



## **Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH**

### **Modelo de Avaliação de Vida Útil de Geradores**

**GERSON ANDRE BRAULIO(1); EDSON DA COSTA BORTONI(2); EDUARDO CRESTANA GUARDIA(2);  
CEMIG GT(1); UNIFEI(2);**

#### **RESUMO**

O trabalho apresenta os resultados de estudos de análises estatísticas de dados de falha de geradores do parque CEMIG e subsidiárias. Neste estudo de caso é aplicada a metodologia de cálculo da vida útil que leva em consideração o efeito do envelhecimento sobre a taxa de falha do equipamento [1]. A partir deste método são obtidos valores aproximados da vida útil do equipamento.

Tal modelo tem com base os conceitos da área de Confiabilidade aplicados num modelo de mistura de funções de distribuição de probabilidade do tipo Weibull na forma da “Curva da Banheira”.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Vida útil, gerador, enrolamento estatístico, análise estatística, análise de falha.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

O parque gerador do Brasil vem se tornando cada vez mais velho. No caso da Cemig-GT, existem usinas hidráulicas com geradores operando desde 1914, havendo ainda um número significativo de unidades que iniciaram a operação em 1959, estes atualmente quase atingem duas vezes a expectativa regulatória.

A determinação da correta forma de manutenção e necessidade de investimento envolvem inúmeras variáveis como equipes de manutenção disponível, custo de paradas para avaliação inspeções, normas regulamentadoras e melhores práticas do mercado. No caso de definição de grandes investimentos para a reforma completa, a definição do momento adequado esbarra na avaliação do estado do equipamento e da vida útil remanescente destes hidrogeradores.

À medida que os geradores envelhecem ou sofrem esforços mecânicos acima da operação normal, deterioram-se devido ao desgaste do isolamento até o ponto em que as falhas ocorrem com maior frequência.

Dentre os múltiplos modos de falhas de hidrogeradores, já foram diagnosticados complexos mecanismos de falha envolvendo um grande número de componentes com base em diagnósticos e experiência de especialistas, na forma de um diagrama de causa, estado físico e modo de falha onde foram identificados 32 causas raízes, 10 modos de falha, 150 diferentes estados operativos levando a 250 mecanismos de falha [5].

Devido as características únicas de cada projeto, diferentes tipos de sistemas de isolamento e especificidades de cada fabricante, uma análise estatística de um grupo de máquinas pode trazer uma boa referência para o

planejamento de paradas para a manutenção ou até mesmo para as paradas maiores para uma reforma, antecedendo as falhas que podem indisponibilizar os geradores por muito tempo.

## 2.0 - DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Estimativa de Tempo de Vida

Em geral, um fabricante fornece a estimativa de vida média do seu equipamento baseada em algumas premissas e cálculos teóricos. No entanto, a referida estimativa não é adequada, por não considerar as condições reais de utilização do equipamento.

Pode-se estimar o tempo médio de vida, tomando-se a média simples das vidas observadas (já encerradas) de um conjunto de indivíduos de uma grande população. Infelizmente, no caso dos equipamentos elétricos, este procedimento não é o ideal. A maioria dos equipamentos de sistemas de potência, tais como transformadores, reatores, cabos e geradores possuem um tempo de vida relativamente longo, fazendo com que os históricos de vidas disponíveis nos bancos de dados das empresas sejam limitados [6]. Mesmo com a utilização de dados de diferentes empresas, as amostras ainda podem ser consideradas pequenas para uma estimativa confiável, sobretudo, considerando a possibilidade de existirem diferenças nas condições ambientais e regras de operação entre as empresas.

### 2.2 Cálculo da Probabilidade de Falha

As funções gerais da confiabilidade relacionadas ao tempo de falha são a função de densidade de falha,  $F(t)$ ; a função de densidade de probabilidade,  $f(t)$ ; a taxa de falha,  $\lambda(t)$ ; a taxa de falha acumulada,  $H(t)$ ; e a Vida Útil Remanescente,  $\mu(t)$ . Esses eventos relacionados com o tempo de vida podem ser representados por distribuições de probabilidade de diferentes tipos, como exponencial, normal, log-normal, Weibull.

Em confiabilidade, a variável aleatória estudada é o tempo até a ocorrência da falha. Esta variável é do tipo contínua, não negativa e está associada a uma distribuição de probabilidade [2]. Seis funções matematicamente equivalentes podem ser usadas para descrever a distribuição da vida útil (ou tempo de falha) sendo que cada uma delas inequivocamente determina as outras cinco. As equações para a distribuição de Weibull e suas transformações podem ser consultadas em [3].

É importante conhecer algumas relações matemáticas entre essas funções.

$$\text{Densidade (pdf)} : f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dS(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\text{Falha (cdf)} : F(t) = \int_0^t f(z) dz \quad (2)$$

$$\text{Sobrevivência} : S(t) = \int_t^\infty f(z) dz = 1 - F(t) \quad (3)$$

$$\text{Taxa de falha} : \lambda(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = -\frac{d}{dt}(\log S(t)) \quad (4)$$

$$\text{Taxa de falha acumulada} : H(t) = \int_0^t \lambda(t) dt = -\ln(1 - F(t)) \quad (5)$$

$$Vida \acute{U}til \text{ Remanescente} (VUR): (t) = \frac{\int_0^{\infty} S(z) dz}{S(t)} \quad (6)$$

A taxa de falha descreve a frequência instantânea de falha. Já a taxa de falha acumulada é interpretada como a probabilidade de falha no tempo  $t$ , dado que a amostra sob estudo sobreviveu até o tempo  $T$ . A Vida Útil Remanescente ou Residual (VUR) também pode ser calculada, sendo importante em planejamento de manutenção. Existe aqui um problema de taxonomia que gera confusão devido ao termo “rate” em Inglês, pois a taxa de falha (“failure rate”) representa o número de falhas ocorridas em determinado período, que difere da probabilidade do equipamento estar falhado (“forced outage rate”).

A distribuição de Weibull pode ser escrita de uma forma mais ampla com três parâmetros, mas pode ser definida por dois ou por apenas um parâmetro assumindo algumas premissas [4]. As equações gerais para a densidade e a taxa de falha são:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta}} \quad (7)$$

$$\lambda(t) = \left( \frac{\beta}{\alpha} \right) \left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (8)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} f(t) &\geq 0, t \geq 0 \text{ ou } \gamma \\ \beta &> 0, \alpha > 0 \\ -\infty &< \gamma < +\infty \end{aligned}$$

$\alpha$  = parâmetro de escala ou vida característica

$\beta$  = parâmetro de forma ou inclinação

$\gamma$  = parâmetro de localização ou período sem falha

Fazendo  $\gamma=0$  obtém-se a distribuição de Weibull de dois parâmetros. Se o  $\beta=C=constante$ , tem-se a distribuição com um parâmetro ( $\alpha$ ).

Uma vez conhecidos os parâmetros da distribuição, podem ser calculadas outras quantidades de interesse estatístico aplicando a análise descritiva envolvendo a média e a variância usando a função Gama(). As expressões usadas são as seguintes:

$$Gama: \Gamma(k) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{k-1} dx \quad (9)$$

$$Média: \bar{T} = \gamma + \alpha \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (10)$$

$$Variância: \sigma^2 = \alpha^2 \left[ \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2 \right] \quad (11)$$

$$Mediana: \check{T} = \gamma + \alpha (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (12)$$

$$Moda: \tilde{T} = \gamma + \alpha \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (13)$$

Em análise de vida útil utilizando a função de Weibull, também são usados modelos de mistura ou combinação de funções para representar os períodos diferentes da vida de um equipamento. O modelo teórico mais conhecido é o da “Curva da Banheira”, Figura 1, com as seguintes características:

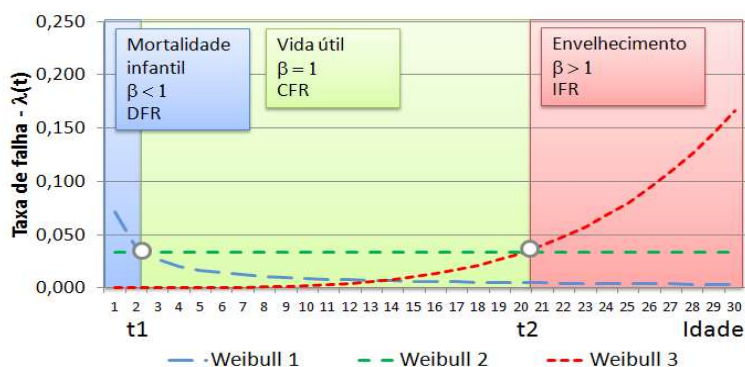


Figura 1 – Modelo de Curva da Banheira [1].

- Período de falhas prematuras ou mortalidade infantil: apresenta taxa de falha decrescente e parâmetro  $\beta < 1$  (característico de componentes eletrônicos e mecânicos);
- Período de vida útil: apresenta taxa de falha aproximadamente constante e parâmetro  $\beta = 1$ . Observam-se falhas aleatórias que podem ser contornadas com práticas de manutenção, ou seja, a função com este parâmetro representa exclusivamente as falhas reparáveis que ocorrem neste período;
- Período de desgaste ou fim de vida: apresenta taxa de falha crescente e parâmetro  $\beta > 1$ . Para  $1 < \beta < 4$  observa-se o início do período de envelhecimento ou envelhecimento prematuro e para  $\beta > 4$  constata-se falhas por desgaste e fim de vida útil. A função com este parâmetro representa exclusivamente as falhas não reparáveis que ocorrem neste período;

## 2.2 Avaliação Estatística do Parque Gerador

A Cemig-GT possui um parque gerador hidráulico com geradores operando desde 1914, havendo ainda um número significativo de unidades que iniciaram a operação em 1959, estes atualmente quase atingem duas vezes a expectativa de vida regulatória.

A Figura 2 mostra um histograma de frequências de entrada em operação dos geradores da CEMIG GT, considerando unidades por ano de instalação.



Figura 2 - Ano de Entrada de Operação dos Geradores.

A Figura 3 mostra a quantidade de falhas observadas na amostra e os anos em que estes geradores iniciaram a operação comercial.

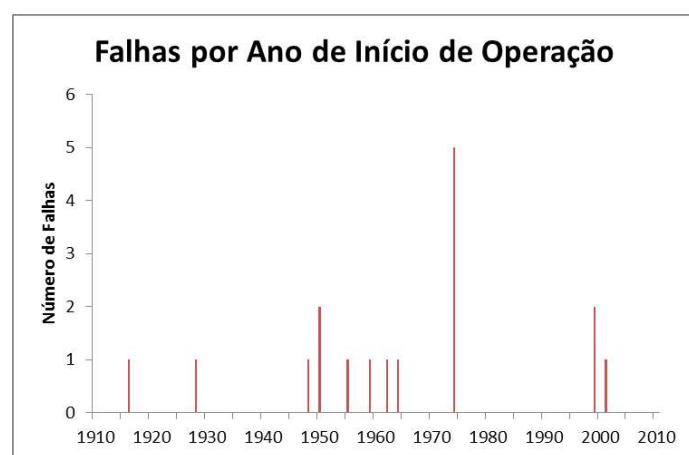


Figura 3 - Número de Falhas por Ano de Início de Operação.

Apesar de ter-se uma pequena amostra dos dados de falha, com base no método de ajuste proposto, numa primeira análise da função de densidade de probabilidade de falha, tem-se parâmetros de forma e escala sendo:  $\beta_0$  igual a 2 (distribuição de Weibull) e  $\alpha_0$  igual a 21,7 anos. As idades médias de falha dadas pelas distribuições são aproximadamente iguais há 19 anos, como exposto na Figura 4.

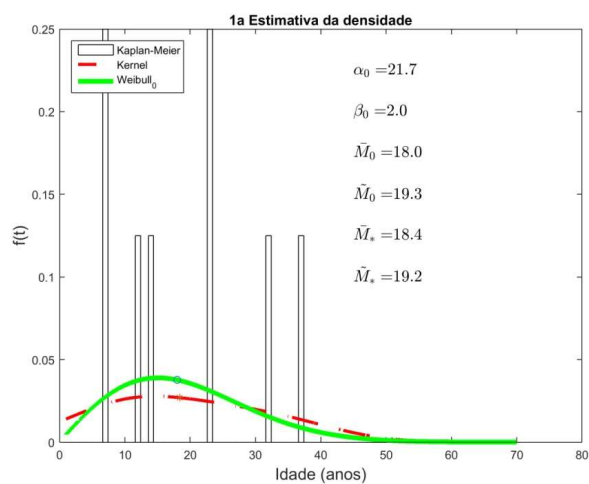


Figura 4 - Função densidade de probabilidade.

A Figura 5 e a Figura 6 mostram, respectivamente, a função de probabilidade acumulada de falha e a função complementar com a probabilidade acumulada de sobrevivência dos geradores.

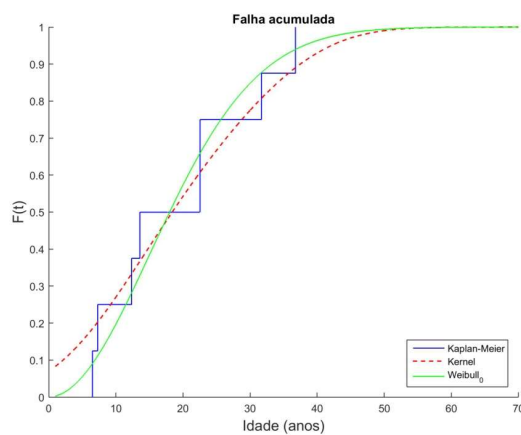


Figura 5 - Função probabilidade de falha acumulada  $F(t)$ .

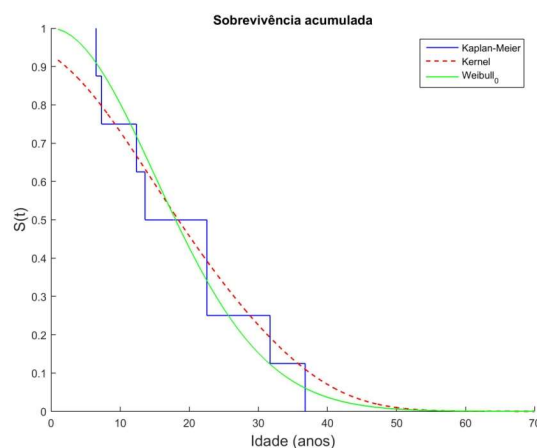


Figura 6 - Função de sobrevivência acumulada  $S(t)$ .

A função taxa de falha paramétrica foi calculada a partir dos seus parâmetros ( $\alpha_0$  e  $\beta_0$ ) pela Equação (11) e a taxa de falha não paramétrica foi obtida pela aplicação da definição teórica sobre os dados usando a Equação (7). Nota-se na Figura 7 um deslocamento maior da taxa de falha não paramétrica indicando o ponto de inflexão onde há aumento da taxa de falha.

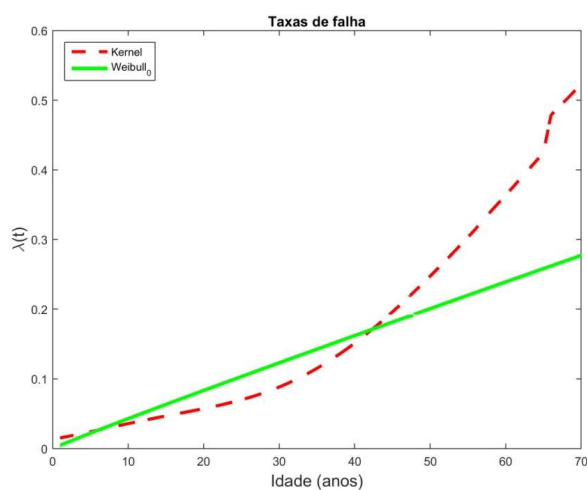


Figura 7 - Função taxa de falha não paramétrica.

Visualmente, o método paramétrico não justifica o aumento da taxa de falha próximo dos 36 anos, mas o método não paramétrico indica que há uma mudança de taxa de falha nítida a partir dessa idade.

A Figura 8 compara as taxas de falha acumuladas da função Weibull e Kernel. Esta função é interpretada como uma função de risco condicional do equipamento, uma vez que não tenha falhado até o ano  $t$ . Visualmente ela amplifica a taxa de falha melhorando a identificação do ponto de inflexão (joelho da curva).

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

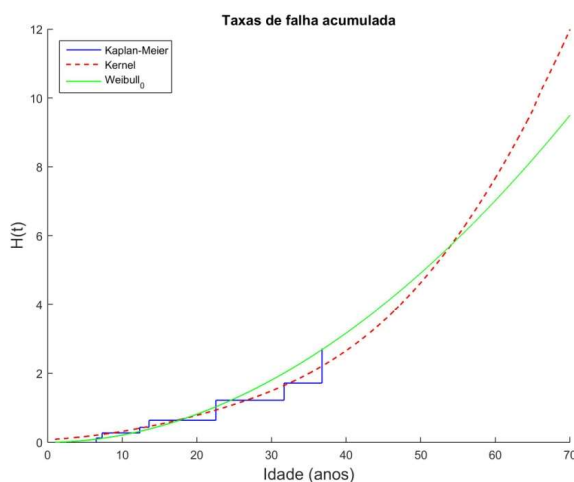


Figura 8 - Taxa de falha acumulada  $H(t)$ .

O melhor ajuste obtido entre as curvas de falha paramétrica e não paramétrica permite obter os parâmetros das distribuições Weibull 2 (representada pela função exponencial para a fase de vida útil, correspondendo ao período de taxa de falha constante) e Weibull 3 (representada pela função de Weibull para a fase de envelhecimento, correspondendo ao período de taxa de falha crescente) para as falhas das fases de vida útil e de envelhecimento. Como resultado deste ajuste define-se a “Curva da Banheira” para os geradores, como mostrado na Figura 9.

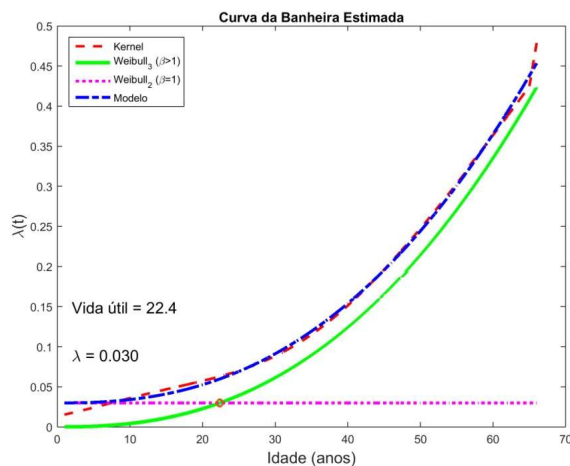


Figura 9 - Ajuste das funções paramétrica e não paramétrica.

Após o ajuste do modelo da curva da banheira, são obtidos os tempos de vida útil de 22,4 anos e vida característica devido ao envelhecimento igual a 36,0 anos. O tempo médio de falha (MTTF) durante o período de vida útil é igual a 13,0 anos.

Por definição o ponto onde a taxa de falha constante é igual à taxa de falha crescente, é o limite do período de vida útil do equipamento. Este tempo de vida útil é obtido graficamente pelo cruzamento das taxas de falha paramétricas (constante e crescente), analisando cada uma delas separadamente. Embora a vida característica de 36 anos seja a duração típica de um gerador em funcionamento, o período de vida útil tem um valor menor.



A Figura 10 mostra as novas funções de densidade de probabilidade calculadas com os parâmetros obtidos no modelo de ajuste proposto. No gráfico, nota-se o ponto de vida característica definido pela moda da distribuição de Weibull 3 da fase de envelhecimento.

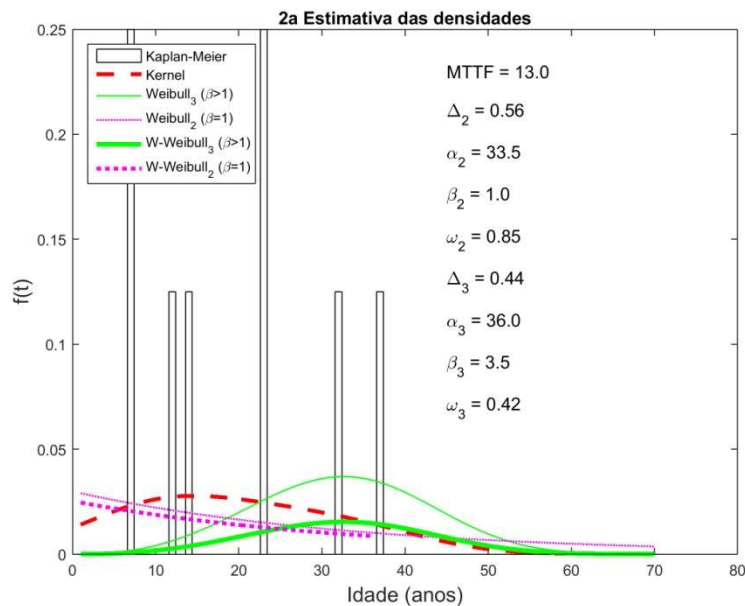


Figura 10 - Densidades de probabilidade paramétricas do modelo.

Os parâmetros das funções de Weibull para cada uma das fases da vida do equipamento estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros das distribuições.

Fase	Curva	Área	Peso	Scala	Forma
Vida útil	Weibull 2	$A_2 = 0,56$	$\omega_2 = 0,85$	$\alpha_2 = 33,5$	$\beta_2 = 1,0$
Envelhecimento	Weibull 3	$A_3 = 0,44$	$\omega_3 = 0,42$	$\alpha_3 = 36,0$	$\beta_3 = 3,5$

A função de VUR é apropriada para indicar a expectativa de vida condicional ao tempo de vida passado. Para o tempo igual a um ano, a expectativa de vida para os equipamentos que falharão por envelhecimento (não reparáveis) é igual a 31,4 anos. Para os equipamentos que terão falhas durante a vida útil (reparáveis) a expectativa é de 29,2 anos.

### 3.0 - CONCLUSÃO

Os projetos novos e até mesmo alguns mais antigos de fabricantes estimam certa vida útil em torno de 35 anos para o sistema isolante. Este sistema de isolamento a base de mica-epóxi tem sido colocado em funcionamento desde meados do século 20 e, durante este período, tem-se verificado uma evolução constante deste sistema no que diz respeito à suportabilidade de temperatura e dimensões de projeto.

No mundo todo e, especialmente no parque gerador da CEMIG GT, existem geradores que estão em funcionamento há mais de 50 anos utilizando ainda os primeiros projetos relacionados ao material isolante, assim como existem também vários projetos concebidos ao longo destes anos que utilizaram toda a gama de evolução deste sistema isolante, chegando até aos mais novos sistemas desenvolvidos. Da mesma forma, o parque pode ser dividido em vários níveis de potência, classe de tensão e em tamanho e outras formas de variação de projeto. Esta falta de padronização dos projetos é a grande barreira encontrada por estes sistemas de diagnósticos que prometem alguma relação com a expectativa de vida útil de geradores.

A análise estatística realizada buscando o histórico de dados de falhas dos geradores do parque da CEMIG GT mostrou uma ideia da expectativa de vida destes geradores em torno de 30 anos, o que se nota que seja até aceitável se comparado aos dados estimados pelos fabricantes. Esta análise, assim como foi dito anteriormente, esbarra na grande diversidade de projetos existentes. Mesmo sem a precisão ideal, auxilia numa análise preliminar da expectativa de vida útil deste equipamento, sendo base para estratégias de manutenção e definição de alguns planos de negócios.

#### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. C. Guardia, "Desenvolvimento de metodologia para cálculo da vida útil de ativos da Distribuição de energia focando a revisão tarifária," Itajubá, 2014.
- [2] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, New York and London: Plenum Press, 1983.
- [3] H. Rinne, The Weibull Distribution, A Handbook, New York: CRC Press, 2008.
- [4] ReliaSoft, Life Dat Analysis Reference, Tucson, 2014.
- [5] O. Blancke, A. Tahan, D. Komljenovic, N. Amyot, C. Hudon e M. Lévesque, "A Hydrogenerator Model-Based Failure Detection Framework to Support Asset Management," Prognostics and Health Management (ICPHM), 06 2016.
- [6] W. Li, E. Vaahedi e P. Choudhury, "Power system equipment aging," IEEE Power and Energy Magazin, vol. 4, pp. 52-58, 2006.

#### 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2004) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2018). Atualmente é engenheiro de planejamento de manutenção - Cemig Geração e Transmissão. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Geração da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: diagnóstico de falha, identificação de parâmetros, monitoramento de descargas parciais, máquinas síncronas e teste e ensaios. Como gerente de projeto, atuou em projeto de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D) de um sistema de avaliação de vida útil de geradores, o que lhe direcionou a fazer mestrado nesta área com a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).