do diagrama de fase mostrado na Fig.1, mas com taxas de crescimento ainda muito baixas, da ordem de um angstrom por hora. Devido às baixas taxas de crescimento não houve interesse comercial, o que justifica o avanço alcançado apenas pela técnica HPHT. Verificou-se, embora timidamente, que na região do diagrama de fase onde há grafite é possível obter o diamante a partir do processo CVD em pressões sub-atmosféricas e temperaturas menores que 1000°C.



**Figura 1 - Pressão de equilíbrio das fases diamante e grafite.**

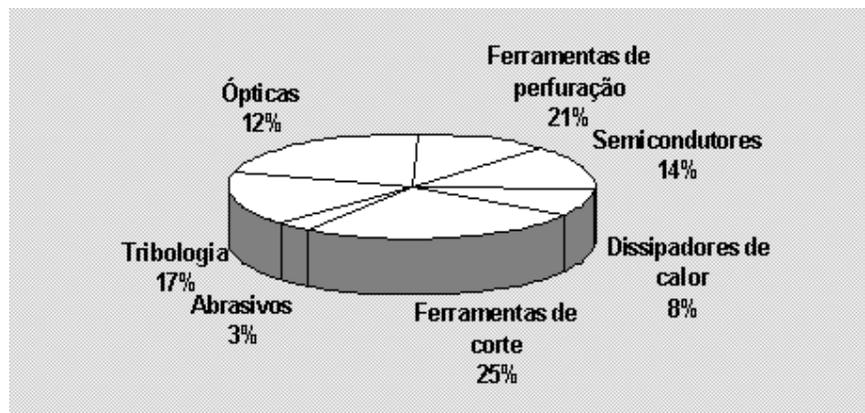
No final da década de 70 e início da década de 80, caracterizou-se o que Angus chamou de início da “era moderna” do crescimento de diamante em baixa pressão. O grupo russo de Deryagin, (Spitsyn et al 1981), foi o primeiro a relatar a taxa de crescimento da ordem de fração de um micrometro por hora, mas sem divulgar seus métodos de crescimento. A mais significativa contribuição veio, no entanto, de grupos japoneses, (Kuhihara et al 1988). A partir de 1982, muitos trabalhos desses grupos divulgaram a síntese de diamante a taxas de alguns micrometros por hora

usando a técnica assistida por filamento quente, (Matsumoto et al 1982), a técnica assistida por descarga de microondas, (Kamo et al 1983), a decomposição de gases a partir de chamas de combustão, (Hirose et al 1989), e jato de plasma em arco, (Kuhihara et al 1988). Usaram-se sempre misturas de pequenas porcentagens de metano em hidrogênio. A partir da década de 80 muitos grupos em todo o mundo se voltaram para essa área, tanto buscando esclarecimentos fundamentais, como aplicações tecnológicas. Em meados desta década registravam-se cerca de 250 equipes nesta área em todo o mundo. No início da década de 90 cerca de 1.000 grupos já estavam envolvidos com a pesquisa e desenvolvimento do diamante CVD. No início do Século 21, somente no Brasil, destacaram-se pelo menos 6 grupos reconhecidos internacionalmente.

Existe um grande interesse da comunidade científica em torno deste tema, com um número elevado de publicações, cuja abrangência vai desde a preocupação com esclarecimentos básicos, relacionados com os princípios dos mecanismos de crescimento, até as mais variadas aplicações que este material pode proporcionar. A busca pelas aplicações está também representada pelo grande número de patentes que surgiram, dando um demonstrativo de sua grande importância para o mercado, e conseqüentemente, para os interesses da sociedade. Dentro dessa premissa, a Fig. 2 mostra os principais campos das aplicações dos filmes de diamante CVD, (Souza et al 1997-a).

O Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP, com início de suas pesquisas no ano 2000, embora não tenha sido o primeiro a ser criado no País, hoje representa nos contextos nacional e internacional um pólo forte de atuação nesta área, com o propósito de dar contribuições fundamentais e de desenvolvimento para aplicações nas áreas de implantes, eletrônica, cerâmicas especiais e ligas de Ti e Nb. Dando continuidade nas pesquisas, visando inicialmente estudar, desenvolver e otimizar o processo de deposição e propriedades dos filmes de diamante CVD, avaliando sistematicamente os processos e os respectivos resultados.

Além da preocupação em manter uma pesquisa básica de vanguarda voltada para o estudo fundamental, o grupo tem também procurado, sempre, aplicações tecnológicas de curto e médio prazo que possam atender com seriedade o mercado interno e externo. Assim, com o desenvolvimento dos softwares Hotfila, Plasmic e o Dissipa, sendo os dois primeiros voltados para caracterização do diamante e o último para o dimensionamento de dissipadores utilizando diamante CVD, vêm contribuir para as pesquisas.



**Figura 2 - Potencial de aplicações do diamante CVD em várias áreas de acordo com o número de patentes publicadas.**

Neste sentido, encontra-se em fase avançada de desenvolvimento as pesquisas com implantes dentário, com ligas de Ti liso e poroso, recobrimento de pistões automotivos, dissipadores de calor, dopagem para obtenção de semicondutores, (Souza et al 1997-a). Paralelamente tem sido mantido o estudo fundamental em cada processo de obtenção, para os diferentes materiais utilizados como substratos. Nesta linha de pesquisa, pode-se destacar o crescimento de filmes de diamante CVD a

partir de compostos halogenados na fase gasosa envolvendo estudos de crescimento da estrutura colunar, diagnósticos “in situ” via espectroscopia de emissão e espectrometria de massa, (Ferreira et al 1998). Este estudo é uma área mais recente e tem gerado muitas contribuições originais, além de ajudar no entendimento dos mecanismos de crescimento dos filmes. Estes resultados têm confirmado dados anteriores da literatura quanto à importância da formação de hidrogênio atômico na fase gasosa e têm mostrado novas direções para pesquisas quanto à possibilidade de utilização de sistemas de menor potência para o crescimento de diamante CVD, comparado com os sistemas convencionais existentes atualmente.

O mecanismo da aderência da superfície do substrato ao filme de diamante é de enorme importância em todo o mundo, (Souza et al 1997-b). O grupo tem somado esforços nesse sentido com sucesso nos experimentos em vários tipos de substratos entre eles; Si, aço ferramenta, WC-Co, quartzo, Nb e ligas de titânio. Os estudos foram feitos em diferentes temperaturas e condições de crescimento para avaliar o “stress” intrínseco e extrínseco. Souza e colaboradores apresentam pela primeira vez uma sistematização desses resultados mostrando a dependência da aderência, principalmente com a temperatura de crescimento.

### **3. PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DO DIAMANTE CVD.**

Atualmente o diamante tem sido visto como um dos materiais de maior interesse econômico, por suas propriedades únicas na natureza, que criam um vasto campo exclusivo de aplicações, (Spear, H. E., Dismukes, J. P 1994). Em resumo, é o material mais duro conhecido na natureza (10.000kg/mm<sup>2</sup>), com coeficiente de atrito muito baixo (0,05), condutividade térmica muito alta (20W/cmK) valor cinco vezes superior ao do cobre), transparente a radiação na região espectral desde o ultravioleta até o infravermelho e alto índice de refração (2,47). Pode ser utilizado como material hospedeiro para vários tipos de dopagens, resistente a radiações cósmicas, nuclear e ultravioleta e também quimicamente inerte para temperaturas inferiores a 800°C, na presença de oxigênio e 1.500°C na ausência de oxigênio. Seu campo de aplicação abrange a tecnologia espacial, na proteção de células solares e superfícies sujeitas a bombardeamento de “partículas” cósmicas, dissipadores de calor, dispositivos eletrônicos mais resistentes, para citar alguns exemplos. Também pode ser usado na microeletrônica, com a possível obtenção de dispositivos mais rápidos e mais eficientes termicamente, assim como na área de óptica, com a obtenção de componentes para lasers de alta potência, em proteção de janelas ópticas de detectores acoplados em mísseis, bem como componentes ópticos para uso em regiões agressivas e bio-implantes.

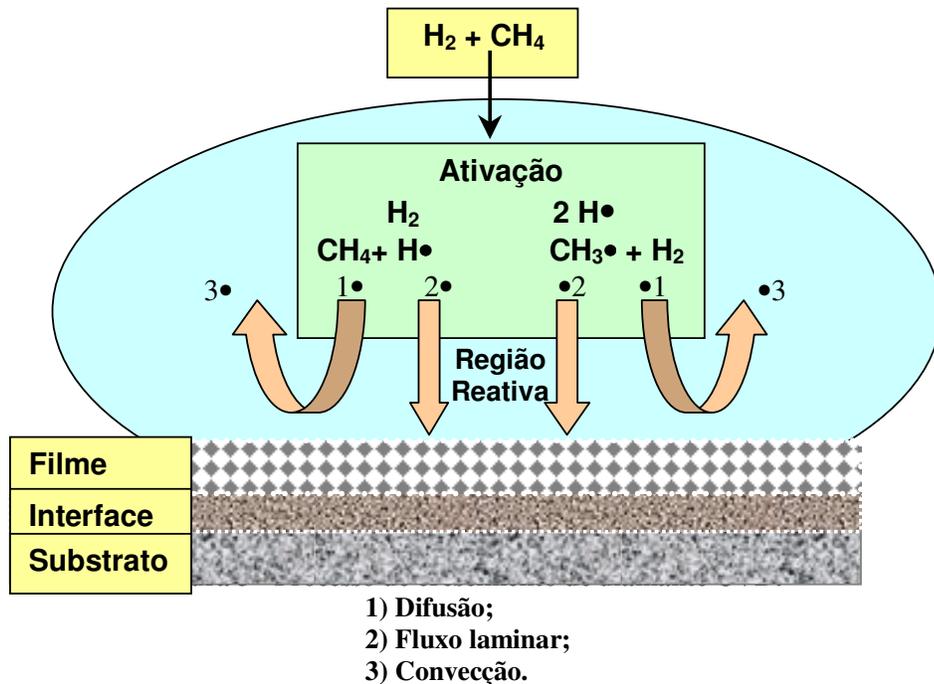
Onde se registra a maior fatia de aplicação é na área de mecânica, aproveitando sua propriedade mais conhecida, que é a dureza. Nesta área, a aplicação atinge a formação de um filme fino protetor em diferentes tipos de materiais cerâmicos e metálicos, assim como a obtenção de um filme espesso ou auto-sustentado sobre diferentes tipos de materiais.

### **4. PROCESSO CVD: Deposição Química de Diamante a Partir da Fase Vapor**

O crescimento de filmes de diamante em baixas pressões, a princípio não seria possível, isto porque o grafite, nas condições típicas de crescimento pelo método CVD é energeticamente mais favorável. A questão de porque o diamante cresce nestas condições não é ainda totalmente resolvida, (Butler, J. E., Woodin, R. L., 1993). Não existe ainda um mecanismo químico que seja completamente aceito para explicar este processo. Uma parte importante do processo de crescimento do filme de diamante CVD é o uso de métodos de ativação de mistura gasosa composta de hidrogênio molecular e um outro gás que contém o elemento carbono (hidrocarboneto). Entende-se por ativação o processo de dissociação do hidrogênio molecular em hidrogênio atômico, considerado o principal precursor de ativação para o crescimento, e também a dissociação do hidrocarboneto, (Bachmann et al 1991).

Não se tem apenas a dissociação dos gases componentes da mistura, uma vez que ela ocorre na

presença de altos gradientes de temperatura na região de ativação, mas sim condições onde o equilíbrio termodinâmico não é atingido. O processo de ativação é a principal diferença entre os vários métodos de crescimento de diamante hoje disponíveis. Um esquema do processo de crescimento de diamante CVD é mostrado na Fig. 3.



A mistura gasosa flui através do reator, passando pela região de ativação e atinge a superfície do substrato. O hidrogênio molecular é dissociado para ativar o processo. A maior parte dos mecanismos que ocorrem na fase gasosa para produzir o filme de diamante CVD, envolve o radical metila e/ou acetileno como sendo as espécies precursoras.

Com base nos resultados dos experimentos que obtiveram sucesso no crescimento de filmes de diamante, os fatos que podem ser considerados relevantes são:

- A ativação do gás, em altas temperaturas, é necessária para se obter a dissociação do hidrogênio e do hidrocarboneto.
- Observa-se relativa independência do método de ativação, seja ele filamento quente, plasma ou outro método. Com os diferentes métodos cresce-se diamante de boa qualidade, dentro das mesmas condições de alguns parâmetros de crescimento.
- A presença de hidrogênio é essencial. Hidrogênio atômico em condições de supersaturação promove o crescimento.
- A taxa de crescimento tem um máximo para temperaturas de substratos entre 700 e 800°C.
- Relativa independência do hidrocarboneto introduzido na mistura. Recentes trabalhos têm mostrado que diferentes misturas levam às mesmas reações químicas e tendem a reproduzir as espécies mais estáveis nas condições do meio.
- Co-deposição de grafite acompanha o crescimento de diamante. Esta co-deposição, em graus variados, dependendo das concentrações de carbono C•, do hidrogênio atômico H• e compostos halogenados (quando utilizados), limita a qualidade do filme obtido.

Outro ponto importante a ser observado aqui é a introdução de CF<sub>4</sub> e de CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> na mistura, (Patterson et al 1991). Estes compostos geralmente melhoram a qualidade do filme e permitem o crescimento até temperaturas mais baixas. Há trabalhos que mostram o crescimento em reator de filamento quente para temperatura de substratos em torno de 300°C, (Field et al 1993). Souza e seus colaboradores demonstraram que a adição de O<sub>2</sub>, embora tenha influência direta na taxa de

crescimento, produz um filme com melhor qualidade. Um ambiente com hidrogênio atômico em condições de supersaturação, e muitos radicais de hidrocarbonetos caracterizam o ambiente de crescimento de filmes de diamante. As perguntas mais fundamentais sobre este ambiente são: qual é a função do hidrogênio atômico e quais são as espécies cujos átomos de carbono são incorporados na rede cristalina do diamante?

O diamante, e não o grafite, é estável nestas condições e existem algumas hipóteses e modelos propostos de reações químicas com grande aceitação. O processo de crescimento não envolve apenas o elemento carbono, cujos campos de estabilidade são mostrados na Fig.1, mas também o hidrogênio. Uma superfície de diamante saturada com ligações C-H, com hibridização  $sp^3$ , é mais estável que uma superfície com o carbono livre de hidrogênio. Uma vez que uma camada de diamante é coberta por uma outra camada de diamante, a camada que foi encoberta contém 4 ligações covalentes de carbono  $sp^3$  e é metaestável em relação ao grafite. Na camada superficial é que o processo de estabilização do diamante é fundamental.

Ao hidrogênio atômico são atribuídas várias funções no processo, que são consideradas fundamentais para a estabilização da fase metaestável nas condições de crescimento, (Frenklach M., J., 1989). Estas funções, baseadas nos resultados dos experimentos, são as seguintes:

- a) Atividade química: Na fase gasosa, o hidrogênio atômico é responsável pelo aumento da atividade química, sendo que ele ataca os hidrocarbonetos estáveis produzindo vários tipos de radicais;
- b) Erosão preferencial do grafite: A taxa de erosão do grafite pelo hidrogênio atômico é de 20 a 30 vezes maior que a taxa de erosão do diamante;
- c) Criação de posições ativas de crescimento: recombinação de hidrogênio atômico da fase gasosa com átomos de hidrogênio ligados à superfície de diamante cria sítios ativos na superfície, onde é possível a inclusão de radicais ou moléculas de hidrocarbonetos;
- d) Estabilização da superfície: A superfície de diamante terminada em hidrogênio é mais estável que a do grafite.

A criação de posições ativas de crescimento é considerada um limitante para o crescimento em baixas temperaturas, pois uma diminuição delas reduz a taxa de recombinação do hidrogênio na superfície.

Do resultado conjunto destas linhas de trabalho concluiu-se que o  $CH_4$ , o  $CH_3\bullet$ , o  $C_2H_2$  e o  $C_2H_4$  são as espécies que mais aparecem, por exemplo, em um reator de filamento quente, em quantidade suficiente para produzir as taxas de crescimento observadas. Como o  $CH_4$  e o  $C_2H_4$  têm baixa reatividade, o  $CH_3\bullet$  e o  $C_2H_2$  são identificados como os mais prováveis precursores do crescimento do diamante, existindo uma corrente mais forte de pesquisadores que defende o radical metila como principal precursor. Os resultados do modelamento do ambiente de crescimento, em um reator assistido por filamento quente, fornecem uma idéia simplificada da química da fase gasosa neste ambiente. A maioria das reações bi-moleculares de abstração de hidrogênio são da forma



A produção de hidrogênio atômico pelo filamento quente promove a interconversão de  $H\bullet$ ,  $CH_4$  e  $C_2H_2$  que atingem um estado de equilíbrio térmico. Portanto, as concentrações dos radicais provêm do equilíbrio parcial destas reações de abstração de hidrogênio.

Em geral existe concordância sobre como o processo deve ocorrer. O crescimento é iniciado pela criação de uma ligação  $sp^3$  livre na superfície, ou seja, uma posição ativa. Se  $C_dH$  representa uma ligação da superfície terminada em hidrogênio,  $C_d\bullet$  representa uma posição ativa, e  $C_gH$  representa uma posição terminada em hibridização  $sp^2$ , estas reações são; (Guo H. Alam,1992):

- a) abstração de hidrogênio da superfície



b) recombinação de hidrogênio atômico da fase gasosa com as posições ativas



c) adição da espécie de crescimento (mecanismo de crescimento)



d) decomposição térmica das posições ativas



Para o  $CH_3\bullet$  e o  $H\bullet$  este tempo de vida médio é da ordem de algumas centenas de microssegundos, enquanto que para o acetileno é da ordem de algumas dezenas de milissegundos. Para as velocidades de difusão, a distância média de difusão é da ordem de 1 cm para o  $H\bullet$ , alguns centímetros para o  $C_2H_2$ , e da ordem de apenas 1 mm para o radical metila. Nestas condições, o acetileno e o hidrogênio atômico gerado no filamento são transportados por difusão até o substrato, enquanto que o radical metila é gerado próximo ao substrato, dentro de uma distância característica da ordem de 1 mm, através da reação;



ou seja, a concentração de radical metila depende da difusão de hidrogênio atômico e de metano até a região do substrato.

Além do processo de difusão, outro fator importante na determinação das concentrações das espécies na região do substrato é a interação com o próprio substrato. As concentrações dos vários hidrocarbonetos têm sido consideradas como determinadas pelos processos da fase gasosa. No entanto, foi identificado recentemente que a concentração de hidrogênio atômico tem grande dependência nos processos de superfície.

Os processos de abstração e de recombinação de hidrogênio na superfície, respectivamente descritos pelas reações a) e b) acima, promovem um processo catalítico de transformação de  $H\bullet$  em  $H_2$ . Este processo é responsável por um alto consumo de hidrogênio atômico e também participa na determinação das concentrações das espécies na região do substrato, em especial do  $H\bullet$  e do  $CH_3\bullet$ .

Existem, atualmente, muitos métodos diferentes para se fazer o crescimento de diamante em baixa pressão. Há que se lembrar apenas que o sucesso no crescimento de diamante em baixa pressão vem da constatação de que a presença do hidrogênio atômico em grandes quantidades na região do substrato é fundamental.

São descritas a seguir as técnicas mais utilizadas para a deposição química a partir da fase vapor dos filmes de diamante, (Spear, H. E., Dismukes, J. P., 1994). Nesses métodos, um hidrocarboneto gasoso é misturado em baixas concentrações com hidrogênio sendo ativado termicamente ou por plasma, antes de entrar em contato com um substrato aquecido.

#### 4.1. Técnica de Deposição Química a Partir da Fase Vapor Assistida por Filamento Quente.

Entre as diversas técnicas de crescimento, a ativação por filamento quente, chamada HFCVD (do inglês "Hot Filament Assisted Chemical Vapor Deposition"), é a mais simples delas, e ao mesmo tempo é a mais amplamente estudada, (Spear, H. E., Dismukes, J. P., 1994). Suas vantagens são o baixo custo dos equipamentos necessários e a facilidade de escalonamento para deposição em grandes áreas. Além disso, por ser um processo puramente térmico, onde os processos químicos envolvidos são relativamente bem conhecidos, vem sendo largamente usado para estudo dos

processos fundamentais envolvidos no crescimento de diamante. As desvantagens são a relativa baixa taxa de crescimento, a não uniformidade da área depositada, muito dependente da forma e proximidade do filamento. Além disso, os filamentos carburizados são muito quebradiços e também não podem ser usados em ambientes com concentrações relativamente altas de oxigênio.

Este processo de crescimento de diamante CVD foi inicialmente apresentado por Matsumoto, (Matsumoto et al 1982). Os filmes de diamantes são depositados sobre um substrato, utilizando uma mistura de metano e hidrogênio, ativado por filamentos aquecidos de tungstênio colocados próximo ao substrato, conforme Fig. 4a. A função do filamento aquecido é dissociar o hidrogênio molecular em hidrogênio atômico. A dissociação catalítica do hidrogênio molecular envolve adsorção do hidrogênio molecular na superfície do filamento, seguida pela evaporação de hidrogênio atômico de volta à fase gasosa. O filamento afeta as concentrações da fase gasosa, como fonte térmica, conduzindo as reações para a condição de equilíbrio termodinâmico e como catalisador da dissociação de hidrogênio atômico. A concentração de radicais provenientes dos hidrocarbonetos aumenta também à medida que a temperatura do filamento aumenta. A temperatura do filamento é cerca de 2200°C para que haja decomposição da mistura gasosa. A região reativa compreende um pequeno volume ao redor do filamento, sendo a distância entre filamento e substrato menor que 10mm para o crescimento de filme de diamante CVD. Para a deposição de filmes em grandes áreas é necessário aumentar a quantidade de filamentos.

#### **4.2. Técnica de Deposição Química a Partir da Fase Vapor Assistida por Plasma**

O plasma, uma região altamente ionizada, pode ser obtido a partir de descargas elétricas, descargas de microondas e RF, a partir de aquecimentos por indução. A função do plasma é funcionar como uma região de atração e gerar hidrogênio atômico produzindo os precursores do crescimento do diamante. Nesta técnica a produção de hidrogênio atômico se dá pela dissociação de hidrogênio molecular por impacto de elétrons e reações químicas. Estes processos de dissociação também são os responsáveis pela formação de radicais contendo carbono, tanto iônicos quanto neutros.

A concentração absoluta de hidrogênio atômico e radicais precursores é função da pressão do gás utilizado como meio para gerar o plasma e da energia do plasma e/ou armazenada no plasma. Em plasma com pressão do gás relativamente alta, onde a temperatura dos gases e dos elétrons é relativamente a mesma, obtém-se elevada concentração de hidrogênio atômico e radicais neutros, formados a partir de colisões entre elétrons e moléculas e também das moléculas entre si, permitindo taxas de crescimentos consideravelmente maiores. Por outro lado, em pressão relativamente baixa, os elétrons são produzidos com elevada energia cinética e devido a não ressonância e ao longo caminho livre médio, eles não transferem muita energia às espécies moleculares. Dessa forma, a temperatura dos gases é mais baixa, resultando na produção de baixas concentrações de hidrogênio atômico e radicais neutros, produzidos somente pelas colisões com os elétrons de alta energia.

O método de crescimento de filmes de diamante que utiliza o plasma em baixa pressão é aquele de descarga por microondas, (Kamo et al 1983), mostrado na Fig. 4b. O método mais utilizado para plasma em alta pressão é o jato de plasma em arco (Kuhihara et al 1988), mostrado na Fig. 4c.

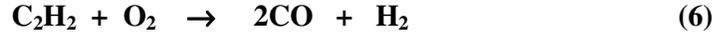
#### **4.3. Técnica de Deposição Química a Partir da Fase Vapor Assistida por Chama de Combustão**

Essa técnica utiliza a chama proveniente de uma tocha de oxigênio-acetileno, com um sistema de controle de fluxo e um sistema de refrigeração adequado para o substrato, (Hirose et al 1989). O crescimento pode ser obtido à pressão atmosférica ou em câmaras especiais. O desenho esquemático deste método é mostrado na Fig. 4d.

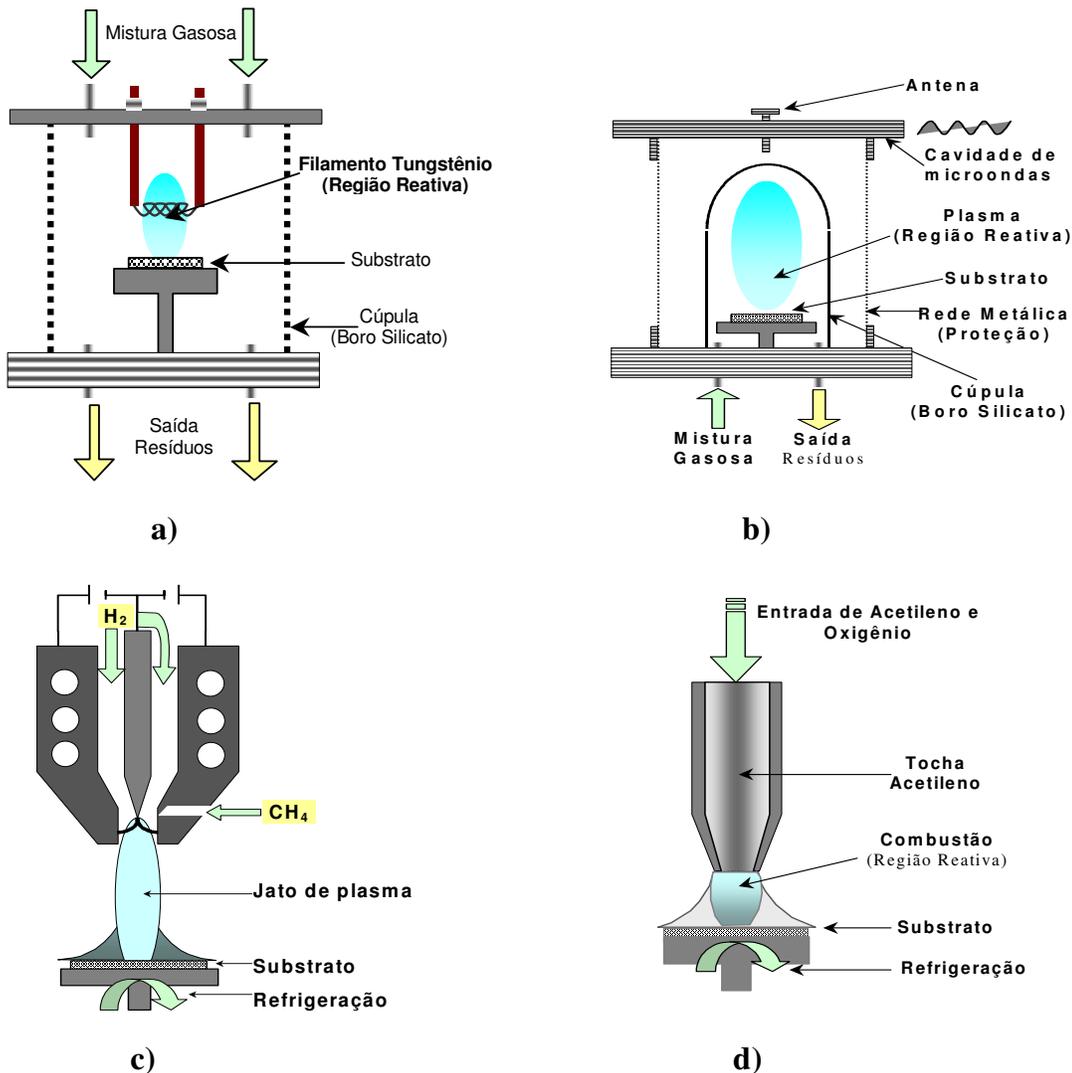
A adição de hidrogênio na mistura oxigênio-acetileno reduz a quantidade de carbono amorfo nos

filmes de diamante CVD.

As chamas de combustão que operam com mistura rica em combustível apresentam três regiões distintas. O cone interno da chama corresponde à zona de combustão primária seguida de um cone intermediário e finalmente uma zona externa. A temperatura na zona de combustão primária pode atingir 3600 °C, sendo CO e H<sub>2</sub> os principais produtos formados nessa região, conforme a reação:



Ainda são formados produtos como H•, OH•, C<sub>2</sub>• e C<sub>2</sub>H•. É justamente nessa região que o substrato deve ser alinhado, enquanto que na região intermediária serão formados os hidrocarbonetos que não foram queimados e os produtos da combustão. As reações químicas nesta região são de menor interesse.



**Figura 4 - Técnicas de deposição de diamante CVD.**

- a) assistida por filamento quente;**
- b) assistida por plasma de microondas;**
- c) assistida por jato de plasma;**
- d) assistida por chama de combustão.**

A zona externa consiste de uma chama resultante da difusão de oxigênio da atmosfera que se incorpora à chama. Nessa região os produtos da combustão são basicamente CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

O substrato é colocado no final da região primária da chama, onde há abundância de hidrogênio atômico e de radicais de hidrocarbonetos necessários para o crescimento do filme de diamante CVD.

## 5 – COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O mecanismo de crescimento mundialmente mais aceito é o que tem o radical metila como precursor na formação dos filmes de diamante CVD. Devido às propriedades intrínsecas superiores do diamante CVD há possibilidades de aplicações nas áreas da eletrônica, mecânica, óptica e biomateriais. Das técnicas apresentadas para deposição dos filmes de Diamante CVD a assistida por filamento quente é a que apresenta possibilidade de implantação com menor investimento. Esta técnica produz um diamante com maior grau de impurezas devido a presença de carbetos do substrato e do filamento. A técnica que necessita de equipamentos mais complexos é a do plasma de microondas, porém fornece um diamante com maior grau de pureza em comparação com a do filamento quente.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angus, J. C., 1991, “Diamond and diamond-like phases “,Diamond and Related Materials, Volume 1, Issue 1..
- Bachmann, P. K., Leers, D., Lydtin, H. ,1991, “Diam. Rel. Mat.”, n.1, p.1.
- Butler, J. E., Woodin, R. L.,1993, “Phil Trans. R. Soc. Lond. A”, n.15, , p. 209.
- Ferreira, N.G., Corat, E.J., Trava-Airoldi, V.J., Leite, N.F., Mendes de Barros, R.C., Del Bosco, 1998, “E. Diamond and Related Materials”, n.7,p.810.
- Field, J. E., Nicholson E., Seward, C. R., Feng, Z. Phil. ,1993, “Trans. R. Soc. Lond A.” n. 67, p. 261.
- Frenklach, M. J. ,1989, “Appl. Phys.”, n. 65, p. 5142.
- Guo, H., Alam, 1992, “M. Thin Solids Films”, n. 212, p.173.
- Hirose, Y., Annanuma, S., Okada, N., Komaki, K, 1989, “Proc. Int. Symp. On Diamond-like Films”, n.1, Pennington, p.80.
- Kamo, M., Sato, Y., Matsumoto, S. and Setaka, 1983, “N. Journal of Crystal Growth”, v. 62, p. 642.
- Kuhihara, K., Sasaki, K., Kawwarada, M., Koshino, 1988, “N. Appl. Phys. Lett.”, v. 52, p. 437.
- Matsumoto, S., Sato, Y., Kamo, M., Setaka, N. Jpn. J. Appl. Phys., 1982, part 2, n. 21, p.183.
- Patterson, D. E., Bai, B. J., Chu, C. J., Hauge, R H., Margrave, J L, 1991, “Materials Research Society”, Pitt., p 443.
- Souza, T.M, Trava-Airoldi, V.J., Corat, E.J., e Leite, N.F. ,1995, “Estudos da Dependência de Stress de Filmes Finos de Diamante CVD em Substrato de Silício” Anais do II Encontro da Sociedade Brasileira de Crescimento de Cristais – INPE – São José dos Campos/SP, P.14.
- Souza, T.M, Trava-Airoldi, V.J., Corat, E.J., e Leite, N.F. ,1997-a, “Brazilian Journal of Vacuum Applications”. n. 1, v.16.
- Souza, T.M, Trava-Airoldi, V.J., Corat, E.J., e Leite, N.F. ,1997-b, “Thin Solid Films” n. 308-309, p. 254.
- Spear, H. E., Dismukes, J. P. ,1994, “Synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology”. John Wiley & Sons,.
- Spitsyn, B.V., Bouilov, L. L., Deryagin, B.V.,1981, “Journal of Crystal Growth”, n. 52,p. 219.
- Trava-Airoldi, V. J., Corat, E. J., Moro, J. R., Souza, T.M., Leite, N. F.,1997, “CVD-Diamond: An Important Material for Many Applications”. II Cong. Int. de Tec. Metalúrgica e de Materiais. Em CD-ROM. São Paulo.

## 7 - DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### **CVD DIAMOND - 21<sup>st</sup>. CENTURY MATERIAL**

#### **Jomar Esteves Bueno**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: jomar.bueno@uol.com.br

#### **Teófilo Miguel de Souza**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

***Abstract.** Being more than a simple precious stone, diamond has been admired along the mankind history also for its characteristics, possessing from the scientific and technologic points of view some of the most peculiar properties of the materials known so far. Its utilization in science and engineering is still limited due to its scarce acquisition and high cost. With the technological advance it has been possible to develop techniques to obtain diamond in form of thin films by means of deposition from a vapor phase (CVD - Chemical Vapor Deposition) on different types of materials. Such depositions are obtained with the assistance of reactors, of which the hot filament and the microwave plasma are the most used. Acquisition of films with distinct surface morphologies and thickness has broadened the possibilities of applications in electro-electronic industries, bio-materials, mechanics, optics and acoustics. On the present work are the utilization tendencies, its potential applicability on the several areas of human knowledge, the deposition processes and the various characterization techniques makes the CVD Diamond one of the greatest scientific and technologic materials of the 21<sup>st</sup> Century.*

**Keywords:** Diamond, CVD, Thin Films



## DISSIPADORES DE CALOR COM DIAMANTE CVD

### **Teófilo Miguel de Souza**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP

E-mail: teofilo@feg.unesp.br

### **Wellington Pascoal de Santana**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP

E-mail: wellpas@hotmail.com

**Resumo.** Considerando o alto coeficiente de condutividade térmica do diamante, sua utilização na forma de filmes finos torna-se extremamente viável para aplicação como dissipadores de calor. Neste trabalho foram feitos estudos sobre aplicação de filmes finos de diamante CVD (do inglês "Chemical Vapor Deposition") sobre a liga  $Ti_6Al_2Sn_4Zr_2Mo$  para utilização como dissipadores de calor para placas eletrônicas. Amostras da liga  $Ti_6Al_2Sn_4Zr_2Mo$  com dimensões 20mm x 20mm x 1mm tiveram suas superfícies preparadas com polimento e ácido oxálico para retirada de óxidos e incrustações formados sobre a amostra, através de lixas d'água 400, 600, 1200 para que não houvesse comprometimento na etapa de formação do filme. Foram feitas também limpeza da superfície com ultra-som, pesagem e determinação da morfologia do corpo de prova através de observações em microscópio eletrônico de varredura e óptico. A superfície do substrato preparado teve sua composição analisada através de EDX. O filme de diamante CVD foi depositado, sobre o substrato preparado, utilizando reator de filamento quente e fazendo uso de uma mistura gasosa convencional de hidrogênio e metano com uma pequena porcentagem de oxigênio. A morfologia da superfície do diamante teve aspecto semelhante aos de outras ligas de titânio. Análises preliminares demonstraram que a resistência térmica do diamante CVD é menor que a do cobre e a do alumínio.

**Palavras-chave:** diamante CVD, dissipadores de calor, ligas de titânio, titânio, filme.

## 1. INTRODUÇÃO

Através do processo de deposição química na fase vapor (Chemical Vapor Deposition–CVD) é possível formar sobre a superfície de um substrato filmes de materiais diversos, entre os quais estão o diamante.

O filme então formado conserva as propriedades do material utilizado como substrato.

O diamante por apresentar características bastante peculiares, tais como sua alta dureza (é o material mais duro que se conhece), alta condutividade térmica, baixo coeficiente de dilatação térmica, excelente acabamento superficial, o que lhe confere um dos mais baixos coeficientes de

atrato, apresenta-se, então, como um material com uma gama de aplicações em várias áreas da engenharia (Davis, 1993).

A liga de titânio  $Ti_6Al_2Sn_4Zr_2Mo$  foi empregada como substrato para deposição do filme de diamante CVD para construção de dissipadores de calor para placas eletrônicas. Sabendo-se da

alta condutividade térmica do diamante e do aumento de contato devido ao crescimento do cristal sobre tais dissipadores pode-se obter uma maior dissipação térmica (Kraus, 1999).

Este trabalho de pesquisa visou, portanto, ao estudo da viabilidade da aplicação do filme de diamante CVD sobre a liga Ti6Al2Sn4Zr2Mo para utilização como dissipadores térmicos de placas eletrônicas com intuito de otimizar a dissipação de energia térmica nessas placas.

## 2. METODOLOGIA

As amostras da liga Ti6Al2Sn4Zr2Mo foram cortadas, com dimensões 20mmx20mm, e numeradas para preparação superficial. Essas tiveram suas superfícies preparadas com polimento e ácido oxálico para retirada de óxidos e incrustações formados sobre a amostra, através de lixas d'água 350, 580,1200 para que não houvesse comprometimento na etapa de formação do filme. O filme de diamante CVD foi depositado, sobre o substrato preparado, utilizando reator de filamento quente, fazendo uso de uma mistura gasosa convencional supersaturada de hidrogênio com metano e uma pequena porcentagem de oxigênio.

O objetivo da utilização do oxigênio foi obter um diamante mais puro. Finalmente foram feitas análises nas amostras através de EDX onde foram verificados aspectos da deposição e pureza do diamante depositado sobre a liga.

### 2.1. Procedimentos Experimentais

Os filmes de diamante CVD foram depositados em um reator de filamento quente com as seguintes condições:

- . Pressão - 50 Torr (50mmHg = 66,5 mbar)
- . Fluxo de gases-120sccm (1,5% em volume de CH<sub>4</sub>, 0,2% em volume de O<sub>2</sub> e o restante de H<sub>2</sub>)
- . Quantidade de filamentos - 2
- . Diâmetro do filamento - 0,2mm
- . Tensão Elétrica - 17,0 V
- . Corrente Elétrica - 13,3 A
- . Potência no reator - 226,1W
- . Densidade de corrente - 211,68 A/mm<sup>2</sup>
- . Fluxo de Água - 54 litros/h
- . Temperatura - 600 °C
- . Tempo de deposição do diamante - 4:00 h

## 3. RESULTADOS OBTIDOS

A análise por EDX realizada com uma amostra pura (sem diamante) e com uma amostra submetida à deposição, evidencia a presença do diamante sobre o substrato, como mostram as Figs. (1) e (2). Observa-se a presença do pico do carbono com grande intensidade após a deposição do filme do diamante CVD. De acordo com a Fig. (3), a morfologia da superfície do diamante sobre a liga empregada para a deposição do filme teve aspecto semelhante a de outras ligas de titânio, ou seja, com os grãos dos cristais mais uniformes com tamanhos próximo dos 2µm.

Foram feitas também análises preliminares da dissipação térmica do diamante utilizando um circuito elétrico através de termopar, e para efeito de comparação foram analisadas as temperaturas em outros materiais como o cobre, o alumínio e o latão, além da próprio liga sem o diamante, como mostra a Tab. (1) (Lee, 1997 and Ho, 2000).

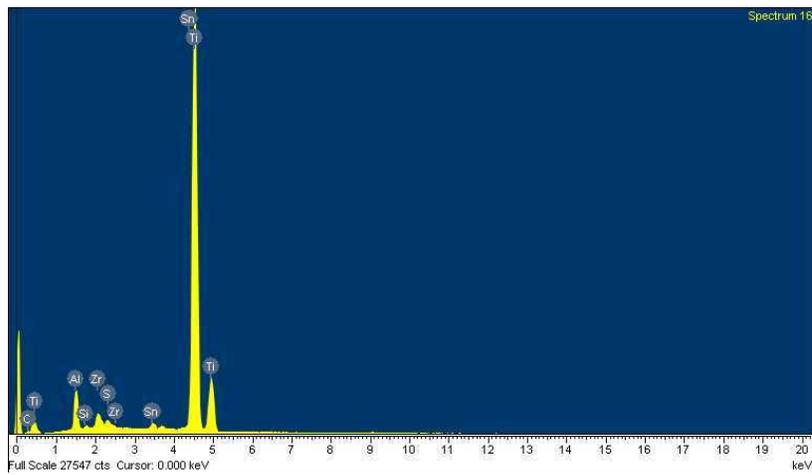


Figura 1. Análise EDX de amostra antes da deposição do filme de diamante CVD.

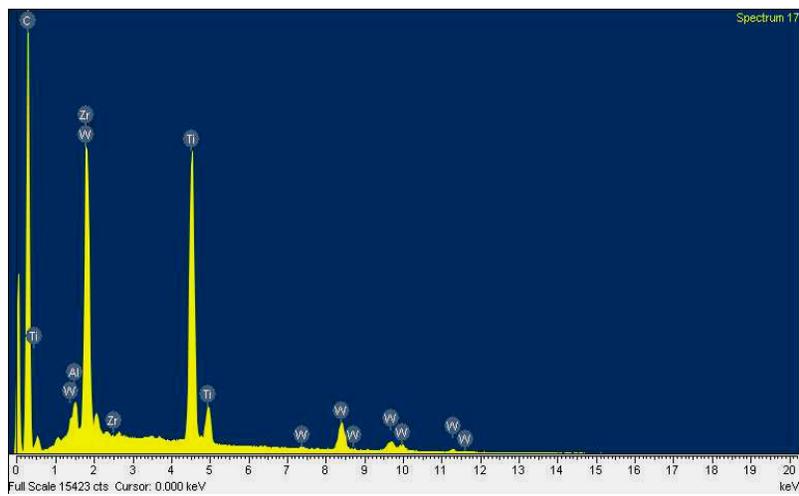


Figura 2 . Análise EDX com amostra submetida à deposição do filme de diamante CVD.

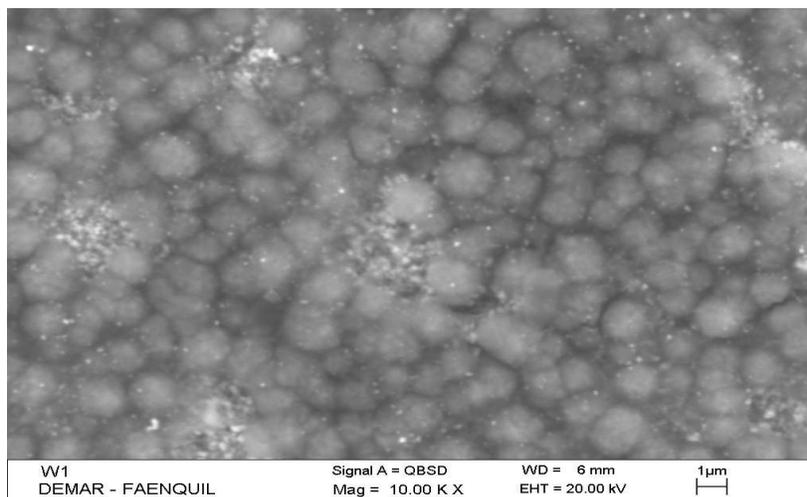


Figura 3. Morfologia do filme através de Microscopia Eletrônica de Varredura

Tabela 1. Valores de Temperatura para Cobre, Latão, Alumínio, Ti6Al2Sn4Zr2Mo e Diamante CVD, para tensões elétricas de 6 e 12V DC.

	Cobre (°C)	Alumínio (°C)	Latão (°C)	Ti6Al2Sn4Zr2Mo(°C)	Diamante CVD (°C)
6,0 (v)	35,4	36,3	38,9	32,8	32,3
12,0 (v)	62,9	63,4	64,9	49,9	49,5

#### 4. CONCLUSÃO

Pode-se observar pela análise dos resultados a eficiência do dissipador de calor com filme de diamante CVD. A liga Ti6Al2Sn4Zr2Mo no seu estado “puro” se mostra como um material com menor resistência térmica que o cobre, alumínio e o latão, e tem sua dissipação aumentada com o filme de diamante CVD. A proximidade na dissipação térmica, vista através da Tab. (1), pode ser entendida pelo fato do diamante estar depositado somente em um dos lados da superfície. Espera-se obter um ganho maior com um recobrimento total da liga.

Entre os materiais tradicionais utilizados em dissipadores de calor, o cobre é o que tem melhor dissipação térmica, seguido do alumínio e latão. O alumínio é o mais empregado devido principalmente ao seu baixo custo.

Devido a melhora de dissipação térmica visto neste trabalho conclui-se que o material obtido da deposição, ou seja o diamante CVD sobre a liga Ti6Al2Sn4Zr2Mo, pode ser aplicado como dissipador de calor para placas eletrônicas ou circuitos semicondutores, com um melhor taxa de dissipação térmica.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das seguintes entidades: FUNDUNESP, PROPP, FAPESP, CNPq, DEMAR-FAENQUIL.

#### 6. REFERÊNCIAS

- DAVIS, Robert F. 1993. “Diamond Films and Coatings – Development, Properties and Applications” – Noyes Publications – Edited North Carolina State University Department of Materials Science and Engineering Raleigh, North Carolina .
- Ho, H.P.; Lo, K.C.; Tjong, S.C.; Lee, S.T., 2000. “Measurement of thermal conductivity in diamond films using a simple scanning thermocouple technique” (Diamond and Related Materials, Volume: 9, Issue: 7, July 3, pp. 1312-1319 )
- Kraus, A. D., Bar-Cohen, A.1999. “Design and Analysis of Heat Sinks”, John Wiley & Sons.
- Lee, Seri, 1997, “Optimum design and selection of heat sinks”. (Microelectronics and Reliability, Volume: 37, Issue 4, April, p. 699 )

### CVD DIAMOND HEAT SINKS

#### **Teófilo Miguel de Souza**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

#### **Wellington Pascoal de Santana**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: wellpas@hotmail.com

**Abstract.** Due the high coefficient of thermal conductivity of the diamond, its utilization in the thin film form becomes-itself extremely viable for application as heat sinks. In this work they went deeds studies about thin application of film of CVD(Chemical Vapor Deposition) diamond on Ti6Al2Sn4Zr2Mo alloy for utilization as heat sinks for electronic plates. Samples from the Ti6Al2Sn4Zr2Mo alloy with dimensions 20mm x 20mm x 1mm had its surfaces prepared with scouring and oxalic acid for retreat of oxides and incrustations formed on the sample, with sandpapers numbers 400, 600, 1200 for no trouble in the film deposition. A cleanliness on surface with ultra-sound, weighing and determination from the morphology of the bulk tes with observations by scanning electronic microcospe and optic. Bulk surface prepared had sweats composition analyzed by EDX. CVD diamond film was deposited, on substrate prepared, utilizing hot filament reactor doing use of a gaseous mixture of hydrogen and methane with a small percentage of oxygen. Surface morphology diamond film had aspect to the of other titanium alloys. Preliminary analyses showed that the CVD diamond film thermal resistance is more less than to of copper and of the aluminum.

**Keywords:** CVD diamond,heat sinks, titanium alloys, Ti, film



## DEPOSIÇÃO DE FILME DE DIAMANTE CVD SOBRE IMPLANTES DENTÁRIOS COM LIGAS DE TITÂNIO LISA

### **Teófilo Miguel de Souza**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

### **Joanisa Possato**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: mec03256@feg.unesp.br

**Resumo.** *O diamante é um material orgânico e tem as propriedades de biocompatibilidade e hemocompatibilidade, sendo estas de extrema importância nos implantes dentários, feitos de titânio e suas ligas, possibilitando diminuir os sintomas de rejeição. Com as amostras de implantes dentários foram feitas limpeza da superfície com ácido oxálico e depois com ultra-som e determinação da morfologia do corpo de prova através de observações em microscópio eletrônico de varredura. A superfície do substrato preparado teve sua composição analisada através de EDX. O filme de diamante CVD (Chemical Vapor Deposition) foi depositado, utilizando um reator de filamento quente. Após as deposições utilizou-se, para análise, a reconstrução confocal.. Os testes de biocompatibilidade ainda não foram feitos em centros autorizados.*

**Palavras-chave:** *implantes dentários, diamante CVD, ligas de titânio, filme fino.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Utilizando do processo de deposição química na fase de vapor (do inglês Chemical Vapor Deposition – CVD) é possível depositar um filme de diamante sobre a superfície de um implante dentário confeccionado com titânio liso. O diamante por ser um material orgânico, confere-lhe as propriedades de biocompatível e hemocompatível (Davis, 1993), sendo estas de extrema importância nos implantes dentários, feitos de titânio e suas ligas, possibilitando diminuir os sintomas de rejeição.

### **1.1. O Implante**

O implante é um sistema instalado no osso alveolar remanescente, com o objetivo de reproduzir a função de uma ou mais raízes dentárias que foram perdidas. O implante em si não é um dente artificial

completo, mas sim, a raiz e sobre este, será construída uma prótese dentária (uma coroa), com alicerce baseado por um ou mais implantes (parafusos ou cilindros).

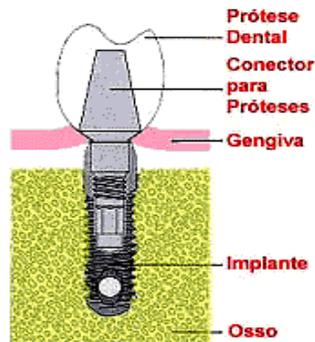


Figura 1. Implante dentário com parafuso de titânio liso.

## 1.2. Biocompatibilidade e Processo de Osseointegração

Entende-se como biocompatibilidade a capacidade de um material para se desempenhar em uma aplicação específica com uma resposta apropriada do organismo receptor. De acordo com a resposta biológica induzida no organismo, os materiais biocompatíveis podem se classificar em biotoleráveis, bioinertes e bioativos. Um material bioinerte não induz resposta local do sistema imunológico, no entanto um material biotolerável, induz uma resposta mínima, sendo aceito pelo organismo receptor.

A resposta típica do tecido ósseo com relação aos materiais inertes e biotoleráveis é a encapsulação do implante por uma camada de tecido fibroso, sendo a espessura dessa camada inversamente proporcional à inércia do material.

O material bioativo permite uma resposta biológica específica na interface com o tecido vivo, possibilitando a formação de uma ligação entre o tecido e o próprio material. Neste caso o tecido é capaz de interagir intimamente com o material depositando-se diretamente sobre a superfície do mesmo sem a intervenção da camada de tecido fibroso.

## 1.3. O Titânio

O titânio é um material de engenharia de aplicação relativamente recente, o titânio possui uma densidade razoavelmente baixa ( $4,5 \text{ g/cm}^3$ ), um elevado ponto de fusão ( $1672 \text{ }^\circ\text{C}$ ), dureza a partir de 100 HB e um bom módulo de elasticidade (107 GPa) (ASM, 1985). Suas ligas são bastante resistentes, chegando a atingir valores de limite de resistência à tração de 1400 Mpa em temperatura ambiente, além de possuírem boa ductilidade, boa usinabilidade e forjabilidade (Hanson, 1995). Um exemplo de aplicação específica que faz uso das propriedades mencionadas é mostrado na Fig. (2) onde tem-se implantes dentários feitos com titânio liso.

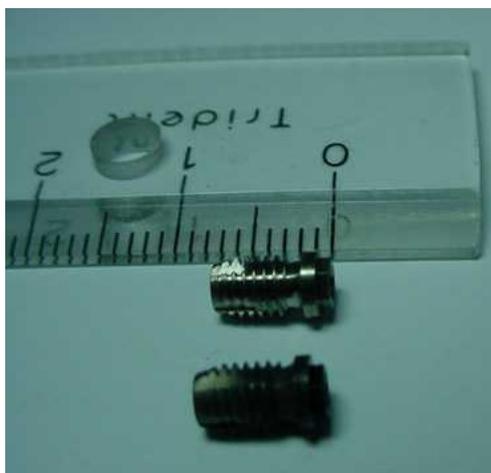


Figura 2. Implantes dentários feitos com titânio liso.

Sua maior limitação é uma elevada reatividade química com outros elementos em elevadas temperaturas, o que levou ao desenvolvimento de uma série de ligas especiais. A principal característica do titânio, entretanto, é a sua elevada resistência à corrosão em temperatura ambiente, o que o torna praticamente imune ao ar, aos fluidos corpóreos, à atmosfera marinha e a uma grande variedade de atmosferas industriais. Além disso, o titânio é biocompatível, o que o torna uma alternativa altamente utilizada na área biomédica, sendo empregado em: implantes dentários e instrumentos cirúrgicos.

## 2. METODOLOGIA

Sobre as amostras de implantes dentários com titânio liso, foram feitas limpeza da superfície com ácido oxálico e depois com ultra-som, pesagem e determinação da morfologia da superfície do corpo de prova através de observações em microscópio eletrônico de varredura e óptico. A superfície do substrato preparado teve sua composição analisada através de raios X e EDX. O filme de diamante CVD foi depositado, utilizando um reator de filamento quente. Após as deposições utilizou-se, para análise, a microscopia eletrônica de varredura.

### 2.1. Procedimentos Experimentais

Primeiramente é feita uma preparação da superfície do material. Usando feltro, pasta de diamante de  $0,25\ \mu\text{m}$  e ácido oxálico 10% em volume, é feito o polimento. Uma posterior limpeza é realizada com auxílio de acetona e por fim a secagem.

A Figura (3) mostra o reator utilizado na deposição do filme de diamante CVD.



Figura 3. Reator de filamento quente utilizado para a deposição dos filmes de diamante CVD.

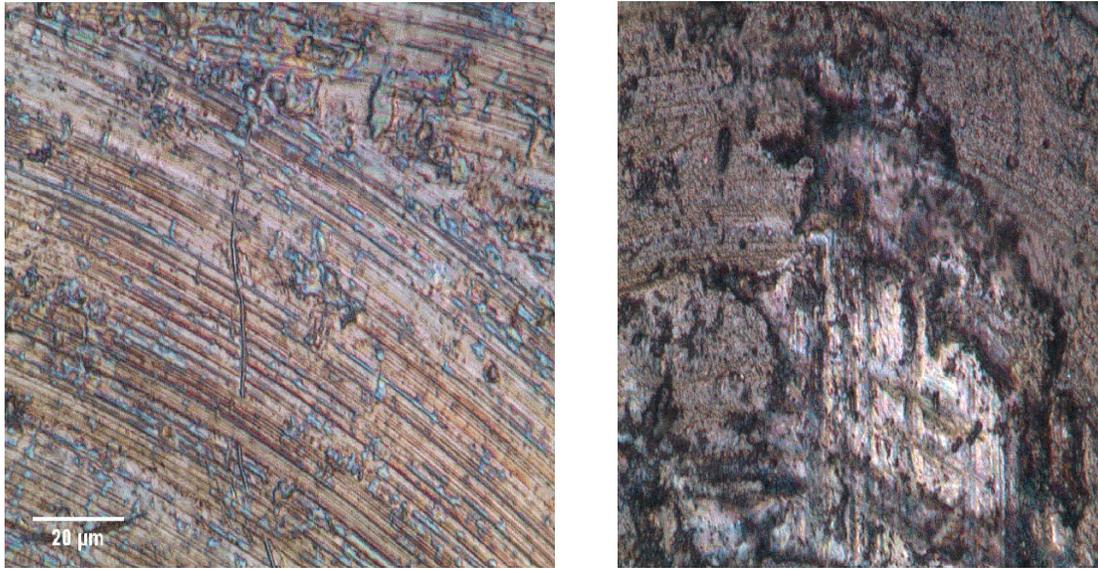
A mistura gasosa para deposição do filme de diamante é constituída de 98,3 % de  $H_2$ , 1,5 % de  $CH_4$ , e 0,2 % de  $O_2$ , com fluxo total de 120 sccm (centímetro cúbico por minuto).

O procedimento foi realizado utilizando reator de filamento quente com tensão de 15 V e corrente elétrica de 12,7 A. Foram utilizados dois filamentos de 0,2 mm de diâmetro cuja densidade de corrente medida foi de  $404,3 \text{ A/mm}^2$ . A potência solicitada pelo reator durante a deposição foi 190,5 W a uma pressão de 6650 Pa. A temperatura do substrato foi de  $725 \text{ }^\circ\text{C}$  e o fluxo de fluido de refrigeração, no caso, água, foi de 54 litros por hora.

### 3. RESULTADOS

Com a utilização do reator de filamento e usando o processo CVD foi possível depositar sobre implantes dentários, confeccionados em titânio poroso, uma camada de diamante. Pretende-se a seguir verificar as propriedades físicas e mecânicas proporcionadas ao implante. Espera-se elevada resistência, biocompatibilidade e hemocompatibilidade, além da diminuição do tempo necessário para a obtenção da osseointegração, pois o tecido humano interage diretamente sobre o implante sem a necessidade da encapsulação, a interação neste caso com o tecido humano deixa de ser apenas mecânica e passa a ser também química, devido a bioatividade do diamante.

A Figura (4) mostra as características apresentadas pelo material antes e depois da deposição do filme de diamante.



(a)

(b)

Figura 4. (a) Superfície do implante antes da deposição do filme feito através da reconstrução confocal. (b) Superfície do implante após a deposição do filme de diamante CVD feito através da reconstrução confocal.

#### 4. CONCLUSÕES

Foram realizadas duas deposições. Uma com uma hora e meia e a outra com duas horas de deposição. O aspecto macroscópico da amostra revelou a deposição de um filme que recobriu toda a superfície do implante conforme mostrado na primeira figura. Também a reconstrução confocal mostrou que a amostra sem brilho é a amostra sem deposição. A amostra com deposição apresenta um brilho.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das seguintes pessoas e entidades:

FAPESP Bolsa IC N<sup>o</sup>. 03/09641-7

FUNDUNESP, CNPq, PROPP.

Luís Rogério de Oliveira Hein.

Emerson Ferreira de Lucena.

Rodolfo, Sr. Valdir, Posch, Rafaela e Fabrício.

Marco Aurélio Ferla de Oliveira pelas sugestões das revisões do texto final.

#### 6. REFERÊNCIAS

ASM, 1985 “Handbook of Metallography and Microstructures”, Materials Park. Vol 9.

Davis, Robert F. 1993 – Diamond Films and Coatings – Development, Properties and Applications – Noyes Publications – Edited by North Carolina State University, North Carolina.

Hanson, B. H., 1995 “The Selection and Use of Titanium Institute of Materials” (ISBN 0901716979).

## **CVD DIAMOND FILM DEPOSITION ON DENTAL IMPLANT WITH SMOOTH TITANIUM ALLOYS**

**Abstract.** *The diamond by be an organic material, him confers the estates of biocompatible and hemocompatible, being these of extreme importance dental implant, deeds of titanium and its alloys, enabling diminish the symptoms of rejection. With the samples of dental implants, they went deeds cleaning from the surface with oxalic acid and afterwards with ultra-sound, weighing and determination from the morphology of the body of test by observations in confocal image. The surface of the sample prepared had sweats composition analyzed with EDX. CVD diamond film was deposited, utilizing a hot filament reactor. After the depositions utilized himself, for analysis in confocal image. Initially the deposition went deed utilizing the sample with smooth titanium. As work after sample will be submitted implant in authorized centers.*

**Keywords.** *dental implants, CVD diamond, titanium alloys, thin film.*



## TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES DE DIAMANTE CVD

### **Teófilo Miguel de Souza**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

### **Joelma Mello**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: joelmamello@imicro.com.br

### **Jomar Esteves Bueno**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: jomar.bueno@uol.com.br

**Resumo.** *O uso de técnicas de caracterização dos filmes de diamante CVD e as correlações de seus resultados com os parâmetros macroscópicos de crescimento promovem um melhor entendimento para o desenvolvimento dos processos de crescimento e aplicações tecnológicas destes filmes. Partindo-se deste princípio e através de um processo iterativo, identificam-se as condições em que o filme de diamante cresce mais favoravelmente e com melhor qualidade. As técnicas de caracterização são de muita importância para análise de superfícies, interfaces e interior do material. O artigo apresenta avaliações feitas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), técnica confocal (MCLV), dispersão de energia de raios X - EDX ("Energy Dispersive X-Ray"), espectroscopia de espalhamento Raman - RSS ("Raman Scattering Spectroscopy"), difração de raios X e espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X - XPS ("X-Ray Photoelectron Spectroscopy") sobre os filmes de diamante CVD e sobre o material onde ele está depositado. Há também descrições de utilização das análises metalográficas e a técnica de indentação Rockwell sobre o referido filme.*

**Palavras-Chave:** *Diamante, CVD, Filmes, Caracterização.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Devido à importância das técnicas de caracterização na área de diamante sintético, este trabalho apresenta uma descrição das principais utilizadas para os filmes de diamante CVD e o substrato. O uso de técnicas adequadas de caracterização dos filmes de diamante CVD e as correlações de seus resultados com os parâmetros macroscópicos de crescimento promovem um melhor entendimento para o desenvolvimento dos processos de crescimento dos filmes.

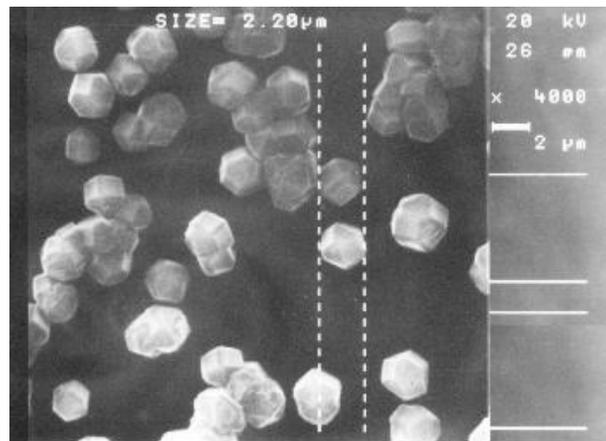
## **2. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES DE DIAMANTE CVD**

As técnicas de caracterização utilizadas são convencionais, mas de muita importância para análise de superfícies, interfaces e interior do material. O trabalho apresenta uma correlação sistemática das medidas feitas por microscopia eletrônica de varredura (MEV),

microscopiaconfocal de varredura a laser (MCLV), dispersão de energia de raios X – EDX (“Energy Dispersive X-Ray”), espectroscopia de espalhamento Raman – RSS (“Raman Scattering Spectroscopy”), difração de raios X e espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X – XPS (“X-Ray Photoelectron Spectroscopy”). Os resultados são também complementados pela análise metalográfica, as técnicas de indentações Rockwell, dureza Vickers e determinação da massa de diamante e da espessura do filme da amostra. Estas técnicas são descritas a seguir, dado a enorme importância de suas utilizações na Engenharia dos Materiais, entretanto maior ênfase será dada para as menos convencionais e que são constantemente utilizadas nas análises dos filmes de diamante CVD.

### 3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A principal função do MEV é produzir uma imagem de aparência tridimensional varrendo a superfície de uma amostra com um feixe de elétrons. A forma e o tamanho dos acidentes topográficos na superfície de uma amostra sólida, podem ser visualizados com uma resolução e riqueza de detalhes impossíveis em um microscópio óptico, conforme observado na Fig.1.



**Figura 1 – Microscopia Eletrônica de Varredura**

Alguns números típicos mostram as vantagens de um MEV que tem resolução de cerca de 4nm, profundidade de foco cerca de 300 vezes maior do que um microscópio óptico e uma magnificação nominal nos equipamentos mais modernos de até 500.000 vezes, evidenciando detalhes dos microcristais e contornos de grão com geometrias diferentes.

É uma técnica muito usada na análise da morfologia superficial e seção de corte transversal da amostra, permitindo verificar a morfologia do substrato e interface, (Bennett et al 1992).

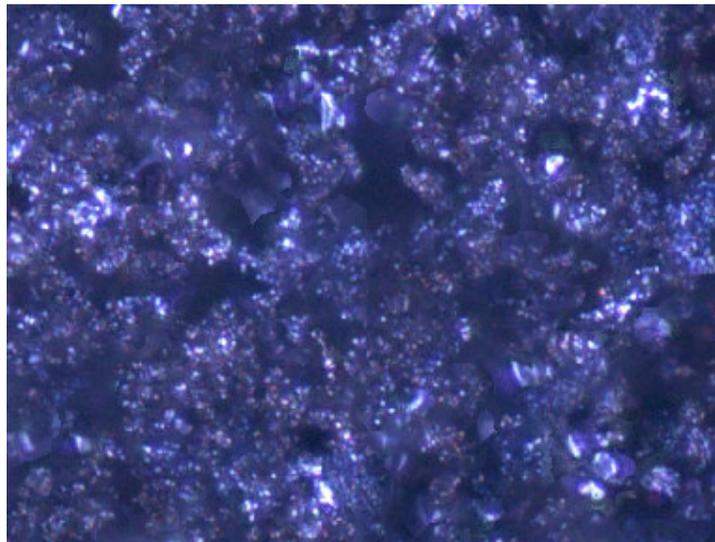
As análises de microscopia eletrônica de varredura forma obtidas com um microscópio modelo LEO 440.

### 4. MICROSCOPIA CONFOCAL DE VARREDURA A LASER (MCLV)

Atualmente, a microscopia confocal de varredura a laser (MCLV) é uma ferramenta essencial na obtenção de imagens com alta resolução e na reconstrução tridimensional de uma variedade de amostras. Permitindo estudos muito mais precisos e oferecendo várias vantagens sobre a microscopia convencional. A microscopia confocal vem se tornando cada vez mais, uma grande aliada nas pesquisas envolvendo os mecanismos de formação das cadeias cristalinas do diamante CVD.

Geralmente, as amostras são submetidas a um composto fluorescente e a luz emitida é processada num computador, o qual exibe a imagem no monitor de vídeo, conforme ilustrado pela

Fig.1. A iluminação é feita por um feixe delgado de raios laser, que varre o corte iluminado, ponto a ponto, em uma determinada área da amostra, realizando o que poderíamos chamar de “corte óptico”. Com a capacidade de variação do campo de varredura do MCLV (0,5 a 1,5 micrômetro) é possível, com essa fina espessura, que a informação seja coletada a partir de uma seção óptica bem definida, praticamente eliminando a fluorescência fora de foco, resultando em um aumento no contraste, na intensidade e qualidade do sinal detectado. Desta forma, a imagem é formada exclusivamente pelas estruturas que estão no plano de varredura, sem que os componentes situados em outros planos contribuam para a formação da imagem tridimensional, (Arnaldo et al 2000).



**Figura 2 – MICROSCOPIA CONFOCAL DE VARREDURA A LASER**

As imagens dos “cortes ópticos” podem ser armazenadas em computador e técnicas de processamento digital de imagens podem ser utilizadas para reconstruir uma imagem tridimensional da amostra, melhorando ainda mais a qualidade das imagens possibilitando melhor identificação, facilitando a interpretação dos resultados experimentais, permitindo ainda cálculos mais precisos do comprimento, área, volume e outras análises de acordo com a finalidade do estudo e formando imagens tridimensionais semelhantes às obtidas com o MEV.

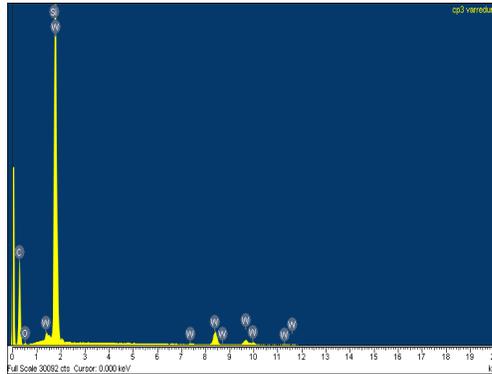
As análises foram obtidas por um sistema de microscopia confocal, o MRC 1024-UV, equipado com um laser de argônio UV e um laser visível argônio/criptônio. O sistema é capaz de adquirir imagens de amostras triplamente marcadas e imagens de transmissão DIC “True Color”.

## **5. DISPERSÃO DE ENERGIA DE RAIOS X (EDX)**

O princípio básico desta técnica está fundamentado na própria microscopia eletrônica de varredura onde um elétron primário colide com um átomo da amostra, provocando a excitação. O átomo excitado decai para seu estado original emitindo um fóton de raios X característico. O sinal de raios X pode ser selecionado por energia usando-se um detetor de dispersão de energia de raios X. Esta técnica analítica é denominada espectroscopia de dispersão de energia de raios X, (Goldstein et al, 1994). Cada elemento tem suas energias de fótons muito características, o que permite sua identificação o que pode ser observado nos picos ilustrados na Fig.3. Além da emissão das linhas características, os espectros de raios X apresentam um ruído de fundo sempre presente, que limita a detecção de sinais fracos e conseqüentemente a possibilidade de determinação de baixas concentrações de elementos.

A análise pode ser semiquantitativa para elementos com número atômico maior que 10, com limite de detecção a partir de 1000 ppm e apenas qualitativa para números atômicos entre 5 e 10. A

análise semiquantitativa é baseada no fato de que a intensidade da radiação emitida é proporcional à fração em peso dos respectivos elementos. Para o cálculo das frações utilizam-se padrões com composição química próxima à da amostra. A sensibilidade é baixa para elementos leves e a análise quantitativa é limitada a superfícies planas e polidas, (Goldstein et al, 1994). As superfícies que não são planas, como região de fratura, partículas isoladas de filmes e substratos, levam a erros significativos.



**Figura 3 - Espectro típico da dispersão de energia de raios X.**

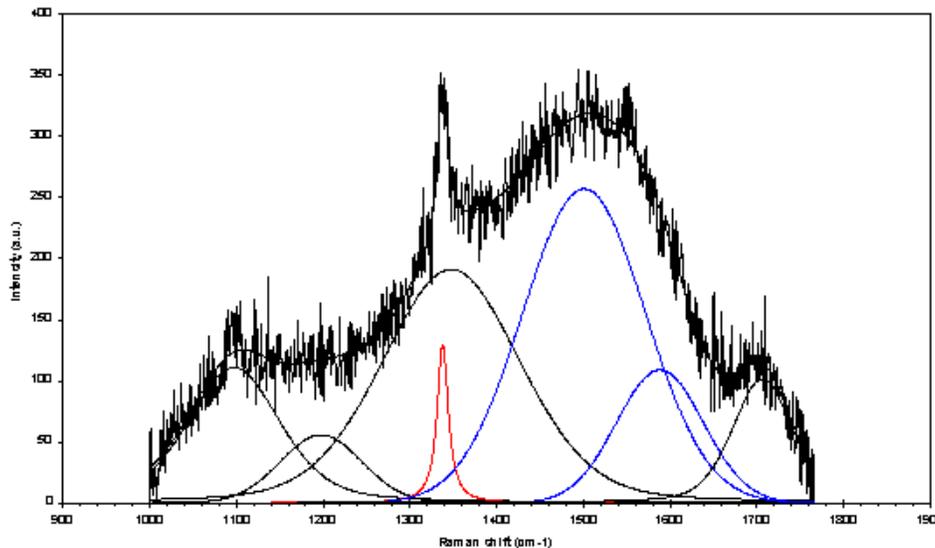
Nesta técnica de análise, um ponto fraco tecnicamente é justamente a detecção, que utiliza janela de berílio, bastante fina, mas que mesmo assim absorve grande parte da energia dos Raios X, principalmente radiação com energia inferior a 0,7 keV. Para que elementos mais leves pudessem ser detectados foram desenvolvidas janelas ultrafinas, à base de materiais plásticos, que permitem a passagem de radiação correspondente ao carbono. E mais recentemente, janelas de diamante têm sido usadas, com menor absorção, principalmente na região dos espectros de Raios X de menor energia e pode representar um avanço, em termos de se obter melhores resultados para elementos leves, (Goldstein et al, 1994).

## 6. ESPECTROSCOPIA DE ESPALHAMENTO RAMAN

A espectroscopia de espalhamento Raman é uma técnica primordial na sondagem de níveis de energia de átomos ou moléculas. Um fóton interagindo com os modos vibracionais e rotacionais do material, conhecido como processo de espalhamento, é espalhado pelo material com uma frequência maior ou menor que a incidente dependendo do estado inicial das moléculas e/ou átomos do material.

O efeito Raman corresponde às radiações espalhadas a partir de uma amostra com frequência ligeiramente diferente da radiação incidente. A energia dos fótons espalhados é aumentada ou diminuída, relativamente à energia dos fótons incidentes, através de incrementos quantizados que correspondem às diferenças de energia entre níveis de energia, seja eletrônico, vibracional, ou entre níveis rotacionais da molécula em um gás, líquido ou sólido. O recurso da espectroscopia de espalhamento Raman consiste na análise da radiação inelasticamente espalhada pela matéria, com comprimento de onda mais curto ou mais longo em relação à radiação incidente, conhecidos como anti-Stokes e Stokes, respectivamente, e que são características intrínsecas de cada material.

Os filmes de diamante CVD, por diversas razões, podem formar-se com incorporações de grafite e formas amorfas de carbono, ou então, também com elementos estranhos introduzidos, estes últimos de grande interesse científico e tecnológico na área de semicondutores. Desta forma, de acordo com as suas possíveis aplicações, uma precisa caracterização se faz necessário, de preferência por métodos não destrutivos, com análises não somente quanto a sua heterogeneidade, mas também quanto a sua forma estrutural.



**Figura 4 - Espectro de espalhamento Raman típico do diamante e os picos deconvoluidos.**

No diamante sem a existência de impurezas na rede cristalina, com a composição química simples de puro carbono, o espectro de espalhamento Raman mostra a banda de espalhamento de primeira ordem devido a interação com o fónon da rede cristalina do diamante, que o identifica com o deslocamento Raman em  $1345,32 \text{ cm}^{-1}$  mostrado na Fig. 4. Nesta figura é mostrada a banda do carbono amorfo, com centro em torno de  $1497 \text{ cm}^{-1}$ , bem mais larga que a do diamante. Também pode-se verificar os seguintes picos deconvoluidos em  $\text{cm}^{-1}$  :

- 1-  $1108,52$  o pico Diamante nano ou microcristalino
- 2-  $1196,24$  o pico Diamante microcristalino
- 3-  $1345,32$  o pico Diamante CVD com “stress”
- 4-  $1350,67$  o pico D do Grafite policristalino
- 5-  $1497,63$  o pico Grafite ou Carbono amorfo  $\text{sp}^2$
- 6-  $1568,69$  o pico G do Grafite

É importante verificar que bandas do diamante e do grafite e formas de carbono amorfo estão bem separados, mas dentro da mesma região de alcance do espectro analisado. A sensibilidade para o grafite e formas amorfas é cerca de 50 vezes maior que para o diamante, o que torna esta técnica de grande importância, especialmente para o diamante.

A espectroscopia do espalhamento Raman, além de mostrar a qualidade do filme de diamante, também é usada para avaliar o estado de “stress” em que fica submetido o filme de diamante depositado sobre qualquer material. A análise de espectroscopia Raman foi também utilizada para medir a dependência entre o “stress” total do filme e a temperatura do substrato. O pico da linha de espalhamento Raman pode estar mais deslocado para comprimentos de ondas maiores, se o filme apresentar “stress” compressivo, e mais deslocado para comprimentos de ondas menores se o filme apresentar “stress” de tração.

O deslocamento adicional do pico Raman,  $\Delta k$ , é utilizado para medir o “stress” total do filme por comparação com a posição da linha de deslocamento do diamante sem “stress”. O pico sem “stress” está centrado em  $1332,5 \text{ cm}^{-1}$  e desta forma  $\Delta k$  equivale a uma metodologia uniforme e adequada para análise de posição do pico da linha do espectro de espalhamento Raman. Inicialmente a forma da linha é ajustada por uma expressão Lorentziana. Nas análises têm sido explorado o “stress” total a que fica submetido o filme, onde cada  $2,87 \text{ cm}^{-1}$  de deslocamento adicional corresponde a  $1 \text{ GPa}$  de “stress” total. Em comparação com a linha do diamante sem

“stress”, os valores experimentais mostram um deslocamento para a direita do pico de espalhamento Raman.

Sabe-se que esse deslocamento adicional da linha do diamante é uma característica dos filmes de diamante crescidos e aderentes sobre substratos que é devido a soma de efeitos extrínsecos e intrínsecos. Os efeitos extrínsecos aparecem principalmente devido a grande diferença entre os valores dos coeficientes de dilatação térmica do diamante e do substrato, enquanto os efeitos intrínsecos aparecem devido à existência de defeitos e/ou impurezas na estrutura cristalina do diamante.

Para avaliar o “stress” total  $\sigma$ , em GPa, para cada filme de diamante, efetuam-se os seguintes cálculos:

$$\sigma = (\text{posição do pico do filme com "stress"} - 1332,5) / 2,87 \quad (1)$$

Sendo  $\sigma_{\text{int}}$  o “stress” intrínseco,  $\sigma_{\text{ext}}$  o “stress” extrínseco,  $k=1345$  GPa o módulo biaxial de Young do filme de diamante,  $T_0$  a temperatura ambiente,  $T_c$  a temperatura de crescimento do filme, todos em °C,  $\alpha_s$  o coeficiente de dilatação térmica do substrato e  $\alpha_f$  o coeficiente de dilatação térmica do filme de diamante à temperatura ambiente, pode-se calcular:

$$\sigma_{\text{ext}} = k (\alpha_f - \alpha_s)(T_c - T_0) \quad (2)$$

Para obter o “stress” intrínseco efetua-se

$$\sigma_{\text{int}} = \sigma - \sigma_{\text{ext}} \quad (3)$$

sendo que  $\alpha_f$  e  $\alpha_s$  são dependentes da temperatura .

Os espectros de espalhamento Raman foram obtidos através do MicroRaman Sistema 2000 da Renishaw analisado com o software Spectralmax.

## 7. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

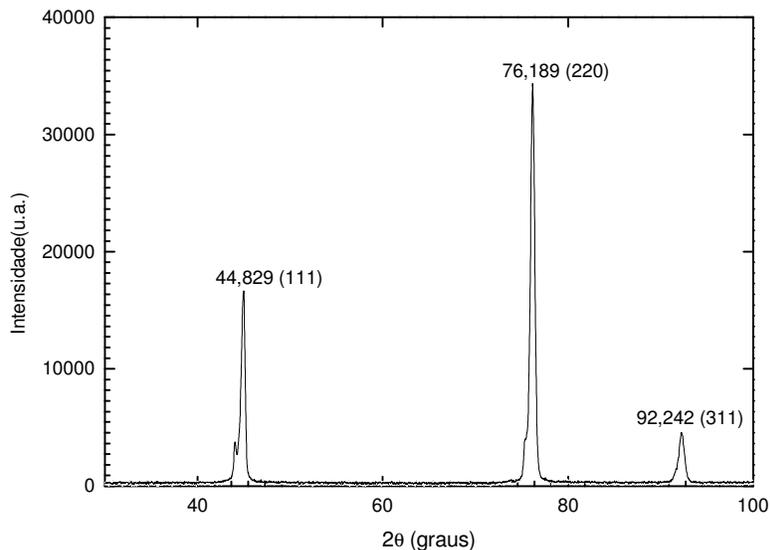


Figura 5 - Difratoograma para um filme de diamante CVD

A técnica de difração de raios X analisa qualitativa e quantitativamente informações relacionadas com a estrutura cristalina e as propriedades de materiais. Ela permite a identificação dos materiais, (Cullity B.D. 1956). É uma técnica não destrutiva, não requerendo preparação específica da amostra e não é necessário remover o filme do substrato para ser analisado.

A Fig. 5 apresenta o difratograma para um filme auto-sustentado de diamante CVD crescido com 1,5% em volume de metano e 98,5% em volume de hidrogênio à temperatura de 600 °C e 30h de crescimento.

Observa-se que o pico correspondente a  $2\theta = 44,829^\circ$  refere-se ao plano (111), o pico correspondente a  $2\theta = 76,189^\circ$  refere-se ao plano (220) e o pico em  $2\theta = 92,242^\circ$  é relativo ao plano (311).

Análises de difração de raios X foram obtidas com o difratômetro modelo PW1830 da Philips.

## 8. ESPECTROSCOPIA DE FOTOELÉTRONS EXCITADOS POR RAIOS X (XPS)

Na espectroscopia de fotoelétrons uma fonte de radiação eletromagnética é usada para ejetar os elétrons da amostra. A fonte de fótons usada é a de raios X, moles entre 1253,6 e 1486,6 eV para as linhas  $K\alpha$  do Mg e Al, respectivamente. A técnica XPS é uma das técnicas mais poderosas em termos quantitativos para análise de superfície. A identificação dos elementos presentes na superfície é feita diretamente pela determinação das energias de ligação dos picos dos fotoelétrons. A intensidade, ou seja, a área integrada do pico fotoelétrico é proporcional ao número de átomos no volume detectado, permitindo obter muitas informações sobre a composição da superfície, (Briggs, D., Seah, M. P. 1990). Uma das grandes vantagens da técnica XPS é a facilidade com que os resultados quantitativos podem ser obtidos. Isto é feito pela determinação das áreas sob os picos do espectro de fotoelétrons e aplicando os fatores de sensibilidade. A integração do pico de interesse é feita após a subtração do ruído de fundo dos elétrons secundários. Normalmente é escolhido o pico mais intenso de cada elemento no espectro.

Um equipamento para análise de superfícies é composto por uma câmara de ultra alto vácuo, uma fonte de raios X, um canhão de elétrons, um canhão de íons, um manipulador de amostra, um espectrômetro, um detector de elétrons e computador para controle. O canhão de íons, além de ser útil na limpeza das amostras *in situ*, é também usado no perfilamento de composição em combinação com XPS. Um dispositivo para inserção rápida de amostra é usado para introduzir a amostra da atmosfera para a câmara de análise sem quebra de vácuo.

As análises da espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS) foram obtidas empregando-se um espectrômetro da Kratos Analytical, modelo XSAM HS.

## 9. METALOGRAFIA

A metalografia microscópica estuda os materiais, com o auxílio do microscópio, visando a determinação de seus constituintes e de sua textura. Este estudo é feito em superfícies previamente polidas e atacadas com reagentes, a fim de expor a topografia da amostra, (Voort G.F.V, 1986).

A apreciação da natureza dos grãos, nódulos, veios, agulhas e glóbulos, suas respectivas porcentagens, suas dimensões, arranjo e formato e a interpretação desses dados constituem o escopo do exame metalográfico. A importância deste exame decorre do fato de as propriedades mecânicas de um material dependerem não só da sua composição química como também da sua textura, indicando a presença de fases.

A técnica dos ensaios metalográficos utilizada para analisar a seção transversal do material próximo ao filme de diamante, foi dividida nas seguintes etapas, (ASM 1985):

- a) Escolha e localização da seção transversal da amostra analisada.

- b) Obtenção de uma superfície plana e polida com lixas 400, 600 e feltro com pasta de alumina 0,25µm em solução com ácido oxálico.
- c) Exame através do microscópio óptico para a observação das ocorrências visíveis sem ataque do reagente.
- d) Ataque da superfície pelo reagente Kroll ou aço oxálico durante 120 s.
- e) Exame ao microscópio óptico para a observação da morfologia da superfície.
- f) Obtenção de fotografias que reproduzem e conservam o aspecto observado.

Os ensaios metalográficos foram realizados utilizando-se um microscópio óptico modelo Leica DMRXP.

## 10. INDENTAÇÃO ROCKWELL

Neste ensaio, a profundidade da indentação com uma carga estabelecida, é usada para medir a dureza da amostra. São usados, ou um cone de 120° de diamante com a ponta levemente arredondada, ou esferas de aço (1/16 “ou 1/8” de diâmetro) como indentadores.

A dureza Rockwell é dependente da carga e do indentador, sendo necessário especificar a combinação de carga e indentador utilizados.

O ensaio Rockwell pode ser efetuado rapidamente e é livre do erro pessoal envolvido na medida microscópica da marca da indentação.

A espessura mínima da amostra para o caso de dureza Rockwell comum é dez vezes a profundidade de impressão. Se a impressão perfurar ou mesmo se ela puder ser notada do outro lado do corpo de prova, deve-se passar para uma escala menor ou então para a dureza Rockwell superficial. As impressões de dureza devem ser espaçadas umas das outras de pelo menos três vezes o diâmetro da impressão para evitar erros de avaliação entre elas.

Uma outra aplicação para a indentação Rockwell, é poder ser utilizada para verificar a aderência entre filme e substrato. Após a indentação, verifica-se se houve delaminação do filme na região ao redor da mesma. Quanto menor a delaminação, maior é a aderência.

Para os ensaios de indentação Rockwell foi utilizada uma máquina modelo Avery tipo 6402.

## 11. DETERMINAÇÃO DA MASSA DE DIAMANTE E DA ESPESSURA DO FILME DA AMOSTRA

Um dos métodos possíveis para se determinar a velocidade de crescimento e a massa da amostra, é o método da pesagem, sobre uma balança com precisão de  $2 \times 10^{-5}$  gramas. A medida da massa da amostra é feita antes e após a deposição, supondo ser o filme, homogêneo em espessura sobre toda a superfície superior do substrato. Para determinar a espessura média do filme, conhecendo-se sua densidade assim como a do substrato, a espessura do substrato medida por um micrômetro digital, utiliza-se a seguinte fórmula:

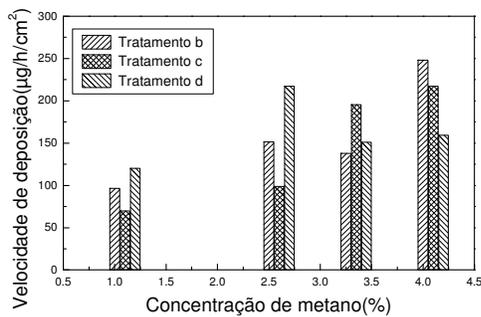
$$e_{\text{diamante}} = (m_{\text{diamante}} / \rho_{\text{diamante}}) / [(m_{\text{sub}} / \rho_{\text{sub}}) \times (1 / e_{\text{sub}})] \quad (4)$$

onde:

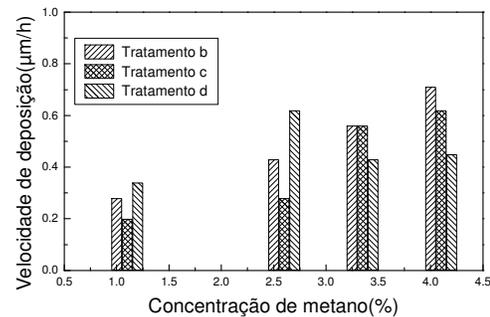
$e_{\text{diamante}}$  é a espessura do filme de diamante em µm,  
 $m_{\text{diamante}}$  é a massa do diamante em gramas,  
 $\rho_{\text{diamante}}$  é a densidade do diamante em g/cm<sup>3</sup>,  
 $m_{\text{sub}}$  é a massa do substrato em gramas,  
 $\rho_{\text{sub}}$  é a densidade do material do substrato,  
 $e_{\text{sub}}$  é a espessura do substrato em µm.

Para efeito de exemplo ilustrativo, adotaremos os valores de  $\rho_{\text{diamante}} = 3,51524\text{g/cm}^3$ , para o substrato, exemplo a liga Ti6Al4V com  $\rho_{\text{sub}} = 4,38252\text{g/cm}^3$ . A massa do diamante depositada é calculada com uma incerteza sobre a pesagem de  $4 \times 10^{-5}\text{g}$  e sobre a espessura do substrato de  $5\mu\text{m}$ . Uma incerteza sobre a densidade do diamante de  $0,05\text{g/cm}^3$  é levada em consideração devido a variação da qualidade dos filmes, que podem apresentar uma razoável proporção de fases  $\text{sp}^2$  e ter influência sobre a densidade. Uma incerteza média de 5% sobre a espessura é devido ao filme ser muito fino ( $<10\mu\text{m}$ ). A velocidade de deposição é obtida dividindo-se a espessura obtida pelo tempo de deposição. Os valores de massa em função do tempo de deposição estão expressos em  $\mu\text{g/h/cm}^2$ . Esta unidade, representando um valor médio, foi utilizada por ser independente das características dos filmes. A unidade  $\mu\text{m/h}$  depende da densidade do filme.

As Figuras 6a e 6b mostram as velocidades de deposição dos filmes de diamante, com os diversos tratamentos, para uma temperatura constante de  $600^\circ\text{C}$  e variação da concentração de metano de 1,0 a 4,0 em porcentagem dentro da mistura gasosa hidrogênio-metano, Plasma:  $15\text{W/cm}^3$  e Fluxo:  $200\text{sccm}$ , com um tempo de crescimento de 8 horas. Observa-se que para o tratamento da superfície do substrato somente com  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e ácido oxálico há a limpeza da superfície, mas não produz os “núcleos” de iniciação do crescimento do filme de diamante. Em 8h, porém há um acréscimo de massa do substrato, de acordo com o aumento da porcentagem de metano na mistura gasosa, sendo 0,06943% para 1% de  $\text{CH}_4$ , 0,08665% para 2,5% de  $\text{CH}_4$  e 0,09639% para 4% de  $\text{CH}_4$ , pela difusão de átomos de carbono e hidrogênio na liga. A Fig. 6b apresenta a velocidade de deposição em função da espessura obtida e do tempo de deposição. Verifica-se que a maior velocidade de crescimento é para uma mistura gasosa com 4% de metano, onde há a cristalinidade e a presença das facetas do diamante bem definidas, porém com morfologia não homogênea e sempre há descolamento do filme para maiores tempos de deposição. Há também o maior acréscimo na massa do substrato, alterando portanto, mais ainda as propriedades mecânicas da superfície do substrato. Uma concentração de 2,5% de metano apresenta menor alteração nas propriedades mecânicas das ligas, com uma velocidade de deposição relativamente alta e menor descolamento do filme para o tempo de deposição de 8 horas. Esta concentração foi adotada para outras temperaturas e experimentos já foram feitos com os tratamentos de superfície c e d.



**a- velocidade de deposição em  $\mu\text{g/h/cm}^2$**



**b- velocidade de deposição em  $\mu\text{m/h}$**

**Figura 6 - Velocidade de deposição do filme.**

## 12. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Assim foram apresentadas as principais técnicas de caracterização dos filmes de diamante CVD. A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para a análise morfológica da superfície e determinação do tamanho dos cristais do filme de diamante CVD. A técnica confocal foi utilizada para a análise morfológica da superfície do filme e a dispersão de energia de raios X foi utilizada

para análise dos elementos constituintes da amostra. Com a espectroscopia de espalhamento Raman determinou-se a pureza cristalina dos filmes, assim como identificou-se os diversos picos do diamante e do grafite, avaliando-se ainda o "stress" sob o filme. O exame metalográfico forneceu detalhes da natureza, dos nódulos, veios, agulhas, glóbulos, respectivas porcentagens, dimensões, arranjo e formato dos grãos do substrato metálico. A técnica XPS foi utilizada para a análise dos elementos químicos da superfície. Com a difração de raios X obteve-se os picos principais do diamante. A técnica de indentação Rockwell foi empregada para determinar a adesão do filme ao substrato. Utilizou-se uma balança de precisão para a obtenção da velocidade de crescimento e da massa da amostra pelo método da pesagem.

### 13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnaldo A. A. et al, 2000, "Realçando Imagens de Microscopia Biológica através de Técnicas de Processamento Digital de Imagens".
- ASM 1985, "Handbook: Metallography and Microstructures Materials Park". v.9, p.453.
- Bennett, L. H. Swartzendruber, L. J. ASM Handbook, V.10, 1992, "Materials Characterization", American Society for Metals.
- Briggs, D., Seah, M. P. 1990, "Practical Surface Analysis, Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy". Second edition, John Wiley & Sons, Chichester, v.1.
- Cullity, B. D. 1956, "Elements of X-Ray Diffraction", Addison-Wesley, Reading, Mass., Cap. 6.
- Goldstein, J. J. et al. 1994, "Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis", 2nd edition, Plenum Press.
- Klug, H.P., Alexander, L.E. 1954, "X-Ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials", John Wiley and Sons, Nova York, Cap. 4.
- Voort, G. F. V. 1986, "Applied Metallography". Van Nostrand R. Company, New York.

### 14. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## CVD DIAMOND FILM CHARACTERIZATION TECHNIQUES

#### **Teófilo Miguel de Souza**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

#### **Joelma Mello**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: joelmamello@imicro.com.br

#### **Jomar Esteves Bueno**

Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais da UNESP - Campus Guaratinguetá - SP  
E-mail: jomar.bueno@uol.com.br

*Abstract. The utilization of CVD diamond film characterization techniques and the correlations of its results with the macroscopic growth parameters promote a better understanding for the development of the processes and technological applications of these films. Starting from this*

*principle and throughout an iterate process, one can identify the conditions in which diamond film grows more favorably and with a better quality. The characterization techniques are most important for the surface analysis, interfaces and the core of the material. This article presents evaluations proceeded with electronic sweeping microscope (ESM), focused technique (MCLV), X-rays dispersive energy (EDX), Raman scattering spectroscopy (RSS), X-rays diffraction and excited X-rays photoelectron spectroscopy (XPS), where CVD diamond films are deposited and its substrate. There are also several descriptions of metallographic analysis as well as Rockwell indentation techniques being used.*

**Keywords:** *CVD, Diamond, Films, Characterizations*



## Software para Dimensionamento de Sistemas de Aterramento Elétrico

Teófilo Miguel de Souza, José Feliciano Adami, Inácio Bianchi

Centro de Energias Renováveis, Departamento de Engenharia Elétrica, Unesp/Guaratinguetá

Av. Ariberto Pereira da Cunha 333, 12516-410, Guaratinguetá-SP, Brasil

Este trabalho apresenta o software, denominado DDPZERO, que permite dimensionar os sistemas para aterramento de instalações elétricas. Foi desenvolvido para ser executado em qualquer micro PC/compatível.

O programa apresenta para o usuário uma introdução aos conceitos do cálculo da resistência, sistemas e malhas de aterramento. Apresenta também os tipos mais utilizados de eletrodos e os tipos de sistemas possíveis de aterramento. Há sugestões para a instalação de eletrodos e para correção ou melhoria da resistência de terra e contém valores típicos resistividade dos solos. Faz cálculos aproximados de resistência de aterramento usando hastes verticais em disposição linear, triangular, quadrado vazio, quadrado cheio, cabos horizontais enterrados em linha reta ou em forma de anel, vigas, placas metálicas, sapatas de concreto, cabos e hastes interligados.

Os resultados são apresentados, através do monitor de vídeo, com saída para arquivos em disco que podem ser impressos e anexados ao memorial descritivo. Assim, as apresentações de várias alternativas podem ser fornecidas rapidamente através do programa, para uma decisão econômica para o projeto de sistemas de aterramento elétrico.

### 1. Introdução

A palavra aterramento refere-se à terra propriamente dita. O aterramento é o fio ou a barra de cobre enterrado, onde passa a corrente elétrica para o solo. Quando se diz que algum aparelho está eletricamente aterrado significa que um de seus cabos de ligação está propositalmente ligado à terra. Ao fio que faz essa ligação denominamos "fio terra". É obrigatório que todas as tomadas tenha o fio terra. Normalmente já vêm com o fio terra instalado, seja no próprio cabo de ligação do aparelho à tomada, seja separado dele. No primeiro caso, é preciso utilizar uma tomada com três pólos onde será ligado o cabo do aparelho. Outro ponto é o valor da resistência de aterramento. Ela mede a capacidade do aterramento de descarregar a energia para a terra. Quanto menor essa resistência, melhor para a instalação, pois mais rápida será a atuação das proteções. Embora chegue-se a exigir 1 ohm, a norma de instalações elétricas (NBR 5410/97)[1] não define diretamente nenhum valor, enquanto a norma americana de instalação elétrica exige um valor máximo de 25 ohms. A norma brasileira de proteção contra descargas atmosféricas (NBR 5419/93)[2] recomenda um valor máximo de 10 ohms. Sempre que possível esse valor deve ser adotado para todas as instalações. Dentro de uma instalação elétrica existem diversos tipos de proteção contra choques elétricos, descargas atmosféricas e sobretensões. Para uma melhor compreensão e busca da solução mais conveniente, deve-se analisar separadamente cada uma delas. Porém ao executar a instalação, deve ser feito um único aterramento. As normas técnicas não permitem aterramentos isolados ou independentes, para que não apareça diferença de tensão, que é a principal causa de "queima" dos equipamentos e colocam em riscos os usuários das instalações elétricas. Um único ponto de aterramento é que irá garantir a proteção adequada.

### 2. Descrição do Software DDPZERO

O software DDPZERO permite determinar a resistência de aterramento para diversas configurações. Os tipos principais são uma simples haste cravada no solo, hastes alinhadas, hastes em triângulo, hastes em quadrado vazio e quadrado cheio, hastes em círculos, placas de material condutor enterradas no solo, cabos enterrados no solo, formando diversas configurações em cruz, em estrela, quadriculados ou formando uma malha de terra. Também está disponível o cálculo para sapatas de concreto e placas de cobre enterradas diretamente no solo. O tipo de sistema de aterramento a ser adotado depende da importância do sistema, do local e do custo. Os dados de entrada do software são a resistividade aparente média do local, o comprimento da haste ou cabo e diâmetros correspondentes, as dimensões geométricas das placas ou das sapatas de concreto. Os dados de saída são a resistência equivalente do sistema juntamente com os dados de entrada.

### 3. Exemplos de Resultados Obtidos Através do Software DDPZERO

Nos sub-itens 3.1 a 3.17 são apresentados exemplos de cada sistema de aterramento que pode ser determinado pelo software DDPZERO. Os dados de entrada geralmente solicitados são a resistividade aparente média do local da instalação, as dimensões geométricas dos elementos que serão utilizados no sistema de aterramento e o espaçamento entre os elementos de aterramento. Os resultados apresentam, além dos dados de entrada, a configuração e a resistência de aterramento para o sistema proposto. O formato da saída tem seu conteúdo como é armazenado no arquivo em ASCII cujo nome foi pedido na entrada do programa. São apresentadas apenas as partes do arquivo que mostram os dados de entrada e os resultados de cálculos para serem analisados.

### 3.1. Resistência de terra para uma haste vertical redonda, em forma de cantoneira ou quadrada

A Figura 1 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza uma haste vertical redonda, cravada no solo, com comprimento L e com diâmetro medidos em metros. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 1 apresenta os resultados para o aterramento feito com uma haste vertical.

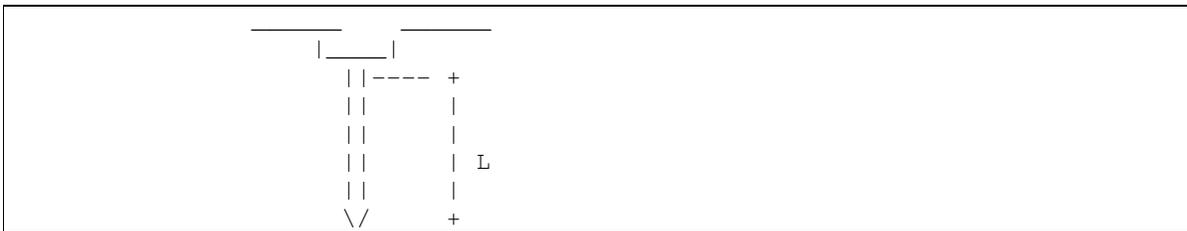


Figura 1- Sistema de aterramento com uma haste vertical

Tabela 1- Resultados para o aterramento com uma haste vertical

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
NUMERO DE HASTES	: 1
COMPRIMENTO DE CADA HASTE ENTERRADA (m)	: 3
ESPAÇAMENTO ENTRE AS HASTES (m)	: 3
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DA HASTE (ELETRODO) (m)	: .019
RESISTENCIA DA(S) HASTE(S) DE ATERRAMENTO (ohms)	: 34.20889

### 3.2. Resistência de terra para hastes verticais em linha reta

A Figura 2 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza hastes verticais redondas dispostas em linha reta, cravadas no solo, com comprimento L, diâmetro e espaçamento “a” entre elas, com as medidas em metros. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 2 apresenta os resultados para o aterramento feito com hastes verticais redondas dispostas em linha reta.

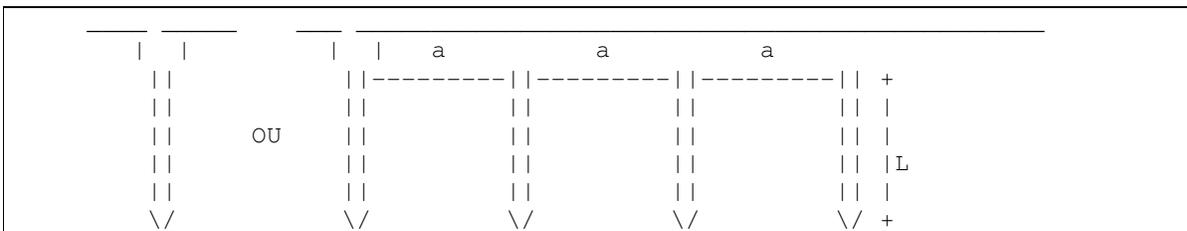


Figura 2- Sistema de aterramento com hastes verticais dispostas em linha reta

Tabela 2- Resultados para o aterramento com hastes verticais redondas dispostas em linha reta

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
NUMERO DE HASTES	: 3
COMPRIMENTO DE CADA HASTE ENTERRADA (m)	: 3
ESPAÇAMENTO ENTRE AS HASTES (m)	: 3

OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DA HASTE (ELETRODO) (m)	: .019
RESISTENCIA DA(S) HASTE(S) DE ATERRAMENTO (ohms)	: 14.2537

### 3.3. Resistência de terra de um sistema de três hastes verticais em triângulo

A Figura 3 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza hastes verticais, dispostas em triângulo, cravadas no solo, com comprimento L, diâmetro e espaçamento “a” entre elas, com as medidas em metros. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 3 apresenta os resultados para o aterramento feito com três hastes verticais dispostas em triângulo.

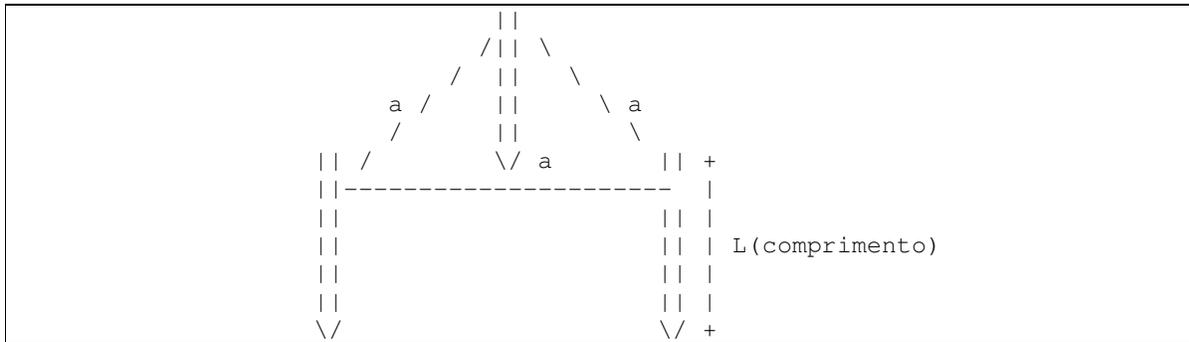


Figura 3- Sistema de aterramento com três hastes verticais dispostas em triângulo

Tabela 3- Resultados para o aterramento com três hastes verticais dispostas em triângulo

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
ESPACAMENTO ENTRE AS HASTES (m)	: 3
COMPRIMENTO DE CADA HASTE ENTERRADA (m)	: 3
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DA HASTE (ELETRODO) (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DE 3 HASTES DE ATERRAMENTO EM TRIANGULO (ohms)	: 15.11645

### 3.4. Resistência de terra para hastes verticais em forma de quadrado vazio

A Figura 4 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza hastes verticais redondas, dispostas em forma de quadrado vazio, cravadas no solo, com comprimento L, diâmetro e espaçamento “a” entre elas, com as medidas em metros. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 4 apresenta os resultados para o aterramento feito com hastes verticais dispostas em forma de quadrado vazio.

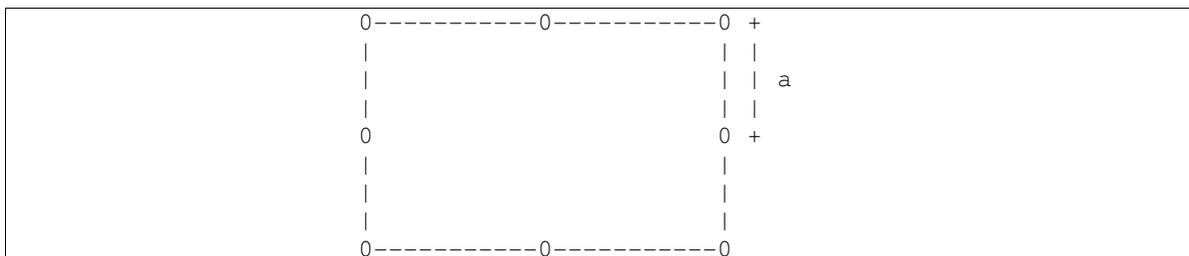


Figura 4- Sistema de aterramento com hastes verticais dispostas em forma de quadrado vazio

Tabela 4- Resultados para o aterramento com hastes verticais dispostas em forma de quadrado vazio

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
NUMERO DE HASTES	: 12
ESPAÇAMENTO ENTRE AS HASTES (m)	: 3
COMPRIMENTO DE CADA HASTE ENTERRADA (m)	: 3
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DA HASTE (ELETRODO) (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DE HASTES VERTICAIS EM QUADRADO VAZIO (ohms)	: 5.330641

### 3.5. Resistência de terra para sistema de hastes verticais em quadrado cheio

A Figura 5 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza hastes verticais redondas, dispostas em forma de quadrado cheio, cravadas no solo, com comprimento L, diâmetro e espaçamento “a” entre elas, com as medidas em metros. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 5 apresenta os resultados para o aterramento feito com hastes verticais dispostas em forma de quadrado cheio.

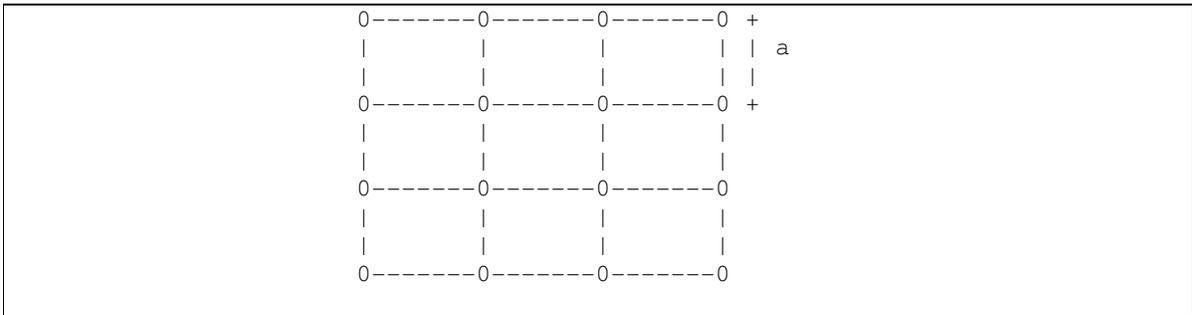


Figura 5- Sistema de aterramento com hastes verticais dispostas em forma de quadrado cheio

Tabela 5- Resultados para o aterramento com hastes verticais dispostas em forma de quadrado cheio

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
NUMERO DE HASTES	: 16
ESPAÇAMENTO ENTRE AS HASTES (m)	: 3
COMPRIMENTO DE CADA HASTE ENTERRADA (m)	: 3
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DA HASTE (ELETRODO) (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DE HASTES VERTICAIS EM QUADRADO CHEIO (ohms)	: 5.146194

### 3.6. Resistência de terra de um cabo horizontal

A Figura 6 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza um cabo horizontal, com comprimento L e diâmetro d numa profundidade “h”, com as medidas em metros, geralmente com h maior ou igual 0,6m. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 6 apresenta os resultados para o aterramento feito com um cabo horizontal.

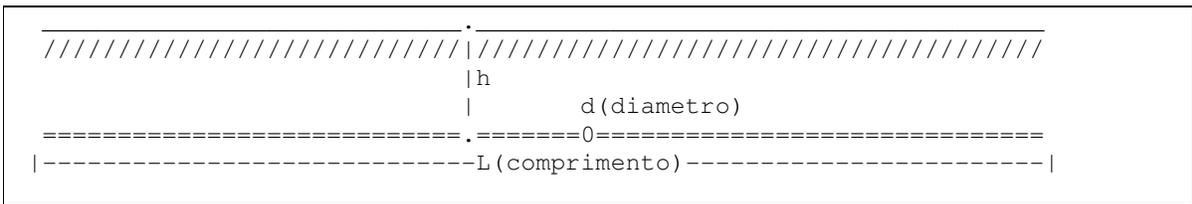


Figura 6- Sistema de aterramento com um cabo horizontal

Tabela 6- Resultados para o aterramento com um cabo horizontal

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
-------------------------------	-------

COMPRIMENTO TOTAL DO CABO (m)	: 50
PROFUNDIDADE DO CABO (m)	: 1
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DO CABO (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DE UM CABO DISPOSTO HORIZONTALMENTE (ohms)	: 3.777321

### 3.7. Resistência de terra de dois cabos horizontais enterrados em ângulo reto

A Figura 7 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza dois cabos horizontais enterrados em ângulo reto, cada um com comprimento L e diâmetro d numa profundidade “h”, com as medidas em metros, geralmente com h maior ou igual 0,6m. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 7 apresenta os resultados para o aterramento feito com dois cabos horizontais dispostos em ângulo reto.

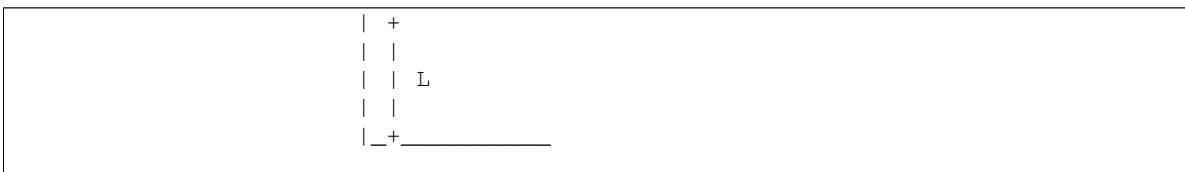


Figura 7- Sistema de aterramento com dois cabos horizontais dispostos em ângulo reto

Tabela 7- Resultados para o aterramento com dois cabos horizontais dispostos em ângulo reto

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
COMPRIMENTO DE CADA SEGMENTO RETILINEO A PARTIR DA CONEXAO (m)	: 25
COMPRIMENTO TOTAL DOS CABOS (m)	: 50
PROFUNDIDADE DOS CABOS (m)	: 1
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DO CABO (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DE 2 CABOS HORIZONTAIS EM ANGULO RETO (ohms)	: 6.49398

### 3.8. Resistência de terra de cabos horizontais em estrela com três pontas

A Figura 8 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza três cabos horizontais dispostos em estrela, cada um com comprimento L e diâmetro d numa profundidade “h”, com as medidas em metros, geralmente com h maior ou igual 0,6m. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 8 apresenta os resultados para o aterramento feito com cabos horizontais em estrela com três pontas.



Figura 8- Sistema de aterramento com cabos horizontais em estrela com três pontas

Tabela 8- Resultados para o aterramento com cabos horizontais em estrela com três pontas

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
COMPRIMENTO DE CADA SEGMENTO RETILINEO A PARTIR DA CONEXAO (m)	: 12
COMPRIMENTO TOTAL DOS CABOS (m)	: 36
PROFUNDIDADE DOS CABOS (m)	: 1
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DO CABO (m)	: .019

RESISTENCIA DE TERRA DE CABOS HORIZ EM ESTRELA DE TRES PONTAS (ohms) : 8.812091

### 3.9. Resistência de terra de cabos horizontais em estrela com quatro pontas

A Figura 9 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza cabos horizontais dispostos em estrela com quatro pontas, cada um com comprimento  $L$  e diâmetro  $d$  numa profundidade “ $h$ ”, com as medidas em metros, geralmente com  $h$  maior ou igual 0,6m. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 9 apresenta os resultados para o aterramento feito com cabos horizontais em estrela com quatro pontas.

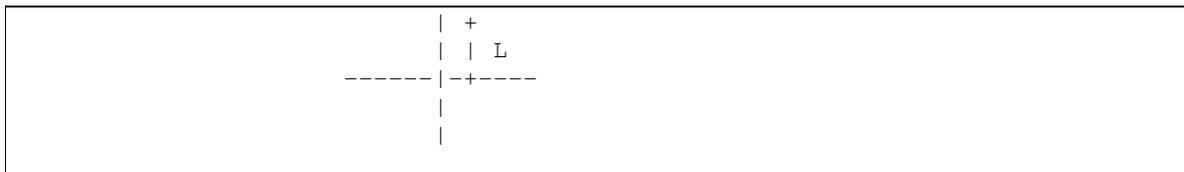


Figura 9- Sistema de aterramento com cabos horizontais em estrela com quatro pontas

Tabela 9- Resultados para o aterramento com cabos horizontais em estrela com quatro pontas

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
COMPRIMENTO DE CADA SEGMENTO RETILINEO A PARTIR DA CONEXAO (m)	: 12
COMPRIMENTO TOTAL DOS CABOS (m)	: 48
PROFUNDIDADE DOS CABOS (m)	: 1
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DO CABO (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DE CABOS HORIZ EM ESTRELA DE QUATRO PONTAS (ohms)	: 7.6646

### 3.10. Resistência de terra de cabos horizontais em estrela com seis pontas

A Figura 10 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza cabos horizontais enterrados, dispostos em forma de estrela com seis pontas, cada um com comprimento  $L$  e diâmetro  $d$  numa profundidade “ $h$ ”, com as medidas em metros, geralmente com  $h$  maior ou igual 0,6m. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 10 apresenta o resultado para o aterramento feito cabos horizontais em estrela com seis pontas.

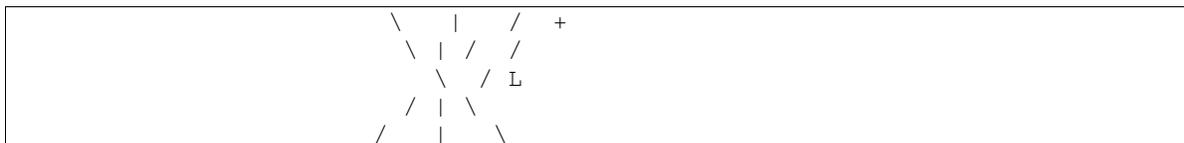


Figura 10- Sistema de aterramento com cabos horizontais em estrela com seis pontas

Tabela 10- Resultados para o aterramento com cabos horizontais em estrela com seis pontas

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
COMPRIMENTO DE CADA SEGMENTO RETILINEO A PARTIR DA CONEXAO (m)	: 8
COMPRIMENTO TOTAL DOS CABOS (m)	: 48
PROFUNDIDADE DOS CABOS (m)	: 1
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DO CABO (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DE CABOS HORIZ EM ESTRELA DE SEIS PONTAS (ohms)	: 9.163402

### 3.11. Resistência de terra de cabos horizontais em estrela com oito pontas

A Figura 11 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza cabos horizontais, dispostos em estrela com oito pontas, cada um com comprimento  $L$  e diâmetro  $d$  numa profundidade “ $h$ ”, com as medidas em metros, geralmente com  $h$  maior ou igual 0,6m. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de

calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 11 apresenta os resultados para o aterramento feito com cabos horizontais dispostos em estrela com oito pontas.

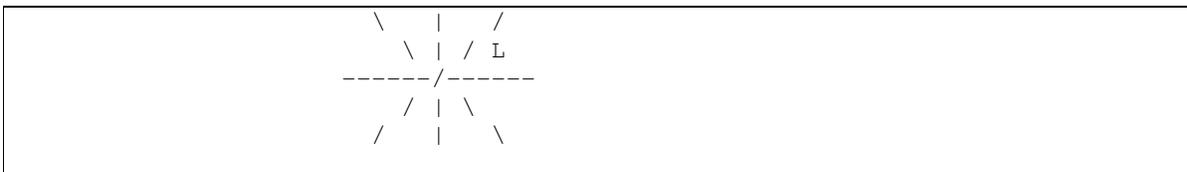


Figura 11- Sistema de aterramento com cabos horizontais dispostos em estrela com oito pontas

Tabela 11- Resultados para o aterramento com cabos horizontais dispostos em estrela com oito pontas

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
COMPRIMENTO DE CADA SEGMENTO RETILINEO A PARTIR DA CONEXAO (m)	: 6
COMPRIMENTO TOTAL DOS CABOS (m)	: 48
PROFUNDIDADE DOS CABOS (m)	: 1
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DO CABO (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DE CABOS HORIZ EM ESTRELA DE OITO PONTAS (ohms)	: 10.6576

### 3.12. Resistência de terra de cabos horizontais enrolados em anel

O sistema calculado a seguir utiliza cabos horizontais enrolados em anel com comprimento L e diâmetro d numa profundidade “h”, com as medidas em metros, geralmente com h maior ou igual 0,6m. A Tabela 12 apresenta os resultados para o aterramento feito com cabos horizontais enrolados em anel.

Tabela 12- Resultados para o aterramento com cabos horizontais enrolados em anel

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
RAIO MEDIO DO ANEL (m)	: 3
NUMERO DE VOLTAS DOS CABOS	: 3
COMPRIMENTO TOTAL DOS CABOS (m)	: 59.3761
PROFUNDIDADE DOS CABOS (m)	: 1
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DE UM CABO DO ANEL-0.0127, 0.019, 0.0254 (m)	: .019
SOMA DOS DIAMETROS DAS SECOES TRANSVERSAIS DOS CABOS DO ANEL (m)	: .057
RESISTENCIA DE TERRA DE CABOS HORIZ ENROLADOS EM ANEL (ohms)	: 21.77805

### 3.13. Resistência de terra de malha para sistema de cabos horizontais enterrados

A Figura 12 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza uma malha com cabos horizontais enterrados. A malha tem comprimento e largura numa profundidade “h”, com as medidas em metros, geralmente com h maior ou igual 0,6m. A Tabela 13 apresenta os resultados para o aterramento feito com cabos horizontais em forma de malha.

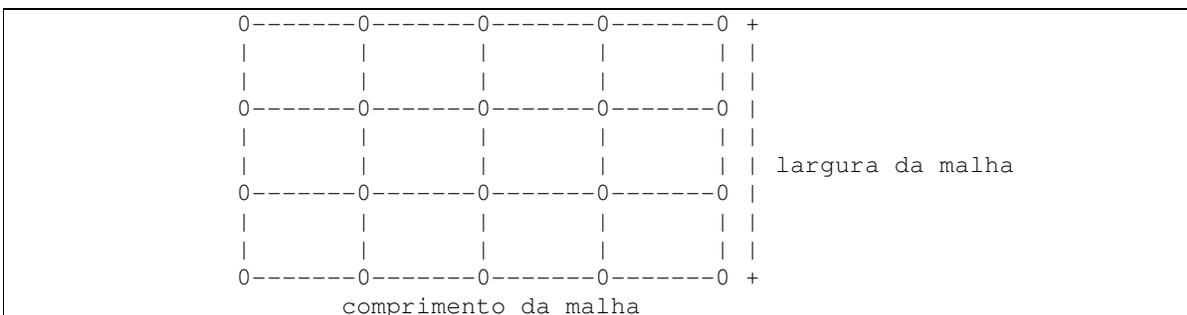


Figura 12- Sistema de aterramento com cabos horizontais em forma de malha

Tabela 13- Resultados para o aterramento com cabos horizontais em forma de malha

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
COMPRIMENTO DA MALHA (m)	: 15
LARGURA DA MALHA (m)	: 10
COMPRIMENTO TOTAL DOS CABOS DA MALHA (m)	: 75
PROFUNDIDADE DA MALHA (m)	: 1
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DO CABO (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DA MALHA DISPOSTA NA HORIZONTAL (ohms)	: 4.529025

### 3.14. Resistência total de aterramento de cabos e hastes interligados

A Figura 13 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza cabos e hastes interligadas. A malha tem comprimento e largura numa profundidade “h”, com as medidas em metros, geralmente com h maior ou igual 0,6m. Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 14 apresenta os resultados para o aterramento feito com cabos e hastes interligadas.

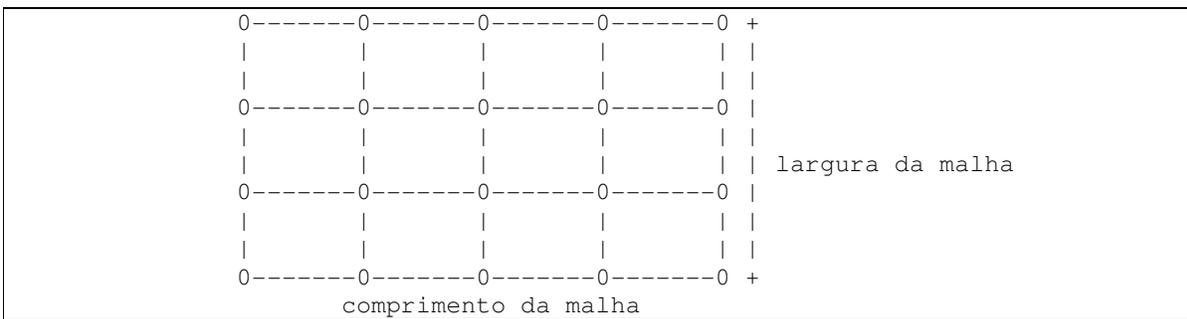


Figura 13- Sistema de aterramento com cabos e hastes interligadas

Tabela 14- Resultados para o aterramento com cabos e hastes interligadas

RESISTENCIA MUTUA ENTRE CABOS E HASTES (ohm)	: 2.297323
RESISTENCIA DE TERRA TOTAL DE CABOS E HASTES INTERLIGADOS (ohm)	: 3.519679
RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
COMPRIMENTO DA MALHA (m)	: 15
LARGURA DA MALHA (m)	: 10
COMPRIMENTO TOTAL DOS CABOS DA MALHA (m)	: 75
COMPRIMENTO TOTAL DAS HASTES (m)	: 36
RESISTENCIA TOTAL PARA AS HASTES (ohms) CALCULADA ANTERIORMENTE	: 5
PROFUNDIDADE DA MALHA (m)	: 1
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DO CABO (m)	: .019
RESISTENCIA DE TERRA DA MALHA DISPOSTA HORIZONTALMENTE (ohms)	: 4.529025

### 3.15. Resistência de terra para sapata de concreto

A Figura 14 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza sapata de concreto. A Tabela 15 apresenta os resultados para o aterramento feito com sapata de concreto.



Figura 14- Sistema de aterramento para sapata de concreto

Tabela 15- Resultados para o aterramento com sapata de concreto

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
VOLUME DO CONCRETO MOLHADO DA SAPATA NO SOLO EM m <sup>3</sup>	: 3
RESISTENCIA DE TERRA PARA SAPATA DE CONCRETO (ohms)	: 14.05044

### 3.16. Resistência de terra de placas metálicas

A Figura 15 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza uma placa metálica. A placa tem comprimento e largura numa profundidade “h”, com as medidas em metros, geralmente com h maior ou igual 0,6m.

Também podem ser utilizadas hastes quadradas ou em cantoneiras, sendo que se tem de calcular os equivalentes de geometria redonda, para serem fornecidos aos dados de entrada. A Tabela 16 apresenta os resultados para o aterramento feito com placas metálicas.

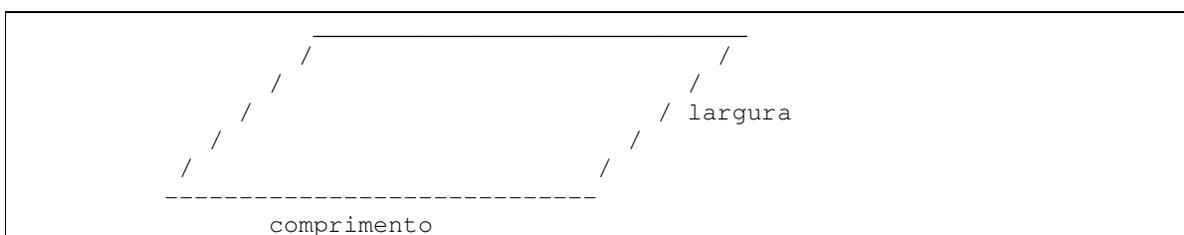


Figura 15- Sistema de aterramento com placas metálicas

Tabela 16- Resultados para o aterramento com placas metálicas.

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
COMPRIMENTO DA PLACA	: 3
LARGURA DA PLACA	: 2
RESISTENCIA DE TERRA DA PLACA METALICA(ohms)	: 8

### 3.17. Resistência de terra de vigas metálicas

A Figura 16 apresenta o desenho esquemático de um sistema que utiliza vigas metálicas. A viga está numa profundidade “h”, com as medidas em metros, geralmente com h maior ou igual 0,6m. A Tabela 17 apresenta os resultados para o aterramento feito com vigas metálicas.



Figura 16- Sistema de aterramento com vigas metálicas

Tabela 17- Resultados para o aterramento com vigas metálicas

RESISTIVIDADE DO SOLO (ohm.m)	: 100
COMPRIMENTO DA VIGA (m)	: 10
DIAMETRO DO CIRCULO CIRCUNSCRITO A VIGA (m)	: .5
RESISTENCIA DE TERRA DE VIGAS METALICAS (ohms)	: 65.08116

#### **4. Comentários e Conclusões**

O material a ser empregado nos sistemas de aterramento deve ter as características de um bom condutor de eletricidade, ser inerte as ações dos ácidos e sais dissolvidos no solo, ter resistência mecânica compatível com a cravação e movimentação do solo.

No caso de utilização de hastes pode-se diminuir o valor da resistência de aterramento aumentando o diâmetro da haste de aterramento, o número de hastes de aterramento, o comprimento da haste e reduzindo a resistividade aparente do solo utilizando tratamento químico.

A resistência total de aterramento de um local é composta da resistência da conexão do cabo de ligação com o equipamento, da impedância do cabo de ligação, da resistência da conexão do cabo de ligação com o sistema de aterramento empregado, da resistência do material que forma o sistema de aterramento, da resistência de contato do material com a terra e da resistência do sistema de aterramento com a terra. A resistência de terra do sistema de aterramento é a mais importante. O seu valor sempre é o maior e depende do solo, das condições locais e climáticas. As outras parcelas são menores e podem ser controladas mais facilmente. Um aumento do diâmetro da haste não é vantajoso. O diâmetro adotado para as hastes é o compatível com a resistência mecânica de cravamento no solo. O aumento do comprimento é o mais apropriado, pois as camadas mais profundas têm resistividades menores e mais estáveis ao longo do tempo. A interligação das hastes em paralelo diminui consideravelmente a resistência de aterramento.

Verifica-se, portanto, que o software é de fácil uso e exige recursos computacionais mínimos facilmente encontrados atualmente. Destina-se a todos aqueles que utilizam ou não a energia elétrica, comunidades urbanas ou rurais, cooperativas, condomínios, órgãos governamentais, ONGs. Pode também ser utilizado em cursos de treinamento, escolas profissionalizantes, escolas técnicas, escolas de engenharia e arquitetura, em empresas prestadoras de serviços de fornecimento e manutenção elétricos, vendedores, compradores, projetistas e instaladores, de sistemas de aterramento elétrico.

#### **5. Bibliografia**

- 1-NBR 5410
- 2-NBR 5419



## Software para Avaliação de Riscos Contra Descargas Atmosféricas e Dimensionamento de Sistemas de Proteção de Estruturas por Pára-Raios

**Teófilo Miguel de Souza (teofilo@feg.unesp.br), Inácio Bianchi (ibianchi@feg.unesp.br)**  
**Centro de Energias Renováveis, Departamento de Engenharia Elétrica, Unesp/Guaratinguetá**  
**Av. Ariberto Pereira da Cunha 333, 12516-410, Guaratinguetá-SP, Brasil**

Este trabalho apresenta um software, denominado SEMRAIOS, que fornece os dados para o dimensionamento do sistema de proteção contra descargas elétricas atmosféricas. Foi desenvolvido para ser executado em qualquer micro PC/compatível.

O programa considera em sua execução: Níveis, modelos e critérios de proteção, uso de pára-raios com captadores Franklin e Faraday, método da esfera fictícia, seções mínimas de condutores e eletrodos, área de exposição equivalente, número de descidas, densidade de descargas para a terra, avaliação geral de risco, frequência anual de descargas, para cálculos da proteção.

Os resultados são apresentados através do monitor de vídeo, com saída para arquivos em disco, podem ser impressos e anexados ao memorial descritivo. Assim, através do programa, pode ser feita uma rápida análise para cálculo do custo de implantação de um sistema de proteção contra descargas elétricas atmosféricas.

O software é de fácil uso e exige recursos computacionais mínimos facilmente encontrados atualmente. Destina-se a todos aqueles que utilizam ou não a energia elétrica, comunidades urbanas ou rurais, cooperativas, condomínios, órgãos governamentais, ONGs. Pode também ser utilizado em cursos de treinamento, escolas profissionalizantes, escolas técnicas, escolas de engenharia e arquitetura, em empresas prestadoras de serviços de fornecimento e manutenção elétricos, vendedores, compradores, projetistas e instaladores, de sistemas de proteção contra descargas elétricas atmosféricas.

### 1.Introdução

A seguir é apresentada a informação mais importante sobre as descargas elétricas e as principais mudanças inseridas na Norma Brasileira NBR-5419/2001.

O Brasil recebe anualmente cerca de 100 milhões de raios, com um maior número de incidências entre os meses de novembro e maio. Este fato dá uma média de 3 raios por segundo. Os raios podem danificar equipamentos direta ou indiretamente, através da rede elétrica. Ainda todos os dispositivos de proteção só funcionam se estiverem devidamente aterrados.

As principais mudanças na Norma NBR-5419 / 2001, que está disponível na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) são:

a-As edificações com altura superior a 10 metros , deverão possuir no subsistema de captação , um condutor periférico em forma de anel , contornando toda a cobertura e afastado no máximo a 0,5m da borda.

b-Condutores em Alumínio, mesmo com capa isolante, continuam sendo proibidos dentro de calhas de água pluvial. O cobre passa a ser permitido nestas condições.

c-Em paredes de material inflamável, o afastamento dos condutores passa a ser de no mínimo 10 cm. Nos demais tipos de parede, os condutores podem ser fixados diretamente sobre as mesmas , ou embutidos dentro do reboco.

d-A norma agora expõe com mais detalhes, a utilização de ferragens estruturais como parte do Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA), com destaque para os sistemas que utilizam barra adicional dedicada , como forma de garantir a continuidade elétrica e a equalização de potenciais ( Anexo D ).

e-Passa a ser permitida a utilização das ferragens de estruturas de concreto protendido como parte integrante do SPDA. Os cabos de aço da estrutura protendida NÃO poderão ser utilizados como parte do SPDA.

f-A tabela 4 determina agora as espessuras mínimas para que estruturas metálicas ( por exemplo, tanques ) possam ser utilizadas no SPDA. São definidas espessuras para não haver pontos quentes (para tanques de inflamáveis e explosivos ) , e pontos de perfuração (para tanques de ácidos, por exemplo ).

g-Todas as peças e acessórios de origem ferrosa, usados no SPDA, deverão ser galvanizadas a fogo ou banhadas com 254 micrometros de cobre. Fica assim proibida a zincagem eletrolítica.

h-A ligação que era feita entre os anéis horizontais de cintamento e as caixas de equalização secundárias não deverá mais ser executada. Deverá ser instalada uma prumada vertical para interligar as caixas de equalização secundárias à caixa de equalização principal (LEP).

i-O valor da resistência de aterramento de 10 ohms continua sendo recomendado , porém , em locais onde o solo apresente alta resistividade , poderão ser aceitos valores maiores, desde que sejam feitos arranjos que minimizem os potenciais de passo , e que os procedimentos sejam tecnicamente justificados.

j-O parágrafo sobre o congelamento do solo foi retirado.

l-Nos SPDA estruturais que não utilizarem a barra adicional dedicada, deverão ser feitas medições de continuidade elétrica entre diversos pontos da estrutura, pois na maioria dos casos a execução não é acompanhada pelo responsável técnico do SPDA.

m-Em caso de não necessidade de SPDA, deverá ser emitido um atestado através do anexo B da norma.

n-Para áreas classificadas o volume a ser protegido deverá ser considerado acima da área de evaporação dos gases ( plano fictício ).

o-Foi incluído um novo mapa de curvas isocerânicas da região sudeste com dados mais recentes

p-A norma traz no Anexo E as exigências para a medição de continuidade elétrica de ferragens.

q-Todas as tabela passaram a ser inseridas dentro do texto da norma.

r-O módulo (mesh ) da gaiola de faraday foi aumentado para os níveis II , III e IV, de forma que o comprimento passa a ser o dobro da largura.

s-O texto na nova norma deixa explícito que, caso o cálculo do número de descidas dê como resultado um número menor que 2, deverão ser instaladas mesmo assim, pelo menos 2 descidas para qualquer tipo de edificação. Postes metálicos não necessitam de descidas , podendo ter a sua estrutura aproveitada como descida natural.

t-Nos casos onde for impossível a execução do anel de aterramento inferior dentro de valetas , deverá ser feito um anel de equalização a até 4 metros acima do nível do solo.

u-Caso sejam utilizados cabos como condutores de descida, estes não poderão ter emendas (exceto a emenda no ponto de medição), nem mesmo com solda exotérmica . Para condutores de perfis metálicos , as emendas continuam permitidas.

v-Foi retirada a exigência de se banhar com chumbo, as peças e acessórios usadas no topo de chaminés.

x-A norma reforça a exigência de se documentar toda a instalação, através de projetos e relatórios técnicos, e de se fazer as vistorias periodicamente.

z-As descidas do SPDA deverão distar das tubulações de gás no mínimo 2 metros . Caso esse distanciamento não seja possível as tubulações deverão ser equalizadas a cada 20 metros de altura, diretamente no SPDA ou indiretamente através de DPS (Dispositivo de Proteção de Surtos) dependendo do caso.

O algoritmo de cálculo inserido no software foi desenvolvido de acordo com as fórmulas explícitas do anexo B da norma, onde são levadas em consideração principalmente as características das edificações, o seu uso, a vizinhança, a atividade cerâmica da região. A resposta final deste software depende diretamente dos dados de entrada e um dado incorreto poderá conduzir a resultados incompatíveis com a realidade. Este software deve ser utilizado quando o usuário tiver certeza dos dados de entrada. Os autores não se responsabilizam pelo mau uso do mesmo.

Quanto às expectativas sobre os SPDA observa-se o seguinte:

1) A descarga elétrica atmosférica (raio) é um fenômeno da natureza absolutamente imprevisível e aleatório, tanto em relação às suas características elétricas (intensidade de corrente, tempo de duração, etc.), como em relação aos efeitos destruidores decorrentes de sua incidência sobre as edificações.

2) Nada em termos práticos pode ser feito para se impedir o recebimento de uma descarga em determinada região. Não existe "atração" a longas distâncias, sendo os sistemas prioritariamente receptores. Assim sendo, as soluções internacionalmente aplicadas buscam tão somente minimizar os efeitos destruidores a partir da colocação de pontos preferenciais de captação e condução segura da descarga para a terra.

3) A implantação e manutenção de SPDA é normalizada internacionalmente pela IEC ( International Eletrotecnical Commission ) e em cada país por entidades próprias como a ABNT (Brasil), NFPA (Estados Unidos) e BSI (Inglaterra).

4) Somente os projetos elaborados com base em disposições destas normas podem assegurar uma instalação dita eficiente e confiável. Entretanto, esta eficiência nunca atingirá os 100 % , estando, mesmo estas instalações, sujeitas a falhas de proteção. As mais comuns são a destruição de pequenos trechos do revestimento das fachadas ou de quinas da edificação.

5) Não é função do SPDA proteger equipamentos eletro-eletrônicos (comando de elevadores, interfones, portões eletrônicos, centrais telefônicas, subestações), pois mesmo uma descarga captada e conduzida para a terra com segurança, produz forte interferência eletromagnética, capaz de danificar estes equipamentos . Para a proteção, deverá ser contratado um projeto adicional, específico para instalação de supressores de surto individuais (protetores de linha).

6) É de fundamental importância que após a instalação haja uma manutenção periódica anual a fim de se garantir a confiabilidade do sistema. São também recomendadas vistorias preventivas após reformas que possam alterar o sistema e também toda vez que a edificação for atingida por descarga direta.

## **2- Dados Necessários Para os Cálculos**

Os dados necessários para os cálculos são as dimensões da edificação, ou seja, comprimento, largura e altura, em metros. São dados importantes também o número de dias de trovoadas por ano. Ele varia em função da cidade onde está localizada a edificação. As cidades brasileiras têm em média 60 (sessenta) dias de trovoadas por ano.

A seguir são apresentados os fatores de ponderação

**Fator A:** Tipo de Ocupação da Estrutura

**Fator B:** Tipo de Construção da estrutura

**Fator C:** Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos das descargas atmosféricas

**Fator D:** Localização da estrutura

**Fator E:** Topografia da região

## **3.Resultados obtidos com o software SEMRAIOS**

### **3.1. Avaliação Geral de Risco Para Proteção Contra Descargas Atmosféricas**

Para a avaliação de riscos contra descargas atmosféricas é necessário fornecer os seguintes dados

**a) Parâmetros da Edificação:** Comprimento, largura e altura em metros.

**b) Número de dias de trovoadas por ano: o número de dias** varia em função da cidade onde está localizada a edificação. As cidades brasileiras têm em média 60 dias.

#### **c) Fatores de Ponderação**

##### **c.1.Fator A: Tipo de Ocupação da estrutura**

Casas e outras estruturas de porte equivalente

Casas e outras estruturas de porte equivalente com antena externa

Fábricas oficinas e laboratórios

Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos, e outros edifícios residenciais não incluídos abaixo

Locais de afluência de público (p. ex.: igrejas, pavilhões, teatros, museus, exposições, lojas de departamento, correios, estações e aeroportos, estádios de esportes)

Escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades

##### **c.2.Fator B: Tipo de Construção da estrutura**

Estruturas de aço revestida, com cobertura não-metálica

Estrutura de concreto armado, com cobertura não-metálica

Estrutura de aço revestida, ou de concreto simples, com qualquer cobertura exceto metálica ou de palha

Estrutura de alvenaria ou concreto simples, com qualquer cobertura exceto metálica ou de palha

Estrutura de madeira, ou revestida de madeira, com qualquer cobertura exceto metálica ou de palha

Estrutura de madeira, alvenaria ou concreto simples, com cobertura metálica

Qualquer estrutura com teto de palha

##### **c.3.Fator C: Conteúdo da estrutura e efeitos indiretos das descargas atmosféricas**

Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não contenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos

Estruturas industriais e agrícolas contendo objetos particularmente suscetíveis a danos

Subestações de energia elétrica, usinas de gás, centrais telefônicas, estações de rádio

Indústrias estratégicas, monumentos antigos e prédios históricos, museus, galerias de arte e outras estruturas com objetos de valor especial

Escolas, hospitais, creches e outras instituições, locais de afluência de público.

#### c.4. Fator D: Localização da estrutura

Estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores da mesma altura ou mais altas (p. ex.: em grandes cidades ou em florestas)

Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar

Estrutura completamente isolada, ou que ultrapassa, no mínimo, duas vezes a altura de estruturas ou árvores próximas

#### c.5. Fator E: Topografia da região

Planície

Elevação moderadas, colinas

Montanhas entre 300 m e 900 m

Montanhas acima de 900 m

### 3.2- Avaliação Geral de Risco Para Proteção Contra Descargas Atmosféricas

AVALIACAO GERAL DE RISCO PARA PROTECAO CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS	
Comprimento da estrutura ou parte dela	C1: 80 m
Largura da estrutura ou parte dela	L1: 36 m
Altura da estrutura ou parte dela	H1: 12 m
AREA DE EXPOSICAO DA ESTRUTURA	: 6116.389 m <sup>2</sup>
Fator A de acordo com o tipo de ocupacao	: 1.7
Fator B de acordo com o tipo de construcao	: 1
Fator C de acordo com o conteudo da estrutura	: 1.7
Fator D de acordo com o tipo de localizacao	: .4
Fator E de acordo com o tipo de topografia	: 1
NUMERO TOTAL DE TROVOADAS POR ANO	: 58
DENSIDADE DE DESCARGAS ATMOSFERICAS PARA A TERRA: 6.402432 descargas/km <sup>2</sup> /ano	
NUMERO PROVAVEL DE RAIOS NA ESTRUTURA	: 3.915976E-02
NUMERO DA AVALIACAO GERAL DE RISCO	: 4.526869E-02
***A ESTRUTURA PRECISA(NECESSITA) DE PROTECAO CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS	

### 3.3- Avaliação Geral de Risco Para Proteção Contra Descargas Atmosféricas

AVALIACAO GERAL DE RISCO PARA PROTECAO CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS	
Comprimento da estrutura ou parte dela	C1: 10 m
Largura da estrutura ou parte dela	L1: 8 m
Altura da estrutura ou parte dela	H1: 4.5 m
AREA DE EXPOSICAO DA ESTRUTURA	: 305.6172 m <sup>2</sup>
Fator A de acordo com o tipo de ocupacao	: .3
Fator B de acordo com o tipo de construcao	: .4
Fator C de acordo com o conteudo da estrutura	: .3
Fator D de acordo com o tipo de localizacao	: .4
Fator E de acordo com o tipo de topografia	: .3
NUMERO TOTAL DE TROVOADAS POR ANO	: 20
DENSIDADE DE DESCARGAS ATMOSFERICAS PARA A TERRA: 1.691794	
descargas/km <sup>2</sup> /ano	
NUMERO PROVAVEL DE RAIOS NA ESTRUTURA	: 5.170414E-04
NUMERO DA AVALIACAO GERAL DE RISCO	: 2.233619E-06
A ESTRUTURA DISPENSA PROTECAO CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS	

### 3.4- Avaliação Geral de Risco Para Proteção Contra Descargas Atmosféricas

AVALIACAO GERAL DE RISCO PARA PROTECAO CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS	
Comprimento da estrutura ou parte dela	C1: 20 m
Largura da estrutura ou parte dela	L1: 12 m
Altura da estrutura ou parte dela	H1: 4 m
AREA DE EXPOSICAO DA ESTRUTURA	: 546.2655 m <sup>2</sup>
Fator A de acordo com o tipo de ocupacao	: .7
Fator B de acordo com o tipo de construcao	: 1
Fator C de acordo com o conteudo da estrutura	: 1.7
Fator D de acordo com o tipo de localizacao	: .4



ESPACAMENTO ENTRE AS HASTES (m)	: 4
OBSERVACAO: 1 (UMA) POLEGADA=0.0254 m	
DIAMETRO EQUIVALENTE DA HASTE (ELETRODO) (m)	: .019
RESISTENCIA DA(S) HASTE(S) DE ATERRAMENTO (ohms)	: 17.20056

#### 4. Comentários e Conclusões

O material a ser empregado nos sistemas de aterramento dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas deve ter as características de um bom condutor de eletricidade, ser inerte às ações dos ácidos e sais dissolvidos no solo, ter resistência mecânica compatível com a cravação e movimentação do solo. A resistência de terra do sistema de aterramento é a mais importante. O seu valor sempre é o maior e depende do solo, das condições locais e climáticas.

Verifica-se, portanto, que o software é de fácil uso e exige recursos computacionais mínimos facilmente encontrados atualmente. Destina-se a todos aqueles que utilizam ou não a energia elétrica, comunidades urbanas ou rurais, cooperativas, condomínios, órgãos governamentais, ONGs. Pode também ser utilizado em cursos de treinamento, escolas profissionalizantes, escolas técnicas, escolas de engenharia e arquitetura, em empresas prestadoras de serviços de fornecimento e manutenção elétricos, vendedores, compradores, projetistas e instaladores, de sistemas de pára-raios.

#### 5. Bibliografia

- 1-NBR 5410
- 2-NBR 5419



Revista SODEBRAS –Volume 1 – N° 1 - Janeiro / 2006

## **Análise do rendimento de lâmpadas fluorescentes em sistemas alternativos que utilizam inversor de onda senoidal modificada para geração de tensão AC**

Esdras Evangelista Silva, Teófilo Miguel de Souza  
Centro de Energias Renováveis -Unesp - Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - B. Pedregulho - 12516-410 Guaratinguetá-SP  
E-mail: ele03046@feg.unesp.br

### **Resumo**

A geração de energia elétrica em sistemas alternativos esta se tornando cada vez mais utilizada, sendo que produção de energia eólica e solar vem crescendo no mundo nos últimos anos. Na maioria destes sistemas, a energia gerada é armazenada em um conjunto de baterias, passará por inversores (12 V (DC) para 110 V (AC)) e estabilizadores de tensão até chegar aos aparelhos consumidores. A ênfase deste projeto é a avaliação do funcionamento de lâmpadas fluorescentes em sistemas alternativos para geração de energia elétrica com inversores com sinal de saída em forma de onda senoidal modificada. Estes são os mais utilizados devido ao custo menor, quando comparado aos que fornecem uma tensão senoidal na saída, por isso é importante a realização de estudos sobre a sua eficiência para que eles possam ser cada vez mais usados, barateando o custo dos sistemas alternativos.

### **Abstract**

The electrical energy production in alternative systems is becoming more used, once that wind and solar energy production are increasing in the world in last years. Most systems, energy produced is stored in a set of batteries, this energy will pass inversors (12 VDC to 110 VAC) and voltage stabilize device until achieve the customer devices. This project emphasize the analysis of

working fluorescent lamp in alternative systems to produce electrical energy by inversors with modified sinusoidal waveform output signal. Those are the most used because is cheaper than one that posses output sinusoidal signal. Therefore is an important study about your efficiency. For that they can more used, cheeping the cost of alternative systems.

### **Fontes alternativas de energia <sup>[2]</sup>**

Na sociedade moderna, o uso da energia elétrica tornou-se indispensável para melhorar a qualidade de vida do homem. A maior para da produção dessa energia no mundo, é realizada através das usinas hidrelétricas, termelétricas e nucleares. Porém, estes tradicionais formas de obtenção de energia possuem certos problemas:

- Grande impacto ambiental;
- Impossibilidade de levar energia a locais muito isolados devido ao grande custo de transmissão.

Devido a estes problemas e outros mais, estão sendo desenvolvidas as fontes alternativas de energia, dentre as quais destacam-se: fotovoltaica, eólica e as pequenas centrais hidrelétricas.

### **Lâmpadas fluorescentes compactas <sup>[3][4][5]</sup>**

As lâmpadas fluorescentes compactas foram desenvolvidas originalmente objetivando a substituição de lâmpadas incandescentes. Possuem princípio de funcionamento similar ao das fluorescentes tubulares, mas suas dimensões são bastante reduzidas. Elas emitem luz pela passagem da corrente elétrica através de um gás. Essa descarga emite quase que totalmente radiação ultravioleta (invisível ao olho humano) que, por sua vez, será convertida em luz pelo pó fluorescente que reveste a superfície interna do bulbo. Para o funcionamento de tais lâmpadas é indispensável o uso de dois equipamentos auxiliares:

**Starter:** Dispositivo utilizado a partida que emprega o princípio do bimetal.

**Reator:** é uma bobina com núcleo de ferro ligado em série e possui dupla função. Produzir sobretensão e limitar a corrente. As lâmpadas fluorescentes compactas (PL), mostradas na Figura 1 e mais detalhadamente na Figura 2, apresentam algumas vantagens.



Figura 1: Lâmpadas fluorescentes compactas

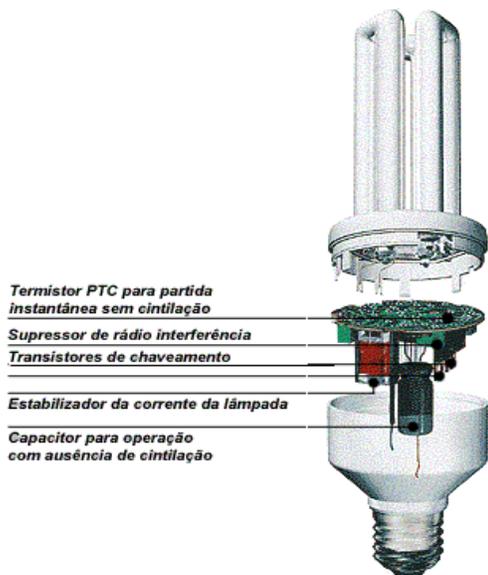


Figura 2: Partes de uma Lâmpada PL.

- Starter incorporado à base, o que permite substituir lâmpadas incandescentes sem qualquer tipo de acessório;
- Vida útil de 8000h (10x a das incandescentes);
- Algumas chegam a ser 80% mais econômica que as incandescentes. Uma experiência feita em 400 casas, no município paulista de Cosmópolis, em 1991, mostrou que a substituição das lâmpadas consumia três vezes menos energia. <sup>[6]</sup>
- Design moderno e compacto.
- Aquecem menos o ambiente, representando uma forte redução na carga térmica das grandes instalações, proporcionando conforto e sobrecarregando menos os sistemas de ar-condicionado.
- Excelente reprodução de cores, com índice de 85%, o que garante seu uso em locais onde a fidelidade e a valorização dos espaços e produtos é fundamental.
- Tonalidade de cor adequada para cada ambiente, obtida graças à tecnologia do pó trifósforo, com opções de:

2.700 K, com aparência de cor semelhante às incandescentes e, portanto, indicada para ambientes onde se deseja atmosfera aconchegante e tranqüila, como residências, hotéis, restaurantes refinados etc.

4.000 K, com aparência de cor mais branca, indicada para ambientes ativos onde se pretende estimular a produtividade ou o consumo, como em restaurantes do tipo fast-food, lojas, shopping centers, escritórios, clubes, academias de ginástica, escolas, hospitais etc.

A Tabela 1 mostra a equivalência entre lâmpadas PL e incandescentes.

PL	9W	11W	13W	20W	25W
Incand 127V	25W	40W	60W	75W	100W
Incand 220V	40W	60W	75W	100W	125W

Tabela 1: Tabela de equivalências.

Obs: O fator de potência é em torno de 0,50 e não existe nenhum meio economicamente viável de corrigi-lo. Sendo assim, esta linha de lâmpadas não é recomendada para grandes instalações comerciais ou industriais, onde se utiliza uma grande quantidade de pontos de luz.

## Inversores de onda

Alguns sistemas alternativos não fornecem energia elétrica continuamente, sendo necessária o armazenamento de parte da energia produzida em baterias para ser usada quando não há produção. Esse é o caso dos sistemas fotovoltaicos, em que a energia precisa ser armazenada para ser usada durante a noite e nos dias nublados, e do sistema eólico em que deve haver armazenamento para os dias em que não há vento.

Os inversores são equipamentos importantes em sistemas de energia alternativa, pois converte a tensão DC fornecida pelo banco de baterias em tensão AC, necessária para o funcionamento da maioria das cargas.

O inversor apresenta três formas básicas de sinal de saída: [2]

Inversor de onda quadrada: possui menor custo que os outros, porém a relação custo - benefício não é muito boa.

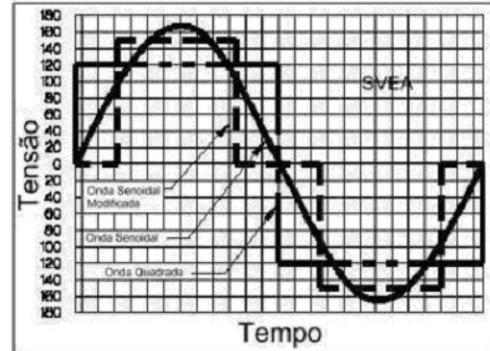
Inversor de onda senoidal modificada (ou onda quadrada modificada): possui boa relação custo benefício e é capaz até de dar partida em motores (Figura 3).



Figura 3: Inversor de onda senoidal modificada

Inversor de onda senoidal: pode alimentar qualquer tipo de carga, porém possui um custo muito maior que os demais.

A Figura 4 compara as formas de



onda de saída dos inversores.

Figura 4: Comparação entre as formas de onda dos inversores.

O objeto de estudo desta pesquisa é o inversor de onda senoidal modificada, principalmente devido a sua relação custo-benefício.

## Análises efetuadas

Foram tomadas lâmpadas de fluorescentes compactas com os seguintes valores de potência: 5W, 7W, 9W e 11W. Foram usadas três lâmpadas de cada valor de potência e realizadas medidas utilizando osciloscópio digital (Figuras 5 e 6).



Figura 5: Osciloscópio digital.

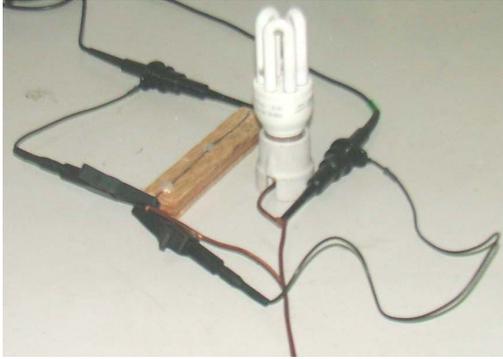


Figura 6: Realização de medidas.

As Figuras 7 e 8 mostram as forma de onda das tensões fornecidas pela rede e pelo inversor.

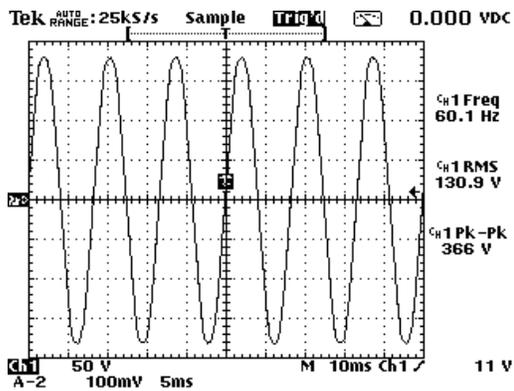


Figura 7: tensão fornecida pela rede.

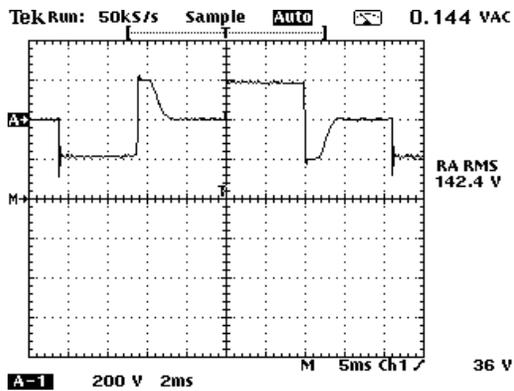
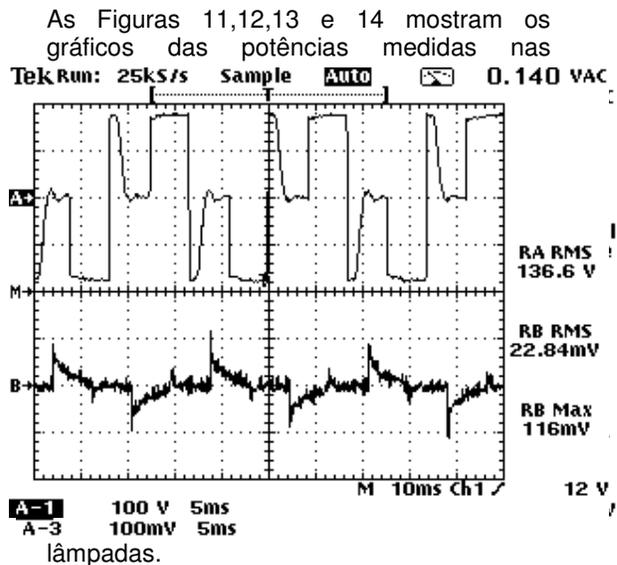


Figura 8: Tensão fornecida pelo inversor

As Figuras 9 e 10 mostram os sinais medidos em uma das lâmpadas de 5W. O sinal de cima é a tensão na lâmpada e o de baixo é a tensão em um resistor de  $0,5\Omega$  colocado em série com a lâmpada, representando a sua corrente.

Figura 9: Sinal medido na lâmpada de 5W ligada à rede.

Figura 10: Sinal medido na lâmpada de 5 W ligada ao inversor.



lâmpadas.

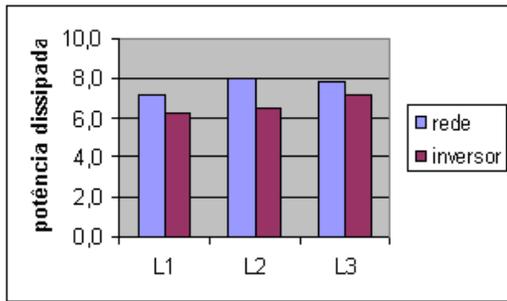


Figura 11: Potências dissipadas nas lâmpadas de 5W.

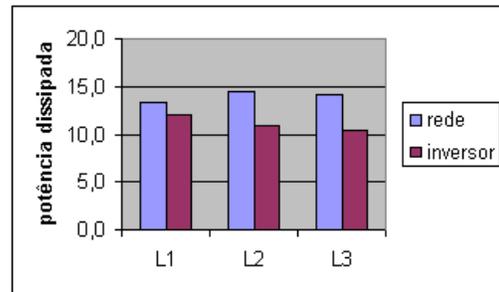


Figura 14: Potências dissipadas nas lâmpadas de 11W.

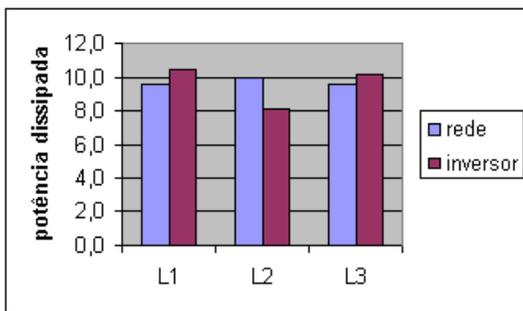


Figura 12: Potências dissipadas nas lâmpadas de 7W.

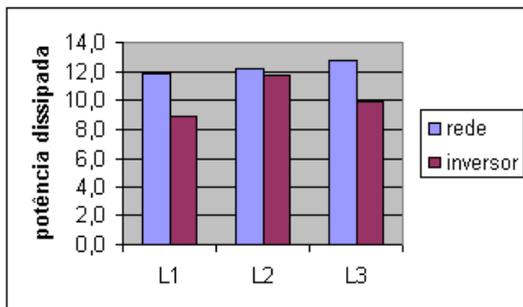


Figura 13: Potências dissipadas nas lâmpadas de 9W.

Para averiguação da intensidade luminosa emitida pelas lâmpadas foi utilizado o luxímetro mostrado na Figura 15.



Figura 15: Luxímetro.

Foram realizadas medidas com as lâmpadas a uma altura de 2,3 m do luxímetro onde os resultados obtidos são mostrados nos gráficos das Figuras 16, 17, 18 e 19.

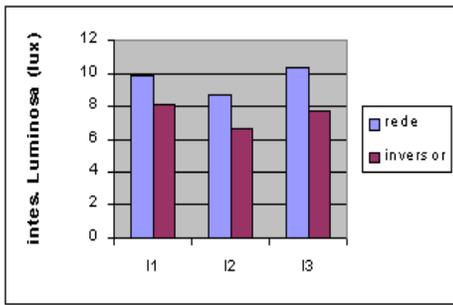


Figura 16: Intensidade luminosa medida nas lâmpadas de 5W.

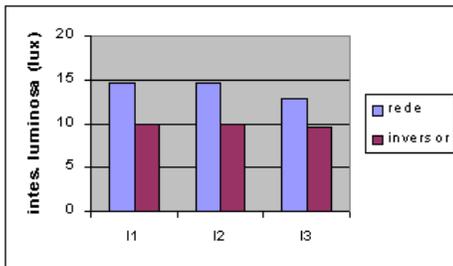


Figura 17: Intensidade luminosa medida nas lâmpadas de 7W.

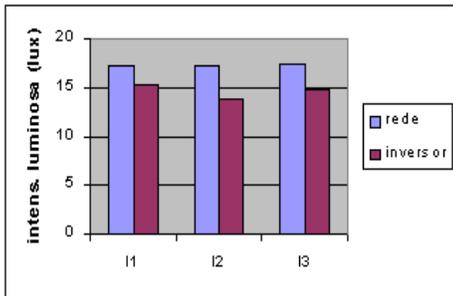


Figura 18: Intensidade luminosa medida nas lâmpadas de 9 W.

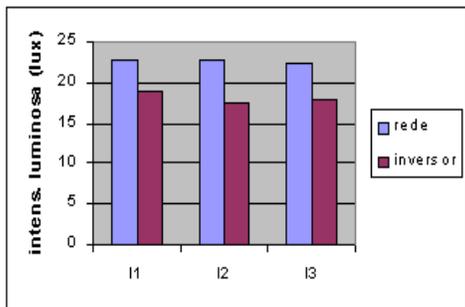


Figura 19: Intensidade luminosa medida nas lâmpadas de 11W

Em seguida foram realizadas medidas a 1m de distância deste local, no qual os resultados obtidos são ilustrados nos gráficos das Figuras 20, 21, 22 e 23.

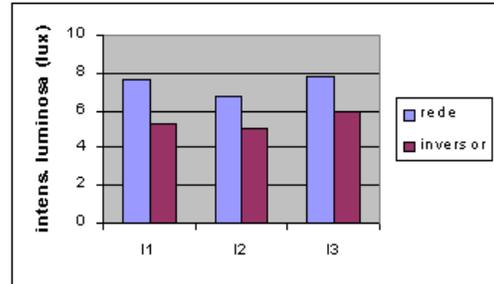


Figura 20: Intensidade luminosa medida nas lâmpadas de 5W

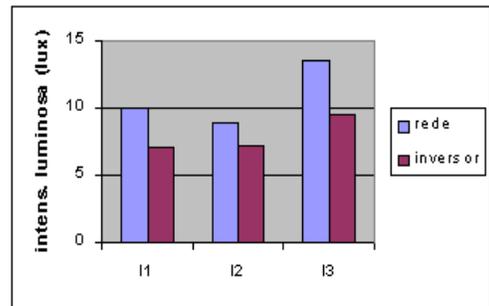


Figura 21: Intensidade luminosa medida nas lâmpadas de 7W

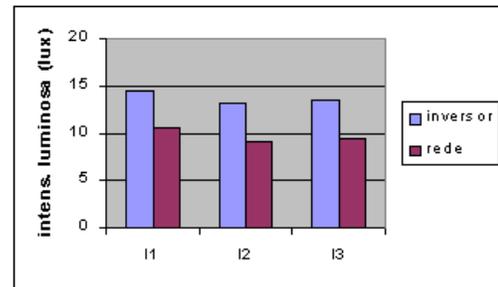


Figura 22: Intensidade luminosa medida nas lâmpadas de 9W.

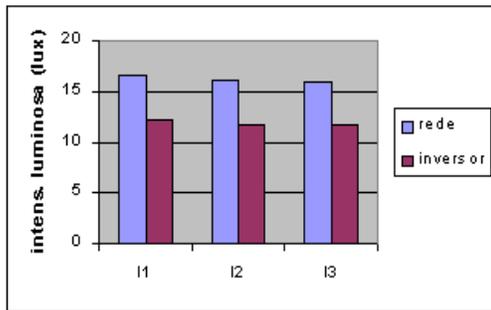


Figura 23: Intensidade luminosa medida nas lâmpadas de 11W.

### Palavras-Chave

- Fontes alternativas de energia
- Inversores
- Lâmpadas fluorescentes compactas

### Agradecimentos

Os autores agradecem as Baterias Delphi, a AVANT, a Protec e WB Eletro-

Eletrônica pelas doações. Também a PROPP-UNESP e a Fundunesp.

### Bibliografia

- [1] ALDABÓ, Ricardo – “Energia eólica” – Editora Artiber, 2002.
- [2] SITE :<http://www.energia-alternativa.com.br/Inversores.htm>
- [3] SITE: <http://www.osram.com.br/empresa/index.html>
- [4] CREEDER, Hélio – “Instalações elétricas” – Editora LTC, 14ªed.
- [5] CALVIN, Geraldo/ CERVELIN, Severino – “Instalações elétricas prediais” – Editora Érica, 4ª ed.
- [6] Jornal "O Estado de São Paulo", 15 de maio de 2001.



## Temperature profiles obtaining on heat sinks recovered with CVD diamond film for semiconductors circuits utilizing thermocouples

T. M. Souza<sup>1</sup>, E. Sakai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Virtual Materials Reseach Center – CVMAT – Unesp, Brazil

E-mail: teofilo@feg.unesp.br

### Abstract

This work presents a device for the acquisition of temperatures on different heatsinks, supporting the research for using the CVD diamond deposition process on materials used in electronic field. One technical way to measure temperature on a surface is by a thermocouple due to its wide measuring range, besides its dependability in the measurements. Temperatures were obtained on several semiconductor heatsinks recovered with CVD diamond film and the results compared to some traditional heatsink alloys, resulting in an excellent perspective for its application in the market.

Keywords: Heatsink, Thermocouple, CVD diamond film

### 1. Introduction

Basically there are two types of heatsinks or heat radiators: the active and the passive. The active radiator has its performance increased with the help of coolant fluids such as air, water, CFC or likewise liquid. The passive radiators actuate on the device which is to be cooled due to the thermic conduction phenomenon and its cooling is obtained through thermic convection and thermal irradiation. Their parameters are established by the Thermology laws (material thermocapacity, volume, temperature difference, contact area and dissipation, color, etc). Heatsinks are chosen in industry based on a parameter called “thermic resistance”, in degree/watt. In working with the Chemical Vapor Deposition (CVD) process, one important application was found in semiconductor heatsinks where, after several tests proceed in lab, resulted in superior performance compared to the traditional alloys used in heat radiators.

The option to obtain temperatures with Chrome/Alumel (NiCr/Nial – type K) thermocouples is due to its simplicity, work interval (-20 °C to 1260 °C) and its small error limit (+/- 2.2 °C max. – according to the converter). The thermocouple principle is based in the “SeeBeck” effect. Type K thermocouple is formed by a chrome-nickel alloy at the positive pole (A) and another chrome-aluminum alloy at the negative pole (B) whereas the measuring junction is connected to a temperature other than is present at the reference junction, thus generating a d.d.p. that can be measured and converted to heat, that is: the higher the temperature difference the higher presents the d.d.p. With specific converters, it is possible to read the temperature in the junction, as shown in figure1.



Figure 1 Simplified schematics of a thermocouple.

## 2. Experimental Procedure

The experimental procedure used a Titanium alloy Ti6Al2Sn4Zr2Mo for the semiconductor heatsink recovered with a thin CVD diamond film. This alloy was chosen due to its high thermal conductivity ( $l=600\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ). A device (shown in figure 2) was prepared in order to obtain a grid of 25 measuring points using type K thermocouples spaced on a  $20\times 20\times 1\text{mm}$  flat heatsink plate. Such a device allows to measure temperatures obtained by 5 thermocouples at a time, so as to cover all of the plate surface. Such a device can also measure temperature profiles of copper heatsinks ( $l=360\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ), aluminum heatsinks ( $l=210\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ), brass heatsinks ( $l=109\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) and Titanium alloy with same surface and dimensions, for comparison purposes with the CVD diamond film heatsink ( $l=2000\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ).

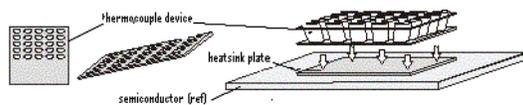


Figure 2 - Thermocouple setup device for temperature acquisition.

The heating source consisted of a variable power supply (6 to 12 VDC in steps of 2 volts) feeding five TIP 41C type transistors. Each transistor become heated at a certain current flow onto which were installed the heatsinks recovered with CVD diamond film, as shown in figure 3.

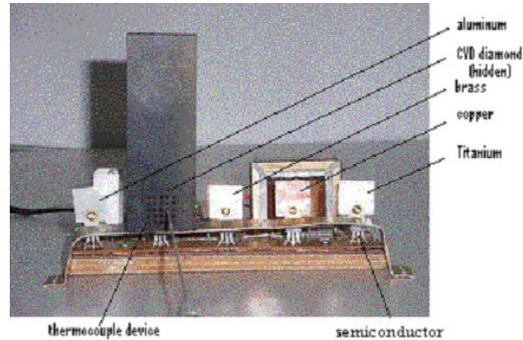


Fig. 3 - Snapshot of the heatsink test setup. From left to right are: Aluminum, CVD diamond (hidden), brass, Copper and Titanium alloy.

The experimental results showed that the CVD diamond is by far superior to any other metals used in the manufacture of heatsinks. One can also notice that at each increase of the d.d.p. on the transistors heat, the CVD diamond and the Titanium alloy would become much more efficient than the other materials.

Temperatures obtained with the variable power supply are shown in Table 1 and a sample of the CVD diamond temperature grid (10 Volts power supply) is shown in Figure 4.

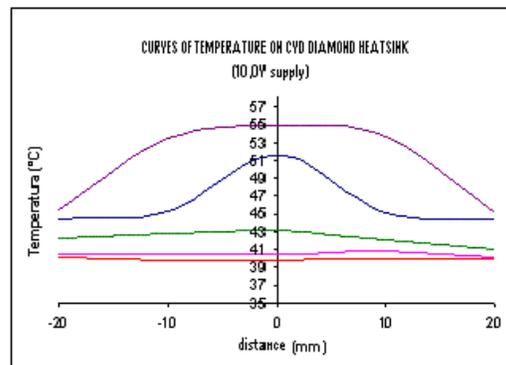


Figure 4 - Curves of temperature on CVD diamond heatsink

The upper curve indicates the thermocouple device closer to the heatsink whereas the lowest curve indicates the device placed farther distant.

## 3. Results

The study and implementation of heatsinks aims at obtaining their better performance and, in particular, in the employment of CVD diamond process. The parameters raised to compare used the most conventional materials found for heatsinks. Characterizations were proceeded with electronic microscopy (see figure 5) in order to verify the morphological aspect of the surface of the CVD diamond and to evaluate the film thickness. Analysis by X-rays diffraction (see figures 6 (a) (b)) intended to verify the chemical composition before and after film deposition. As observed, peaks of aluminum are found on 37.5, 39 and 40 degrees (2 Theta) whereas peaks of Titanium are found on 40 and 65 degrees. Finally, peaks of CVD diamond are found on 44, 76 and 92 degrees.

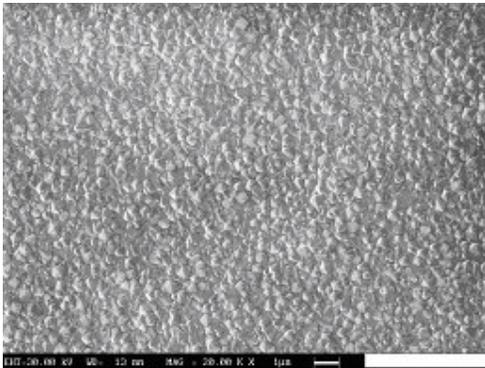


Fig. 5 – Typical Morphology of CVD diamond film surface used in semiconductor circuitry heatsinks

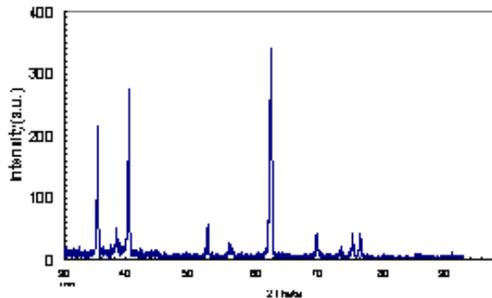


Fig.6a. Spectroscopy obtained in samples without diamond deposition

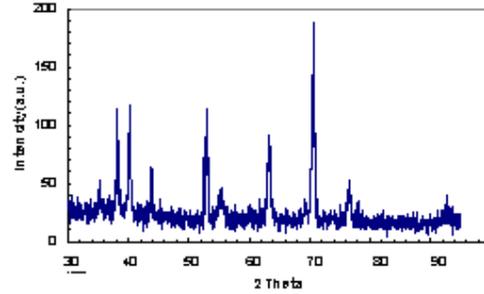


Fig. 6b Spectroscopy obtained in samples with the CVDdiamond film deposition

### 3.1 Thermic properties of cvd diamond as a heatsink

Several studies of the thermal properties of CVD diamond film are found in related literature (1; 16; 20; 21; 23; 24). The principal methods used for measuring are known to be the photothermic technique. This technique, with its best chosen cost/benefit for the project development, utilises the temperature acquisition by contact, in which 25 points of type K thermocouples are applied, sheltered by magnesium oxide, in a square matricial disposition onto the film. Thermocouple attachment to the diamond was made with silver glue. Using this system, temperature variations were detected over the film area, with the help of the semiconductor as a heating source device. A matrix of 25 thermocouples equally spaced was prepared as to obtain any variations in the temperature along the film surface.

In order to compare the results for the CVD diamond fixed on the substrate, the values of temperature obtained with different materials (some good or relatively good heat conductors) were collected. Amongst them: of the natural diamond, copper, aluminum and brass. With relation to the thermal conductivity of the heatsinks recovered with CVD diamond film, the following points influenced somewhat:

### 3.2 Pretreatment of the substrate surface

With a convenient scratching with diamond powder (0.25 micra) and oxalic acid (10% vol), as a pretreatment of the sample surface, permitted a growth of diamond film.

### **3.3 Film crystal purity**

No crystal purity analysis were made. That would demand several analysis by Raman scattering spectroscopy in order to obtain better coherent results.

### **3.4 Film grain boundary density**

All deposited films presented equal surface morphology. One of the liable possibilities is that the mixture was unique, that is, a kind of standard mixture was obtained. Pressure and temperature were also maintained constant. Pressure value was circa 50 Torr and temperature about 600 degrees Celsius.

### **3.5 Film density**

A mean density of the films presented close values to diamond, the latter taken for reference, that is:  $3.50 \text{ g/cm}^3$  (natural diamond)

### **3.6 Film thickness**

Experiences carried out furnished films with thickness less than 5 micra. Greater thickness will be analysed in the next future experiments. It has been taken as reference a thickness circa 4 micra, measured by sweep electronic microscopy

### **3.7 Film area**

Due to the limited area of 20 x 20 mm allowed by the built reactor, all the experiments were standardized to that area.

### **3.8 Methane concentration**

The resulted mixture had a fixed volume concentration 1.5% of methane gas in volume. It would be necessary to have a specific instrument to measure mass, whose price reaches the significant amount of R\$ 6.000,00 (Six thousand Real)

### **3.9 Gas flux**

Five (5) experiments were performed with each of the 40, 60, 80,100, 120 and 160 sccm flux (cubic centimeter per minute). As the temperature and pressure were maintained constant in all experiments, there was practically no considerable influence with the gas flux variations. There was, indeed, a bit greater deposition. It should be taken into account that in the mixture presented some 0.2% Oxigen (vol) The presence of Oxigen helps obtaining a purer diamond, with less impurities, chiefly with no diamond carbon. Thus, all of the obtained films presented same surface morphology.

### **3.10 Reactor internal pressure to deposition**

A pressure of 50 Torr was maintained for all the experiments. There were no significant changes in the thermic conduction of the CVD diamond device

### **3.11 Check of the thermal conductivity**

In the CVD diamond sample thermocouples were installed on the whole area of the film and results compared against other conventional heatsinks presenting same dimensions and geometrical characteristics.

Temperature measurements were taken using type K thermocouples device (figure 2) attached to the Aluminum, Copper, Brass and CVD diamond films, in a likewise panel. Results are shown in Table 1 and figure 4.

## **4 – Conclusions**

Despite the difficulties encountered to obtain the temperatures, it can be concluded that the CVD diamond, even with a thin film deposition, is superior in dissipating heat when compared to those traditional alloys found on the market. This is further confirmed in the measure

we demand more from heatsinks. Finally, amongst many other applications, the CVD diamond will be much useful as a heatsink as well, for the thermal resistance of the diamond is less than the copper and more less than the aluminum.

## 5 – References

- 1 Lee, Seri, Optimum design and selection of heatsinks. (Microelectronics and Reliability, Volume: 37, Issue: 4, April, 1997, pp. 699 )
- 2- Vogel, Marlin R., Liquid cooling performance for a 3D multichip module and miniature heat sink. (Microelectronics and Reliability, Volume: 36, Issue: 4, April, 1996, pp. 548 )
- 3- Vafai, Kambiz; Zhu, Lu, Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling (International Journal of Heat and Mass Transfer, 2287-2297 )
- 4- De Baetselier, Erwin; Goedertier, Wim; De Mey, Gilbert, A survey of the thermal stability of an active heatsink (Microelectronics and Reliability, Volume: 37, Issue: 12, December, 1997, pp. 1805-1812 )
- 5- Batchelor, A.R.; Postoyalko, V., Integral heatsink analysis for two-terminal microwave oscillator devices (Microelectronics Journal, Vol.: 27, Issue: 6, Sept., 1996, pp. 499-503 )
- 6- Kreutz, E.W.; Pirch, N.; Ebert, T.; et. al., Simulation of micro-channel heatsinks for optoelectronic microsystems (Microelectronics Journal, Volume: 31, Issue: 9-10, October, 2000, pp. 787-790 )
- 7- Kalinin, G.; Matera, R., Comparative analysis of copper alloys for the heatsink of plasma facing components in ITER (Journal of Nuclear Materials, Volume: 258-263, October, 1998, pp. 345-350 )
- 8- Rahman, Muhammad Mustafizur, Measurements of Heat Transfer in Microchannel HeatSinks (International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume: 27, Issue: 4, May, 2000, pp. 495-506 )
- 9- Nygren, R.E.; Youchison, D.L.; Watson, R.D.; O'Dell, S., High heat flux tests on heatsinks armored with tungsten rods (Fusion Engineering and Design, Volume: 49-50, November, 2000, pp. 303 - 308 )
- 10- Kulish, Vladimir V.; Lage, José L., Diffusion within a porous medium with randomly distributed heatsinks (International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume: 43, Issue: 18, September 15, 2000, pp. 3481-3496 )
- 11- Ledezma, Gustavo; Bejan, Adrian, Heatsinks with sloped plate fins in natural and forced convection (International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume: 39, Issue: 9, June, 1996, pp. 1773-1783 )
- 12- Kim, S.J.; Kim, D.; Lee, D.Y., On the local thermal equilibrium in microchannel heatsinks (International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume: 43, Issue: 10, May 15, 2000, pp. 1735-1748 )
- 13- Fedorov, Andrei G.; Viskanta, Raymond, Three-dimensional conjugate heat transfer in the microchannel heatsink for electronic packaging (International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume: 43, Issue: 3, February, 2000, pp. 399-415 )
- 14- Lage, J. L.; Weinert, A. K., Numerical study of a low permeability microporous heatsink for cooling phased-array radar systems (International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume: 39, Issue: 17, November, 1996, pp. 3633-3647 )
- 15- Jubber, M.G.; McLaughlin, A.J.; Marsh, J.H.; Aitchison, J.S.; John, P.; Troupe, C.E.; Wilson, J.I.B., Micromachined pattern transfer into CVD diamond (Diamond and Related Materials, Volume: 7, Issue: 8, August, 1998, pp. 1148-1154 )
- 16- Ho, H.P.; Lo, K.C.; Tjong, S.C.; Lee, S.T., Measurement of thermal conductivity in diamond films using a simple scanning thermocouple technique (Diamond and Related Materials, Volume: 9, Issue: 7, July 3, 2000, pp. 1312-1319 )

17- Tajima, M., Electronic component cooling unit (Applied Thermal Engineering, Volume: 17, Issue: 12, December, 1997, pp. XXIII )

18- Pope, Elaine, Thermal characterization of a tape carrier package. (Microelectronics and Reliability, Volume: 36, Issue: 4, April, 1996, pp. 548 )

19- L., H. Shu; Christou, A.; Barbe, D.F., High temperature device simulation and thermal characteristics of GaAs MESFETs on CVD diamond substrates (Microelectronics and Reliability, Volume: 36, Issue: 9, September, 1996, pp. 1177-1189 )

20- DAVIS, Robert F. – Diamond Films and Coatings – Development, Properties and Applications – Noyes Publications – Edited North Carolina State University

Department of Materials Science and Engineering Raleigh, North Carolina – 1993.

21- P. Bachmann e D.U. Wiechert, Diamond and Diamond-like Film and Coatings, editado por R.E. Clausing et al. Plenum Press, N. York, 677 (1991).

22- S. J. Bull, P.R. Chalker e C. Joynston: Mat. Sci. And Techn. Vol. 8, ,679 (1992)

23- Incropera, F.P., De Witt, David P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa,

24 - Kraus, A. D., Bar-Cohen, A. Design and Analysis of Heat Sinks, J. W.&Sons, Inc.1999

25- Rashid, M.H. Power Electronics - Circuits, Devices & Applications. Prentice-Hall, Inc. 1999.

Table 1 – Temperatures of heatsinks versus semiconductor voltages.

Temperatures obtained on heatsinks																			
supply: 6.0V					supply: 8.0V					supply: 10.0V					supply: 12.0V				
CVD diamond					CVD diamond					CVD diamond					CVD diamond				
30,8	30,8	31,1	30,7	30,9	35,3	35,2	35,7	35,3	34,6	40,1	39,8	39,8	39,9	39,9	46,7	47	47,9	47,2	46,9
31,9	32,5	32,3	32	31,4	35,8	38,3	36,7	37,9	35,6	40,5	40,4	40,4	40,7	40	47,6	49,4	49	48,6	47,4
31,9	32,1	32	31,8	31,7	37,2	37,8	38	38	37,2	42,3	42,8	43,1	42	41	48	48,3	49,4	48,6	48,2
33,2	32,9	34,1	33,4	33,1	38,4	39,2	38,7	39,4	38,4	44,4	45,2	51,5	45,1	44,4	49,9	51,4	51,2	50,9	50
32,7	35	-	33,8	32,3	37,6	43,2	-	41,7	37,1	45,5	53,4	-	53,7	45,1	52	55,4	-	55,1	51,1

Titanium alloy					Titanium alloy					Titanium alloy					Titanium alloy				
31,6	30,8	32,5	31,9	31,5	35,2	35,8	35,7	35,7	35	40,2	41,6	41	42,2	40,1	46,4	47,8	48	47,4	46,2
31,6	32,3	32,8	31,8	31,7	36,3	37,4	36,7	37,4	36,7	41,3	44	44,2	43,6	41,4	47,1	49,4	48,9	48,9	47,7
31,8	33	32,7	32,1	32	38	38,5	38	38,6	38,2	42,8	42,9	44	43	42,4	48,6	49,1	49,6	49,2	48,2
33	33,2	34,4	34	33,2	38,8	40,9	38,7	41	38,4	43,7	48,3	49,9	48	43,6	50,3	52,8	52,7	52	51
34,8	36,2	-	34,9	33,3	39,4	45,2	-	43,5	37,8	45,8	54,7	-	54,3	45,9	53,1	56,2	-	54,3	53,4

Aluminum					Aluminum					Aluminum					Aluminum				
35,3	35,5	35,4	35,5	35,2	41,5	40,9	42,3	43,7	41,9	53,1	53,2	53,6	56,1	53	62,1	62,6	63,5	62	61,8
35,7	35,6	35,5	35,8	35,4	42,9	43,1	44	44,6	43,3	54,6	54,5	54,5	54,4	54,2	32,5	63,7	64,3	62,3	62,1
36,3	36	36,2	36,1	35,8	44,3	44,5	44,3	44,7	44,2	54,7	56,8	56,9	56,5	54,8	63,5	64,2	65,1	64,3	63,4
37,4	37,5	38,2	38,4	37,3	45,1	46,2	46,4	46,1	45,2	56,7	57,1	57,5	57,1	56,3	66	65,7	67,1	66,5	66,1
36,7	36,7	-	36,6	36,6	43,2	46	-	45,2	43,5	55	57,2	-	57,6	54,6	67,2	68,9	-	69,6	67,4

Copper					Copper					Copper					Copper				
38,2	38,1	38,3	38,1	38,3	42	41,8	42,4	41,9	41,7	52,6	52,4	53,5	54,7	52,7	60,5	60,9	61,6	61,4	60,9
38,4	39,2	38,2	38,3	38	43,3	42,1	43	44,4	43,5	54,2	54,1	54,6	54,2	54,1	61,6	61,8	62,3	61,1	62,4
38,3	38,5	38,2	38,2	38,1	44,5	44,2	43,5	44,1	44,1	54,8	55,4	55,4	54,7	54,7	62,3	62,5	62,9	62,3	62,4
38,3	38,6	38,5	38,4	38,3	44,7	47,3	46,3	45,9	45	57,2	55,8	56,7	56,6	56,3	63,3	64,2	64,6	64,1	63,2
38,5	38,8	-	38,8	38,4	42,5	45,4	-	45,6	43,3	54	56,5	-	57,5	55,5	65,1	66,2	-	67	65,2

Brass					Brass					Brass					Brass				
38,2	38,4	38,9	38,6	38,5	41,9	42,1	42,7	42,4	42,3	53,4	54,8	54,3	53,7	53,2	62,8	62,7	64,3	63,8	63
38,5	38,7	39	38,9	38,7	42,8	44,1	44,3	44,4	42,4	54,5	54,2	55	55,3	54,6	63,4	64	65,5	34,2	63,9
38,8	39,3	39,3	39	38,9	44	44,6	45,5	44,3	43,7	55	56,2	57,4	55,6	55,2	65,4	66	67,8	67,2	66,8
38,9	39,2	39,4	39,3	39	46	47,8	48,9	46,7	45,5	58	58,1	58,5	58	57,8	67,6	68,1	69,7	68,6	67,9
39	39,5		39,4	39,2	43,9	46,1	-	46,5	44,3	56,3	58,4	-	58,4	57,3	68,2	67,8	-	71,6	67,6



## Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Utilizando Planilha Eletrônica

**Jomar Esteves Bueno, Arsênio de Paiva Lopes, Teófilo Miguel de Souza**

CER - Centro de Energias Renováveis, Departamento de Engenharia Elétrica, Unesp – Campus de Guaratinguetá

Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha 333, CEP: 12516-410, Guaratinguetá – SP, Brasil  
[jomar@feg.unesp.br](mailto:jomar@feg.unesp.br), [arsenio.p.Lopes@terra.com.br](mailto:arsenio.p.Lopes@terra.com.br), [teofilo@feg.unesp.br](mailto:teofilo@feg.unesp.br)

**Resumo:** Muito se tem investido em pesquisas de melhorias das células fotovoltaicas, melhorando sua eficiência, sendo seu uso cada vez mais difundido. Apesar do custo ainda alto, tem grande potencial para geração de energia elétrica e vem se tornando uma fonte de energia alternativa promissora, gratuita, limpa e que já está sendo uma solução viável para a crise energética. Assim sendo, a energia elétrica gerada através de células fotovoltaicas apresenta-se também como uma alternativa possível, praticável e ecologicamente correta para geração de energia alternativa para as mais diversas aplicações. A artigo tem como objetivo estimular e incentivar o uso de Módulos Solares para geração de energia elétrica, apresentando, desta forma, uma planilha excel, de utilização bastante simples, porém que garante um resultado prático satisfatório, pois o formulário utilizado para realização dos cálculos é resultado de um estudo empírico realizado com modelos comerciais e bastante populares de Módulos Solares.

### DIMENSIONING OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING ELECTRONIC TABLE

**Abstract:** So much research investment has been done all over the World to enhance the PV Cells efficiency and brings down the production costs. Instead of a high cost, it is being more and more used, with great potential for generation of electric power the PV Systems have become a promissory alternative source of energy, gratuitous, clean and it is being an alternative solution for the energetic crisis. The energy generated by PV Cells is also presented as a possible, practicable and ecologically correct alternative for generation of alternative energy. This Paper is aimed in stimulating the usage of PV Systems for generation of electricity presenting an simple worksheet in excel format that will offer a satisfactory and trustable practical result because the formulas were empirically tested with commercial and very popular models of PV Modules.

**Key Words:** *Photovoltaic Energy, Alternatives Sources of Energy, Solar Modules.*

#### 1. Introdução

A Terra é “bombardeada” por grande quantidade de energia irradiada pelo Sol na forma de calor e luz, da qual ela se beneficia somente de uma pequena parte. Mesmo assim, essa fração equivale ao Sol fornecer, especificamente sobre o Brasil, energia equivalente a 309 mil Itaipus.

Mais do que simplesmente iluminar, ou proporcionar a fotossíntese, vem se descobrindo inúmeras outras formas de aproveitamento da energia irradiada pelo sol. Devido ao sol ser uma fonte de energia gratuita, acessível, abundante,

não poluidora e, portanto, ecologicamente correta, muitas pesquisas têm sido dedicadas à melhoria da tecnologia de utilização e da eficiência dos dispositivos solares de aquecimento e fotovoltaicos.

Este artigo não visa ensinar as técnicas de utilização da energia solar, porém, de um ponto de vista prático, será apresentada uma planilha Excel para se dimensionar Sistemas Fotovoltaicos para geração de energia elétrica.

#### 2. Considerações técnicas

É estimado que 30% da energia que o Sol envia ao planeta Terra é refletida de volta para o espaço. Os 70% restantes são absorvidos pela atmosfera e na superfície terrestre, proporcionando os ciclos biológicos e hídricos, o movimento dos ventos e o aquecimento.

O melhor período de insolação ocorre das 9 - 15 hs (Brasil), sendo tanto maior quanto mais próximo da linha do Equador.

Através das células fotovoltaicas, a energia da luz solar pode ser transformada em eletricidade devido à composição química / intrínseca das fotocélulas as quais reagem com a incidência da luz (fótons) liberando elétrons, gerando assim, eletricidade. Varias células são agrupadas e interligadas formando os módulos fotovoltaicos, os quais são capazes de gerar energia elétrica instantaneamente quando expostos à luz solar. Esses módulos geram energia elétrica em corrente contínua que pode ser regulada através de um controlador de cargas para utilização imediata ou, posteriormente, com o armazenamento em banco de baterias (GTES, 1999).

### **3. Componentes Básicos de um Sistema de Energia Solar fotovoltaica**

Os sistemas de energia solar são compostos basicamente dos seguintes elementos:

- Módulo solar
- Controlador de energia
- Bateria

#### **3.1. Módulo Solar**

Trata-se de um dispositivo que transforma a luz solar em energia elétrica contínua, normalmente com tensão de 12V, porém com um rendimento da ordem de 10%, ainda muito aquém do desejado. São compostos de Células Fotovoltaicas de silício formando uma junção P-N, protegidas, por um vidro transparente, contra os mais diversos fatores ambientais, prolongando a vida útil de funcionamento, com custo operacional praticamente reduzido a zero. O número de módulos solares a ser utilizado em um determinado sistema é definido pela potência necessária para atender a demanda dos equipamentos elétricos que estarão em funcionamentos simultâneo. Como o próprio nome sugere, são modulares de modo a permitir as mais diversas combinações de tensão (múltiplo de 12 VCC) e corrente (CER,2003).

#### **3.2. Controladores de Carga**

São equipamentos destinados a proteger e controlar o suprimento de corrente à carga. Normalmente equipados com desligamento automático por sub-tensão (da bateria), o controlador de carga otimiza o uso da energia fotovoltaica gerada pelo módulo solar, protegendo a bateria contra sobrecargas e também de descargas excessivas.

#### **3.3. Baterias**

A célula fotovoltaica não pode, por si só, armazenar a energia gerada e para isso, utiliza-se de um banco de baterias o qual será o elemento acumulador dessa energia elétrica gerada nos módulos, tornando-a disponível sempre que necessário. Normalmente são utilizadas baterias de 12 VCC, seladas e livres de manutenção.

### **4. Instalação**

Os módulos solares operam freqüentemente ligados a uma bateria a não ser em casos específicos, como por exemplo, sistemas de bombeamento onde são conectados diretamente à moto-bomba.

Por ser modular, caso haja um eventual aumento no consumo de energia, novos módulos podem facilmente ser adicionados ao sistema inicial. Os módulos são providos de terminais, possibilitando uma fácil e rápida instalação e conexão aos demais Módulos ou à bateria.

#### **4.1. Alinhamento dos Módulos**

Para escolha correta do local de instalação dos módulos, recomenda-se utilizar uma bússola ou GPS. Devendo estar voltado para o Norte Geográfico, se abaixo da linha do Equador, ou Sul Geográfico se acima da linha do Equador. No caso específico do Brasil, a maior parte do seu território está abaixo da linha do Equador, o que implica em se introduzir uma declinação á direita em relação ao Norte Magnético. A tolerância para variação do alinhamento é da ordem de mais ou menos 15°, de modo a não causar grandes perdas da luz.

Além da orientação em relação ao Norte Geográfico é também necessário o ajuste da Inclinação. Uma regra prática para ajustar a inclinação é a de adicionar 10° à latitude do local de instalação, sendo que a latitude pode ser facilmente obtida com um GPS. A inclinação irá variar de acordo com a região devido à variação das latitudes (CER,2003).

Para melhor desempenho, pode-se ainda realinhar os módulos conforme a estação do ano, efetuando pequenas correções do ângulo de inclinação: Primavera e Outono, Verão – 10 graus. Inverno + 10 graus.

#### 4.2. Manutenção:

Uma das grandes vantagens dos módulos solares é que a manutenção do sistema é praticamente nenhuma, reduzindo-se apenas à limpeza dos módulos. A eficiência dos módulos solares depende diretamente da sua superfície fotossensível daí a razão de se verificá-la periodicamente, mantendo-a livre de folhas ou depósitos de resíduos de qualquer natureza.

### 5. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico.

As fórmulas de cálculo das potências, praticamente, se resumem em CA -Trifásica e CC, como descrito abaixo:

A potência em CA é dada por:

$$P = I.U.\sqrt{3}.\cos \phi . \eta \text{ (W)} \quad (1)$$

Sendo que para os casos de tensões bifásicas ou monofásicas basta suprimirmos a  $\sqrt{3}$  e utilizarmos os demais parâmetros da fórmula.

Considerar  $\cos \phi=1,0$  e  $\eta=1,0$  para equipamentos elétricos diferentes de motores e lâmpadas fluorescentes.

A potência em CC é dada por:

$$P = U. I. \eta \text{ (W)} \quad (2)$$

É importante especificar as cargas que serão alimentadas, pois o dimensionamento depende das potências das mesmas (CER,2003).

#### 5.1. Consumo Médio Diário

O consumo será calculado com base na demanda de utilização das cargas o que é feito como descrito abaixo:

$$CMD = (\text{Quantidade de Equipamentos} \times \text{Pot.Nominal} \times \text{Horas de utilização por dia} \times \text{Número de dias por semana}) / 7 \text{ (Ah/dia)} \quad (3)$$

Faz-se esta operação para cada equipamento ou grupo de equipamentos de mesma potência (AC e CC) e soma-se os resultados, obtendo assim o **CMD (A.h / dia)**.

#### 5.2. Capacidade de Carga

Uma vez feito o levantamento das cargas AC e DC e do consumo, estima-se as horas de pico de irradiação solar e a autonomia desejada (dias sem sol). Multiplica-se o CMD pelo número de dias sem sol (autonomia), de modo a garantir a demanda durante o período pré-estabelecido. Ao escolher-se o modelo do módulo solar deve-se multiplicar sua Corrente à Máxima Potência (Imp) pelo número estimado de horas de pico de irradiação por dia, estimando-se assim o tempo de geração de energia durante um dia, obtendo-se a Capacidade de Carga (**CCM (A.h/dia)**) que o Módulo Solar deverá suprir.

$$CCM = Imp \times \text{Horas de pico de Irradiação} \quad (4)$$

#### 5.3. Quantidade de Módulos Solares

Divide-se o CMD / CCM e obtém-se o Número de Módulos em paralelo necessários para suprir esta demanda diária (este número deve ser um número inteiro).

$$NMP = CMD / CCM \quad (5)$$

Com o mesmo raciocínio, divide-se a tensão CC do sistema pela tensão do Módulo de modo a obter-se o número de módulos em série para compor a tensão CC desejada (também deve ser um número inteiro).

$$NMS = VCC \text{ Sistema} / VCC \text{ Módulo} \quad (6)$$

Somando-se os dois resultados obtém-se o total de módulos solares necessários.

$$\text{Total de Módulos} = NMS + NMP \quad (7)$$

#### 5.4. Banco de Baterias

Para dimensionamento do banco de baterias deve-se multiplicar o CMD por um fator de segurança para garantir as possíveis perdas, ou seja:

$$\text{A.h das Baterias} = CMD \times 1,2 \text{ (A.h)} \quad (8)$$

Este resultado será multiplicado pelo Fator (7,5; 12; 15) da bateria, para então se obter a capacidade mínima do banco de baterias.

TABELA I  
Fator de Descarga

Aplicação	Bateria	FD
Não crítica	Automotiva	12
Não crítica	Deep Cycle	7,5
Crítica	Deep Cycle	15

Divide-se este resultado pela Capacidade de Carga da Bateria (**CCB**), obtendo-se o número de baterias necessárias em paralelo e de modo similar divide-se a tensão CC do sistema pela tensão da bateria (normalmente 12VCC) e obtém-se o número de baterias em série (CER,2003).

$$\text{NBP} = \text{CMD} \times 1,2 / \text{CCB} \quad (9)$$

$$\text{NBS} = \text{VCC} / \text{VCC Bateria} \quad (10)$$

### 5.5. Controlador de Carga

Também definido com Regulador será dimensionado multiplicando-se a **Imp** por 1,1 (fator de segurança) e em seguida multiplica-se o resultado obtido por 1,3, ou seja:

$$\text{I Controlador} = \text{Imp} \times 1,43 \text{ (A)} \quad (11)$$

Este resultado garante a escolha de um regulador com **Imax**  $\geq$  **Isc**.

O número de reguladores em paralelo é dada pela como a seguir (CER,2003).

$$\text{NRP} = \text{Imax Calculada} / \text{Imax Regulador} \quad (12)$$

### 5.6. Inversor

Por fim o inversor é escolhido para suprir uma Potência AC  $\geq$  Potência AC Estimada.

$$\text{PAC Inversor} \geq \text{PAC Estimada (W)} \quad (13)$$

## 6. Descrição da Planilha de Dimensionamento

Optou-se por utilizar planilhas no formato excel por ser uma ferramenta bastante difundida, de fácil utilização e compreensão, atingindo não somente o meio acadêmico mas também o público em geral.

De forma lógica e seqüencial o usuário é orientado através da solicitação dos dados de projeto e conseguinte apresentação dos cálculos e resultados, o que pode ser visualizado na Fig (1), item 1.

Para escolha do Módulo adequado é necessário o levantamento da carga a ser alimentada gerando assim o Consumo Médio Diário. A partir deste dado pode-se escolher o Módulo/fabricante adequado, Fig (1), item 2.

O Bando de Baterias poderá ser definido entre dois tipos básicos de baterias, as Automotivas e as Deep Cycle, podendo-se ainda escolher o modelo e o fabricante, Fig (1), item 3.

O modelo / fabricante do Controlador de Carga também poderá ser escolhido, como descrito no Fig (1), item 4.

Na seqüência, finalmente pode-se especificar o Inversor e respectivos dispositivos de proteção do sistema assim como a fiação adequada, Fig (1), item 5.

A planilha apresenta ainda, em forma de "worksheets", Tabelas, Cargas AC-DC, necessárias para o dimensionamento e facilitar a compreensão de sua forma de utilização.



## 7. Comentários e Conclusões

As formas de aproveitamento da energia solar, seja como fonte de calor ou fonte luminosa, seja para geração de outras formas de energia, é hoje sem sombra de dúvidas, uma das alternativas mais promissoras para enfrentarmos os desafios energéticos da atualidade e futuros. E quando se pensa em energia, deve-se ter em mente que, a quase totalidade das demais fontes de energia, de forma geral, é derivada direta ou indiretamente do Sol.

Assim sendo, a proposta deste artigo foi fornecer uma ferramenta básica e prática de projeto de Sistemas Fotovoltaicos dando uma idéia de sua vasta aplicação. A planilha apresentada ainda, condições de realizar a análise de possibilidades de dimensionamento de um sistema de geração de energia elétrica utilizando Módulos Fotovoltaicos.

## 8. Referências

CER/UNESP- Guaratinguetá "Manual de Instalação de Sistemas Fotovoltaicos" – SP, 2003.

GTES/CEPEL/CRESESB "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos" – RJ, 1999.

## 9. Direitos Autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo desta publicação.

Cliente :		Cidade :	
Logradouro :		Estado :	
Responsável :		Projeto :	
		Data :	

[1] **Irradiação Solar Característica do Local de Instalação do Sistema**

Autonomia (Dias sem Sol) =

Número de horas de Pico de Irradição =

**LIMPAR DADOS**

[2] **Módulo Solar**

Consumo médio diário da Planilha de estimativa de consumo =  Ah/dia

Módulo (Modelo / Fabricante) =

Corrente a Potência Máxima (Imp) =  A

Capacidade de Carga por Módulo =  Ah/dia

Módulos Paralelo =

Tensão DC do Sistema =  12 VCC

Módulos em Série (para operação em 12VCC) =

Total de Módulos =

[3] **Banco de Baterias : Capacidade Mínima**

Aplicação	Bateria		FD	
Não crítica	Automotiva	<input type="radio"/>	12	<input type="text"/> Ah
Não crítica	Deep Cycle	<input checked="" type="radio"/>	7,5	
Crítica	Deep Cycle	<input type="radio"/>	15	

Bateria (Modelo / Fabricante):

Capacidade de carga =  Ah

Baterias em Paralelo =

Baterias em Série =

Total de Baterias =

# Condutor até o Controlador de Carga =  mm2

Fusível =  (A)

[4] **Controlador de Carga**

Isc (corrente de curto circuito) do Módulo =  (A)

Controlador (Modelo / Fabricante) =

Corrente máxima do regulador =  (A)

Potência contínua do regulador =  W

Potência de surto do regulador =  W

Controlador(es) em Paralelo =

# Condutor até o Controlador =  mm2

Fusível =  (A)

[5] **Inversor (DC/AC)**

Potência Total AC - Planilha de Estimativa de consumo: P<sub>AC</sub> =  W

Estimativa de Potência de Surto =  W

Inversor (Modelo / Fabricante) =

Potência adotada para o Inversor =  W

% Utilização =

# Condutor até o Inversor =  mm2

Fusível =  (A)

Figura 1: Planilha Eletrônica para Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos



## Dimensionamento de Sistemas Acionados por Roda D'água para Geração de Energia Elétrica e Bombeamento de Líquidos, utilizando Planilha Eletrônica

**Teófilo Miguel de Souza, Jomar Esteves Bueno, Arsênio de Paiva Lopes,**

CER - Centro de Energias Renováveis, Departamento de Engenharia Elétrica, Unesp – Campus de Guaratinguetá

Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha 333, CEP: 12516-410, Guaratinguetá – SP, Brasil  
[jomar@feg.unesp.br](mailto:jomar@feg.unesp.br), [arsenio.p.Lopes@terra.com.br](mailto:arsenio.p.Lopes@terra.com.br), [teofilo@feg.unesp.br](mailto:teofilo@feg.unesp.br)

**Resumo:** As rodas d'água vêm sendo utilizadas há séculos, para moagem, para bombeamento e mais recentemente para geração de energia elétrica e até mesmo como decoração. Com grande potencial para geração de energia elétrica, vem se tornando uma fonte de energia alternativa promissora, gratuita, limpa e que já está sendo uma solução viável para a crise energética. Assim sendo, a energia elétrica gerada através de rodas d'água, assim como o bombeamento, apresenta-se também como uma alternativa possível, praticável e ecologicamente correta para bombeamento e geração de energia alternativa, dando vida extra e otimizando o potencial das rodas d'água. A artigo tem como objetivo estimular e incentivar o uso de rodas d'água para bombeamento e geração de energia elétrica, apresentando, desta forma, uma planilha excel, de utilização bem simples, porém que garante um resultado prático satisfatório, pois o formulário utilizado para realização dos cálculos é resultado de um estudo empírico realizado com modelos comerciais e bastante populares de rodas d'água.

### **ELECTRONIC TABLE TO DESIGN A SYSTEM FOR GENERATION OF ELECTRICITY AND PUMPING SET IN MOTION BY A WATERWHEEL**

**Abstract:** Waterwheels have been used as watermills by centuries and most recently as decoration and for generation of electric energy. With great potential for generation of electric power the waterwheels have become a promissory alternative source of energy, gratuitous, clean and it is being a alternative solution for the energetic crisis. The energy generated by waterwheels is also presented as a possible, practicable and ecologically correct alternative for pumping and generation of alternative energy giving an extra life and optimizing the generation potential of a waterwheels. This Paper is aimed in stimulating the usage of waterwheels for pumping and generation of electricity presenting an simple worksheet in excel format that will offer a satisfactory and trustable practical result because the formulas were empirically tested with commercial and very popular models of waterwheels.

**Key Words:** *Waterwheels, Generation, Electric Energy, Pumping, Alternatives Sources of Energy, Hybrids Systems.*

#### **1. Introdução**

O bombeamento d'água para irrigação, consumo humano e animal, abastecimento de reservatórios e açudes é uma necessidade na grande maioria, em propriedades rurais, o que pode ser conseguido com rodas d'água. Assim sendo, a roda d'água é mais uma opção para o abastecimento de água em sítios, fazendas, chácaras, pousadas, hotéis-fazenda e etc. De funcionamento simples, baseia-se no

aproveitamento da energia hidráulica utilizando a força de acionamento de uma queda d'água para gerar o bombeamento. Sendo uma alternativa de baixo custo de aquisição e manutenção, não poluente e, portanto, “ecologicamente correta”.

Neste artigo será apresentada uma planilha de cálculos, como ferramenta, para o dimensionamento de um sistema de

bombeamento de água utilizando-se de uma roda d'água e também, como opção, a utilização da roda d'água para geração de energia elétrica.

## 2. Considerações técnicas

Quando se tem uma queda d'água disponível, pode se utilizar uma roda d'água para bombeamento e geração de energia elétrica. Sendo de grande eficiência e com custo operacional e de aquisição relativamente baixos, torna-se um atrativo para as aplicações que tenham necessidade de bombeamento de água. Existem rodas d'água de vários tipos e modelos, dependendo das aplicações a que se destinam. De fácil instalação e manutenção, podem ser instaladas para obter o aproveitamento das águas desde pequenas quedas (bicas) até mesmo riachos e rios, com ou sem barragens de represamento..

### 2.1. Tipos de Instalações com Rodas d'água

As rodas d'água são freqüentemente encontradas em madeira, ferro e, dependendo da aplicação, em materiais especiais como o PVC. Com diversos modelos e fabricantes disponíveis no mercado, este artigo dedicar-se há apenas às rodas do tipo sobreaxial por serem estas as mais simples, mais baratas e conseqüentemente as mais comuns.

Por questões de facilidades de instalação, baixo investimento e mínima agressão ao meio ambiente, considerar-se-á apenas dois tipos básicos de instalações de Rodas d'água:

- ✓ **Rodas d'água a Fio d'água** - Utilizada quando a vazão de acionamento é suficiente para atender às necessidades de bombeamento, sendo também a mais barata, portanto com melhor custo x benefício.
- ✓ **Rodas d'água com Reservatório** - Utilizada quando a vazão de acionamento não é suficiente para suprir o bombeamento, necessitando, neste caso, recorrer a um reservatório. O reservatório pode ter sua vazão controlada, permitindo uso de maior volume d'água quando da necessidade de maior consumo de energia elétrica ou de bombeamento.

O bombeamento pode ser conseguido basicamente de duas maneiras sendo através da ação da gravidade seja por elevação em desnível. A primeira opção é mais barata e deverá sempre que possível ser adotada. Para a segunda opção, quando o centro de consumo está localizado acima da fonte de abastecimento, será necessário recorrer ao bombeamento para que ocorra a elevação em desnível.

Importante salientar que a vazão de acionamento não é necessariamente a mesma água utilizada para o bombeamento, ou seja, água de abastecimento diferente da água de acionamento. O que vem a ser uma grande vantagem em relação ao "Carneiro Hidráulico" pois, permite, desta forma, utilizar-se, por exemplo, de água não potável para o bombeamento de água potável, sem que haja contato entre as duas.

## 3. Dimensionamento de Sistema de Bombeamento com Roda D'água

Para que se possa fazer o cálculo da demanda de água por dia em litros, é necessário conhecer a necessidade diária de água dos possíveis consumidores. Costuma-se fazer uma estimativa de necessidade de consumo por população humana, animal e por utilização em irrigação. Esta estimativa prática está apresentada na Tab - (I).

TABELA - I  
Demanda Diária d'água (litros/dia)

Consumidor	(l / dia)
<b>Pessoas</b>	<b>100</b>
<b>Aves</b>	<b>0,3</b>
<b>Caprinos</b>	<b>5</b>
<b>Suínos + Higiene</b>	<b>15</b>
<b>Bovinos</b>	<b>35</b>
<b>Eqüinos</b>	<b>50</b>
<b>Hortas m<sup>2</sup></b>	<b>5</b>
<b>Jardins m<sup>2</sup></b>	<b>5</b>

A Tab-(I) é recomendada por expressar praticamente a necessidade de consumo (demanda) diária e deve ser utilizada multiplicando-se o número de consumidores pelo respectivo consumo diário. Ao final faz-se o somatório " $\Sigma q$ " das demandas individuais para se obter a demanda diária total " $q$ " em (litros/dia).

Além desses dados, em um projeto é necessário conhecer também o seguinte:

- Alturas de Queda e Elevação;
- Vazão de Acionamento nas estações "seca", "chuvas" e com represamento;
- Comprimento da Tubulação;
- Tempo de Utilização.

### 3.1. Demanda Diária de água “q”

A demanda em litros / dia é dada por:

$$q = \sum q_{\text{Consumidor}} \text{ (l/dia)} \quad (1)$$

A Tab- (I) deve ser utilizada para se estimar a necessidade diária de consumo humano e animal.

A demanda “q” em litros / seg é dada por:

$$q = \frac{\sum q \text{ (l/dia)}}{86.400} \text{ (l/s)} \quad (2)$$

### 3.2. Dimensionamento das Tubulações

A Tab –(II) permite a escolha das tubulações de entrada e saída ou seja sucção e recalque, em função da vazão em litros por segundo.

TABELA - II  
Diâmetro da Tubulação (polegadas) em função da Vazão

Q (l/s)	Q < 2	2 ≤ a < 6	6 ≤ a < 15	15 ≤ a < 30	30 ≤ a < 50	50 ≤ a < 80	80 ≤ a < 120	120 ≤ a < 150	150 ≤ a < 180	180 ≤ a < 210
Ø (")	3 "	4 "	6 "	8 "	10 "	12 "	14 "	16 "	18 "	20 "

Da mesma forma pode-se dimensionar a tubulação de alimentação da roda utilizando-se a tabela acima, porém, sempre que possível devem ser utilizadas técnicas mais baratas e de instalação mais simples como, por exemplo, calhas ou canaletas. Deve-se utilizar canos ou mangueiras próprias para suportar a pressão exercida pela água (ZM Bombas, 2004).

O comprimento máximo das tubulações, assim como o desnível será definido de acordo com fabricante escolhido, dependendo portanto de suas características técnicas.

A escolha adequada do modelo de roda d'água e respectivas capacidades de bombeamento e sucção, varia de acordo com os modelos disponíveis e com os fabricantes. Além dessas informações é fornecida a velocidade de giro da roda em rpm, o que é de grande utilidade para a geração de energia elétrica.

### 3.3. Cálculo da Potência disponível

Considerando a possibilidade de geração de energia elétrica tem-se a fórmula que define a potência disponível P dada por:

$$P = 5.Q.H \text{ (W)} \quad (3)$$

Onde; **H** = Altura Vertical da queda (m)  
**Q** = Vazão de Acionamento (l/s)

### 3.4. Especificação do Gerador

São utilizados geradores com rotores de ímãs permanentes os quais podem ser encontrados no mercado e estão disponíveis nas potências de 350 a 20.000 watts para aplicações com rodas d'água.

A planilha solicita informações para o dimensionamento tais como tensão de alimentação, número de fases, rendimento etc a fim de estabelecer a capacidade mínima necessária para a carga a ser alimentada.

## 4. Descrição da Planilha de Dimensionamento

Optou-se por utilizar planilhas no formato excel por ser uma ferramenta bastante difundida, de fácil utilização e compreensão, atingindo não somente o meio acadêmico mas também o público em geral.

### 4.1. Utilização da Planilha (Bombeamento)

De forma lógica e seqüencial o usuário é orientado através da solicitação dos dados de projeto e conseguinte apresentação dos cálculos e resultados, o que pode ser visualizado na Fig (I).

Para levantamento do consumo diário de água, é apresentada uma tabela iterativa, com as principais necessidades de abastecimento, consumo humano e animal, em função da altura do reservatório.

Também é solicitada a altura da queda vertical assim como a altura vertical do reservatório. Na seqüência a planilha apresenta a Vazão diária necessária em l/s e o Diâmetro mínimo da roda para suprir o abastecimento necessário. Os cálculos foram realizados com base nos resultados práticos obtidos com o modelo experimental utilizando-se uma bomba de embolo.

Por fim pode-se escolher um modelo adequado de roda d'água, em função do seu diâmetro considerando-se este diâmetro maior ou no mínimo igual ao calculado.

#### 4.2. Utilização da Planilha (Geração de Energia Elétrica)

Mantendo-se a mesma forma lógica e seqüencial o usuário é guiado através da solicitação dos dados de projeto e conseguinte apresentação dos cálculos e resultados o que pode ser visualizado na Fig (I) (Souza et al 2003).

Os dados iniciais já foram solicitados logo no início da planilha. O diâmetro da roda é calculado em função do bombeamento necessário e este é que irá definir a potência para a carga a ser alimentada, o que é calculado em planilha auxiliar de dimensionamento de cargas. Pode-se então, escolher o modelo de roda d'água e o respectivo diâmetro atendendo ao mínimo exigido para suprir a potência de demanda (Souza et al,2002).

Na seqüência especifica-se o Gerador e respectivos dispositivos de proteção do sistema assim como a fiação adequada.

A planilha apresenta ainda, em forma de "worksheets", Tabelas, Cargas AC-DC e Exemplos, necessárias para o dimensionamento e apresenta exemplos práticos para facilitar a compreensão de sua forma de utilização.



#### 5. Comentários e Conclusões

A Roda D'água pode ser uma alternativa economicamente viável para o abastecimento de água em hotéis fazenda, pousadas, agropecuária, fazendas, sítios, chácaras e propriedades rurais em geral, piscicultura e demais aplicações que requeiram abastecimento de água e tenham a disponibilidade de uma queda d'água.

A proposta deste artigo é a de transmitir uma idéia da grande utilidade desse mecanismo relativamente simples e barato para atendimento à necessidade de bombeamento e, com poucas adaptações, geração de energia elétrica. A planilha apresentada oferece condições de realizar a análise de possibilidades de dimensionamento de um sistema de bombeamento e geração de energia elétrica de forma simultânea, utilizando a Roda D'água.

#### 6. Referências

Souza, T. M., Bianchi, I. Leonel, R. C. "Evaluation of a Permanent Magnet Generator by na 18-Blade Windmill" WWEC, 2002.

Souza, T. M., Leonel, R. C. "Evaluation of a permanent magnets generator to be driven by windmills", V CLAGTEE, 2003

ZM Bombas "Manual da Bomba ZM MAXXI-51", Maringá/PR, 2004.

#### 7. Direitos Autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo desta publicação.

Cliente :		Cidade :	
Lagradouro :		Estado :	
Responsável :		Projeto :	Data : 31-ago-05

[2] Estimativa da Demanda de Água Diária

Consumidor	Quant.	(l / dia)	Total
Pessoas			
Aves			
Caprinos			
Suínos + Híg			
Bovinos			
Equinos			
Hortas m <sup>2</sup>			
Jardins m <sup>2</sup>			
Outros (especificar)			
Somatório da Demanda Diária Σq (l/dia) =			
q = q (l/dia) / 86400 (l/s) q (l/s) =			

LIMPAR DADOS

[2] Altura da Queda Disponível e Elevação Necessária

Altura Queda Vertical h (m)   
 Altura de Elevação "Bombeamento" H (m)   
 Distância do Centro de Consumo (m)   
 Vazão Média de Acionamento na Estação Seca "Qs" (l/s)   
 Vazão Média de Acionamento na Estação das Águas "Qa" (l/s)   
 Distância do Centro de Consumo de Energia Elétrica (m)   
 Comprimento da Tubulação (m)   
 Tempo de Utilização Diária (h)   
 Tempo de Armazenamento Diário (h)

[2] Cálculo da Potência Disponível e Necessária

Potência da Vazão na Seca :  W , com  
 Potência da Vazão nas Águas :   
 Potência Necessária :  W  
 % Utilização na Seca :   
 % Utilização nas Águas :

[3] Escolha do Modelo de Bomba

Modelo   
 Curso dos Pistões   
 Giro da Roda - rpm   
 Vazão de Bombeamento ao dia - 24h   
 Altura Máxima de Elevação (m)

[4] Cálculo do Diâmetro Mínimo da Tubulação de Sucção e Recalque

Ø Tubulação ( Entrada e Saída ) =

[5] Cálculo do Diâmetro Mínimo da Tubulação de Alimentação da Roda

Ø Tubulação Alimentação (Roda D'água) =

[6] Cálculo do Comprimento Máximo da Tubulação

Tubulação de Sucção   
 Desnível Máximo de Sucção   
 Tubulação de Bombeamento   
 Desnível Máximo de Bombeamento "Altura"  (m)

[7] Características Gerais da Bomba

Bomba Selecionada :   
 Dimensões da Roda (D x L)

[8] GERADOR : SELEÇÃO

Tensão AC (VAC) =   
 Numero de Fases :   
 Cos (φ) =   
 Rendimento η =   
 Corrente à potência máxima ( Imp ) : [ (Px1,2) / ( UAC .cos(φ). η ) ] =  (A)  
 Capacidade de carga por Gerador :  Ah/dia  
 Modelo de Gerador :   
 Corrente Máxima Gerador I (A) =   
 # Condutor até o Centro de Consumo :  mm2  
 Fusível :  (A)

Figura 1 : Planilha Eletrônica de Dimensionamento de Sistemas Acionados por Roda D'água para Geração de Energia Elétrica e Bombeamento de Líquidos



## **Sistema de Aquecimento de Água Através da Energia Solar - Procedimentos para Vistoria Visando à Perícia Técnica.**

**Arsênio de Paiva Lopes, Jomar Esteves Bueno, Teófilo Miguel de Souza**

CER - Centro de Energias Renováveis, Departamento de Engenharia Elétrica, Unesp – Campus de  
Guaratinguetá

Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha 333, CEP: 12516-410, Guaratinguetá – SP, Brasil  
[arsenio.p.lopes@terra.com.br](mailto:arsenio.p.lopes@terra.com.br) ; [jomar@feg.unesp.br](mailto:jomar@feg.unesp.br) ; [teofilo@feg.unesp.br](mailto:teofilo@feg.unesp.br)

**Resumo:** Trata-se de um trabalho elaborado para fins de vistoria e perícia, em Sistemas de Aquecimento Solar de Água, que procura em sua forma e conteúdo, apresentar os principais conceitos desta tecnologia, assim como sugestões que poderão facilitar na prática e execução destas atividades. Sua elaboração baseou-se em levantamento de informações técnicas e teóricas, resultados das pesquisas de campo, pesquisas em internet e na aplicação de um “Checklist” desenvolvido especificamente para auxílio em trabalhos desta natureza. Todo desenvolvimento deste trabalho baseou-se em algumas poucas obras técnicas reconhecidas sobre o assunto e na grande contribuição de centros de pesquisa, respeitando-se as Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

### **SYSTEM OF HEATING OF WATER THROUGH THE SOLAR ENERGY PROCEDURES FOR INSPECTION SEEKING TO THE TECHNICAL EXPERTISE**

**Abstract:** This paper was done based on a monograph made for the purpose of inspection on Water Solar Heating System that tries, in its contents and form, to present the main concepts of this technology as well as propositions that allows its easy practicing and the performing of its activities. Its accomplishment was based on the obtaining of technical and theoretical information, field-testing results, and Internet research and on a checklist application specifically developed to help on works of this sort. All of this work development was based on a few recognized constructions about this subject and on great contribution by research centers in compliance with the ABNT (Brazilian Association of Technical Norms) technical norms.

**Key Words:** Solar energy, photochemical energy, solar heating, solar collector, heating of water.

## 1. Introdução

Há muito tempo que os recursos exauríveis são objetos de estudos, daí a necessidade, cada vez maior, de se aprimorarem as técnicas de utilização das fontes de energia atuais (Soletrol-2003).

A utilização de fontes alternativas de energia, principalmente a elétrica e a térmica permitem diminuir a dependência de outros países em relação ao petróleo e poupar energia obtida de modo convencional, obtida praticamente através de grandes hidrelétricas e algumas termelétricas.

Para estabelecimentos rurais, residenciais, comerciais ou industriais, situados em áreas desenvolvidas, possuir uma fonte alternativa de geração própria de energia, de baixíssimo custo de manutenção, representa economia no pagamento de energia proveniente de uma concessionária, principalmente se localizados em áreas isoladas, ou com dificuldades de obter energia através de vias convencionais de abastecimento. Nestes casos, uma fonte de energia alternativa pode propiciar a estas regiões, maiores e melhores condições através da iluminação, do uso de pequenos aparelhos eletro-eletrônicos, tais como eletrodomésticos, comunicação, bombas de água e pequenas máquinas que utilizam energia motora (CER-2003).

O enfoque principal será a utilização da energia solar como forma de obtenção de energia térmica para fornecimento de água quente, através do uso de coletor solar, com capacidade para suprir as necessidades de residências, indústrias, estabelecimentos comerciais e de lazer, tais como pousadas, hotéis, restaurantes e clubes dentre outros.

O coletor solar é um equipamento simples por onde circula a água, a qual é aquecida, devido à incidência da luz solar. É conveniente utilizá-lo para aquecer água, pois é mais barato e muito mais simples do que utilizar módulos de células solares para produzir eletricidade e alimentar, por exemplo, um chuveiro elétrico.

A proposta deste artigo é apresentar o potencial emergente desta tecnologia para vistorias e perícias em fontes alternativas de obtenção de energia, mais especificamente as que utilizam como fonte primária a energia solar. A utilização de módulos e coletores solares, células à combustível, micro e pequenas usinas hidrelétricas, turbinas eólicas ampliam seu potencial em termos de vistorias

e perícias uma vez que vêm se tornando cada vez mais populares e acessíveis.

Porém, diante deste vasto campo que emerge, em termos de potencial de mercado de trabalho para profissionais da área, o presente trabalho concentrar-se-á nos sistemas de aquecimento de água utilizando-se a energia fototérmica (CER-2003).

## 2. Aquecimento de Água

O aquecimento por energia solar apresenta diversos atrativos como uma vida útil considerável, simplicidade de instalação e operação, baixa manutenção, retorno de investimentos em curto prazo e maior segurança em relação a outros sistemas. Sendo ainda, uma de suas vantagens principais, a contribuição para a preservação do meio ambiente, ou seja, ecologicamente correto. O aquecimento d'água tem ampla utilização sendo indispensável na vida moderna, seja para banhos, piscinas, higienização de roupas e alimentos, processos industriais ou outros. Seu uso representa grande economia no consumo elétrico ou de combustíveis resultando ainda na redução de investimentos para as geradoras de energia elétrica. Devido à exigência de baixa temperatura de saída, tais sistemas funcionam com coletores solares planos, o que caracteriza simplicidade construtiva, baixos custos e aplicabilidade nas mais variadas regiões. A configuração destes sistemas é semelhante à dos demais sistemas centralizados com acumulação, onde um reservatório térmico (boiler) armazena a água aquecida, garantindo água quente nos períodos sem radiação. Para períodos longos de chuva ou nublados, há a possibilidade de utilização de sistemas auxiliares de aquecimento elétrico ou a gás garantindo um conforto contínuo (Soletrol – 2002).

## 3. Sistema Solar de Aquecimento de Água

Inicialmente, é importante salientar que o aquecedor solar não é uma fonte de energia e sim um consumidor de energia, pois utiliza mais energia do que pode "produzir". Assim sendo, o aquecedor solar de água não fornece energia, mas ainda assim, proporcionando o aquecimento com rendimento mínimo na ordem de 50%, resultará em economia de outros tipos de energia.

O uso da energia solar para aquecimento de água contribui para a redução dos custos de aquecimento gerados pelas fontes convencionais, permitindo economias

da ordem de 50% a 90%, sem a perda do nível de conforto colaborando ainda com a preservação do meio ambiente (Lopes et al, 2005).

Com o custo das formas convencionais de geração de energia aumentando cada vez mais, a necessidade de utilização, na mesma proporção, das Fontes Alternativas de Energia vem igualmente crescendo. Assim sendo, o aquecimento de água à base de energia solar, que já vem sendo explorado em larga escala, é uma alternativa para as formas de aproveitamento dessa fonte de energia gratuita e inesgotável que é o Sol, tornando-se também um novo mercado de trabalho em termos de perícias e avaliações (Siemens-2002).

#### **4. Componentes básicos de um sistema de aquecimento solar**

O sistema solar de aquecimento é composto basicamente de:

- Coletores Solares
- Reservatório térmico (boiler)
- Sistema Elétrico Auxiliar de Aquecimento
- Parte hidráulica
- Estrutura de apoio e suporte
- Acessórios

O dimensionamento do reservatório de água quente é feito para atender à demanda diária. A área total da superfície do sistema (Coletores Solares) é calculada para aquecer e suprir essa demanda diária de água seja diretamente, seja para armazenamento em recipiente térmico. Normalmente encontram-se no mercado, sistemas modulares mais comuns variando de 1,2 a 2 m<sup>2</sup> de superfície. Cada m<sup>2</sup> com capacidade de produzir cerca de 100 litros de água quente (35° a 70° C) por dia.

Considera-se que esses sistemas de aquecimento de água por energia solar, quando cuidadosamente projetados e bem instalados, funcionam por mais de 25 anos, e que o investimento inicial terá retorno em curto prazo, aproximadamente 2 anos, aos custos atuais. Portanto, em médio prazo o investimento torna-se atraente e lucrativo, mantendo-se o mesmo nível de conforto e até mesmo, em certos casos, aumentando. Devido ao grande número de fabricantes e opções existentes no mercado brasileiro e ao seu custo acessível, a instalação desses equipamentos se faz muito presente nos dias atuais e nem sempre com a devida qualidade ou cuidados com as instalações, novamente confirmando o grande potencial de perícias nesta área. Sendo que não se restringe

apenas a uma área do conhecimento por se tratar de uma instalação multidisciplinar que vai da engenharia de materiais, passando pela civil, arquitetura, hidráulica, elétrica dentre outras (Soletrol - 2003).

#### **5. Checklist”**

Devido ao crescente número de instalações de sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar e aos conseqüentes problemas de instalação e dimensionamento, a pesquisa voltou-se para possíveis ocorrências e não para o que as motivou.

Os resultados das pesquisas vieram através da busca nos "sites" dos fabricantes e fornecedores de equipamentos, assim como da elaboração de um questionário específico para ser respondido por profissional ou representante atuante na área.

#### **6. Planilha de “Checklist”**

Com a finalidade de auxiliar na inspeção de instalações de sistemas de aquecimento solar ou para identificar anomalias no intuito de orientação técnica, ou para auxílio em vistorias e perícias, foi elaborada uma planilha de “check list” apresentada na Fig (1) (Lopes et al, 2005).

#### **7. Vistoria e Perícia**

Durante a pesquisa para definir o trabalho, constatou-se que na maioria dos casos o mau funcionamento dos sistemas deve-se ao dimensionamento errôneo em projeto ou por instalação de baixa qualidade realizada por técnicos não qualificados, podendo gerar processos judiciais entre consumidor e fornecedor.

#### **8. Objetivo e Metodologia**

Na vistoria de um sistema de aquecimento de água por energia solar, tem-se por objetivo esclarecer as efetivas condições em que se encontra o sistema e determinar ações preventivas e corretivas. Sendo necessário observar “in loco”, anotar e analisar resultados e suas ocorrências.

Para tais procedimentos é necessário executar uma ou mais diligências no local, fazendo levantamento sempre em conjunto com as partes interessadas.

Proceder no local a um exame externos e internos das instalações, adotando métodos para facilitar os estudos.

Analisar os resultados sempre vinculados às normas vigentes e especificações do fornecedor, documentando esses procedimentos com fotos e equipamentos de medição aferidos e certificados.

Todas as irregularidades encontradas devem ser anotadas, analisadas, e baseadas de acordo com as normas ou especificações técnicas do fabricante, e do país, a ser referenciada.

Para facilitar o procedimento de inspeção, o responsável pela vistoria ou perícia, deve elaborar uma complementação do “checklist” apresentado anteriormente.

O sistema solar de aquecimento de água não deve oferecer riscos aos usuários, na falta de energia elétrica ou falha de qualquer componente, as temperaturas ou pressões desenvolvidas não podem danificar o sistema (Lopes et al, 2005).

## 9. Planilha de Cálculos

Após o preenchimento da planilha de checklist é necessário confrontar o dados obtidos com os do objeto da perícia, para tanto é quase que necessário refazer os cálculos do projeto. Para tanto elaborou-se uma planilha de dimensionamento.

A Fig (2) apresentada mostra a planilha para projetos de dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos.

## 10. Conclusão

Problemas como ângulo do telhado podem ser resolvidos pelo projetista e outros problemas, pelo consultor ou representante, quando se inicia a instalação.

O alinhamento dos coletores e o ângulo de inclinação são muito importantes para um bom rendimento do sistema de aquecimento solar. Erros são cometidos tanto por comodidade ou estética, utilizam-se telhados que oferecem inclinação em não conformidade com o ideal para o correto alinhamento dos coletores.

É necessário buscar soluções viáveis quando o local de instalação não atender às exigências mínimas de projeto.

## 11. Bibliografia

A.P. Lopes, Bueno.J.E - Monografia “Sistema de Aquecimento de água através da Energia Solar, Procedimento para Vistoria Visando à Perícia Técnica”, FAAP - 2005

FAE - Apostila do Curso “Fontes Alternativas de Energia” TMS/FAE UNESP-Guaratinguetá/SP - 2003.

Siemens Manual Técnico “Aquecedor Solar Siemens” - São Paulo/SP - 2002.

Soletrol, “Manual Técnico Aquecedor Solar”, (Utilização, Instalação e Dados Técnicos), São Manuel/SP - 2003.

## 12. Direitos autorais

Os autores são os responsáveis pelo material impresso neste capítulo.

PLANILHA DE CHECK LIST											
<b>Dados do Cliente:</b>											
Nome:											
End.:											
De acordo com a NBR-12269/92 (NBR 7198, NBR 10184, NBR 10185) e Especificações do Fabricante											
<b>INFRA-ESTRUTURA</b>											
Tipo de Construção:					Área Construída:						
Latitude do local da instalação:					Declinação Magnética:						
Altura do reservatório de água fria:											
Altura do reservatório de água quente: :											
Distância entre boiler e coletores:											
Altura dos Coletores:											
Área dos Coletores:											
<b>INSTALAÇÃO DO SISTEMA</b>											
Desnível		X		Nível		Forçada					
Altura do desnível:				Moto-Bomba		fabricante					
<b>DIMENSIONAMENTO</b>											
<b>Demanda de Água :</b>											
N. Usuários:						N. Banhos:					
N. Equipamentos						Cozinha:					
Hidromassagem:						Maq. Lavar:					
Lav. Prato:											
Outros:											
<b>Boiler e Coletores</b>											
Capacidade do Boiler (litros):				N. coletores:		Área dos Coletores (m2):					
<b>TUBULAÇÃO DE ÁGUA QUENTE NBR-7198</b>											
Tipo: Cobre			Isolação:								
<b>ORIENTAÇÃO DA INSTALAÇÃO</b>											
Telhado:		Inclinação		Posição Geográfica:							
Laje:		Inclinação		Posição Geográfica:							
Suporte:		Inclinação		Posição Geográfica:							
Coletores:		Inclinação		Posição Geográfica:							
Outros:		Inclinação		Posição Geográfica:							
<b>ELEMENTOS DE FIXAÇÃO:</b>					<b>SISTEMA AUXILIAR DE AQUECIMENTO</b>						
					Potência (W)		Fabricante:				
					Tempo de Acionamento:						
					<b>INSTALAÇÃO ELÉTRICA</b>						
<b>SOMBREAMENTO:</b>					Aterramento:		Bitola Cabo:				
					Circuito Independente:		Disjuntor:				
<b>LIMPEZA:</b>					<b>VÁLVULAS</b>						
					Retenção: Não		Segurança:				
<b>DRENAGEM DE ÁGUA PLUVIAL:</b>					Anti Congelante: Não		Respiro:				
					Outros:						
<b>EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS:</b>					<b>SELO PROCEL:</b>		<b>OBS</b>				
		Fabricante:									
		Fabricante:									
		Fabricante:									
		Fabricante:									
		Fabricante:									
		Fabricante:									

Figura 1 – Planilha de Checklist para inspeção em Sistemas de Aquecimento Solar

<b>Ciente :</b>		<b>Cidade :</b>	
<b>Logradouro :</b>		<b>Estado :</b>	
<b>Responsável :</b>		<b>Projeto :</b>	<b>Data :</b>

[1] Cálculo da Massa de Água Quente

Estimativa de Consumo de Água Quente					
Consumidor	Quant.		l/dia	por	Total
Banho					
Torneira Lavabo					
Hidromassagem					
Cozinha					
Ducha Higiénica					
Lavadora de Roupas					
Alojamento de Obra					
Casa Popular					
Casa Rural					
Residencial					
Apartamento					
Lavanderia Hotel					
Outros					
				m (l/dia) =	

LIMPAR DADOS

[2] Cálculo da Quantidade de Calor Necessária

temp. ambiente "ti" =

temp. final "tf" =

Q = m.c.(tf - ti) (kcal)

Q (kcal) =

[3] Área Total Necessária de Coletor Solar

Intensidade de Radiação Solar			
Região	Horas de Sol / Dia		Kcal.h/m2
Norte			<input type="radio"/>
Nordeste			<input type="radio"/>
Sudeste			<input checked="" type="radio"/>
Sul			<input type="radio"/>
Centro-Oeste			<input type="radio"/>
Área Total =		<input type="text"/>	(m2)

[4] Quantidade de Coletores Solar

Área do Coletor =

Número de Coletores =  Coletor(es) de  (m2) cada

[5] Dimensionamento Reservatório Térmico (Boiler)

Boiler (litros)

Numero de Boilers  de  litros

[6] Potência da Resistência Elétrica (Dias nublados ou muito frios)

Tempo de Aquecimento  horas

Potência R =  (kW)

Figura 2 – Planilha Eletrônica de Dimensionamento de Sistemas Aquecimento Solar



## SISTEMA DE MULTIPLICAÇÃO DE VELOCIDADES PARA MOTORES EÓLICOS E RODA D'ÁGUA

### **Teófilo Miguel de Souza**

Centro de Energias Renováveis - UNESP - Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Bloco IV - Bairro Pedregulho  
CEP 12516-410 - Guaratinguetá - SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

### **Marco Aurélio Ferla de Oliveira**

Centro de Energias Renováveis - UNESP - Guaratinguetá  
R. Padre Roma, nº 8 - Nova Guará  
CEP 12515-540 - Guaratinguetá - SP  
E-mail: maferla@ig.com.br

**Resumo.** Este trabalho apresenta o projeto e desenvolvimento de um sistema de multiplicação de velocidades voltado para motores aplicáveis a cata-vento e rodas d'água. Consiste no aumento da rotação fornecida por estes tipos de motores. A baixa rotação, através de transferência de torque, é transformada em rotação suficiente para acionar um gerador com rotor de ímãs permanentes para fornecimento de energia elétrica. Utilizando um sistema de acoplamento adaptável para motor eólico ou roda d'água, a rotação é transferida para uma coroa que está ligada por meio de corrente a um pinhão (relação coroa/pinhão = 4:1). O pinhão, por sua vez, está acoplado em uma extremidade de um eixo que tem, na outra extremidade, uma coroa do mesmo tamanho que a primeira citada. Esta coroa é ligada por meio de outra corrente a um segundo pinhão que está fixo no eixo do gerador. Todo sistema gira com auxílio de eixos e rolamentos presos a mancais que estão fixos em uma base. A transmissão de rotação com polias e correias produz maiores esforços em todo o sistema, pois tem o objetivo de minimizar o deslizamento entre os componentes que, geralmente, são de grandes dimensões. O sistema desenvolvido com coroas, correntes e pinhões teve suas dimensões reduzidas e mostrou-se mais eficiente que os normalmente utilizados com polias e correias.

**Palavras-chave:** multiplicador de velocidades; energia alternativa; roda d'água; cata-ventos.

## **1. INTRODUÇÃO**

Atualmente, todas as pessoas necessitam de energia elétrica. Desde aquelas que moram nos mais modernos e luxuosos prédios das grandes capitais, até as mais humildes, que se encontram nas zonas rurais.

Para quem mora na cidade é mais fácil conseguir energia, já que a mesma, chega até as casas por meio das grandes linhas de transmissão provenientes das usinas hidrelétricas. Porém, para quem mora no campo, não é tão fácil assim, sabendo que o desenvolvimento do país não conseguiu alcançar todas as áreas necessitadas, a fim de melhorar a vida.

Entretanto, de algumas maneiras é possível produzir a energia elétrica necessária nestas regiões, como, por exemplo, usando geradores movidos por um determinado tipo de motor propulsor que produz alta rotação. Geralmente, tem alto custo, implantação e manutenção especializada. Também é possível utilizar motores eólicos, como cata-ventos, ou rodas d'água. Neste caso, só há um

inconveniente: a baixa rotação produzida por estes tipos de propulsores. Surge então a necessidade de se desenvolver um sistema que aumente esta rotação e suporte a alta rotação do gerador.

Existem vários tipos de sistemas de multiplicação de velocidades, os quais são mais conhecidos, em máquinas, como sistemas de transmissão. Estes sistemas funcionam de modo a transmitir o torque gerado por motores a eixos, câmbios de veículos e sistemas de alimentação, entre outros. Tudo depende da necessidade para a qual o sistema está sendo desenvolvido, seja para transmitir força ou velocidade. Todo sistema existente possui prós e contras que pesam muito na escolha de qual seria o melhor tipo a ser usado para o fim desejado. A seguir encontram-se descritos alguns tipos mais comuns.

## 2. TIPOS DE TRANSMISSÃO EM MÁQUINAS

### 2.1. Transmissão por correias

Em transmissão por correias, podem ser aplicadas correias planas ou correias em perfil “V”.

As correias planas são utilizadas em árvores paralelas ou reversas, suportando uma potência máxima de 1600 kW a uma rotação de 18000 rpm. Dessa forma, a relação de transmissão máxima, que será determinada pela dimensão das polias, é 1:10, porém a relação ideal é até 1:5.

As correias em “V” são utilizadas somente em árvores paralelas, suportando potência máxima de 1100 kW. Neste caso, a relação de transmissão máxima é 1:15, e a relação ideal até 1:8.

Para melhor funcionamento do conjunto, as correias devem estar bem esticadas. Para que esta condição possa ser atendida, usa-se uma polia esticadora, como mostrada na Fig. (1).

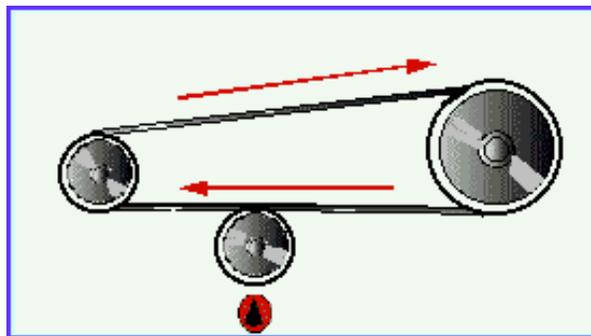


Figura 1. Exemplo de transmissão usando polias e correias.

As correias, inevitavelmente, sofrem esforços durante todo o tempo em que estiverem operando, pois estão sujeitas às forças de atrito e de tração. As forças de atrito geram calor e desgaste dos componentes, e as forças de tração produzem alongamentos que vão lasseando-as. Além desse dois fatores, as correias estão sujeitas às condições do meio ambiente como umidade, poeira, resíduos, substâncias químicas, que podem gerar rachaduras. As rachaduras reduzem a tensão das correias e, conseqüentemente, a sua eficiência. Outro dano comum é a sua fragilização causada principalmente pelo excesso de calor. O resultado dessa fragilização é um aspecto pastoso e pegajoso apresentado pela mesma (Melconian, 1949).

O sistema produzido com estes elementos tem custo acessível, porém há necessidade de manutenção constante devido ao desgaste das correias e rolamentos.

### 2.2. Engrenagens

São utilizadas em eixos paralelos ou reversos.

A relação de transmissão é constante, segura e não apresenta deslizamento.

Possuem vida longa em relação a outros tipos de transmissão e resistem bem às sobrecargas.

Também apresentam índice de ruído maior em relação a outras transmissões, além da necessidade de constante lubrificação para melhor rendimento do sistema.

Atualmente a norma DIN especifica 12 (doze) qualidades de engrenagens, que variam de acordo com a tolerância. Estas qualidades vão desde engrenagens utilizadas em indústrias de precisão (relojaria e aparelhos de medições) até engrenagens mais rústicas, normalmente utilizadas em máquinas agrícolas.

As mais usadas são engrenagens de dentes retos e helicoidais, e as cônicas com dentes retos (Melconian, 1949).

Alguns exemplos são mostrados na Fig. (2).

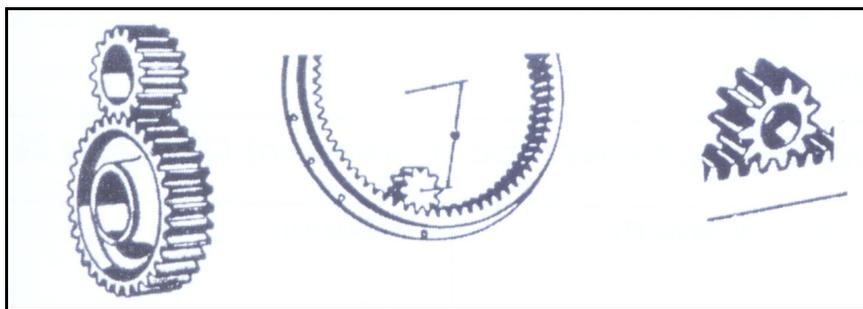


Figura 2. Modelos de engrenagens.

### 2.3. Correntes

As partes fundamentais de um sistema que usa correntes são: eixos fixos em rolamentos apoiados em mancais, coroas e pinhões de diversos tamanhos, e a própria corrente, que transmite todo o torque e velocidade.

As transmissões por meio de correntes são aplicadas em locais em que engrenagens e correias não trazem resultados satisfatórios, ou não sejam possíveis, ou ainda quando houver, por exemplo, a necessidade de acionamento de vários eixos por um único eixo motor.

As correntes sofrem menos desgaste que as correias e engrenagens, assim como todos os seus respectivos componentes. Elas também exercem menor força nos eixos e rolamentos, que por sua vez passam a ter maior vida útil do que quando aplicados em sistemas de correias. Isso ocorre porque não é preciso esticá-las como acontece com as correias.

### 2.4. Outros tipos

Além das transmissões mais comuns utilizando correias, engrenagens e correntes, existem outras maneiras de transmitir torque ou velocidade que também podem ser aplicadas em máquinas.

Podem ser citados sistemas que usam coroa e parafuso sem fim, molas, rolamentos, eixos e eixos-árvore, cabos de aço, junções eixo-árvore com cubo, chavetas, mancais de deslizamento e acoplamentos elásticos.

## 3. SISTEMA DE MULTIPLICAÇÃO DE VELOCIDADES PARA MOTORES EÓLICOS E RODA D'ÁGUA

O sistema proposto neste trabalho visa transformar a baixa rotação fornecida por motores eólicos e rodas d'água em rotação suficiente para movimentar um gerador com rotor de ímãs permanentes, numa determinada frequência, capaz de produzir energia elétrica. O desenvolvimento da transmissão utilizando correntes estabeleceu alto desempenho associado ao baixo custo de implementação.

Geralmente, uma roda d'água e um cata-vento têm velocidades típicas variando de 30 a 50 rpm. Para obter a rotação necessária ao bom funcionamento do gerador com rotor de ímãs permanentes, é necessária uma velocidade acima de 300 rpm. Assim, a velocidade é conseguida através de um multiplicador de velocidades construído de tal modo a obter uma relação de multiplicação final de acima de 10:1.

No projeto proposto a relação de multiplicação é de 16:1 e de 64:1, quando se aplica em um cata-vento ou em uma roda d'água. Uma queda d'água faz com que a respectiva roda gire com velocidade aproximadamente constante. Como os ventos não são periódicos e não apresentam velocidade constante, pode-se observar um rendimento maior ao aplicar uma relação mais leve. Na relação de 16:1, as velocidades podem atingir entre 480 rpm e 800 rpm. Na relação 64:1, as velocidades do gerador podem ser entre 1920 rpm a 3200 rpm.

No mercado brasileiro, hoje em dia, existem vários tipos de geradores, que são classificados quanto à complexidade de construção e rotação máxima. Um gerador de dois pólos é de fácil construção e funciona a uma rotação de 3600 rpm. Enquanto que, um modelo mais complexo de dez pólos funciona a uma rotação de 720 rpm.

As coroas, pinhões, correntes e um dos eixos são peças utilizadas na transmissão de motocicleta, sendo portanto materiais de fácil acesso e baixo custo. Os mancais, flanges e a base são peças mais difíceis de se encontrar nas dimensões apropriadas e quando encontradas têm custo muito alto. Portanto se faz necessário produzi-las através de usinagem e outros processos de fabricação.

No sistema de transmissão por correntes, o custo de material é R\$ 128,00, para o multiplicador com relação 16:1, e R\$ 380,00 para a relação 64:1. Ao passo que, o custo de material de multiplicação por correias fica em torno de R\$ 414,00, incluindo a polia, duas correias, dois mancais e um eixo. Para ter as relações mencionadas, 16:1 e 64:1, o sistema montado com correias não fica compacto.

### 3.1. Como funciona

O sistema de multiplicação de velocidades funciona de modo a produzir rotação suficiente para movimentar o gerador de energia. A Figura (3) mostra o multiplicador sustentado por uma armação de ferro e apoiado sobre trilhos, também de ferro. A função dos trilhos é esticar as correntes entre as coroas e pinhões do gerador e do eixo principal.



Figura 3. Apresentação do conjunto montado em um cata-vento.

A partir de um flange de acoplamento, que serve tanto para o cata-vento quanto para a roda d'água, é possível obter a rotação inicial. A coroa primária está fixada neste flange acoplado ao eixo do motor eólico, como mostra a Fig. (4). Portanto, a rotação da coroa primária é a mesma rotação inicial.

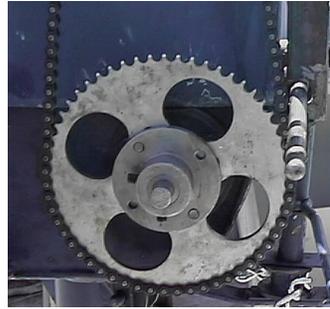


Figura 4. Coroa primária.

Por meio de uma corrente, a coroa primária é ligada ao pinhão primário localizado na parte superior do sistema, de acordo com a vista frontal mostrada na Fig. (5). A relação de dimensão coroa/pinhão é 1:4, sendo que a coroa possui 56 dentes e o pinhão 16 dentes.

O pinhão primário se encontra na extremidade de um eixo sustentado por um mancal com dois rolamentos. O mancal é apoiado em uma base feita com cantoneiras na forma de um triângulo isósceles, mostrado na vista traseira da Fig. (5). No mesmo eixo encontra-se a coroa secundária, que por sua vez, está ligada por meio de outra corrente ao pinhão secundário fixo no eixo do gerador.

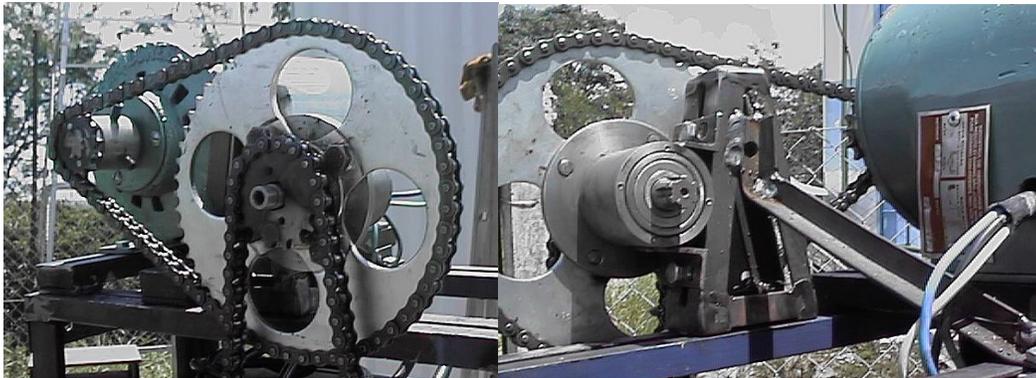


Figura 5. Vistas frontal e traseira da parte superior do multiplicador.

A Figura (6) mostra o multiplicador utilizando três relações coroa/pinhão, sendo que a coroa primária está acoplada ao eixo motor da mesma forma como no sistema de relação 16:1.

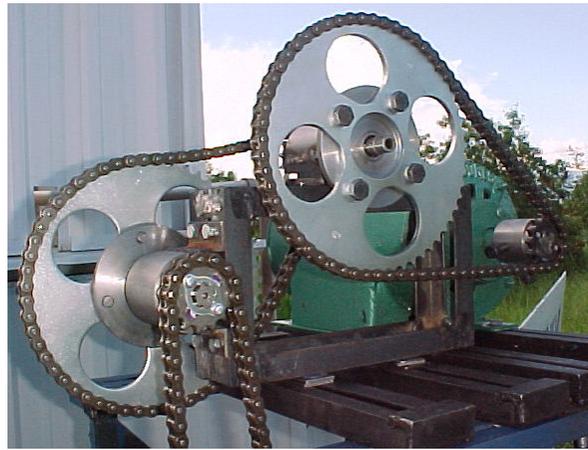


Figura 6. Multiplicador de relação 64:1.

### 3.2. Sistemas de geração de energia elétrica

Toda a descrição feita até agora foi para demonstrar os processos mecânicos. Porém, é importante descrever como obter a energia elétrica.

O gerador utilizado fornece corrente alternada em uma faixa de tensão de 12 a 35 V e potência máxima de 500 W. A título de ilustração, com uma potência 132 W é possível suprir 6 lâmpadas fluorescentes compactas de 15 W, uma TV de 20" de 60 W e uma antena parabólica de 30 W, um aparelho de som de 25 W e um ventilador de mesa de 40 W, todos ligados durante 4 horas por dia nos sete dias da semana (Bianchi, 2003).

No caso do cata-vento, tem-se a necessidade de armazenar a energia produzida, pois é provável que o horário de uso da energia não coincida com o momento em que o cata-vento está girando. Para tanto, é preciso conectar alguns aparelhos ao cabo de saída do gerador, de acordo com o diagrama de blocos da Fig. (7). Assim, o gerador fornece a energia para o carregador de baterias. O controlador de cargas recebe esta energia e fornece para as baterias de tal modo que, não ultrapasse dos 13,8 V e controla a energia fornecida para o inversor e as cargas, limitando o fornecimento quando a bateria tem um nível mínimo de 11,5 V (Souza, 2003).

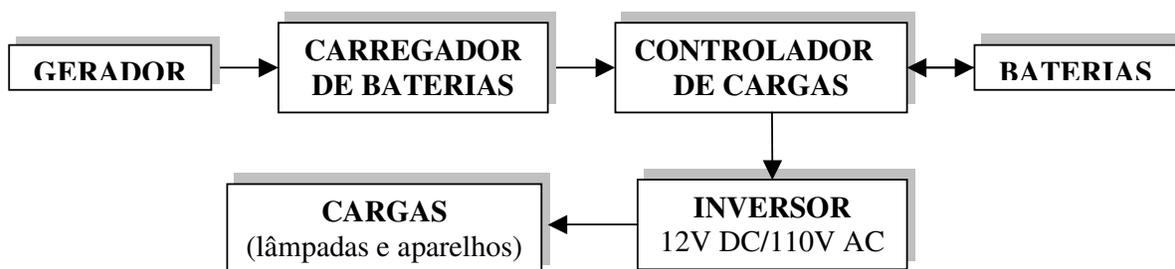


Figura 7. Esquema de ligação para armazenamento e fornecimento de energia elétrica.

## 4. RESULTADOS OBTIDOS

Os sistemas de multiplicação, tanto de relação 16:1 quanto de 64:1, apresentaram resultados satisfatórios, que dependem exclusivamente da potência desejada na saída do gerador utilizado.

Para uma roda d'água com diâmetro de 1,20 m gerando energia elétrica, os testes levaram a Eq. (1), sendo P, a potência em watts, Q, a vazão em litros por segundo e, D, o diâmetro da roda em metros (Souza, 2003).

$$P = 7,16.Q.D \quad (1)$$

O fator de multiplicação 7,16 da Eq. (1) foi encontrado experimentalmente, a partir do rendimento do gerador e da roda d'água. Os resultados foram obtidos considerando que a roda ao gerador AC com rotor de ímãs permanentes são mostrados na Tab. (1), onde  $P_s$  é a potência na saída do gerador, em watts, T, é o torque medido no eixo do gerador.

Tabela 1. Valores de vazão de água na roda, e potência e torque do gerador.

Vazão Q (l/s)	Potência $P_s$ (W)	Torque T (N.m)
1	8,6	2,74
5	43	13,69
10	86	27,38
20	172	54,74
30	258	82,12
40	344	109,50
50	430	136,87

No caso do cata-vento, também gerando energia elétrica, os resultados dependem da velocidade do vento. A respectiva potência fornecida pelo gerador pode ser calculada com o auxílio da Eq. (2), onde P é a potência, dada em watts, D é o diâmetro do cata-vento, dado em metros e, V é a velocidade do vento, em metros por segundo (Bianchi, 2003).

$$P = 0,15.D^2.V^3 \quad (2)$$

O fator de multiplicação 0,15 da Eq. (2) é um valor dependente do coeficiente de potência do motor eólico e da densidade do ar, e o diâmetro do cata-vento é 3,40 m. As potências fornecidas pelo gerador são mostradas na Tab. (2).

Tabela 2. Valores das potências determinadas pela velocidade do vento.

Velocidade do vento V (m/s)	Potência P (W)	Torque T (N.m)
3	46,8	14,90
5	216,8	69,00
7	594,8	189,33
9	1264,1	402,38
11	2308,0	734,66

Faz-se necessário deixar claro que em situações climáticas normais durante o dia a velocidade do vento não ultrapassa de 12 m/s. Além de que, o cata-vento possui um sistema de freio de segurança que pára a roda quando o vento está muito forte.

## 5. CONCLUSÃO

Portanto, através dos multiplicadores de velocidades apresentados, com relação de 16:1 e 64:1, é possível obter velocidades suficientes para acionar os geradores com rotores de ímãs permanentes de 600 rpm a 1800 rpm. As vantagens mais importantes são: neste tipo de transmissão não há deslizamento e desgaste precoce de mancais, correias e todas as partes mecânicas. Também o custo previsto é bem menor que o de transmissão de polias e correias. É um sistema compacto e modular

que pode ser aplicado tanto em motores eólicos quanto em rodas d'água permitindo assim uma utilização em vários sistemas de acionamento mecânico.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem primeiramente a Deus, sem o qual nada poderia ser feito. A PROPP – UNESP. A Fênix Cata-ventos, NH Geradores e ZM Bombas pelas doações realizadas durante o desenvolvimento do projeto. Aos técnicos, Benedicto, Rodolfo, Alex Teixeira e José Carlos pelo apoio técnico.

## 7. REFERÊNCIAS

- Melconian, S., 1949, “Elementos de Máquinas”, 3ª edição, Ed. Érica, São Paulo.
- Souza, T. M., Leonel, R. C., Bianchi, I., 2003, “Evaluation of the permanent magnets generator for power supply moved by windmill of blades”, WWEC 2003 – The World Wind Energy Conference and Renewable Energy Exhibition. ISBN 0-95846639-4.
- Bianchi, I., Souza, T. M., Affonso, C. E., 2003, “Software for Small Wind-Electric Power Plants Design”, WWEC 2003 – The World Wind Energy Conference and Renewable Energy Exhibition. ISBN 0-95846639-4.
- Souza, Teófilo M., Bianchi, I. et al 2003. “Desenvolvimento de Software Para Dimensionamento de Microhidrelétricas com Geradores a Ímãs Permanentes e Potências até 10kW”. 5<sup>th</sup>. Latin-American: Electricity Generation and Transmission. São Pedro-SP. ISBN 85-903471-1-7.

## SPEED MULTIPLICATION SYSTEM FOR AEOLIAN ENGINES AND WATERMILL

### **Teófilo Miguel de Souza**

Centro de Energias Renováveis - UNESP - Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Bloco IV - Bairro Pedregulho  
CEP 12516-410 - Guaratinguetá - SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

### **Marco Aurélio Ferla de Oliveira**

Centro de Energias Renováveis - UNESP - Guaratinguetá  
R. Padre Roma, nº 8 - Nova Guará  
CEP 12515-540 - Guaratinguetá - SP  
E-mail: maferla@ig.com.br

*This paper presents the project and development of a multiplication of speed system aimed at aeolian engines, for example, a windmill, or watermill. It consists in increasing the rotation supplied for referred the types of engines. The low rotation, through torque transference, is transformed into enough rotation to set in motion a permanent magnets generator for supply of electric energy. Using a system of adaptable coupling for aeolian engine or watermill, the rotation is transferred to a crown that is fixed by means of chain to a turning gear (crown/turning gear = 4:1 ratio). The turning gear is connected in an extremity of a axle that has, in the other extremity, a crown of the same size that the first one cited. This crown is fixed by means of another chain to a second turning gear that is fixed in the axle of the generator. The system tun with aid of axles and ball bearing imprisoned the bearing which are fixed in a base. The transmission of rotation with pulleys and leather straps produces greaters all efforts in the system, therefore it has the objective to minimize the landslide between the components that, generally, are of great dimensions. The*

*system developed with crowns, chains and turning gears had its dimensions reduced and revealed more efficient than others usually used with pulleys and leather straps.*

*Key-words: speed multiplier; alternative energy; watermill; windmill*



## UTILIZAÇÃO DE MATERIAL ALTERNATIVO PARA FABRICAÇÃO DE RODA D'ÁGUA PARA AMBIENTES QUIMICAMENTE AGRESSIVOS

### **Teófilo Miguel de Souza,**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá, SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

### **Vinícius Lourenço dos Reis Silva**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá,  
E-mail: mec03264@feg.unesp.br

### **Carlos Alberto Junqueira Branco Junior**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá,  
E-mail: civ03168@feg.unesp.br

### **Murillo dos Santos Menezes**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá,  
E-mail: mec03181@feg.unesp.br

### **Ederaldo Godoy Júnior**

Depto. de Energia da UNESP–Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá, SP  
Depto. de Eng. Mecânica da Universidade de Taubaté, R. Daniel Danelli, s/n, Taubaté, SP  
E-mail: godoyjr@feg.unesp.br

### **José Luz Silveira**

Depto. de Energia da UNESP–Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá, SP  
E-mail: joseluz@feg.unesp.br

**Resumo.** *Este trabalho apresenta o projeto, dimensionamento e desenvolvimento de uma roda d'água, com materiais alternativos de modo a ser utilizada em ambientes quimicamente agressivos. O material escolhido inicialmente é o PVC, utilizado em tubulações de água e esgoto, em substituição aos materiais metálicos. A aplicação inicial é para acionamento mecânico de máquinas e geração de energia elétrica para pequenas potências. É necessário levar em consideração a vazão da queda d'água em litros por segundo e a altura útil. Assim calcularam-se todas as dimensões dos componentes*

*das rodas d'água com maiores possibilidades de serem utilizadas no ambiente mencionado. Entre as dimensões estão o diâmetro da roda no ponto de incidência da água, o volume de cada cuba de água, a quantidade de cubas, as dimensões do eixo, as dimensões dos raios da roda e o modo de fixação do eixo a roda. Os dimensionamentos foram feitos para a roda d'água com instalação específica para uso em saída de biodigestores, esgotos e outros resíduos líquidos com rendimento otimizado para as faixas*

*de altura vertical útil acima de 0,8 metros e vazão a partir de 1,0 litro por segundo. Para quedas d'água com grande volume e pouca altura vertical, também é possível a construção de uma roda mais larga ou a opção para uso de duas rodas estreitas com um sistema de transmissão para obtenção da rotação necessária ao bom funcionamento do gerador elétrico.*

**Palavras-chave:** geração de energia, roda d'água, PVC, aeróbico.

## 1. INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de esgoto tradicionais, operam geralmente por sistema aeróbico do tipo lodo ativado, um sistema bastante eficiente do ponto de vista sanitário, pois reduz em média 95% da carga orgânica do esgoto sanitário, porém pouco eficiente energeticamente, pois os sistemas de aeração consomem muita energia elétrica quando comparado com o sistema conjugado anaeróbico-aeróbico.

Visando otimizar os sistemas aeróbios-anaeróbios, desenvolveu-se uma miniETERA (mini estação de tratamento de esgoto e reuso de águas) auto-suficiente energeticamente.

O processo anaeróbico (sem a presença de oxigênio) é responsável pela redução de cerca de 80% da carga orgânica do esgoto sem a utilização de equipamentos eletromecânicos, utilizando apenas a força da gravidade. Esse sistema ainda gera biogás combustível que pode ser convertido em energia elétrica.

O processo aeróbico (na presença de ar) necessita de aeração, onde o sistema de roda d'água para complementação dessa aeração é realizada utilizando a diferença de altura entre a saída do sistema biodigestor anaeróbico e a entrada do biodigestor aeróbico, colocando entre eles uma roda d'água feita de PVC para simultaneamente oxigenar o meio e gerar energia elétrica para controle e monitoramento da miniETERA.

## 2. ASPECTOS TÉCNICOS SOBRE RODAS D'ÁGUA E O SISTEMA PROPOSTO.

As rodas d'água são classificadas de quatro maneiras, dependendo somente de como é a região de entrada da água (Macintyre, 1983):

- Rodas de cima
- Rodas de baixo
- Rodas de lado
- Rodas flutuantes

No caso específico do projeto mencionado será utilizado o tipo de roda de cima, que podem chegar a um rendimento total entre 0,70 e 0,80 dependendo do tamanho da queda. Para a construção da roda foi necessário levar em consideração a vazão da queda d'água e a altura útil da queda, neste caso uma queda de 1,30 m e uma vazão de 70 m<sup>3</sup>/dia, todo o dimensionamento levou em conta a energia convertida em rotação na roda e todo seu dimensionamento será feito a partir desses cálculos. Essas dimensões são o diâmetro da roda no ponto de incidência da água, o volume de cada cuba de água, a quantidade de cubas, as dimensões do eixo, as dimensões dos raios da roda e o modo de fixação do eixo à roda. Sendo Q a vazão em metros cúbicos por segundo, H a altura de queda da água em metros,  $\eta$  o rendimento, a potência prevista teórica em cv (cavalo vapor) pode ser obtida através da Eq. (1):

$$P = (1000 \times Q \times H \times \eta) / 75 \quad (1)$$

O material utilizado na construção da roda é um material alternativo, já que sua utilização será em ambientes quimicamente agressivos. O material utilizado será de PVC, utilizado em tubulações de água e esgoto, evitando assim os problemas como a corrosão, muito comuns nas rodas convencionais.

### **3. TIPOS DE RODAS D'ÁGUA**

As rodas d'água giram, comumente, num plano vertical e se distinguem das turbinas porque não apresentam variação na pressão entre a entrada e a saída do sistema. Há uma grande variedade de tipos. A seguir serão apresentados os tipos mais comuns (Macintyre, 1983).

#### **3.1. Roda Sobreaxial**

A água neste tipo de roda d'água, entra na parte superior da roda, acima do eixo de rotação, e é captada por pequenas bolsas, ou conchas. Quando essas bolsas ou conchas se enchem de água, o fluxo de água impulsiona a parte superior da roda, que gira. Ao atingirem a parte inferior do percurso, as bolsas se esvaziam. E reinicia-se o ciclo. As rodas sobreaxiais são usadas para moer grãos e gerar eletricidade. Apesar de terem uma eficiência alta (cerca de 80%), funcionam a baixa velocidade e geram pouca potência em relação ao volume que ocupam: potências nominais de 22 kW, girando a oito rotações por minuto.

#### **3.2. Roda Subaxial**

As rodas subaxiais recebem a energia pelo impacto da água corrente na parte inferior das rodas, em suas pás, geralmente planas, e tem uma eficiência máxima de 35% a 45%, em condições ideais. Devem ser construídas com uma armação lateral que evite a turbulência. E convém que o canal que conduz a água para a roda seja ligeiramente mais largo que esta. Uma variação da roda subaxial, usada principalmente nas regiões montanhosas da Europa, é a roda horizontal. A água vem de um canal, aberto ou fechado, e cai a mais ou menos três metros sobre a roda. A água que atinge as pás, que são inclinadas e planas, de modo que a água caia perpendicularmente sobre elas. Com o impacto da água, a roda gira. As rodas horizontais são construídas geralmente de madeira e atingem eficiência de 20%.

#### **3.3. Roda Subaxial Poncelet**

Nesse tipo de roda subaxial, a água, que incide na parte inferior da roda, montada verticalmente, provém de uma pequena barragem com uma abertura variável em sua parte inferior. A água que vai da barragem para a roda tem uma pressão igual à altura da água na represa. A água sai na forma de um jato, tanto mais forte quanto maior a pressão. A velocidade do jato varia com a raiz quadrada da altura de água na represa. Isto é, se aumentarmos de 4 vezes a altura da água na represa, a velocidade do jato será multiplicada por dois. A água incide sobre a roda e penetra em pequenas conchas, formadas pelas palhetas da roda. Sobe pela curva das palhetas, exercendo uma força na roda, que gira. É despejada num reservatório de saída, assim que a concha inicia o movimento ascendente. Quase toda a energia do jato é convertida em rotação da roda, uma vez que a água já usada atinge o reservatório de saída com velocidade muito pequena. Essas rodas têm eficiência entre 70% e 80%. São geralmente feitas de madeira, menos as palhetas que são de aço laminado. O diâmetro das rodas Poncelet varia de 5 metros, no mínimo, até um máximo de 4 vezes a diferença de altura entre o nível da barragem e do reservatório de saída. Essas rodas têm muita força, mas baixa velocidade, sendo por isso apropriadas para executar trabalhos mecânicos e não para geração de energia elétrica.

A Tab.(1) mostra um quadro das características principais dos diferentes tipos de rodas d'água.

Tabela 1 – Quadro das características dos diferentes tipos de rodas d’água

Tipo	H – nível (metros)	D – diâmetro da roda (metros)	Rotação ideal (rpm)	Eficiência (%)	Adaptabilidade às variações de		Construção	Materiais
					Vazão	Nível		
Subaxial	2 – 5	3 x H	$\frac{25x\sqrt{H}}{D}$	35 – 45	Boa	Regular	simples	metal madeira
Poncelet	1 – 3	2 x H a 4 x H	$\frac{25x\sqrt{H}}{D}$	60 – 80	Boa	Regular	relativamente simples	metal madeira
Sobreaxial	3 – 10	H a 3 x H	$\frac{25x\sqrt{H}}{D}$	60 - 80	Boa	Nenhuma	simples	metal madeira

Normalmente as rodas d’água são feitas de materiais metálicos, sofrendo muito com a incidência da corrosão. No projeto proposto o aspecto inovador é a utilização de um material alternativo em substituição ao material metálico. A princípio utilizar-se-á como material alternativo o PVC, que é utilizado em tubulações de água e esgoto. A utilização deste, justifica-se por ser um material de menor custo em relação ao aço inox e por não apresentar danos ocasionados pela corrosão.

#### 4. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA AERADOR E GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA

##### 4.1. Localização da roda d’água na estação de tratamento de efluentes MINIETERA

Os testes da roda d’água construída foram feitos na miniestação de tratamento de efluentes e resíduos localizada no Campus de Guaratinguetá, conforme mostrado na Fig.(1b).



Figura 1 – Configuração da miniETERA e a localização da roda d’água

##### 4.1.1. Material utilizado na fabricação

O material utilizado na construção dessa roda d’água é basicamente o PVC. O PVC é um material leve ( $1,4 \text{ g/cm}^3$ ), o que facilita seu manuseio e aplicação. É resistente à ação de fungos, bactérias, insetos e roedores, resistente à maioria dos reagentes químicos, resistente às intempéries (sol, chuva, vento e maresia) e é também um bom isolante térmico. Sua vida útil em construções é superior a 50 anos. As placas utilizadas são de dois metros de comprimento e um metro de largura com espessuras de cinco milímetros. Os cubos foram feitos de caixas de esgoto modulares com

diâmetros de 300mm. Para suportar o peso da água, o eixo foi feito em aço inox, com diâmetro de 25mm e comprimento de dois metros.

#### 4.1.2. Configuração e construção da roda d'água em PVC

Para a construção da roda d'água foram utilizados a base de duas caixas múltiplas de esgoto em PEAD (Polietileno de alta densidade) e placas de PVC com 5 mm de espessura.

A Fig. (2) mostra a seqüência da construção e montagem da roda d'água, com diâmetro de um metro, com o aerador. A roda é composta de 16 cubas, com uma largura de 150 mm, com um volume aproximado de 6,7 litros cada uma.

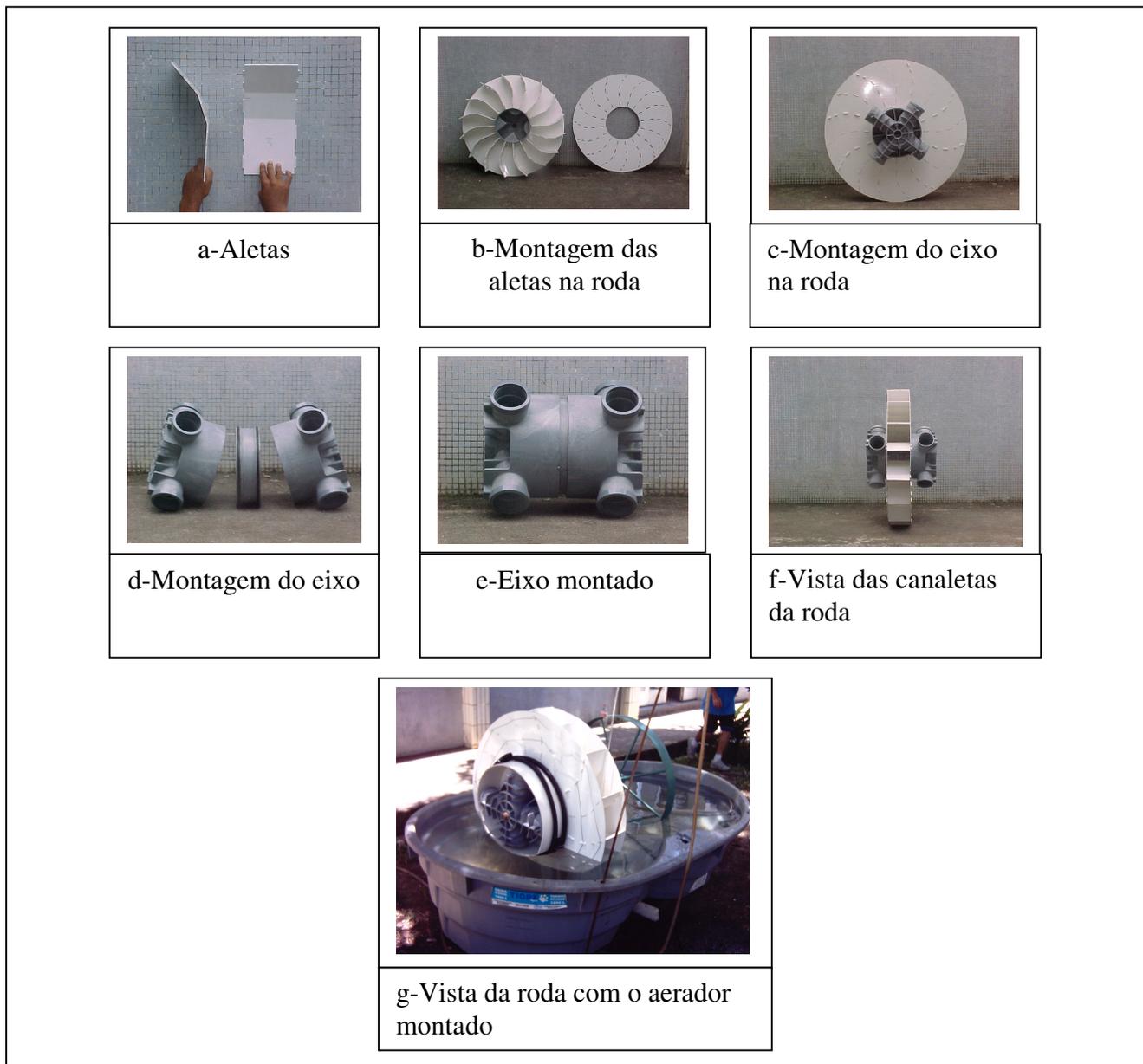


Figura 2 – Montagem da roda d'água com diâmetro de um metro e o aerador

### 4.1.3. Configuração da roda d'água acoplada ao gerador de energia elétrica.

Para a geração de energia elétrica, a roda d'água foi acoplada a um gerador com rotor de ímãs permanentes (Souza, 2003) que pode fornecer até 1000W de potência elétrica por meio de uma correia de borracha em V tipo A.

A Figura 03 mostra a roda d'água acoplada ao gerador elétrico com rotor de ímãs permanentes.

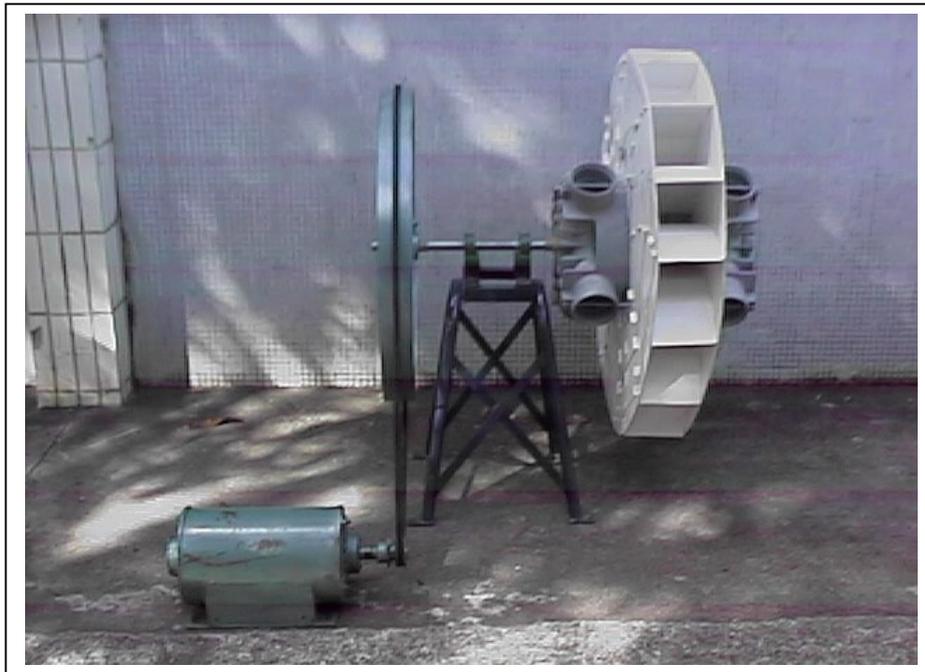


Figura 03 – Vista da roda d'água acoplada ao gerador de energia elétrica.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

As medidas mais importantes foram realizadas, entre elas a da rotação e a da potência fornecida pelo gerador. A rotação ideal de acordo com a Tab.(1) é 25 rpm. Nos ensaios a rotação teve seus valores entre 20 rpm e 50 rpm, com a ligação de mais cargas elétricas e menos cargas elétricas, respectivamente. A seguir serão apresentados os resultados experimentais obtidos com a geração de energia elétrica e a aeração do líquido.

### 5.1. Geração de energia elétrica

Para uma roda d'água aerando a água e gerando energia elétrica, os testes levaram a Eq. (2), sendo P, a potência em watts, Q, a vazão em litros por segundo e, D, o diâmetro da roda em metros.

$$P = 5.Q.D \quad (2)$$

O fator de multiplicação 5 da Eq. (2) foi encontrado experimentalmente, visto que a roda d'água estava trabalhando com duas funções, como já foi mencionado acima. Se a roda d'água trabalhar somente gerando energia, este fator de multiplicação passa a ser acima de 7 (Souza, 2003).

Para a roda com diâmetro de 1,00 m, o gerador AC com rotor de ímãs permanentes fornece as potências mostradas na Tab. (2), onde  $P_A$  é encontrada com a roda d'água aerando a água e gerando energia elétrica, e  $P_S$ , somente gerando energia elétrica.

Tabela 2. Potência elétrica obtida experimentalmente da roda d'água construída com PVC com 1,00 m de diâmetro de acordo com a vazão.

Vazão Q (l/s)	Potência P <sub>A</sub> (W)	Potência P <sub>S</sub> (W)	Armazenamento em 10 h (Litros)	Vazão durante 4 h Q(l/s)	Potência P <sub>A</sub> (W)	Potência P <sub>S</sub> (W)
1	5	7	36000	2,5	12,5	17,5
2	10	14	72000	5,0	25	35
3	15	21	108000	7,5	37,5	52,5
4	20	28	144000	10	50	70
5	25	35	180000	12,5	62,5	87,5
10	50	70	360000	25	125	175
20	100	140	720000	50	250	350
30	150	210	1080000	75	375	525
40	200	280	1440000	100	500	700
50	250	350	1800000	125	625	875

## 5.2. Aeração do líquido

Conforme mostrado na Fig.(2.g), a aeração do líquido que sai da miniestação de tratamento, é feita colocando-se uma mangueira corrugada de cada lado da roda, quando a roda está com a metade submersa no líquido. Deste modo quando a roda movimentada e a mangueira passa no ar esta recebe o mesmo. Ao passar dentro do líquido esta mistura o líquido com ar. O movimento periódico ar-líquido-ar-líquido faz com que o líquido seja aerado.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho, portanto, apresentou o projeto e desenvolvimento de uma roda d'água confeccionada em PVC para ambientes quimicamente agressivos. Sua utilização pode ser para permitir a aeração de líquidos, principalmente o que sai de biodigestores, assim como acionar um gerador com rotor de ímãs permanentes para fornecer energia elétrica. Os experimentos demonstraram que para a geração de energia elétrica, com uma potência satisfatória, o mais recomendável, quando há uma pequena quantidade de água, é armazenar durante todo o dia e utilizar durante cerca de 4 horas durante a noite.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a PROPP – UNESP, a ZM Bombas, a NH Geradores e a Tigre pelas doações realizadas durante o desenvolvimento do projeto. Aos técnicos Rodolfo e José Carlos pelo apoio técnico.

À FAPESP pela bolsa IC 03/12697-4 e ao CNPQ pelas bolsas de Doutorado e Produtividade em Pesquisa.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Macintyre, A J., 1983 “Máquinas Motrizes Hidráulicas”, Ed. Guanabara Dois S.A.

Souza, T. M., Leonel, R. C., Bianchi, I., 2003, "Evaluation of the permanent magnets generator for power supply moved by 18-blades windmill", WWEC 2003 – The World Wind Energy Conference and Renewable Energy Exhibition. ISBN 0-95846639-4.

Souza, Teófilo M., Bianchi, I. et al. 2003. "Desenvolvimento de Software Para Dimensionamento de Microhidrelétricas com Geradores a Ímãs Permanentes e Potências até 10kW". 5<sup>th</sup>. Latin-American: Electricity Generation and Transmission. São Pedro-SP. ISBN 85-903471-1-7.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### THE USE OF ALTERNATIVE MATERIAL TO MAKE WATER WHEEL FOR AGGRESSIVE CHEMICALLY ENVIRONMENT

**Teófilo Miguel de Souza,**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá, SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

**Vinícius Lourenço dos Reis Silva**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá,  
E-mail: mec03264@feg.unesp.br

**Carlos Alberto Junqueira Branco Junior**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá,  
E-mail: civ03168@feg.unesp.br

**Murillo dos Santos Menezes**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá,  
E-mail: mec03181@feg.unesp.br

**Ederaldo Godoy Júnior**

Depto. de Energia da UNESP–Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá, SP  
Depto. de Eng. Mecânica da Universidade de Taubaté, R. Daniel Danelli, s/n, Taubaté, SP  
E-mail: godoyjr@feg.unesp.br

**José Luz Silveira**

Depto. de Energia da UNESP–Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá, SP  
E-mail: joseluz@feg.unesp.br

***Abstract.** This work presents the project, measurements and developments of a water wheel, with alternative materials in order to be used in chemically aggressive environments. The chosen material is the PVC used in water pipes and drain replacing the metal material. The main use is to start working the machine and to generate a small amount of energy. It's necessary to consider the water flow in liters per second and height of the waterfall. All the dimensions of the water wheel components were calculated to be used the mentioned environment. Among this dimensions are the diameter of the wheel in the incident point of the water the volume of each water blade, the amount of blade, the axis*

*dimensions of the wheel spoke and the way to stick the axis to the wheel. All the calculations were made for the water wheel with specific installations for the height of the water fall higher than 0.8 meters and 1.0 liter per second water flow, in the exits of the biodigestors, drains and other liquids residues. It's possible build a large wheel or use two narrow ones with a transmission system to obtain the necessary rotation to get the electric generator working well, for water falls with a large amount of water and low vertical height.*

**Keywords:** *energy generation, water wheel, PVC, aerobic.*



## **SOLAR PARABOLIC CYLINDRICAL HEATER WITH FILM OF POLYETHYLENE FOR HEATING OF WATER AND DRYING OF GRAINS**

### **Teófilo Miguel de Souza,**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá, SP  
E-mail: teofilo@feg.unesp.br

### **Fernando de Haro Moraes**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá,  
E-mail: mec03188@feg.unesp.br

### **Leandro Yossida**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá,  
E-mail: mec05303@feg.unesp.br

### **Murillo dos Santos Menezes**

Centro de Energias Renováveis – UNESP-Guaratinguetá,  
E-mail: mec03181@feg.unesp.br

**Abstract.** It was developed in the Energies Renewable Center of Unesp-Guaratinguetá a parabolic cylinder solar heater with a polyethylene film. The equipment is used to the water heat and also by a substitution component system makes it able to dry grains, like rice, coffee, flour, bean, corn and soy. It has three meters of length, 0,8 meters of width and 0,8 meters of height. The water heating system is composed by 5 blackish copper pipes (9 mm of diameter) connected in series, located at the parabola focus in the length direction. The system has capacity to make the outflow water temperature reaches around 200 centigrade. The daily 5 hours of sun cans produce 200 liters of hot water. The same parabolic cylinder heater can be used to dry grains by a variable components system. This variable component system is a square copper pipe with 3 meters of length; 0,1m of width; 0,06m of height and it is in the parabolas focus located. It is possible to use his own inclination to the grains descent. The daily production depends on the size and on the temperature that each kind of grain can resist without burn.

## **1. INTRODUCTION:**

The alternative energy source research grows up in the 70 decade with the oil crisis; up to that time, there were barely new sources experiences. Its brings, the need of been researching and investing in new others energy sources. At present, the environmental impact is the conventional sources problem. In a near future the heat liberated by the energy consumption will be the cause of the deep world climate modifications. In the

environmental backups and fuel questions exists the technology domain. The third world and in development countries are the biggest alternative energy sources holders. The first world countries are years and years dedicated for take advantages of those development technologies; it is a new economic domain form. Brazil receives around 2.000 kWh/m in a year, what represents 685 W/hour/day and considering on average eight hours of the sun daily lighting the land. For calculations effects, must be taken the most intense four hours of sun (10:00am to the 2:00pm) and without clouds days. Brazil is the second biggest energy country quantity receiver of the world; around 29 quintillions of kWh resulted by his territorial extension and tropical situation. By the researches datum obtained in 1999, the electric energy consumption in Brazil is 42% directed for the buildings sector, being 84,1% corresponding to companies and residences and 15,9% for the administration and achieving public, being 13,8% of the Internal Brute Product of the country. In agreement with the Brazil energy company manual the residential sector takes 25% of responsibility for the national energy consumption. The electric shower is the second biggest residence consumer, corresponding to 25%, barely losing for the 30% of the refrigerator. His utilization reaches a peak on 6:00pm to 7:00pm, corresponding to 8,5% of the national energy demand in this schedule. These facts aim the electric thermal source importance of the hot water obtaining, mainly in an energy rationing time being that Brazilian electric hydraulic energy generation is practically exhausted. The solar energy collectors utilized for the hot water output can be divided in two groups: the flat and the alternatives with deferments forms, being the flat more utilized. The residential heater water system are generally composed by flat collectors that produces hot water varying of 60°C to 100°C temperatures, and basically consists in a copper or aluminum pipes streamer fixed to a blackened plate and covered with a transparent glass that, heats all the system when exposed to the solar light, being the heat transferred to the water by conduction. The cylindrical parabolic collectors resemble to a middle cut drum, internally cover by a mirrored stuff, concentrating the solar rays about a straight line in the focus, in which is a pipe installed for the water passes, reaching 250°C medium temperatures. The project has as main objective: the optimized profile obtaining of a reflector parabola that is composed by a continues mirrored sector, by a metallic structure supported, equipped with a automatic complex system that accompany the sun, so this way the collector is always perpendicularly positioned to the solar rays. The efficiency peak will be the in the schedule between 9:00am and 3:00pm, in decrease or no cloud regions. They will be focused innovations about the following parameters: the parabola profile obtaining form, the constructive optimization procedure, the peculiar stuff utilization, the radiant energy capture and reflection optimization. This work presents economic, thermal and stuff feasibilities. The developed collector has as main innovation: his parabolic format that concentrates all the received radiation in copper pipes that are fixed in the parabola focus. The water after been heated goes for a conventional boiler. The reached temperatures in focus of the parabola are relative high when compared with a conventional collector, becoming him more competitive. The agricultural product drying is an old civilization practice, when there was not grains storage worry and the naturally grains humidity diminutions occurs in the own field. The drying was deed in natural environment conditions, mainly dictated by the solar energy incision and by the air movement. Lately, the drying conditions it tried to be partially controlled, and this passed to be deed in special stoves or heated rooms. In Brazil, a significant output part of grains still being dry by a primitive form, or deed during a long period of natural procedure in fields. The utilized

drying grains methods are enough diverse. They can be classified by the following topics: the natural drying, that is deed in the field; and the artificial drying, that can be deed in low temperatures (natural or lightly heated air) or in high temperatures (provoked by air streams of artificial heating). The main objective of the alternative collectors studied is the making cost reduction, seeking to his industrial and domestic water heating use socialization, since the efficiency of even has a favorable benefit-cost. They demand a high initial investment; this explains the decreases rate of solar systems development for the water heating in the world. The development of smaller cost of a good thermal performance heater is urgently necessary. With this objective, the parabolic solar collectors are being developed to finish with those deficiencies. The parabolic solar collector is today a verified fact, already having been a study object by several researchers in the international scenery. The captor concentration systems forms are normally constituted of parabolic, are-spherical, cylindrical-parabolic, conical and log-conical. To have a satisfactory performance system is necessary to have a direct radiation, clear heaven without clouds (Duffie & Beckman, 1991). The philosophy adopted to do the solar collector project is: simple, with a high benefit-cost, more efficient than the others and more specifically destined to the water heating. For been utilized by the urban population, or even by the rural where they have the electric energy difficult access. Was based on this initially reasoning line that this kind of solar heater collector was developed. It is easy to know that the consumers will give preference to that kind of solar equipment, mainly those that they are economic worried and inhabit sunny regions. With a broadly diffused conception the solar energy is associated with the low output temperature, mainly for domestic purposes. The collector will find application in the domestic heating water, in the hospital sterilization and in the industrial energy generation. For the domestic application is utilized a conventional boiler for the temperature control, for a hospital the system must be adapted for high temperatures utilizations for the water vapor in the equipments sterilization, clothes washes and food making. Increasing the project proportions, can turns possible the use for the electric energy generation, what already is done in countries as German.

In the Table 1 there are some hot water consumption and application data.

Table 1. Hot water consumption estimative.

<b>Application</b>	<b>Consume liters/day</b>
Provisional lodging of work	24 by person
Popular house or rural	36 by person
Residence	45 by person
Apartment	60 by person
Hotel (without include kitchen and laundry)	36 by person
Hospital	125 by room
Restaurants and similar	12 by meal
Laundry	15 by kg of dry clothes

There are solar parabolic collector prototypes that already can be found in the European market prepared for the heat generation. That showed down project consists, at least, in 100m<sup>2</sup> solar field area utilization. By example: the hotel roof, with his pressurized system supplying hot water to a deaden tank storage. The tank supplies the pressurized water to 180 °C to a vapor generator, which produces the saturated vapor to 4.5 bar of pressure (148

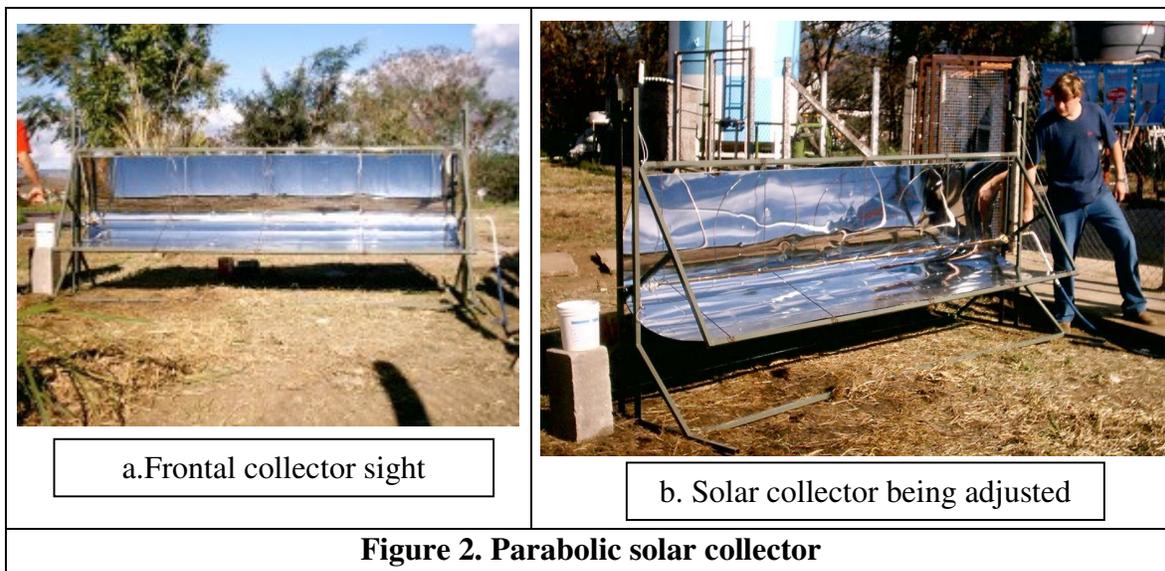
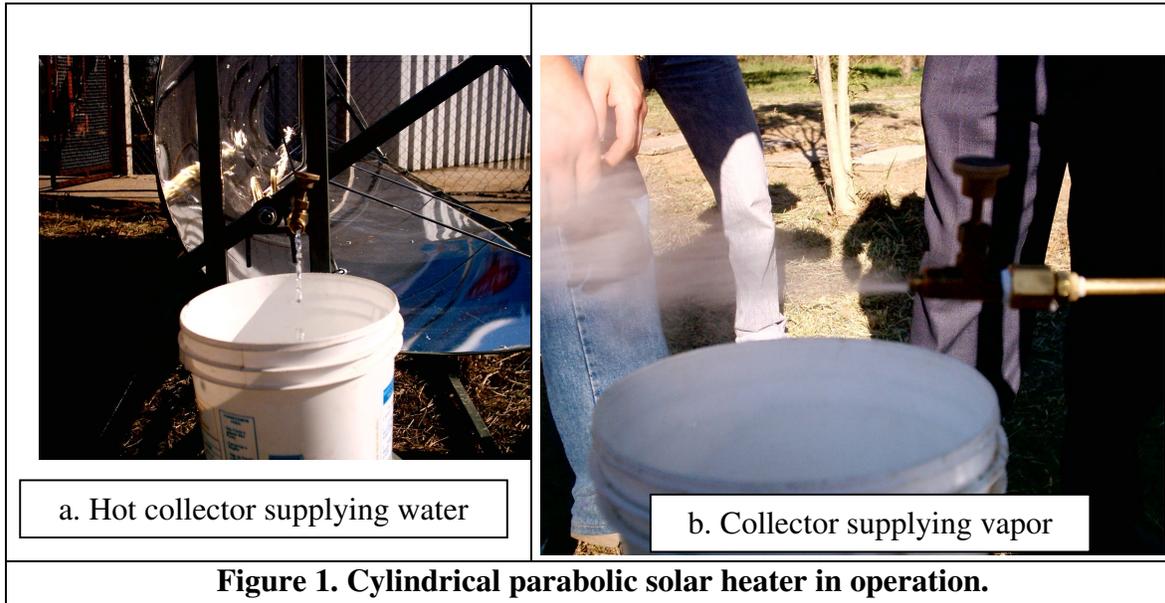
°C). This generator feeds the existing vapor distribution. By this arrangement, the excessive solar heat is not wasted, it is supplied to other consumers. With a 116 kilowatts nominal cooling capacity, the generator supplies a significant part of the hotel rooms conditioned air. The existing compression refrigerators will supply this. The laundry is the main vapor consumer that works around 20 hours in the high station. The laundry vapour demand moves from 300 to 700 kg/hr, approximately on average it is 240 kW. Already with the heater can be obtained an extremely durable grain, but also high perishable seeds. If they were reaped in good conditions and subsequently maintained in short humidity contents and low temperature, they can retain their sprout's power and some other qualities by long periods. The objective of adequate storage grain is to maintain his biological, physical and chemical durations qualities, likely immediately after sprout. The dry operation is an important process part that antecedes the storage. The grains dry is dried from the hot air that leaves the solar collector.

### **3.DESCRPTION OF THE SOLAR COLLECTOR PROJECT**

The solar collector proposed construction, has as main characteristics a high solar radiation search mechanism and a unlike conventional parabolic collector form, followed the following procedures:

1. The parabola project dimensions- the collector dimensions were defined with the pretension of obtain a 3,0 m<sup>2</sup> parabolic reflection area.
2. The reflector parabola design – the parabola profile design was did in AutoCAD, printing and extending it for the real size.
3. The parabola profile making- The parabola profile was reproduced in a wood matrix with fixed points with the utilization of nails for give the parabolic form to the steel bars, optimizing his making process.
4. The fixed parabola base construction- was built a metalon 25x25mm metal structure for the reflector parabola fixation. The structure permits its turns in approximately 180°.
5. The mirrored plate fixation in each parabola part– To the mirrored plate fixation in the parabola was deed above the 25x3mm steel bars, rivets fixed, adjusting it to the parabola profile.
6. The coppers pipes fixation- was utilized civil iron to position the copper pipes (5mm of diameter) in the parabola focus.
7. Coppers pipes arrangement- it was deed to a streamer form, aiming at the maximum solar radiation capture.
8. The square copper pipe arrangement in the copper pipes place– The square pipe is located in the parabola focus aiming at the maximum solar rays capture.
9. The parabola fixation on the fixed base – The cylindrical parabolic collector is fixed to his base in a 30° angle approximately, being possible to promote a high solar rays capture.
10. Solar rays accompaniment system- was utilized an electric motor with low energy consumption (3,5volts). The motor turns on when the solar ray enter parallel to a rectangular pipe fixed perpendicularly to the parabola and turn on the photo-sensor located in the bottom of this pipe. There is also a timer that guarantees that the photo-sensor will be deactivated during the night and activated during the day.
11. Structure paint – All the solar collector structure was painted to protect it of the variations climate, minimizing the degradation exposition effects of the nature phenomena.

In Figure 1 and 2 show collector.



#### 4. EXPERIMENTAL PROCEDURE:

They were carried out experiences with the maximum determination temperature prototype in the focus achieved, after a determinate procedure to find the best optimization form and location to position the heater in their perfects coordinates. The temperatures were obtained from a digital thermometer put in the following points: in the focus, in the water exit and another to the environment temperature determination. They will determine the real outflow temperatures. In the grains heater case was deed grains drying time experiences.

#### 5. RESULTS:

The most important measures were of temperature and outflow. An ideal daily outflow in a residence with 5 persons, is approximately 200 l, as can be seen in the Table 1. The outflow obtained in the experiences was limited by the cooper pipes diameter, showed in the Table 2.

Table 2. Results obtained during the experiments

	<b>Experiment 1</b>	<b>Experiment 2</b>
Environment temperature (°C)	16	16
Focus temperatura (°C)	117	84
Water temperature (°C)	85	50
Outflow (ml/s)	2,2	7,14
Outflow (l/h)	7,9	25,6
Outflow (l/7h)	55,3	179,2

In the grains drying is not possible to calculate, the exactly drying time, due to many variables that are involved in the procedure. The variable elements includes: the relative environment air humidity temperature variations, of the hot air humidity that leaves the heater, after pass through the grains mass, cleaning the grains and the hot air stream intensity, etc. The problem would be simpler if it will not have hot air and others variations factors, and if those leaves the heater being always saturated. Is sufficient say that; the grains drying is not an exact science and, like this, requires a constant procedure vigilance.

## **6. CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS:**

The solar collector developed is enough viable for the water heating and to the grains dry, being able to bring favorable benefit-cost and a high electric energy economy. His operation is very simple; it has an easy handling automatic solar accompaniment mechanism. The automatic procedure of solar accompaniment has a fundamental optimization importance for the solar radiation absorption. However, the reflector stuff utilized does not have a so high efficiency, as mirror, that fact didn't give so expressive experience results. The near step will be testing a new reflector stuff that has a better benefit cost. That will be able to obtain bigger temperatures than the conventional collectors, and heat a bigger water quantity in smaller time, showing his high efficiency. Therefore, the parabolic solar collector developed for heat water and dry grains, has a high efficiency and can becomes a market product.

## **7. REFERENCES:**

- Bezerra, A.M., 2001, Aplicações Térmicas da Energia Solar, Editora Universitária, João Pessoa, Pb.
- Solar Manual Cooker, 1982,Brace Research Institute, Quebec, Canadá.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991,Solar Engineering of Thermal Processes, second edition, John&Sons, New York.
- Dickinson, W.C., Cheremisinoff, P.N., 1980, Solar Energy Technology Handbook, Part B, Marcel Dekker, New York.
- Bezerra, A.M., 1990, Aplicações Práticas da Energia Solar, Livraria Nobel, São Paulo.

- Santos, T.S.N., 1997, Estudo Comparativo de Secadores Solares de Exposição Direta e Convectivo, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN, Natal.
- Sena, J.F., 1997, Secagem de Sementes de Algodão usando Coletor Solar Plano: Estudo Cinético e Térmico, Dissertação de Mestrado do Programa de de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN, Natal.
- Ramos, C.M.P., 1997, Polpas de Frutas Tropicais Desidratadas em Leito de Jorro, Trabalho de Final de Curso de Engenharia Química da UFRN, Natal.
- Mujumdar, A.S., 1987, Advances in Drying, Vol 4, Hemisphere Publishing Corporation, Berlin.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991, Solar Engineering of Thermal processes, second edition, New York, John&Sons, & Beckman.



## CATA-VENTO: MÉTODO DE SELEÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS PELO CENTRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS DA UNESP – CAMPUS GUARATINGUETÁ

Luis Fernando Silva Moura  
Teófilo Miguel de Souza

Centro de Energias Renováveis da Unesp - Campus Guaratinguetá

**Resumo.** Cata-ventos são sempre boa opção para promover irrigação em regiões com potencial de vento adequado. Sua seleção correta pode garantir o abastecimento de água suficiente com o mínimo custo. Desde abril de 2004 o Centro de Energias Renováveis da Unesp - Campus Guaratinguetá vem testando um cata-vento comercial com rotor de 18 pás e 3,4 metros de diâmetro, que em uma região com velocidade média de vento de aproximadamente 3 m/s, vem sendo obtida uma média diária de 1500 litros de água. Este volume é suficiente para abastecer uma pequena propriedade rural, porém, poderia ser conseguido com uma máquina de menor capacidade, caso esta operasse adequadamente.

**Abstract.** *Windmills are always a good option to promote irrigate in areas with adequate potential wind. Its correct selection can guarantee the enough water supply with minimum cost. Since April 2004 the “Centro de Energias Renováveis da Unesp - Campus Guaratinguetá” has tested a commercial windmill with 18 blades rotor and 3,4 diameter meters, that in a area with approximately 3 m/s mean wind, has been obtained a income mean 1500 water liters.*

### 1. Cata-ventos

São aeromotores de pequena potência, com elevado número de pás, em geral destinados à elevação mecânica de água com bombas alternativas, centrífugas, ou parafusos de Arquimedes (Macintyre, 1983).

Provindos de sistemas simples de engrenagens, para aumentarem o número de rotações, podem acionar dínamos (corrente contínua) ou geradores de corrente alternada. A transmissão da rotação do eixo horizontal, onde são fixados as pás e o eixo vertical, pode ser feita com rodas dentadas cônicas ou engrenagens cilíndricas. Neste caso, a roda secundária funciona como um excêntrico circular capaz de movimentar uma biela que comunica a uma haste vertical, o desejado movimento alternativo a uma peça apropriada de bomba alternativa. No primeiro caso, com uma multiplicação de velocidade do eixo vertical, consegue-se acionar uma bomba centrífuga (Macintyre, 1983).

Os cata-ventos possuem uma “calda” ou “leme” que se orientam automaticamente na direção do vento, mantendo o motor frontal ao vento. Em alguns tipos, a cauda pode ser rebatida, operando como parte de um dispositivo de frenagem acionado com alavancas, por operador no solo (Macintyre, 1983).

O número de pás varia conforme o fabricante e as necessidades. Em geral apresentam 12, 18 ou 24 pás com diâmetros de 3,2 m ou mais.

As engrenagens em cata-ventos de boa qualidade são alojadas em caixas fechadas onde é colocado o óleo ou a graxa para lubrificação (Macintyre, 1983).

### 2. Velocidade do Vento

A velocidade do vento varia com a distância do solo, devido à camada limite terrestre, sendo afetada pelos obstáculos que cercam o ponto considerado e pelo perfil do terreno nas imediações. A velocidade do vento muitas vezes não é medida na altura em que vai se instalar a turbina, algo que é aconselhável. Com o objetivo de se corrigir os dados, pode-se utilizar uma relação da variação da velocidade com a altura (Neumann, 2002):

$$v = v_0 (h / h_0)^n \quad [2]$$

onde:

$v$  = velocidade corrigida do vento na altura da turbina [m/s];

$h$  = altura da turbina [m];

$h_0$  = altura do anemômetro [m];

$v_0$  = velocidade do vento medida pelo anemômetro [m/s];

Valores de referência de  $n$  são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Valores de referência de  $n$  [3].

Tipos de terreno	N
Liso (mar, areia plana, neve plana)	0,10-0,13
Moderadamente rugoso (pastagem curta, campos de cereais, regiões rurais despovoadas)	0,13-0,20
Rugoso (bosques, bairros)	0,20-0,27
Muito rugoso (cidades, edifícios altos)	0,27-0,40

### 3. Possibilidade de Uso da Energia Eólica

A tabela 2 indica a possibilidade do uso da energia eólica, com base nos valores esperados de velocidade anual do vento.

Tabela 2 - Relações gerais entre Viabilidade e Velocidade do vento para seu uso como fonte de energia [3].

Velocidade prometida anual do vento a 10 metros de altura do solo.	Possibilidade de uso da energia eólica
Menor que 3 m/s	Usualmente não é viável, a menos que existam condições especiais para um melhor aproveitamento.
3 - 4 m/s	Pode ser uma boa opção para cata-ventos, pouco viável para geração de energia elétrica.
4 - 5 m/s	Cata-ventos são competitivos economicamente com equipamentos Diesel, geração de energia elétrica é viável.
Mais de 5 m/s	Viável para bombeamento e geração de energia elétrica.
Mais de 6 m/s	Viável para bombeamento, geração com sistemas autônomos e para sistemas conectados a rede elétrica.

Deve-se estar claro que essa tabela é apenas uma referência para uma rápida análise e não pretende ser completamente conclusiva.

### 4. Potência Hidráulica $P_H$

Apesar das dificuldades associadas com a variação do vento, é possível estimar uma potência média efetiva para elevação de água (potência hidráulica) com base na velocidade média do vento na região de instalação do cata-vento. Supondo que a velocidade média do vento ao

longo de um mês ou ano é  $\bar{v}$ , então a potência hidráulica aproveitável  $P_H$  no mesmo período pode ser estimada por

$$\bar{P}_H = 0,1\bar{v}^3 .A \text{ [W]}$$

na qual A é a área de varredura do rotor. A equação também pode ser expressa de outra forma

$$\bar{P}_H = 0,1\bar{v}^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

com  $\bar{P}_H$  denotando a potência média específica por  $\text{m}^2$  de área do rotor.

A equação citada leva em conta o rendimento do rotor, da transmissão e da bomba. Desta forma a equação também pode ser escrita na forma  $\bar{P}_H = \gamma.\dot{Q}.H$  (Van Meel, 1989).

## 5. Seleção de Equipamentos

Para a seleção de um cata-vento específico, é necessário conhecer, mês a mês, a potência hidráulica requerida e o potencial eólico disponível.

A seleção é baseada no conceito do mês crítico (*“design month”*). Este é o mês na qual a demanda de água é a mais alta em relação ao potencial eólico disponível, ou seja, o mês em que o sistema será mais pesadamente solicitado. O mês crítico é encontrado calculando a razão entre a potência hidráulica requerida e a potência eólica disponível em cada mês. Quando esta razão for máxima, estará caracterizado o *“design month”* (Van Meel, 1989).

### a) Altura da torre

Apesar do diâmetro do rotor ser a mais importante característica de um aeromotor, a altura da torre precisa ser primeiramente conhecida para desta forma poder-se calcular a velocidade do vento na altura do eixo das pás. Dados mensais da velocidade média do vento na altura do eixo das pás são necessários para se estimar o potencial do vento disponível (Van Meel, 1989).

### b) Diâmetro do rotor

O diâmetro do rotor é a mais importante característica de um aeromotor, determinado simultaneamente a potência útil disponível e os custos (Van Meel, 1989). O ábaco da figura 1 pode ser usado para determinar o diâmetro requerido.

A tabela 3 mostra um exemplo do procedimento inicial para a utilização do ábaco. Note que a maior *“reference area”* indica o *“design month”*.

Tab. 3 - Forma de identificar o mês crítico [5].

Location: FLAMENGOS, CAPE VERDE.....					
Month	Average hydraulic power $P_{hydr}$ (W)	Average wind speed at hub height (m/s)	Specific wind power $P_{wind}$ (W/m <sup>2</sup> )	Reference area $P_{hydr}/P_{wind}$ (m <sup>2</sup> )	Design month
Jan	41	4.9	71	0.6	
Feb	41	5.4	94	0.4	
March	41	5.4	94	0.4	
April	41	5.1	80	0.5	
May	41	5.5	100	0.4	
June	41	4.6	58	0.7	
July	41	3.5	26	1.6	
Aug	41	3.3	22	1.9	←
Sept	41	3.5	26	1.6	
Oct	41	4.4	51	0.8	
Nov	41	4.4	51	0.8	
Dec	41	4.9	71	0.6	

, onde  $\bar{P}_{hydr} = \gamma \cdot \bar{Q} \cdot H$  [W] e  $P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot \bar{V}^3$  [W/m<sup>2</sup>].

“CE”, definido como a razão entre a energia real produzida e a energia teórica produzida em um dado período, T, com vento de velocidade constante e igual a velocidade média do vento, assumindo que o cata-vento estará trabalhando com coeficiente de potência,  $C_p$  máximo. Para cata-ventos CE pode ser considerado 0,40 (Van Meel, 1989).

$C_p \eta_{max}$ , máximo valor do coeficiente de potencia global,  $C_p \eta$ , que está associado ao sistema rotor-transmissão-bomba, e por isso depende da altura de bombeamento. Valores comuns para cata-ventos de 18 pás podem ser encontrados na tabela 4.

Tab. 4 - Valores representativos de performance [5].

$C_p \eta_{max}$				
Altura de bombeamento	H < 3 m	H = 3 m	H = 10 m	H = 20 m
Cata-vento clássico	0 – 0,15	0,15	0,20	0,30

### c) Dimensão da bomba

A escolha da bomba adequada implica em melhor performance do sistema. Sem levar em conta a eficiência, a uma mesma vazão, bombas de maior capacidade propiciarão menores rotações do rotor e bombas de menor capacidade maiores rotações, e isto é determinante na operação em torno do ponto ótimo de funcionamento ( $C_p = 3$ ), que depende da rotação do rotor e do regime de vento.

O ábaco da figura 2 pode ser usado para determinar a dimensão da bomba, caracterizada pelo curso da mesma.

A “*design wind speed*”,  $V_d$ , é associada à velocidade média do vento correspondente ao mês em que a razão da potência hidráulica pela potência eólica é maior, ou seja, é associada a velocidade média do vento correspondente ao mês crítico, *design month* (Van Meel, 1989). Na  $V_d$  o coeficiente de potência global é máximo. A razão  $\frac{V_d}{\bar{V}}$  para cata-ventos é admitida igual a 0,6 (Van Meel, 1989). No exemplo da tabela 3, a velocidade média do vento no mês crítico é 3,3 m/s e desta feita,  $V_d = 2$  m/s. Se  $\rho_{ar}$  é consideravelmente diferente de 1,2 kg/m<sup>3</sup> é necessário fazer a correção  $\sqrt{(\rho/1,2)}$ .

A velocidade de operação, “speed of operation” é representada no canto superior esquerdo do ábaco. A velocidade específica (tip speed ratio),  $\lambda_d$ , é aproximadamente 1,0 (unidade) para a

maioria dos cata-ventos. A taxa de transmissão,  $i$ , é igual a 1,0 para acionamento direto da bomba e em torno de 1/3 para cata-ventos dotados de caixa de transmissão (Van Meel, 1989).

A altura total, “total head”, é a altura geométrica mais as perdas hidráulicas.

O ábaco retorna o volume efetivo bombeado.

Para a seleção do diâmetro da bomba, pode ser utilizado o ábaco da figura 3.

O diâmetro do pistão é obtido cruzando-se com seu curso (stroke) e com o volume teórico ou geométrico bombeado, onde vale ressaltar que no ábaco da figura 2 é obtido o volume efetivo bombeado.

Para velocidades baixas de bombeamento, o rendimento volumétrico é de cerca de 90%. Bombas recentemente projetadas, dotadas de bocal de partida, a eficiência volumétrica pode ser baixa, em torno de 80% (Van Meel, 1989).

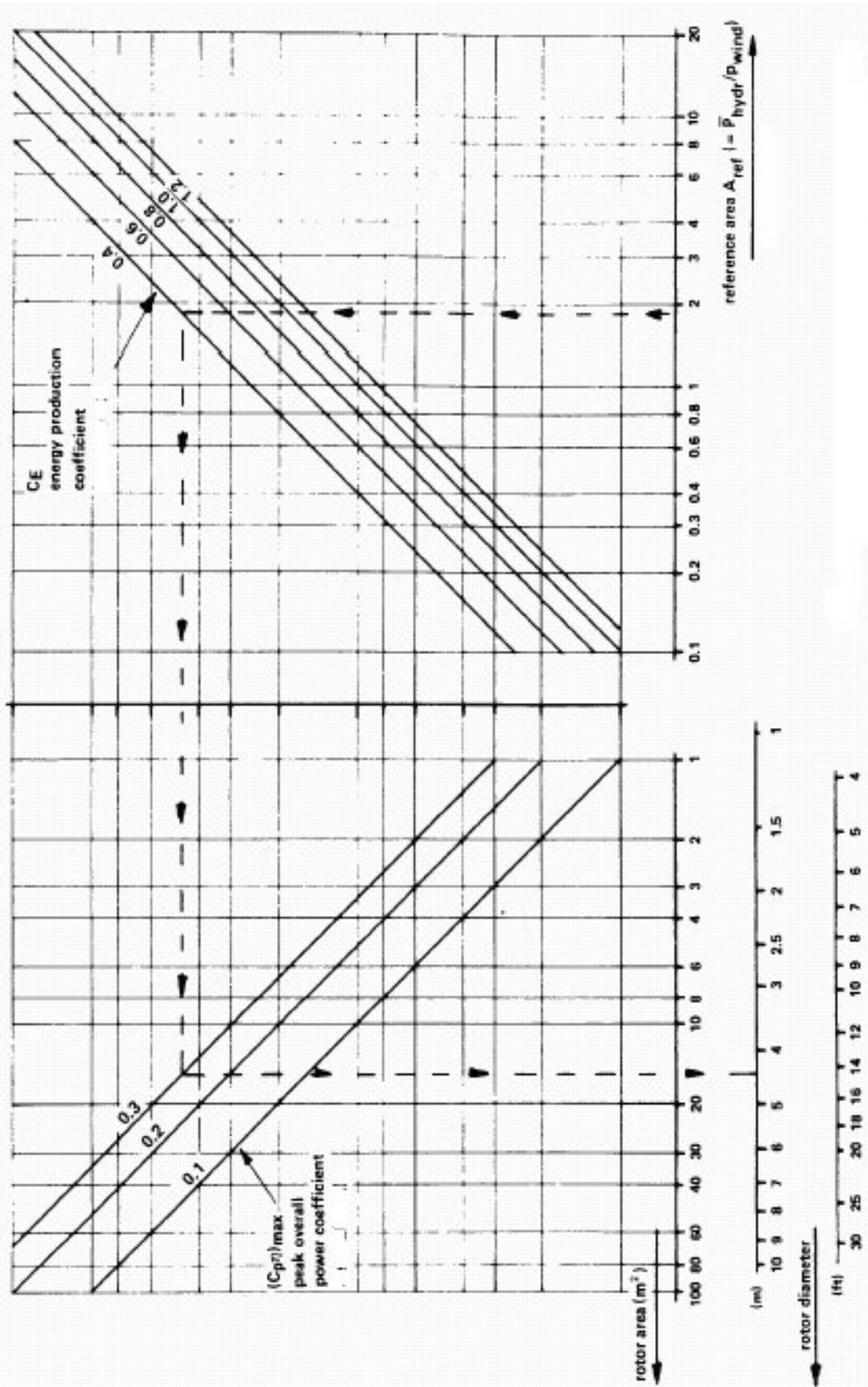


Fig. 1 - Ábaco para determinar o tamanho do rotor de um cata-vento [5].

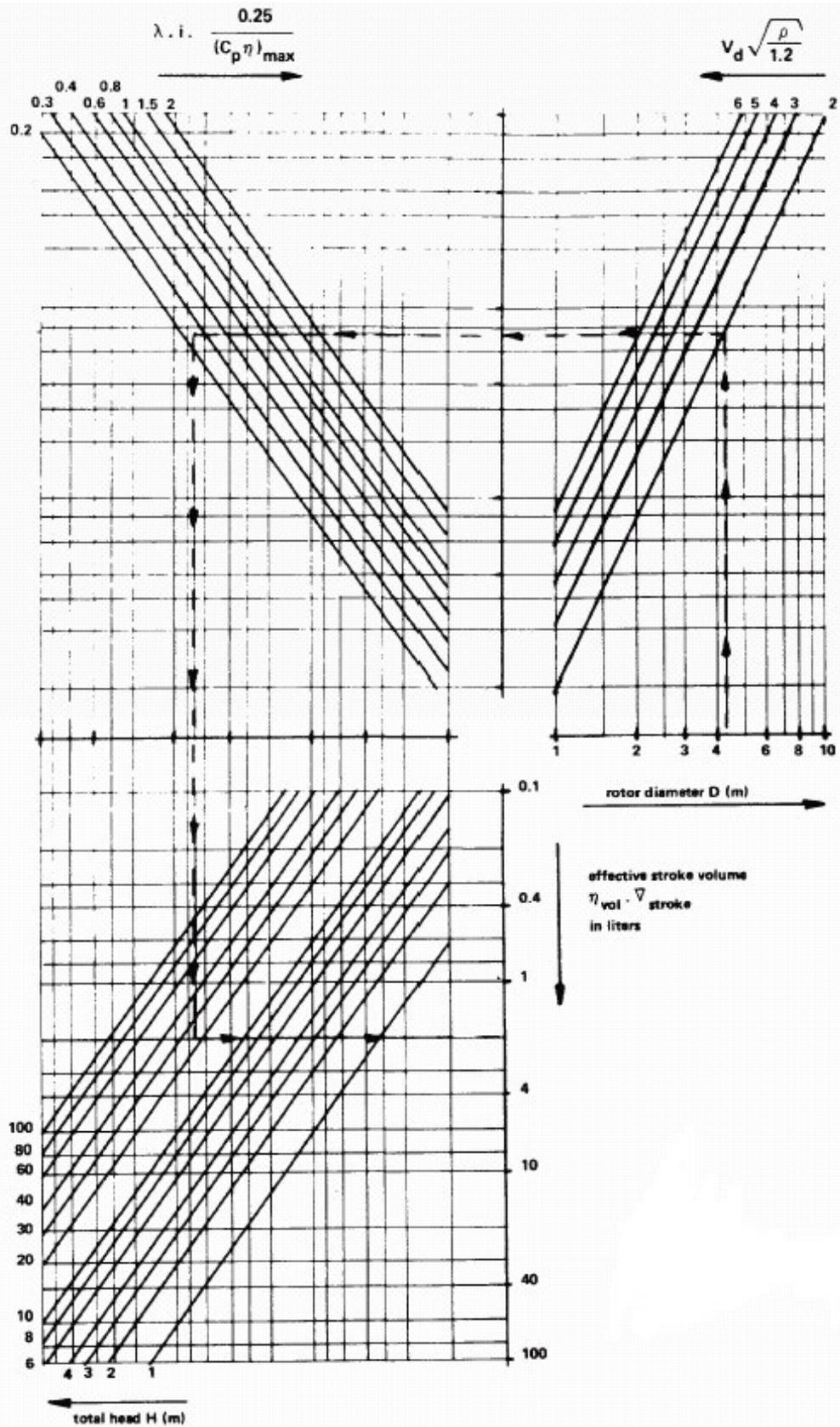


Fig. 2 - Ábaco para dimensionar a bomba de um cata-vento [5].

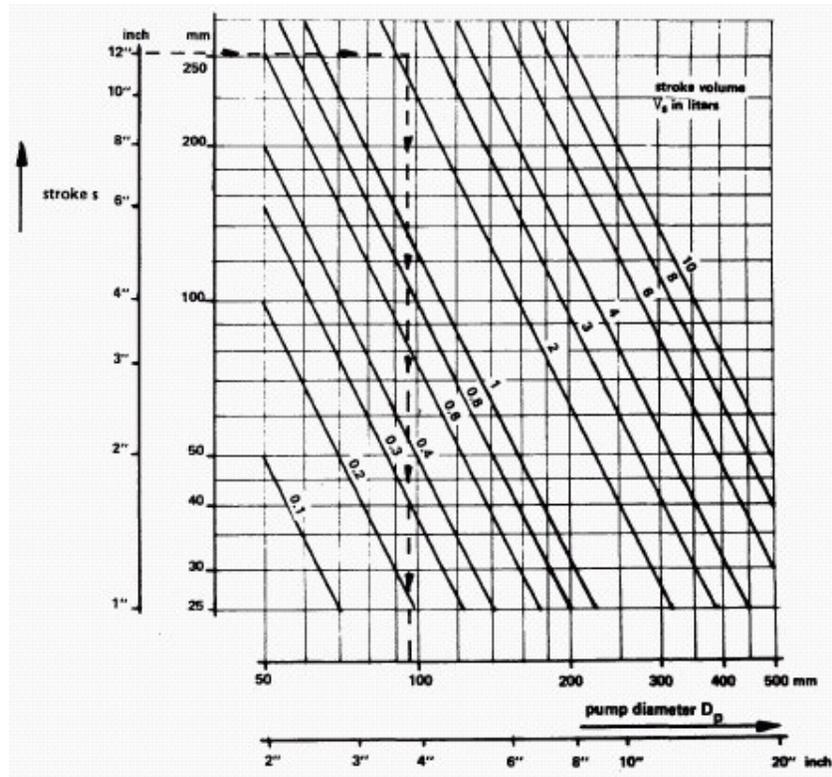


Fig. 3 - Ábaco para a seleção do curso e do diâmetro do pistão [5].

## 6. Experiência do Centro de Energias Renováveis

Desde abril de 2004 a Faculdade de Engenharia vem testando um cata-vento com o objetivo de avaliar tecnicamente a viabilidade de implantação da máquina em regiões de baixo potencial eólico, como a cidade de Guaratinguetá que possui ventos com velocidade média anual em torno de 3m/s.

O cata-vento é um modelo comercial do tipo multipás, adquirido por doação, que se encontra montado no Centro de Energias Renováveis da Unesp-Campus de Guaratinguetá. Suas principais especificações são as seguintes:

- Rotor com 18 pás e 3,40 m de diâmetro;
- Torre de montagem a 15 m de altura do solo;
- Velocidade do vento para acionamento de 4 m/s a 10 m/s;
- Número máximo de pulsações por minuto: 26;
- Capacidade de fazer recalque a uma distância de até 2 km com elevação inferior a 30 m;
- Curso do pistão: 17 cm;
- Taxa de redução da transmissão: 1/3.

### 6.1. Presença de Ventos na Região de Guaratinguetá

Em relatório para a CETESB, o Prof. Dr. João Ubiratan de Lima e Silva, Chefe do Departamento de Engenharia Civil da Unesp Campus de Guaratinguetá, analisou a direção e a velocidade de ventos predominantes na região de Guaratinguetá-SP. Os dados foram processados a partir das sondagens meteorológicas da estação de radiossonda do Ministério da Aeronáutica de Guaratinguetá e são referentes ao período de 1974 a 2000. O Gráfico da figura 11 mostra a velocidade média do vento em m/s.

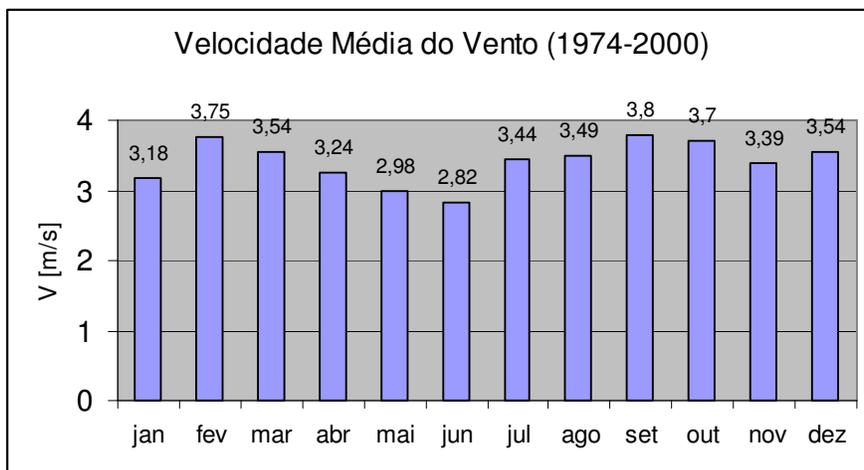


Fig. 4 – Velocidade média do vento em Guaratinguetá-SP (1974-2000).

Nota-se que junho é o mês crítico, “design month”, ou o mês em que foi registrada a velocidade média mais baixa, caso as necessidades hidráulicas sejam constantes ao longo do ano.

## 6.2. Análise Teórica

As análises teóricas que seguem, são elaboradas conforme equações do item 4.

Considerando as características técnicas do cata-vento do Centro de Energias Renováveis (diâmetro do rotor de 3,40 m) e o histórico de ventos da cidade de Guaratinguetá, os gráficos da figura 5 e 6 mostram a vazão esperada ao longo dos meses, conforme média histórica de ventos, bombeando a uma altura de coluna d’água de 10 e 40 metros respectivamente.

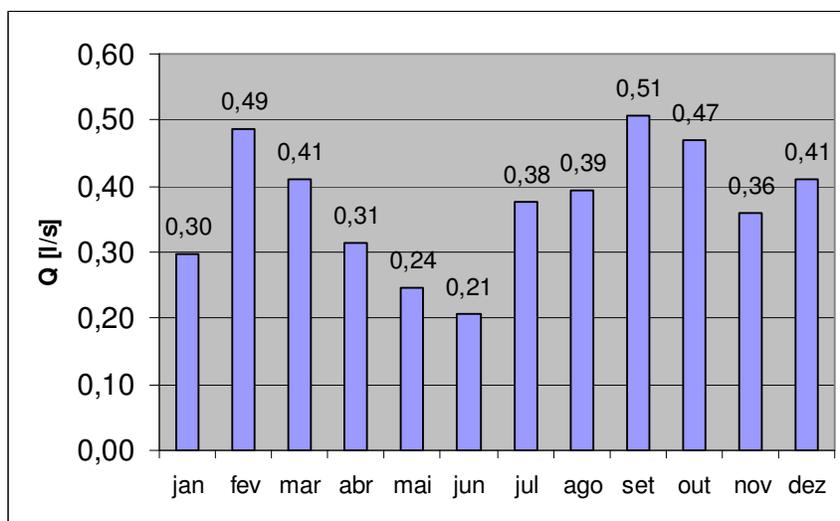


Fig. 5 – Vazão mensal bombeada, conforme média histórica de ventos, a uma altura de coluna d’água de 10 m.

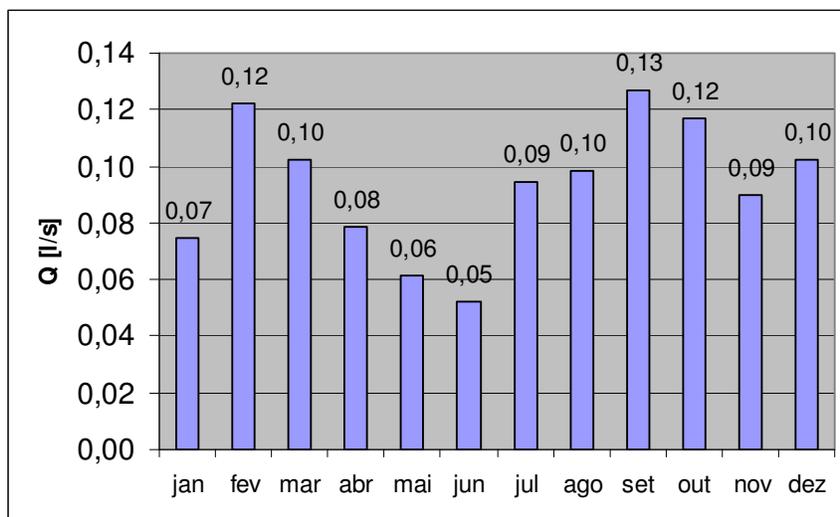


Fig. 6 – Vazão mensal bombeada, conforme média histórica de ventos, a uma altura de coluna d'água de 40 m.

No caso do mês crítico de Guaratinguetá, que é junho, o volume diário disponível, considerando 10 metros de coluna d'água, será 18144 litros de água.

## 6.2. Resultados Obtidos

O cata-vento do Centro de Energias Renováveis da Unesp - Campus Guaratinguetá tem disponibilizado uma média diária de 1500 litros de água. É notável a grande diferença entre o que se esperaria teoricamente e o que tem sido obtido.

Este volume é suficiente para abastecer uma pequena propriedade rural com 5 pessoas, 20 aves, 4 suínos, 16 bovinos, 3 eqüinos, 20 m<sup>2</sup> de hortas e 20 m<sup>2</sup> de jardins, porém, conforme o método de seleção apresentado, o volume que vem sendo disponibilizado poderia ser obtido com cata-ventos de 18 pás com diâmetro do rotor de 1 a 1,5 metros, o que deixa claro que a máquina vem trabalhando totalmente fora da sua condição de melhor rendimento.

A máquina, como em geral, é fabricada de forma artesanal, foi doada e montada no Centro de Energias Renováveis pela empresa fabricante. Por falta de critérios técnicos, muitas vezes têm-se máquinas hiperdimensionadas que acabam gerando custos desnecessários.

## 7. Palavras Chaves

Cata-vento, seleção de cata-ventos, velocidade do vento, viabilidade, potência hidráulica.

## 8. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – que desde setembro de 2003 incentiva o projeto de pesquisa.

## 9. Referências

- [1] Macintyre, Archibald Joseph; **Máquinas Motrizes Hidráulicas**; Vol. 1; Editora Guanabara Dois; Rio de Janeiro; 1983.
- [2] Veldkamp, Dick; **Recommended Practices for Testing Water-Pumping Windmills**; World Bank; Washington D.C.; 1989.
- [3] Neumann, Antonio Lecuona; **Las Energia Eólica: Principios Básicos e Tecnologia**; Leganés; 2002.

- [4] UPEME: Unidad de Planeación Minero Energética; **Guía para la Utilización de la Energía Eólica para Bombeo de Agua**; UPEME; Bogotá; 2003.
- [5] Van Meel, Joops Smulders, Paul; **Wind Pumping – A Handbook**; World Bank; Washington D.C.; 1989.