



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GMI - 15  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO XII  
ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS - GMI**

**APLICAÇÃO DE CONFIABILIDADE ÀS INDISPONIBILIDADES DAS UNIDADES GERADORAS DE FURNAS:  
ANÁLISES QUALITATIVA E QUANTITATIVA**

**Evandro Freire \***

**FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.**

**RESUMO**

A partir do controle de índices das indisponibilidades forçadas e programadas de uma planta hidrelétrica de FURNAS, correspondendo a um período de observação de 19 anos, o trabalho apresentará dois métodos de avaliação de confiabilidade operacional. O primeiro, de forma qualitativa e baseado em séries históricas, permitirá correlacionar as indisponibilidades programadas com as forçadas. O segundo, um método quantitativo, permitirá calcular o tempo máximo previsto de indisponibilidade forçada de uma unidade geradora qualquer para um nível de confiabilidade desejado. O cálculo fará uso de duas funções de distribuições de probabilidades estatísticas, Gamma e Weibull, que, após determinadas, terão os seus ajustamentos aos dados observados verificados através do teste de aderência do qui-quadrado.

O estabelecimento das curvas de tendências históricas e de distribuição de probabilidade acumuladas serão então usados para avaliar o estágio de desgaste destas unidades, permitindo priorizar intervenções, bem como fornecer uma visão sobre a qualidade de manutenção empregada. O método de ajustamento quantitativo pode ainda ser empregado como parâmetro de avaliação, sob o ponto de vista da confiabilidade probabilística ou de índice de confiabilidade, da qualidade da energia gerada pelas diversas plantas geradoras de uma empresa concessionária ou mesmo entre empresas geradoras pertencentes ao setor de energia elétrica.

**PALAVRAS-CHAVE**

Indisponibilidade, Confiabilidade, Qualidade, Manutenção, Hidrogerador.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Podemos definir indisponibilidade como sendo a relação entre o tempo de manutenção, com a unidade hidrogeradora parada, e a soma do tempo em que o hidrogerador está disponível para a operação, mesmo que não operando, mais o tempo de manutenção com a máquina parada.

Um hidrogerador pode estar indisponível por 3 motivos: uma parada para manutenção programada, uma parada forçada ou em função de uma causa externa, como por exemplo, um distúrbio na rede. Neste trabalho abordaremos apenas as duas primeiras causas, já que além de estarem tipicamente relacionadas à geração, praticamente respondem pela quase totalidade do tempo de indisponibilidade. Assim sendo, o tempo de parada programada corresponde ao período de tempo em que a unidade não se encontra disponível à operação devido às atividades de manutenção planejadas, enquanto o tempo de parada não programada, ou forçada, diz respeito ao período de tempo durante o qual a unidade se encontra indisponível para a operação devido a uma avaria imprevista.

\*Rua Real Grandeza, 219, Bloco A, Sala 701 - CEP 22283-900 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL  
Tel.: (21) 2528-4862 - Fax: (21) 2528-5268 - e-mail: efreire@furnas.com.br

## 2.0 - SÉRIES HISTÓRICAS

Séries históricas são dados classificados de acordo com o tempo. Para se ter uma melhor compreensão do comportamento de uma série usualmente se faz seu ajustamento a diversas funções matemáticas, sendo as mais largamente utilizadas a reta, a parábola e a função exponencial. Seu estudo visa comparações e análises aproximativas.

Deve ser ressaltado que o uso de curvas ou retas ajustadas a séries históricas, com o objetivo de fazer-se projeções de longo prazo, deve ser visto com restrições, desde que eventuais previsões podem estar erradas em largos valores. No entanto, uma de suas aplicações típicas é a pesquisa de possíveis relações de causa e efeito. Desta forma, pode-se buscar uma comprovação de correlação entre os tempos de indisponibilidade programada e indisponibilidade forçada. De maneira a demonstrar a potencialidade do método, usaremos dados de indisponibilidades programadas e forçadas da Usina de Porto Colômbia referentes ao período de 1985 a 2003.

A usina hidrelétrica de Porto Colômbia, situada na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, no rio Grande, é composta por 4 geradores de eixo vertical de 84 MVA cada, acionados por turbinas Kaplan. Estas unidades entraram em operação ao longo dos anos de 1973 e 1974. A Figura 1 mostra tendências de estabilidade para as indisponibilidades forçadas e programadas, baseadas nas indisponibilidades médias observadas nas 4 unidades, no entanto, o mesmo não se repete quando semelhante abordagem é aplicada de modo individualizado para cada máquina.

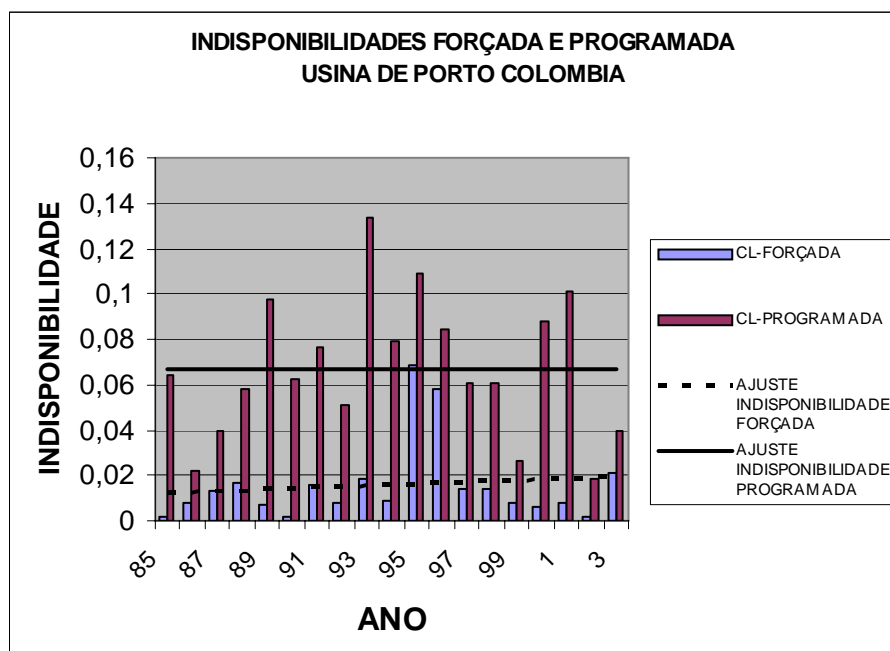


FIGURA 1 – Média para os 4 hidrogeradores da Usina de Porto Colômbia

Na Figura 2, correspondente aos dados da unidade 1, pode-se observar que mesmo havendo uma leve tendência de redução da manutenção programada, não houve, em contra-partida, uma piora na indisponibilidade forçada, que mantém a mesma tendência declinante. Por outro lado, na Figura 3, correspondente aos dados da unidade 4, observa-se que até meados da década de 90 tinham-se tendências ascendentes para ambas as indisponibilidades, a partir de então estas tendências tornam-se declinantes. Uma comparação entre as unidades 1 (com  $\mu_p=0,065024$ , indisponibilidade média programada, e  $\mu_f=0,002156$ , indisponibilidade média forçada) e 4 (com  $\mu_p=0,087789$  e  $\mu_f=0,033441$ ) mostra que a manutenção forçada desta última correspondeu a 15 vezes o tempo da unidade 1, apesar do tempo dedicado à manutenção programada da unidade 4 ser 35 % superior, na média anual, ao da unidade 1 no período de referência. Considerando-se a discrepância entre as duas unidades e que a qualidade de manutenção é a mesma para ambas, já que é executada por pessoal e recursos idênticos, seria interessante uma pesquisa de defeitos na unidade 4 a fim de saber-se a origem de tantas interrupções forçadas.

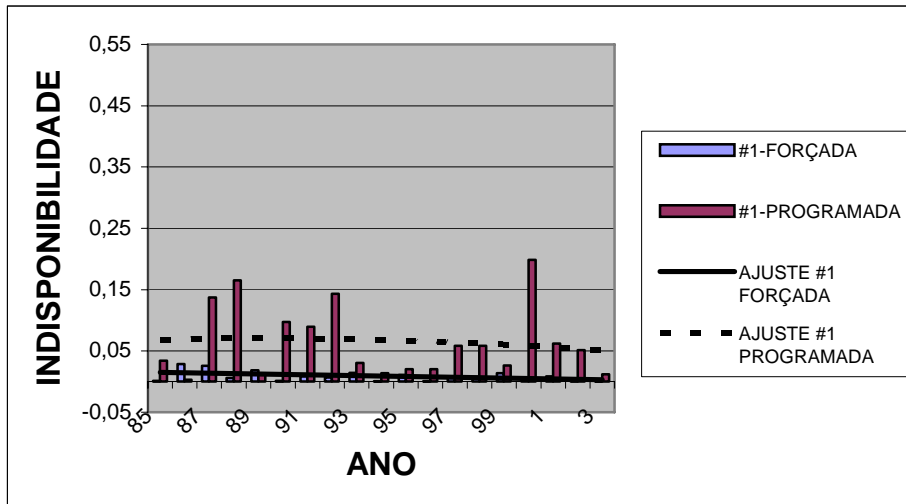


FIGURA 2 – UG#1 apresenta a melhor situação da Usina de Porto Colômbia

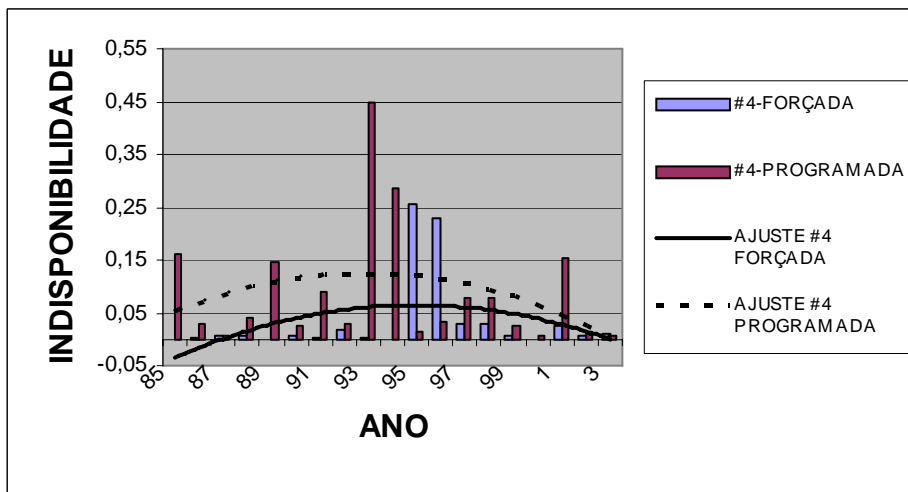


FIGURA 3 – UG#4 apresenta a pior situação da Usina de Porto Colômbia

### 3.0 - FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE

O histograma das indisponibilidades forçadas da usina de Porto Colômbia mostra uma assimetria bastante acentuada, conforme pode ser visto na Figura 4, o que impede seu ajustamento através de uma função de distribuição normal. Por admitirem forte assimetria e serem distribuições mais aceitas para modelos do tipo “tempo para falha” de equipamentos e componentes, faremos o ajustamento segundo as funções Gamma e Weibull.

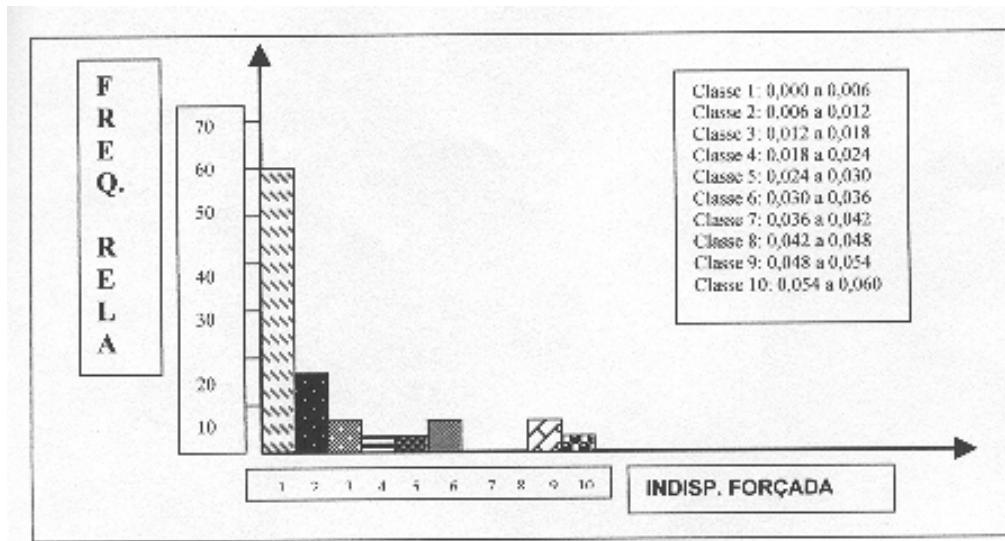


FIGURA 4 – Histograma das indisponibilidades forçadas da Usina de Porto Colômbia

### 3.1 Distribuição Gamma

A função de densidade de probabilidade Gamma é definida por:

$$f(x; \eta, \lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} x^{\eta-1} e^{-\lambda x}, & x \geq 0, \lambda > 0, \eta > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad [I]$$

Onde  $\Gamma(\eta)$  é a função Gamma:

$$\Gamma(\eta) = \int_0^{\infty} x^{\eta-1} e^{-x} dx \quad [II]$$

Os parâmetros  $\lambda$  e  $\eta$  são, respectivamente, os parâmetros de escala e forma, sendo calculados por:

$$\lambda = (n-1) \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad [III]$$

$$\eta = \lambda \cdot \bar{x} \quad [IV]$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [V]$$

Ao contrário dos recursos de cálculo usados no passado, tais como ábacos, tabelas e régua, modernamente o cálculo é enormemente facilitado fazendo-se uso de computadores e softwares específicos que dispõem de funções estatísticas. Como exemplo citamos o Excel™ e mesmo um “site” disponível na Internet acessado gratuitamente em [www.stalets.com/free/pdist.htm](http://www.stalets.com/free/pdist.htm).

Para  $n=46$  e fazendo uso de [III], [IV] e [V], além de softwares estatísticos, chegamos a  $\lambda=0,0212$  e  $\eta=0,41367$ . A Figura 5 apresenta a função de probabilidade acumulada Gamma para Porto Colômbia.

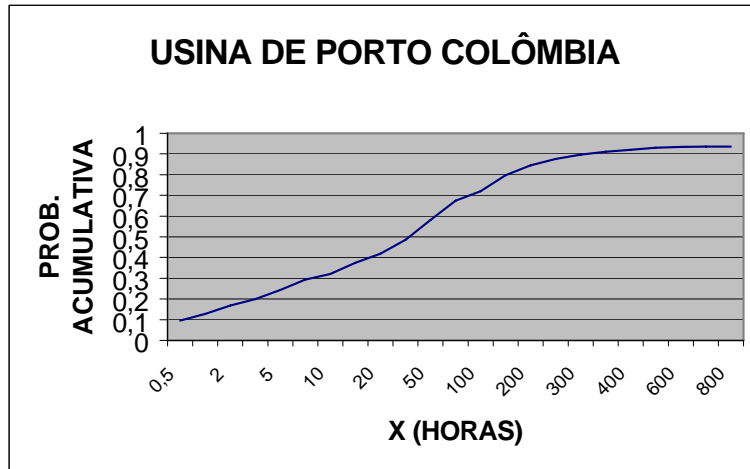


FIGURA 5 – Função de probabilidade acumulada Gamma

### 3.2 Distribuição de Weibull

A função de densidade de probabilidade de Weibull é definida por:

$$f(t; \eta, \sigma) = \begin{cases} \frac{\eta}{\sigma} \left(\frac{t}{\sigma}\right)^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^{\eta}\right], & t \geq 0, \sigma > 0, \eta > 0 \\ 0 & \text{[VI]} \end{cases}$$

Uma estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull a partir dos dados observados geralmente envolve uma solução de equações não-lineares. O processo gráfico (1) é muito mais simples e usualmente adequado para aplicações práticas. A Figura 6 permite extrair da reta de menor coeficiente angular os parâmetros de forma ( $\eta=0,6756$ ) e de escala ( $\sigma=34,4807$ ). Como os pontos plotados tendem a estar alinhados numa reta, o modelo pode ser considerado adequado.

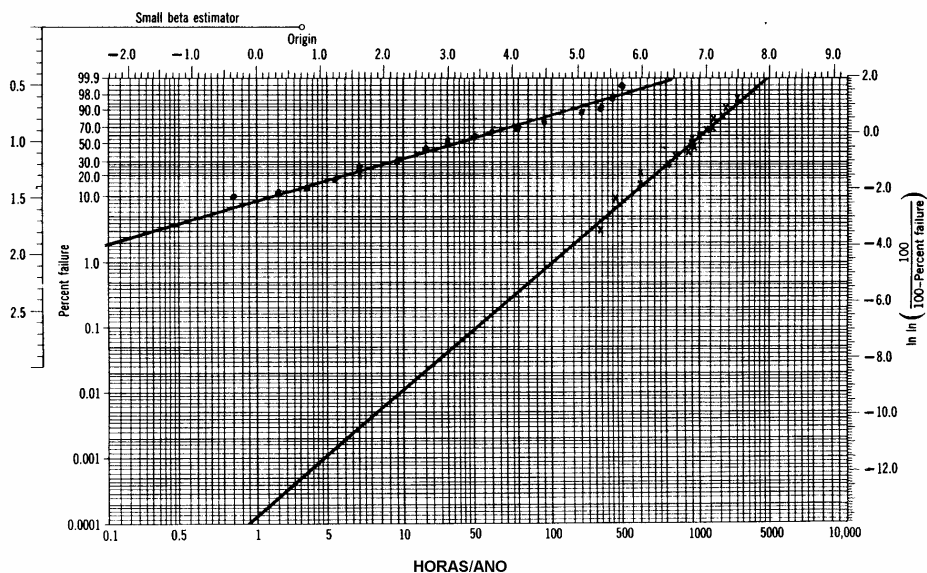


FIGURA 6 – Determinação de parâmetros de forma e de escala (Weibull)

A Figura 7 apresenta a função de probabilidade acumulada de Weibull para Porto Colômbia. Sua interpretação permite extrair, por exemplo, que na usina de Porto Colômbia o tempo de indisponibilidade forçada, para uma confiabilidade de 95%, não ultrapassa a 180 horas/ano/hidrogerador. Ou por outro lado, existe uma probabilidade de

50% de que qualquer gerador fique indisponível forçadamente entre 18 e 120 horas ao longo de um ano. Analogamente, interpretação similar pode ser feita fazendo-se uso da Figura 5.

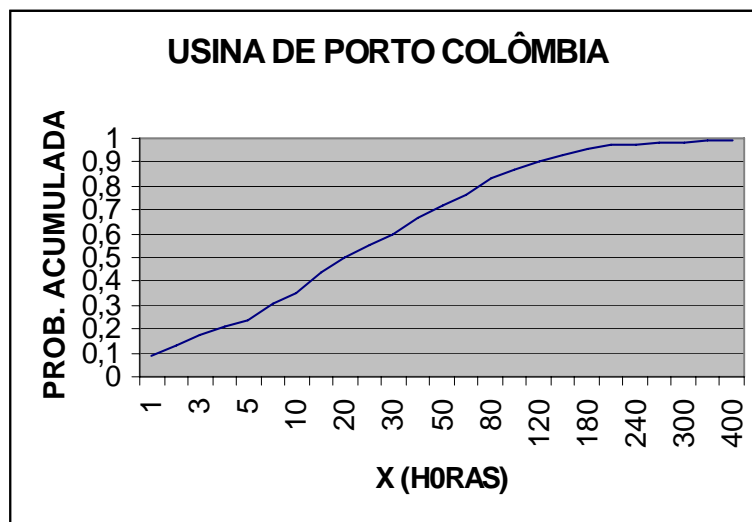


FIGURA 7 – Função de probabilidade acumulada Weibull

#### 4.0 - TESTE DE ADERÊNCIA DO QUI-QUADRADO ( $\chi^2$ )

Um teste estatístico de uma hipótese de distribuição provê uma técnica para avaliar se um modelo assumido representa uma descrição adequada dos dados observados. Os seguintes passos estão usualmente envolvidos:

Passo 1: um número conhecido como “teste estatístico” é calculado a partir dos dados observados.

Passo 2: a probabilidade de obter o teste estatístico calculado é determinada.

Passo 3: se a probabilidade de obter o teste estatístico calculado é baixa, conclui-se que o modelo assumido não é uma representação adequada dos dados observados.

Uma probabilidade de 0,10 ou 0,05 ou menos é considerada baixa. Se a probabilidade associada com o teste estatístico não é baixa, diz-se, então, que não há nenhuma evidência de que o modelo assumido é inadequado. O teste do qui-quadrado pode ser usado para qualquer modelo de distribuição. A Tabela 1 mostra as probabilidades calculadas para cada classe de indisponibilidade forçada de Porto Colômbia segundo os modelos Gamma e de Weibull.

A partir dos dados gerados na Tabela 1, calcula-se o teste estatístico e, fazendo-se uso de uma tabela de distribuição  $\chi^2$  para dois graus de liberdade (1), obtém-se a probabilidade para cada uma das duas distribuições:

Tabela 1 – Probabilidades por classe

Classe	Limites de Classe	Horas Indispon. Anual	Casos Observados	Probabilidade Gamma	Valor Esperado Gamma	Probabilidade Weibull	Valor Esperado Weibull
1	0,000-0,006	0-53	28	0,463	21,3	0,560	25,8
2	0,006-0,012	53-105	8	0,211	9,7	0,260	12
3	0,012-0,018	105-158	3	0,098	4,5	0,095	4,4
4	0,018-0,024	158-210	1	0,060	2,8	0,035	1,6
5	0,024-0,030	210-263	2	0,036	1,6	0,020	0,9
6	0,030-0,036	263-316	1	0,025	1	0,015	0,7
7	0,036-0,042	316-368	0	0,016	0,7	0,010	0,5
8	0,042-0,048	368-421	0	0,010	0,5	0	0
9	0,048-0,054	421-473	2	0,007	0,3	0	0
10	0,054-(mais)	473-(mais)	1	0,074	3,4	0,005	0,2

Gamma:

$$\chi^2 = \frac{(28-21,3)^2}{21,3} + \frac{(8-9,7)^2}{9,7} + \frac{(6-8,9)^2}{8,9} + \frac{(4-5,9)^2}{5,9} = 3,96$$

$$\Pr\{\chi^2(2) > 3,96\} \cong 0,14$$

Weibull:

$$\chi^2 = \frac{(28-25,8)^2}{25,8} + \frac{(8-12)^2}{12} + \frac{(10-8,3)^2}{8,3} = 1,87$$

$$\Pr\{\chi^2(2) > 1,87\} \cong 0,40$$

Os dados observados não contradizem as hipóteses dos modelos assumidos das distribuições Gamma e de Weibull, no entanto, esta última está em bem melhor concordância com os dados fornecidos.

#### 5.0 - REAVALIANDO A CONFIABILIDADE

A partir de 1998, a empresa iniciou uma revisão de suas práticas de manutenção em suas unidades geradoras que, em muitos dos casos, acarretou em um aumento de tempo entre duas revisões preventivas seguidas. Passado algum tempo desta implementação, é recomendável avaliar se, por conta disto, perdas indesejáveis de confiabilidade não foram também introduzidas e, por conseguinte, menores disponibilidades. Acrescentando as indisponibilidades forçadas da Usina de Porto Colômbia a partir de 1999 ao período anteriormente em análise, e escolhendo a função acumulada de Weibull como modelo de ajustamento, obtém-se a Figura 8. A comparação desta figura com a Figura 7 mostra que, apesar das mudanças implementadas no programa de manutenção visando basicamente reduzir o tempo de manutenção programada e, em consequência, elevar a disponibilidade operacional, a confiabilidade das unidades geradoras de Porto Colômbia manteve-se inalterada.

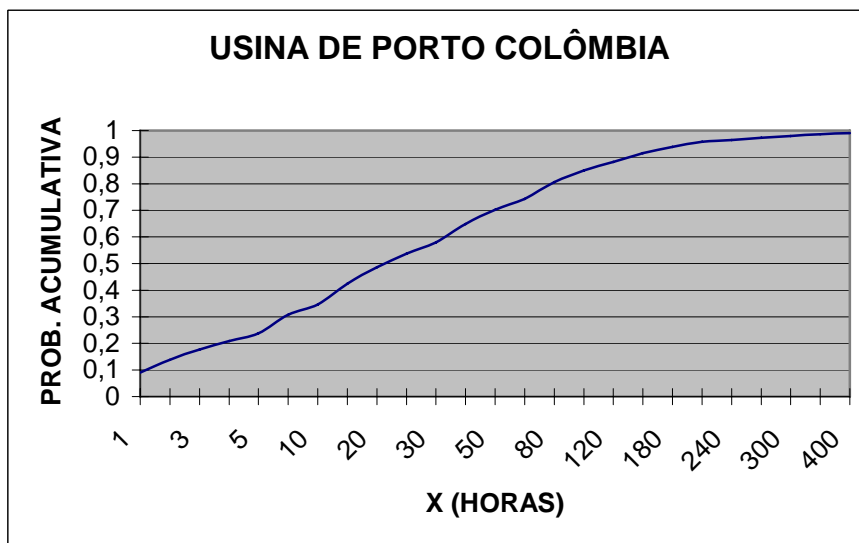


FIGURA 8 – Função de probabilidade acumulada Weibull (após mudanças no plano de manutenção programada)

#### 6.0 - CONCLUSÕES

A análise obtida através de séries históricas é qualitativa e pode ser utilizada, por comparação entre unidades geradoras congêneres, para realçar suas diferenças e possibilitar a pesquisa de defeitos sistemáticos ou falhas de processo que ocasionem ou expliquem aumentos nas indisponibilidades forçadas.

Os dados observados de indisponibilidades forçadas podem ser ajustados para estimar os tempos para reparos anuais, devido a avarias forçadas não previstas e para um desejado nível de confiança. Isto, em conjunção com o método qualitativo, permite quantificar em termos de aumento ou redução de disponibilidade operacional eventuais melhorias implementadas no processo ou correções de defeitos crônicos após um novo período de observação. A função de distribuição de Weibull mostrou-se mais adequada para fazer-se este ajustamento.

Em um cenário atual, em que se busca oferecer qualidade crescente, onde há fiscalização e exigências de consumo, o método quantitativo pode ser usado também como auxiliar na predição da oferta disponível de energia, como por exemplo, nos compromissos contratuais de venda de eletricidade, reduzindo-se, desta forma, a possibilidade de penalizações por contratos não cumpridos. Pode ainda o método de ajustamento, usando-se a função de probabilidade de Weibull, ser empregado como parâmetro para avaliar, sob o ponto de vista de confiabilidade probabilística, a qualidade da energia gerada pelas diversas plantas geradoras de uma empresa concessionária ou mesmo entre empresas geradoras de energia elétrica, visto que quanto menos tempo estatisticamente as unidades geradoras ficarem indisponíveis forçadamente, maior será a confiança na qualidade da energia gerada por elas. A Figura 9 mostra os índices (fictícios, exceto para Porto Colômbia) de confiabilidade de plantas geradoras de origem hidráulica do sistema FURNAS.

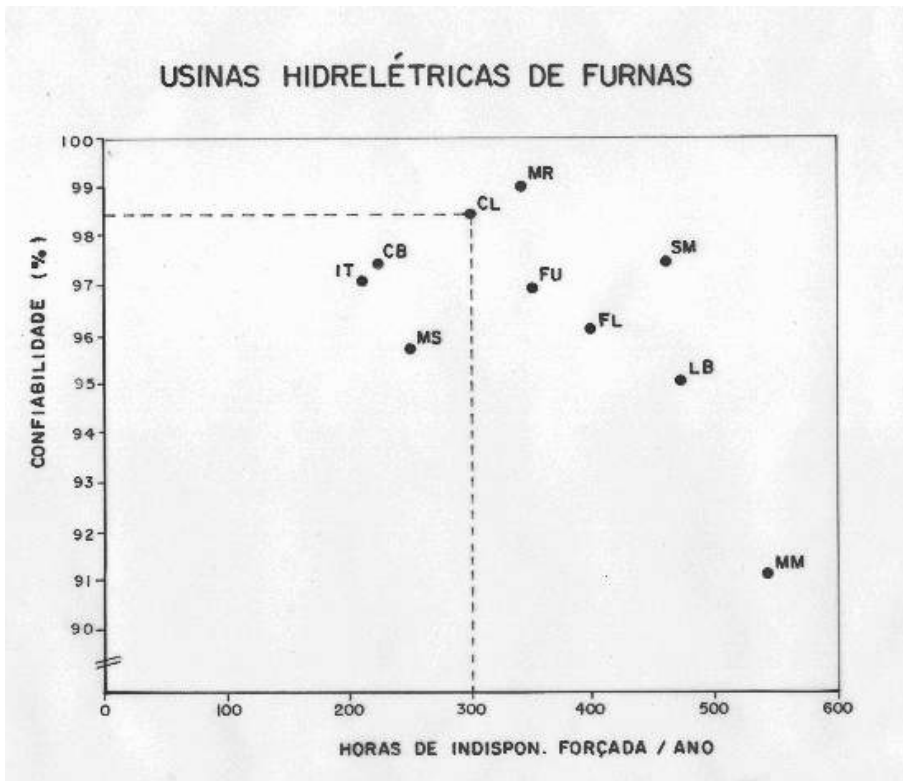


FIGURA 9 – Índices de confiabilidade para plantas de FURNAS

## 7.0 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- (1) Hahn, G. J., Shapiro, S. S., Statistical Models in Engineering, John Wiley & Sons, 1967