

# **CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS DO TIPO FRANCIS E KAPLAN NO BRASIL**

Cid Antunes Horta

Carmo Gonçalves

José Adalberto Lage Calainho

Fernando Gillet Lomônaco

ELETRONORTE – Edif. Venâncio 3000, bloco C, Sala 310 – Brasília – DF CEP 70718 900

## **RESUMO**

A produção de energia elétrica no Brasil possui uma predominância Hidráulica (92%). O potencial hidráulico a ser explorado é de grande envergadura, em torno de 206.992 MW e nos últimos anos tem-se observado um crescimento médio da demanda em torno de 5%, sendo que em algumas regiões este crescimento chega a 20%.

Para atender este aumento da demanda, as usinas instaladas têm operado em seus limites máximos, o que tem contribuído para um incremento de ocorrência de cavitação nas turbinas hidráulicas.

Hoje no país 75% das companhias geradoras de energia elétrica através de Usinas Hidrelétricas estão operando com algum tipo de problema de cavitação em seus equipamentos.

Este trabalho pretende contribuir com o CONEM2000, 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 seqüência dos eventos de formação de bolhas de vapor, com o seu posterior desenvolvimento, implosão ou explosão, tendo como origem a queda de pressão associada a pequenos núcleos existentes nos líquidos. O fenômeno de cavitação produz efeitos indesejáveis e agressivos, dos quais pode-se citar por exemplo os abaixo descritos:

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

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

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

No Brasil, as indústrias naval e aeroespacial estão se desenvolvendo e a produção de energia elétrica é essencialmente hidráulica (em torno de 92%). O potencial hidráulico a ser explorado é de grande envergadura ( da ordem de 206.992,000MW ) e a demanda de energia tem crescido em algumas regiões até 20% ao ano. Por essas razões, os estudos e o desenvolvimento de técnicas de controle da cavitação necessitam ser fortalecidos.

Levantamentos efetuados em 1991 pelo CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica da Eletrobrás), mostraram que os gastos com a recuperação das turbinas hidráulicas no Brasil foram da ordem de US\$13,000,000.00 (treze milhões de dólares), isto considerando apenas despesas com mão-de-obra e materiais empregados nos reparos .

Os danos causados pela cavitação em componentes de turbinas hidráulicas tem envolvido não apenas custos elevados de reparo mas principalmente considerável perda de energia gerada por indisponibilidade das máquinas, limitação da flexibilidade operacional do sistema e redução da vida útil dos equipamentos afetados.

Hoje no país 75% das companhias geradoras de energia elétrica através de usinas hidrelétricas estão operando com algum tipo de problema de cavitação em seus equipamentos.

Atualmente um dos aspectos relevante da cavitação em turbinas hidráulicas é que na ausência de um modelo numérico suficientemente abrangente, o fenômeno é avaliado em modelos de escala reduzida, com posterior transposição dos resultados experimentais para o protótipo. Os resultados obtidos das transposições da turbina modelo para a turbina protótipo vem mostrando bons resultados, entretanto eles possuem um fator de segurança com relação aos limites cavitativos, em virtude dos efeitos de escala, que podem conduzir a surpresas no protótipo.

Este trabalho apresenta dados relativos a erosão por cavitação em turbinas hidráulicas instaladas no Brasil, principalmente turbinas Kaplan e turbinas Francis até 1997. Também é feita a análise de métodos e processos de reparos da erosão, bem como o comportamento dos materiais utilizados e velocidade de erosão.

## **2- CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS**

Atualmente o fenômeno de cavitação tem sido de grande preocupação para o setor elétrico quando se trata de usinas hidrelétricas. A cavitação pode ocorrer em qualquer estrutura hidráulica de uma usina, tais como: vertedouro, válvulas, canais, túneis, comportas e principalmente nas 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) em menor escala, ocorre como consequência do ciclo da bolha, originado devido a gradientes de pressão e a existência de germes ou núcleos contidos nos fluidos.

Este tipo de cavitação normalmente aparece ao longo de contornos sólidos, ou no interior dos fluidos, devido a queda de pressão para valores inferiores ao da pressão de vapor do líquido. 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 repercursão das ondas de choques geradas.

Com a finalidade de determinar e quantificar a relação entre as condições dinâmicas e de pressão estática que conduzem ao início da cavitação, foi desenvolvido um índice adimensional quantitativo que caracteriza o fenômeno. Este índice é denominado pela literatura técnica por índice, parâmetro ou coeficiente de cavitação.

Este coeficiente é definido pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{(P_{\infty} - P_v)}{(0.5\rho U_{\infty}^2)} \quad (1)$$

Onde:  $P_v$  - Pressão e vapor do líquido;  $\rho$  - densidade do fluido;  $U_{\infty}$  - Velocidade do fluido na região não perturbada.

Esse coeficiente, que para o caso de turbinas hidráulicas é denominado de coeficiente de Thoma, é uma referência para os níveis de cavitação incipiente, desenvolvida e desinente. Para turbinas hidráulicas este coeficiente assume a seguinte expressão:

$$\sigma_p = \frac{(H_a - H_v - H_s)}{H} \quad (2)$$

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  $\sigma_p$  - coeficiente de cavitação da instalação.

As turbinas normalmente são projetadas e instaladas de forma que o coeficiente de cavitação da instalação ( $\sigma_p$ ), seja superior ao coeficiente de cavitação crítico ( $\sigma_c$ ). 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.

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.

O sistema de erosão por cavitação pode ser dividido basicamente em dois mecanismos:

- Mecanismo hidráulico, onde as depressões locais geram as estruturas de vapor, que crescem e colapsam, induzindo impactos sobre as paredes sólidas;
- Mecanismo de danos, onde o material da parede sólida é danificado com posterior remoção de massa, devido aos impactos oriundos da cavitação.

A interface entre estes dois mecanismos 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, na tabela 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 - Resultado de desempenho do eletrodo HQ-913 x AWS E 309 em Foz do Areia

<b>Horas de operação ( h )</b>	<b>AWS-E-309 - Profundidade Pit's ( mm )</b>	<b>HQ-913 - Profundidade Pit's ( mm )</b>
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 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, 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 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**

- Relatórios Técnicos e Informações Técnicas da maioria das Companhias do Setor Elétrico do Brasil; ELETRONORTE, ELETROSUL, FURNAS, CHESF, CEMIG, CESP, ITAIPU, COPEL, CEB, LIGHT, ESCELSA, ENERSUL, ELETROPAULO, CPFL E CERJ, 1997.
- Gonçalves, C. –“Cavitation Flow on Unsteadiness Mechanisms” – ENM/UnB, Master Dissertation, 1997.
- Brasil, A.C.P, and Others –“Hydraulics Cavitation Monitoring” – ENM/UnB – CESP, Report, 1996.
- Voith Hydro Power Generation –“Primeiro Seminário de Reabilitação e Modernização de Usinas Hidrelétricas”- 1997.
- Souza, N.C.; Silva, R.G. & Herek, O. –“Experimental Application With Hydroloy HQ 913” – COPEL, pp 1-6, 1991.

- Bourdon, P. et al –“Cavitation Erosion Prediction on Francis Turbines – Part 1 – Measurements on the Prototype, Hydraulic Machinery and Cavitation” – pp 534-543, 1996.



ANEXO I

Tabela 1 - Resultado da pesquisa sobre cavitação nas concessionárias 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

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

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