



GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA (GGH)

CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS DO TIPO FRANCIS E KAPLAN NO BRASIL

José Adalberto Lage Calainho*
ELETRONORTE - EEGM

Cid Antunes Horta
ELETRONORTE - EEGM

Carmo Gonçalves
ELETRONORTE - EEGM

Fernando Gillet Lomônaco
ELETRONORTE - CEMG

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um breve relato sobre cavitação em turbinas de reação, os principais fatores que levam uma turbina a cavar, os principais materiais utilizados recentemente para os reparos da erosão, bem como os seus desempenhos relativos, e os resultados das pesquisas feitas junto ao setor elétrico brasileiro que mostram a situação da cavitação em turbinas hidráulicas, inclusive a quantidade de eletrodo depositado por hora de operação por turbina e os seus respectivos custos de reparo por hora de operação, no Brasil até Outubro de 1997.

Este trabalho pretende contribuir com o XV SNTPEE, de forma a mostrar aos participantes interessados, a situação das principais turbinas hidráulicas instaladas no país com relação à cavitação.

PALAVRAS CHAVES

Cavitação; Turbinas; Erosão; Francis e Kaplan

1-INTRODUÇÃO

O fenômeno de cavitação é basicamente entendido, como a sequência dos eventos de formação de bolhas, ou pacotes de vapor, com o seu posterior desenvolvimento normalmente com resultados agressivos tais como:

- Erosão de contornos sólidos;
- Vibrações e ruídos excessivos;
- Diminuição da capacidade de vertedouros de Usinas Hidrelétricas;
- Diminuição da eficiência de Turbinas Hidráulicas, com queda de potência.

A erosão por cavitação ocorre devido a concentração de energia em uma pequena área sólida próxima ou no próprio local do colapso. Essa concentração de

energia é responsável pelas altas tensões localizadas que excedem os limites de resistência dos materiais.

Considerando a importância e complexidade deste fenômeno, diversas companhias e centro de pesquisas tem concentrados esforços no sentido de obterem mais informações no tocante a máquinas hidráulicas visando esclarecer principalmente os seguintes pontos:

- Prever as condições para as quais existem riscos de cavitação erosiva para o protótipo;
- Localizar as regiões onde ocorrerão as erosões;
- Estimar os níveis de tensões que serão exercidas sobre as superfícies sólidas;
- Classificar os materiais com relação às suas resistências à erosão;
- Estabelecer relação entre tipo de cavitação e intensidade de erosão (monitoramento).

No Brasil a produção de energia sendo essencialmente hidráulica (em torno de 92%), e o potencial a ser explorado de grande envergadura, da ordem de 206.992,000 MW, e a crescente demanda por energia chegando em algumas regiões em torno de 20% ao ano, e o desenvolvimento das indústrias naval e aero-espacial são razões pelas quais se torna importante os trabalhos e estudos da cavitação.

Levantamentos efetuados pelo CEPTEL em 1991 (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica da Eletrobrás), mostraram que os dispêndios gastos com reparos de cavitação nas turbinas hidráulicas no Brasil eram da ordem de US\$ 13,000,000.00 (treze milhões de dólares), isto considerando apenas despesas com mão-de-obra e materiais.

Estes dispêndios cresceram nos últimos anos tendo em vista que com o crescimento da demanda superior ao crescimento da oferta, muitas unidades passaram operar em seus limites e alguns casos até com sobrecarga, e para garantir a regulação do sistema

muitas unidades passaram a operar com cargas parciais. Além dos custos de reparos, a cavitação também tem sido responsável por indisponibilidade de máquinas, limitação da flexibilidade operacional do sistema e redução da vida útil dos equipamentos.

Hoje no país 75% das companhias geradoras de energia elétrica através de hidrelétricas estão operando com algum tipo de cavitação em seus equipamentos. Atualmente um dos aspectos relevante da cavitação em turbinas é a ausência de um modelo numérico suficientemente abrangente, o que leva a avaliação da cavitação dos protótipos em modelos de escala reduzida, com posterior transposição dos resultados para a turbina protótipo, que atualmente através da IEC 995 tem procurado levar em consideração os efeitos de escala, entretanto tais efeitos ainda podem levar à surpresas no protótipo, o que leva aos fabricantes a trabalharem com um fator de segurança.

Este trabalho apresenta dados relativos a erosão, bem como os intervalos de reparo, das turbinas hidráulicas de médio e grande porte instaladas no Brasil, também é apresentado o comportamento de materiais utilizados, e breves informações teóricas.

2- CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS

O projeto e fabricação de turbinas hidráulicas, principalmente as de grande porte, vêm evoluindo através do tempo, sendo que atualmente algumas chegam a apresentar rendimentos máximos superiores a 96%. Entretanto ainda hoje os fabricantes se deparam com problemas significativos com relação a cavitação.

Nas turbinas hidráulicas de reação, principalmente as Francis e Kaplan de altas velocidades específicas, a incidência de cavitação é maior em virtude de depressões ocorridas com maior frequência nas regiões convexas próximas à saída das pás rotoras.

Os tipos de cavitação que mais ocorrem nessas máquinas são:

- Cavitação fixada (Michel and Belahadji, 1997), que consiste basicamente da formação, crescimento e enchimento de uma cavidade de vapor, que posteriormente é interrompida por um fluxo reentrante, e deslocada para a jusante, para regiões de pressões mais elevadas, onde é implodida violentamente, provocando ondas de choques e concentrações de altas pressões. Este tipo de cavitação é detetora de um poder destruidor considerável;
- Cavitação por vórtice, que se desenvolve normalmente em regiões de alta tensões cizalhantes, onde ocorre a formação de vórtices. Nos vórtices a pressão absoluta decresce no centro

para valores próximos aos da pressão de vapor. Estes vórtices são normalmente desenvolvidos nas extremidades das pás rotoras de turbinas Kaplan (tip vortex cavitation), nas camadas cizalhantes de jatos submersos, na extensão do cone dos rotores (principalmente em turbinas Francis) e nas passagens do fluxo entre as pás. Este tipo de cavitação é responsável por grandes erosões, vibrações e ruídos intensos;

- Cavitação por bolhas (Franc et al, 1995), ocorre como consequência do ciclo da bolha, originado devido a gradientes de pressão e a existência de germes ou núcleos contidos nos fluidos. Esta cavitação é erosiva devido as altas pressões geradas pelos colapsos das bolhas, que normalmente são intermitentes; devido ao impacto do jato reentrante, que se forma durante a implosão, com a superfície sólida; ou ainda devido a repercussão das ondas de choques geradas.

Um fator relevante em turbinas hidráulicas, é que a melhor forma de prever a cavitação da turbina protótipo é através de ensaios em laboratórios especializados em modelos de escala reduzida, com posterior transposição dos resultados. Entretanto esse método é acompanhado por algumas imprecisões, em virtudes dos efeitos de escala existentes entre as condições de ensaios e as de operação real da unidade. Estas diferenças que provocam desvios das similaridades podem se manifestar principalmente das seguintes formas:

- Viscosidade;
- Rugosidade;
- Germes de cavitação;
- Nível de turbulência;
- Qualidade da água.

Portanto para a determinação dos limites operacionais da unidade e do posicionamento do rotor da turbina, é levado em consideração um fator de segurança com relação a cavitação.

O coeficiente que quantifica as condições dinâmicas e estáticas que podem conduzir a condição de cavitação, ou seja, é uma referência para os níveis de cavitação incipiente, desenvolvida e desinente, é denominado para turbinas hidráulicas de coeficiente de Thoma e assume a seguinte expressão:

$$\sigma_p = \frac{(H_a - H_v - H_s)}{H} \quad (1)$$

Onde: H - Altura da coluna de líquido; H_a - Altura da coluna de líquido correspondente a pressão atmosférica; H_v - Altura da coluna de líquido correspondente a pressão de vapor; H_s - Altura da coluna de líquido correspondente a calagem da turbina hidráulica e σ_p - coeficiente de cavitação da instalação. As turbinas normalmente são projetadas e instaladas de forma que o coeficiente de cavitação da instalação

(σ_p), seja superior ao coeficiente de cavitação crítico (σ_c).

A relação entre os sigmas da instalação e o crítico, representa o fator de segurança com relação à cavitação, que por volta de 1960, era de 50%, e atualmente está em torno de 15%, sendo que já existem fabricantes trabalhando (em 1999) com 10%. Espera-se que esta relação chegue em menos de 5%, quando for possível um quase perfeito diagnóstico do fenômeno, bem como uma considerável melhoria no seu controle.

Uma vez que cada turbina tem suas próprias características com relação à cavitação, fatores como pressão atmosférica, elevações dos níveis de jusante e montante, são responsáveis por grandes influências no comportamento de turbinas hidráulicas, e tornam sua análise mais complexa.

O posicionamento do rotor da turbina com relação ao nível mínimo de jusante é fundamental, pois se a contrapressão no rotor não for suficiente para compensar as quedas de pressões oriundas das condições operativas, poderá surgir uma cavitação intensa e comprometer o seu funcionamento.

Também não é viável economicamente aumentar o afogamento (H_s) da turbina, pois isto elevaria os níveis de escavações e como consequência, os dispêndios com concreto durante a construção.

Atualmente fórmulas empíricas, advindas de métodos estatísticos, têm sido utilizadas para determinar de forma preliminar as alturas de sucção de turbinas hidráulicas. Estas fórmulas normalmente são função da queda, e principalmente da velocidade específica de turbinas homólogas, no entanto a comprovação do comportamento do rotor da turbina com relação à cavitação, é feita nos ensaios do modelo reduzido.

Pesquisas recentes, realizadas pelas áreas de Projeto Eletromecânico de Usinas Hidrelétricas (EEGM) e de Engenharia de Manutenção da Geração (CEMG) da Eletronorte, junto às principais empresas geradoras de energia do setor elétrico, mostraram que existem aproximadamente 129 Turbinas Francis operando no Brasil sob cavitação, das quais 110 apresentam potências unitárias superiores a 100 MW, e 49 Turbinas Kaplan também estão operando com problemas de cavitação, sendo que dessas; 23 unidades possuem potências superiores a 100 MW.

Também pode-se citar que os principais fatores que levam estas turbinas a cavitarem poderão ser os abaixo relacionados (individuais ou em conjunto):

- Perda dos perfis das pás rotoras, devido a sucessivas intervenções para reparos, principalmente quando não se dispõe de gabaritos para a reconstituição do perfil;
- Perda dos perfis das palhetas diretrizes;

- Rugosidade excessiva;
- Operação fora das faixas garantidas, isto é, com carga parcial ou com sobrecarga;
- Desconjugação das palhetas diretrizes com as pás rotoras;
- Características da água do reservatório;
- Operação com altura de sucção inferior a mínima prevista;
- Projeto de perfis inadequados;
- Sucção da unidade subestimada;
- Proteção insuficiente das áreas sujeitas a severa cavitação, previstas nos ensaios de modelo em escala reduzida.

Da experiência acumulada por fabricantes de turbinas hidráulicas, companhias geradoras de energia elétrica brasileiras e dos resultados experimentais, pode-se dizer que a cavitação de borda de ataque, é influenciada pelo ângulo de incidência do escoamento na pá, e é praticamente insensível ao valor da altura de sucção. Portanto aumentar a altura de sucção para este caso, não seria recomendado, pois levaria a níveis de escavações inaceitáveis, e seria inviável economicamente.

As cavitações sensíveis à altura de sucção, são as que normalmente ocorrem no lado de sucção das pás nas bordas de saída, que podem ser evitadas com o incremento da altura de sucção.

3- EROÇÃO DEVIDO A CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS

A erosão por cavitação em turbinas hidráulicas é um efeito dos mais indesejáveis e nocivos, e responsável por grandes perdas e danos para o setor elétrico brasileiro.

Com o objetivo de evitar essas erosões severas, sempre que possível os limites operacionais das unidades geradoras são limitados.

Como já mencionado anteriormente, o fenômeno de erosão por cavitação é baseado na interação entre o fluido e uma superfície sólida. As altas pressões, e ondas de choques, geradas por implosões de estruturas de vapor, são responsáveis pelos danos causados nas superfícies metálicas.

O estudo do fenômeno de erosão é bastante complexo pelo fato de envolver o comportamento hidrodinâmico dos fluxos cavitantes, especialmente as fases de implosão das estruturas de vapor e o comportamento do material com relação aos impactos repetitivos oriundos da cavitação.

A previsão da erosão por cavitação em turbinas hidráulicas tem sido objeto de pesquisas intensas atualmente, nos campos numérico e experimental, entretanto o problema ainda não foi resolvido.

A interface entre estes os mecanismos erosivos hidráulicos e de danos, é denominada de agressividade da cavitação, que é o carregamento de impactos sobre a parede em virtude de impactos sucessivos.

Embora os mecanismos dos colapsos ainda não se encontrem totalmente elucidados, é admitido que o impacto é caracterizado por uma pressão da ordem de GigaPascal, com um tempo de duração da ordem de microsegundos, e superfície de impacto da ordem de décimo de milímetro (Dorey et al, 1996).

A perda de massa do material sólido durante a erosão passa por uma fase de incubação, onde aparecem os pequenos pits e o desgaste é pequeno, em seguida ocorre uma aceleração do processo onde a remoção de massa é incrementada até um valor máximo após o qual a perda de material se torna estável e aproximadamente constante.

Em um fluxo cavitante se o coeficiente de cavitação é diminuído e a velocidade mantida constante, a erosão é incrementada até um máximo e decresce posteriormente quando é atingido o estágio de supercavitação.

Prever a capacidade erosiva de um fluxo cavitante não é uma tarefa fácil, principalmente em turbinas hidráulicas onde o escoamento é bastante complexo, essa previsão tem sido objeto de estudos em diversos centros de pesquisas.

A capacidade erosiva da cavitação está associada aos pulsos de pressão gerados. Para prever os possíveis danos, os pesquisadores têm recorrido principalmente aos métodos experimentais, destinados a quantificar estes picos de pressão e compará-los com a resistência dos materiais. Também tem sido usados métodos acústicos, que monitoram os ruídos do fenômeno.

Um dos métodos que determina experimentalmente os picos instantâneos de pressão é o PPHS, pressure pulse height spectrum (Le et al, 1993), que utiliza sensores piezoelétricos de alta frequência (0,7 MHz), de dimensões reduzidas (diâmetro de 0,9mm) e de alta resistência.

Este sistema permite avaliar a agressividade de diferentes tipos de cavitação, entretanto é de difícil aplicação em turbinas hidráulicas, em virtude da necessidade da instalação dos transdutores nas áreas de impactos.

No caso de turbinas hidráulicas no Brasil existe uma tendência de monitoramento da cavitação por sensores acústicos de altas frequências (100 kHz a 1 MHz). Testes de campo foram executados na UHE Ilha Solteira (CESP) em turbinas Francis de 160 MW (Brasil et al, 1996), utilizando sensores de emissão acústica em conjunto com hidrofones e transdutores de pressão, associados a uma unidade de condicionamento de sinal e a um software de inteligência artificial.

Também encontra-se em operação na UHE Xingó (CHESF), em uma turbina

Francis de 500 MW um sistema de diagnóstico da cavitação por sensores acústicos de alta frequência associado a uma unidade de condicionamento de sinal. A CEMIG também está utilizando um sistema de monitoramento acústico através de acelerômetros.

Todos estes sistemas tem detectado a cavitação com êxito, entretanto a determinação da taxa de erosão para definir com precisão a parada da unidade para reparo, e a previsão de pontos operacionais com cavitação não erosiva, encontram-se em fase de desenvolvimento por todos os pesquisadores.

A confiabilidade do sistema elétrico brasileiro tem sido afetada em função da erosão severa observada em muitas de suas turbinas, o que acarreta na necessidade de indisponibilização das unidades para reparo.

O déficit de geração existente no país atualmente, contribui para uma tendência de agravamento dessa situação, uma vez que as turbinas serão exigidas cada vez mais.

Com a finalidade de mostrar o estado que se encontram as turbinas hidráulicas brasileiras com relação à cavitação, bem como o nível de erosão, a tabela 1 do anexo 1, mostra o resultado de pesquisa feita junto as principais concessionárias do país. Foram obtidos dados técnicos de 273 turbinas hidráulicas de médio e grande porte, que representam significativo do total de unidades de, médio e grande portes, instaladas no Brasil. Das turbinas pesquisadas 178 apresentam algum problema de cavitação, o que representa 65 % do total de unidades pesquisadas.

Os resultados da pesquisa realizada junto ao setor elétrico brasileiro, mostram ainda que a erosão ocorre com maior frequência no lado de sucção das pás. Quanto ao posicionamento, é distribuída na borda de ataque, de fuga e no meio das pás, sendo que a parte mais castigada é na extremidade das mesmas. Também foram citados casos de erosão no anel periférico e no cubo do rotor.

Além das turbinas mostradas na tabela acima, merecem destaques as turbinas Francis da Usina de Itaipú e de Foz do Areia, pelo porte e níveis de cavitação observados.

As turbinas da UHE Itaipu, com 740 MW de potência nominal unitária, com rotor de 300 t de aço soldado ASTM A 643 Gr.A, sofreram intervenções para reparo, em 1995 na unidade 2 e em 1996 na unidade 12, onde foram depositados 980 e 950 Kg de eletrodos respectivamente. Nessa ocasião (1995), foi substituído o tradicional eletrodo revestido pelo processo de arame tubular, o que representou um ganho de produtividade dos serviços da ordem de 3 vezes em relação ao método anterior de reparo.

Na UHE Foz do Areia (COPEL), foram realizados testes de campo em turbinas Francis com 430 MW de potência nominal unitária, com eletrodos de AWS-E-

309 Mo (Ni-Cr) e HQ-913 (Ni-Co). Os resultados obtidos foram favoráveis ao HQ-913, como mostra a tabela 2 abaixo :

TABELA 2 - DESEMPENHO DO ELETRODO HQ-913 (NI-CO)X AWS E 309 NA UHE FOZ DO AREIA

| Horas de operação (h) | AWS-E-309 - Profundidade Pit's (mm) | HQ-913 - Profundidade Pit's (mm) |
|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| 1500 | 1.0 | 0.5 |
| 3500 | 3.5 | 1.0 |
| 5800 | 8.0 | 3.0 |
| 8000 | 12.0 | 4.5 |

Com relação aos materiais usados para o reparo da erosão em turbinas hidráulicas no Brasil, existe uma tendência dos materiais AWS-E 307; AWS-E 410; AWS-E 308 e AWS-E 316, serem substituídos pelo AWS-E 309 Mo (resistência a tração 520 MPa), para o caso de ataque moderado e HQ 913/914 (resistência a tração 820 MPa), para o caso de ataque severo.

4-CONCLUSÃO

A análise dos dados obtidos junto a maioria das concessionárias de energia elétrica no Brasil mostrou que a situação da cavitação é bastante abrangente, e os dispêndios com reparos tem sido consideráveis , isso sem levar em conta a maior consequência, que é a indisponibilidade de unidades para geração de energia. Provavelmente os principais fatores responsáveis pelo alto nível de cavitação nas turbinas hidráulicas brasileiras são:

- Unidades operando com sobrecarga ou com carga parcial;
- Perda de perfil hidráulico das pás rotoras devido a intervenções de manutenção;
- Efeitos de escalas na transposição do modelo para o protótipo;
- Altura de sucção insuficiente para alguns pontos operacionais;
- Projeto inadequado de perfis hidráulicos.

Também é clara a necessidade de se continuar as pesquisas na busca de métodos de controle da cavitação e de materiais com melhor qualidade para reparos de áreas erodidas, bem como do aprimoramento dos processos de aplicação dos mesmos.

Os métodos de monitoramento da cavitação, tem avançado bastante no sentido de detectar a cavitação e o nível da mesma, entretanto a correlação entre os sinais detectados e o nível de erosão em tempo real, é uma tarefa que ainda depende da obtenção de dados referentes a condições de operação e cavitação observada, e não foi até então elucidada.

Os sistemas de monitoramento contribuem para evitar de operar as unidades por muito tempo em regiões

com alto nível de cavitação, o que poderá reduzir a erosão, e prolongar o intervalo de parada para a manutenção, e são importantes para se obter os dados de operação das unidades em tempo real, e principalmente para usinas parcialmente desassistidas. Pode-se observar que no Brasil a cavitação em turbinas hidráulicas é um fator relevante, que traz prejuízos e e contribui para diminuir a confiabilidade dos sistemas, o que tenderá a agravar uma vez que no país mais de 80% das turbinas instaladas tem mais de 20 anos, a necessidade de aumentar a oferta de energia contribui para que as máquinas sejam operadas com sobrecarga.

5-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ELETRONORTE, ELETROSUL, FURNAS, CHESF, CEMIG, CESP, ITAIPU, COPEL, CEB, LIGHT, ESCELSA, ENERSUL, ELETROPAULO, CPFL E CERJ, Relatórios Técnicos e Informações Técnicas da maioria das Companhias do Setor Elétrico do Brasil; 1997.
- (2) GONÇALVES, C. –“Cavitation Flow on Unsteadiness Mechanisms” – ENM/UnB, Master Dissertation, 1997.
- (3) BRASIL, A.C.P, AND OTHERS – “Hydraulics Cavitation Monitoring” – ENM/UnB – CESP, Report, 1996.
- (4) MICHEL,J.M.AND BELAHADJI,B.– 1997 “Fundamentals of Cavitation”- ENM/UnB-LEGI/IMG, Series of Lectures
- (5) ARNDT, R.E.A. –“Hydroturbine Cavitation” – ENM/UnB/ELETRONORTE – University of Minnesota, Series of Lectures, 1997.
- (6) SOUZA, N.C.; SILVA, R.G. & HEREK, O. – “Experimental Application With Hydrology HQ 913” – COPEL, pp 1-6, 1991.

ANEXO I

TABELA 1 - RESULTADO DA PESQUISA SOBRE CAVITAÇÃO NAS TURBINAS BRASILEIRAS

SITUAÇÃO DA CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS NO BRASIL (OUT/97)

| INSTALAÇÃO | TIPO TURBINA | NUM. UNIDADES C/CAVIT. | POTÊNCIA NOMINAL (MW) | QUEDA NOMINAL (m) | HER (h) | kg/HO (kg/1000h) | R\$/HO (R\$/1000h) |
|--------------|--------------|------------------------|-------------------------|---------------------|-----------|--------------------|--------------------|
| S. SIMÃO | FRANCIS | 6 | 285 | 72 | 32.000 | 5 | 1170,00 |
| B. MUNHOZ | FRANCIS | 4 | 359 | 128 | 15.000 | 30 | 1833,00 |
| 3 MARIAS | KAPLAN | 6 | 61 | 50 | 40.000 | 3 | 680,00 |
| JAGUARA | FRANCIS | 4 | 116 | 45 | 23.000 | 9 | 2170,00 |
| V. GRANDE | KAPLAN | 4 | 100 | 25 | 30.000 | 13 | 3330,00 |
| S.GRANDE | FRANCIS | 4 | 27 | 95 | 26.000 | 2 | 380,00 |
| EMBORCAÇÃO | FRANCIS | 4 | 297 | 128,5 | 30.000 | 3 | 670,00 |
| CAMARGOS | KAPLAN | 2 | 22 | 22 | 30.000 | 2 | 420,00 |
| ITUTINGA | KAPLAN | 4 | 12 | 25 | 32.000 | 2 | 390,00 |
| N.PONTE | FRANCIS | 3 | 173 | 96 | 16.000 | 3 | 780,00 |
| FURNAS | FRANCIS | 8 | 152 | 94 | 35.000 | 2 | N.I. |
| M. MORAES | FRANCIS | 2 | 45 | 45 | 35.000 | 1 | 140,00 |
| L.C.B. CARV. | FRANCIS | 6 | 170 | 60,8 | 35.000 | 25 | 1490,00 |
| P.COLOMBIA | FRANCIS | 4 | 80 | 20 | 35.000 | 2 | 170,00 |
| MARIMBONDO | FRANCIS | 8 | 186 | 60,3 | 35.000 | 2 | 190,00 |
| ITUMBIARA | FRANCIS | 6 | 354 | 80 | 21.000 | 51 | 2860,00 |
| FUNIL | FRANCIS | 3 | 72 | 67 | 35.000 | 1 | 130,00 |
| CORUMBÁ | FRANCIS | 3 | 125 | 73,5 | N.I. | N.I. | N.I. |
| TUCURUÍ | FRANCIS | 12 | 360 | 66 | 21.000 | 1 | N.I. |
| C. NUNES | KAPLAN | 2 | 20 | 23 | 8.600 | 5 | 580,00 |
| I. SOLTEIRA | FRANCIS | 20 | 161,5 | 46 | 20.000 | 22 | 3530,00 |
| JUPIÁ | KAPLAN | 14 | 100,8 | 25,4 | 20.000 | 65 | 5970,00 |
| 3 IRMÃOS | FRANCIS | 6 | 54 | 45,8 | 20.000 | 50 | 5000,00 |
| N.AVANHAN. | KAPLAN | 3 | 34 | 29,7 | 20.000 | 5 | 1500,00 |
| PROMISSÃO | KAPLAN | 3 | 88 | 27,4 | 20.000 | 5 | 1500,00 |
| CHAVANTES | FRANCIS | 4 | 103,5 | 76 | 20.000 | 1 | 2000,00 |
| CAPIVARA | FRANCIS | 4 | 160 | 50 | 20.000 | 1 | 1750,00 |
| ROSANA | KAPLAN | 4 | 80 | 17 | 20.000 | 2 | 1250,00 |
| TAQUARUÇU | KAPLAN | 5 | 100,8 | 23 | 20.000 | 1 | 1600,00 |
| JURUMIRIM | KAPLAN | 2 | 48,75 | 35 | 20.000 | 1 | 1000,00 |
| SOBRADINHO | FRANCIS | 6 | 178 | 27,2 | 24.000 | N.I. | N.I. |
| S. SANTIAGO | FRANCIS | 4 | 355 | 106 | 18.000 | 11 | 3000,00 |
| S. OSÓRIO A | FRANCIS | 4 | 182 | 70 | 22.287 | 8 | 900,00 |
| S. OSÓRIO B | FRANCIS | 2 | 175 | 70 | 23.601 | 4 | 900,00 |
| P. FUNDO | FRANCIS | 2 | 110 | 253 | 26.000 | 1 | N.I. |

HER - Horas de operação - R\$/HO - Custo de reparo por 1000 horas de operação por unidade

kg/HO - kg de eletrodo depositado por 1000 horas de operação por unidade