

VI-062 - MODELAGEM PROBABILÍSTICA DO TEMPO DE VIDA ÚTIL DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA APLICAÇÃO EM ANÁLISES DE CICLO DE VIDA

Adelmo Menezes de Aguiar Filho⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Química pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Atua como bolsista de iniciação científica pelo programa Jovens Talentos para a Ciência (CAPES/CNPq) no grupo de pesquisas GAMA-UFBA (*Growing with Applied Multivariate Analysis*) e é colaborador de pesquisas no grupo de pesquisas BIOMA-IFBA (Biotecnologia e Meio Ambiente). Possui formação técnica em operação de processos industriais e químicos pelo Instituto Federal da Bahia (IFBA).

Karla Patrícia Santos Oliveira Rodríguez⁽¹⁾

Engenheira Química – Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Mestre e Doutora em Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Pós-doutora em Engenharia Sócio-Ambiental – Hokkaido University (Hokudai, Japão). Professora do Departamento de Engenharia Química e do Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia (EP/UFBA).

Hugo Henrique de Simone Souza⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental formado pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul e atualmente é mestrando em Meio Ambiente, Águas e Saneamento pela Universidade Federal da Bahia.

Asher Kiperstok⁽¹⁾

Engenheiro Civil – TECHNION, Israel Institute of Technology. MSc. e PhD em Engenharia Química. Tecnologias Ambientais – University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST, Inglaterra). Coordenador da Rede de Tecnologias Limpas e Minimização de Resíduos (TECLIM) e do Programa de Pós Graduação em Produção Limpa – Departamento de Engenharia Ambiental, (EP/UFBA).

Leonardo Eustaquio Rodrigues⁽²⁾

Coordenador de manutenção do sistema de distribuição energia elétrica da Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA).

Endereço⁽¹⁾: Rua Aristides Novis, 02 - Universidade Federal da Bahia - Departamento de Engenharia Química – Escola Politécnica – Federação - Salvador - BA - CEP: 40210-630 - Brasil - Tel: (71) 3283-9802 - e-mail: aguiar.soul@gmail.com.

RESUMO

A modelagem do tempo de vida (TVU) de um determinado produto ou sistema permite a avaliação do desempenho tanto dos seus procedimentos de manutenção quanto de operação, além disso, contribui de forma importante para avaliação de potenciais impactos ambientais por meio das ferramentas da análise de ciclo de vida. No presente projeto de pesquisa foi realizado o estudo de TVU dos transformadores de distribuição da Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA) por meio de modelagem probabilística (histórico de falhas dos equipamentos) da análise de sobrevivência com o objetivo de fornecer informações para futuras análises de ciclo de vida deste equipamento. O detalhamento da metodologia realizada busca fornecer subsídios para que pesquisadores desta área possam aplicar este tipo de estudo em ACV. Os resultados indicaram um tempo médio de vida de 10,4 anos para estes equipamentos por meio do ajuste da curva de sobrevivência à distribuição de Weibull e a influência de características construtivas no seu tempo de vida por meio da regressão da curva de sobrevivência. A interpretação dos resultados do TVU permitiu também avaliar a importância dos mesmos na tomada de decisões em uma ACV permitindo agregar menor incerteza aos resultados da análise.

PALAVRAS-CHAVE: Tempo de Vida Útil, Análises de Ciclo de Vida, Energia Elétrica, Análise de sobrevivência, COELBA.

INTRODUÇÃO

A estimativa do tempo de vida útil (TVU) é ferramenta fundamental em análises do custo financeiro do ciclo de vida de equipamentos, produtos ou sistemas, além de prover informações importantes sobre os procedimentos de manutenção e avaliação da confiabilidade destes sistemas (SILVA Jr. *et al.*, 2006; PANDEY, 2005). São resultados comuns deste tipo de estudo a estimativa do tempo médio de vida,

conhecimento da função de distribuição de probabilidade (PDF) das falhas do sistema estudado, verificação da variabilidade dos tempos de falha e a predição de do tempo de vida restante para equipamentos ainda em utilização (HONG, 2009; LAWLESS, 2002).

Por sua vez, as questões ambientais vêm corroborando para a compreensão do papel estratégico dos estudos de TVU no *design* de componentes de equipamentos, gerenciamento de programas de reuso e reciclo de produtos e na quantificação do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida destes sistemas (SI *et al.*, 2011; MAZHAR *et al.*, 2007). Neste contexto, a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode incorporar uma série de informações a respeito de um estudo de TVU do sistema considerado.

Conforme ISO (2001), a ACV permite quantificar os potenciais impactos ambientais relacionados a um produto através da construção e interpretação de um inventário contendo as entradas e saídas (mássicas e energéticas) do período de vida considerado no estudo. A Figura 1 apresenta a principais fases do desenvolvimento de uma ACV.

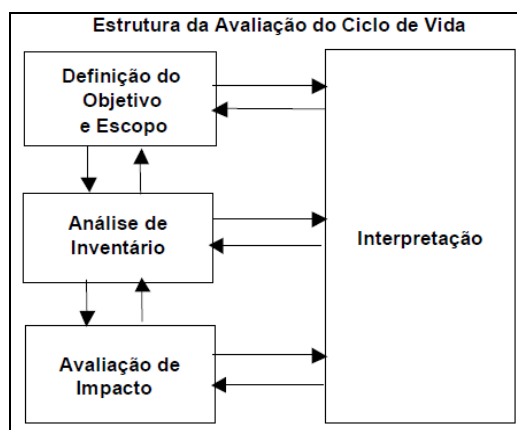


Figura 1: Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida.
Adaptado de Coutro (2007).

As informações provenientes da avaliação do TVU de um produto, como serão discutidas a seguir, vêm a permitir uma melhor definição da unidade funcional e uma melhor compreensão do objeto de estudo, resultando em menores incertezas inerentes aos resultados da ACV (BENEDET Jr, 2007).

A estimativa do tempo de vida útil de um equipamento pode ser obtida por meio de três meios principais: aquisição das informações em bancos de dados, realização de teste de campo ou laboratório e através do uso de ferramentas matemáticas (GUITARD, 1989). O uso de banco de dados (e.g. *handbooks*) consiste numa estratégia de baixo custo e fácil obtenção, contudo as informações presentes nestes podem não explicitar as condições em que foram amostrados e podem não representar a situação real e específica de cada local; os testes de campo/laboratório permitem maior confiabilidade nas informações, embora estejam muitas vezes atrelados a elevados custos e tempo demandado. A abordagem matemática supera as desvantagens dos outros métodos e permitem um conhecimento específico sobre o objeto de estudo (GUITARD, 1989).

Como observado em Sikorska (2011), existem diversos métodos para estimativa do TVU, dentre os quais se destacam: a construção de modelos físicos (abordagem fenomenológica do problema); utilização de redes neurais artificiais (modelagem não linear do tempo de vida dos equipamentos a partir de dados experimentais); utilização de sistemas baseados em lógica Fuzzy; e modelos de expectativa de vida estatísticos e estocásticos.

Este último será à base de toda formulação matemática deste artigo, por se considerar que as informações necessárias para este método (histórico de falhas dos equipamentos/sistemas) podem ser obtidas através do setor de manutenção ou qualidade de empresas.

Nos modelos estocásticos de tempo de vida procura-se obter a função de distribuição acumulada (PDF) das falhas (*aggregate reability functions*) de um sistema ou equipamento, este método corresponde à análise de sobrevivência empregada em estudos da área de saúde (BOTELHO, 2009; COSTA, 2008). A função de sobrevivência (Equação 1) define a probabilidade de um equipamento não falhar, ou ainda a fração do total de equipamentos instalados que não irão falhar até um determinado tempo estipulado (DANTAS, 2004).

$$S(t) = P(T \geq t) \quad \text{equação (1)}$$

Onde, S é a probabilidade de sobrevivência de um equipamento de um tempo t até um tempo T qualquer.

A curva de sobrevivência pode ser obtida utilizando técnicas não paramétricas ou a partir de modelos probabilísticos paramétricos. Os modelos não paramétricos são estimados sem que nenhuma hipótese seja realizada sobre a distribuição de probabilidade do tempo que em o evento de interesse. Para os modelos paramétricos assume-se uma distribuição de probabilidade e busca-se determinar os parâmetros do modelo que apresentam o melhor ajuste para os dados amostrais (ARAUJO, 2008).

Além da função de sobrevivência, outras duas funções derivadas desta são utilizadas nas análises de sobrevivência: função taxa de falha (medida da variação da sobrevivência de um indivíduo) e a função taxa de falha acumulada (Equações 2 e 3, respectivamente).

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt}(\log S(t)) \quad \text{equação (2)}$$

$$\Lambda(t) = -\log S(t) \quad \text{equação (3)}$$

As principais funções de probabilidade utilizadas em estudos de TVU são a função exponencial, de Weibull e lognormal (Figura 2) podendo ser aplicadas outras distribuições como a log-logística, gamma e a gamma generalizada (GIOLO & COLOSIMO, 2006).

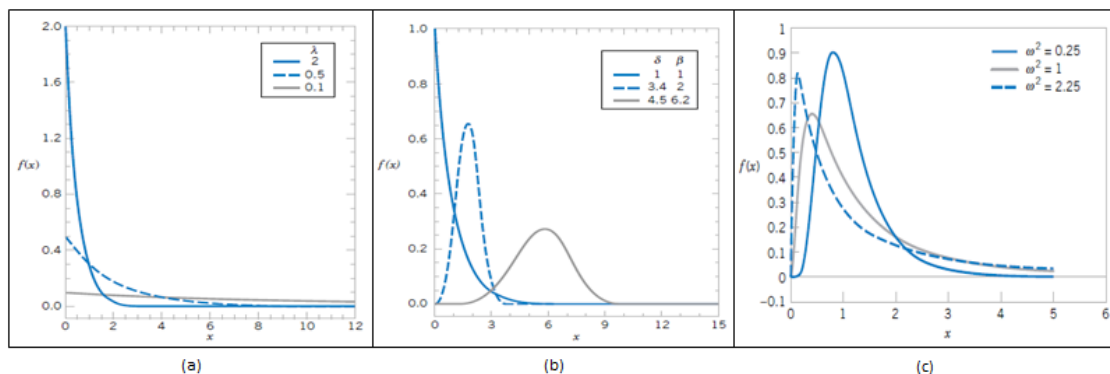


Figura 2: Gráficos das distribuições de probabilidade (a) exponencial, (b) de Weibull e (c) lognormal. Adaptado de Montgomery (2002).

As Equações 4, 5 e 6 apresentam as funções de sobrevivência para as distribuições descritas acima (LAWLESS, 2002).

$$\hat{S}_E(t) = e^{-t/\alpha} \quad \text{equação (4)}$$

$$\hat{S}_W(t) = e^{-(t/\alpha)^\gamma} \quad \text{equação (5)}$$

$$\hat{S}_{LN}(t) = \Phi\left(\frac{-\log t + \mu}{\sigma}\right) \quad \text{equação (6)}$$

Onde, t: tempo; α : parâmetro de escala; γ : Parâmetro de Forma; μ : média dos valores de tempo; σ : desvio-padrão dos tempos de falha; Φ : Função de distribuição normal acumulada.

É interessante notar que o banco de dados utilizado para este análise (tempo de vida observado dos equipamentos) pode contar observações denominadas censuras, isto é, observações de equipamentos que não sofreram o evento de interesse, que em nossa situação corresponde à falha do equipamento (GIOLO & COLOSIMO, 2006). Três tipos de censura são descritas na literatura: Tipo I, Tipo II e a aleatória. O Tipo I

corresponde a observações que até o fim do estudo não sofreram falha, o Tipo II às situações em que o estudo é finalizado quando um número de equipamentos falha (sobrando equipamentos sem apresentar falha) e a censura aleatória quando o equipamento falha ou abandona o estudo por razões que não sejam interesse do estudo (BASTOS, 2006).

Os estudos envolvendo a estimativa do TVU são usualmente realizados com auxílio de softwares estatísticos que possuem ferramentas para análises de sobrevivência como o software comercial *MINITAB* ou softwares que permitam a construção de algoritmos para a realização da análise pretendida, destacam-se entre estes o *MATLAB*, *Statistical Analysis Software* (ambos softwares comerciais) e o R (R CORE TEAM, 2012), software livre que destaca-se pela quantidade significativa de material sobre a análise de sobrevivência.

Como forma integrante do projeto de análise de ciclo de vida dos equipamentos pertencentes ao sistema de distribuição elétrica pertencente à COELBA (Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia), a presente pesquisa teve por objetivo desenvolver a análise do TVU destes equipamentos, restringindo-se aos transformadores de potência em função da disponibilidade do banco de dados da empresa. De forma complementar, foi realizada uma ampla discussão sobre a importância e uso deste tipo de estudo em análises de ciclo de vida, buscando motivar sua aplicação na presença de informações suficientes.

A COELBA é pertencente ao grupo NEOENERGIA está presente em 415 dos 417 municípios do estado da Bahia atendendo mais de 14 milhões de habitantes, contando atualmente com mais de 8 mil km de linhas de transmissão e subtransmissão e aproximadamente 190 mil transformadores de distribuição (COELBA, 2013). Seus números demonstram a importância de estudos de impacto ambiental.

MATERIAIS E MÉTODOS

Ajuste não paramétrico e paramétrico dos dados de tempo de vida

Verifica-se na literatura uma série de estimadores utilizados para construção da curva de sobrevivência não paramétrica, dos quais se destaca o estimador Kaplan-Meier (KAPLAN & MEIER, 1989). Este estimador foi selecionado por ser apropriado para qualquer tamanho amostral (ARAUJO, 2008). Destaca-se ainda a vantagem que este estimador tem em relação a outros, quanto a poder considerar qualquer distribuição para os dados censurados (KAHN, H. A.; SEMPOS, C. T., 1989). A Equação 7 apresenta a equação do estimador Kaplan-Meier:

$$\hat{S}_{KM}(t) = \prod_{j:t_j < t} \left(\frac{n_j - d_j}{n_j} \right) = \prod_{j:t_j < t} \left(1 - \frac{d_j}{n_j} \right) \quad \text{equação (7)}$$

Onde, t_j : Tempo de ocorrência do evento de interesse (avaria do equipamento), onde $j = 1, \dots, k$, ordenados de forma crescente; n_j : Número de equipamentos não avariados e não foram censurados até o momento imediatamente anterior ao tempo t_j ; d_j : Número de equipamentos avariados no tempo t_j .

O ajuste paramétrico da curva de sobrevivência recai em um problema de estimação de parâmetros para o qual é possível utilizar o método de máxima verossimilhança. Este método busca estimar o vetor de parâmetros de determinada distribuição de probabilidade com o qual existe a máxima probabilidade de serem gerados os dados amostrais (PAWITAN, 2001). Desta forma, procura-se maximizar o valor da função de máxima verossimilhança (Equação 8) através da resolução da Equação 9 (derivada primeira da função de máxima verossimilhança igualada a zero).

$$L(\theta) = \prod_{j=1}^r f(t_j; \theta) \quad \text{equação (8)}$$

$$U(\theta) = \frac{\partial \log L(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad \text{equação (9)}$$

Onde, θ : Vetor de parâmetros de uma determinada distribuição de probabilidade; $L(\theta)$: Função de Verossimilhança.

Na presença de censuras do tipo I, a função de verossimilhança assume a forma da Equação 10, em que é adicionado um termo para a contribuição dos dados censurados, sendo S a função de sobrevivência dos dados censurados (COLOSIMO & GIOLO, 2006).

$$L(\theta) = \prod_{j=1}^r f(t_j; \theta) \prod_{j=r+1}^n S(t_j; \theta)$$

equação (10)

Tratamento e organização do banco de dados

Verificado o procedimento matemático para ajuste da curva de sobrevivência dos transformadores, a próxima etapa da estimativa do tempo de vida útil dos transformados consistiu na organização e tratamento do banco de dados contendo as datas de instalação e retirada de operação destes equipamentos. Este continha inicialmente mais de 322 000 observações, contudo verificou-se a existência de inconsistências importantes, tais como: dados faltantes, informações fora de escala e observações indicadas pela empresa como inconsistentes, que foram retiradas para dar prosseguimento na análise.

Verificou-se em seguida a quantidade de censuras presente no banco de dados previamente organizado, o que constatou que mais de 90% dos equipamentos registrados não haviam falhado até o período do levantamento destes dados (Censura tipo I). Este alto percentual de censuras invalida o uso das observações censuradas na análise, por acarretar em uma superestimação do tempo de vida (GIOLO, 2012). Optou-se, portanto, em trabalhar apenas com os dados de transformadores avariados, os quais somavam mais de 12 000 entradas no banco de dados.

Além das datas de instalação e avaria destes equipamentos, também foi possível obter características técnicas dos equipamentos, por exemplo, número de fases e sua potência nominal em kVA. Como discutido posteriormente, estas informações, foram empregadas no desenvolvimento de um modelo de regressão para as curvas de sobrevivência.

Definição da curva de sobrevivência

A curva de sobrevivência não paramétrica (construída pelo estimador Kaplan-Meier) e a revisão da literatura de análise de sobrevivência para equipamentos do sistema de distribuição elétrica (HONG, 2008; PANDEY, 2005) foram utilizados como indicadores das distribuições de probabilidade (PDF) a serem ajustadas aos dados de tempo de vida. Desta forma foram selecionadas as distribuições de probabilidade exponencial, de Weibull e lognormal para ajuste da curva de sobrevivência.

A seleção da PDF melhor ajustada se deu pelo método gráfico, comparando a curva de sobrevivência não paramétrica com cada curva paramétrica. Adicionalmente, as curvas de sobrevivências estimadas pelo Kaplan-Meier e por cada modelo foram analisadas sendo verificada a proximidade dos dados a uma reta de 45° (COLOSIMO & GIOLO, 2006). A rotina de cálculo necessária para esta análise foi construída no software R com auxílio do pacote *Survival* (THERNEAU, 2012) e está disponível no endereço eletrônico: <http://goo.gl/EDJwl>.

Ajuste de um modelo de regressão à curva de sobrevivência

Com a PDF que melhor caracteriza os dados de tempo de vida é possível evoluir na análise propondo um modelo de regressão à curva de sobrevivência. Este procedimento além de permitir uma avaliação do TVU mais específica para cada categoria de transformador, também possibilita verificar a influência de cada variável (características do transformador) no tempo de vida do equipamento.

As Equações 11, 12 e 13 apresentam os modelos de regressão para curvas de sobrevivência das distribuições exponencial, de Weibull e lognormal. Onde x corresponde a matriz contendo as variáveis do modelo, β é o vetor dos parâmetros e σ o parâmetro de forma da distribuição.

$$S(t, x) = \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\exp\{x' \beta\}} \right) \right\}$$

equação (11)

$$S(t, x) = \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\exp\{x' \beta\}} \right)^{\frac{1}{\sigma}} \right\}$$

equação (12)

$$S(t, x) = \Phi \left\{ -\frac{\log t + x' \beta}{\sigma} \right\} \quad \text{equação (13)}$$

Foram desenvolvidos quatro diferentes modelos de regressão para a curva de sobrevivência, os quais poderiam conter como variáveis a potência nominal e o número de fases do transformador separadas em modelos distintos, unidas em um único modelo ou ainda contendo uma variável representando as interações entre as variáveis.

O teste de razão da verossimilhança (Equação 14) foi empregado para verificação da significância estatística dos coeficientes de regressão e do próprio modelo. A estatística do teste se baseia na comparação da função de verossimilhança do modelo que se deseja avaliar com o valor da função de verossimilhança de um modelo mais genérico, em nosso caso, por exemplo, comparar o valor da verossimilhança de um modelo com uma variável com a PDF da curva de sobrevivência (LAWLESS, 2002).

$$TRV = -2 \log \frac{L(\hat{\theta}_0)}{L(\hat{\theta})} \quad \text{equação (14)}$$

Onde: TRV: Valor da estatística do teste de razão de verossimilhanças; $L(\hat{\theta}_0)$: Valor da função de verossimilhança do modelo testado; $L(\hat{\theta})$: Valor da função de verossimilhança do modelo geral.

Sob a hipótese nula que o modelo ajustado é estatisticamente igual ao modelo mais generalizado, a estatística TRV segue uma distribuição qui-quadrado com p graus de liberdade, a qual para amostras grandes rejeita a hipótese nula a um nível de significância α quando $TRV > \chi^2_{p, 1-\alpha}$ (COLOSIMO & GIOLO, 2006).

Para avaliar a significância de cada variável preditoras no modelo de regressão estatística do teste de razão de verossimilhanças é calculado entre o modelo com a variável que se deseja avaliar significância e um modelo mais abrangente (que não contenha tal variável). Caso o p -value do teste seja menor que o nível de significância (considerado igual a 5%) a variável é aceita no modelo.

A adequação global do modelo ajustado foi verificada através da construção dos resíduos Cox-Snell (Equação 5), os quais deve seguir uma distribuição exponencial padrão para indicar a boa adequação do modelo. Graficamente é possível plotar os resíduos Cox-Snell contra os valores da função de taxa de falha aplicada aos valores dos resíduos e verificar se o gráfico formado tende a uma reta com inclinação de 45° (LAWLESS, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os principais resultados da análise do tempo de vida dos transformados, além da regressão realizada sobre a curva de sobrevivência ajustada, ao fim uma discussão sobre a utilização dos resultados do estudo de TVU em análises de ciclo de vida.

Estimativa do tempo de vida útil dos transformadores

A curva de sobrevivência não paramétrica (Figura 3) foi construída com o tempo de vida de transformadores instalados desde 1946 a 2010. Os valores estimados pelo estimador Kaplan-Meier foram utilizados como parâmetros para selecionar a distribuição de probabilidade com melhor ajuste à curva paramétrica (Figura 4), a qual demonstrou uma preferência de escolha à PDF de Weibull (pontos mais alinhados à reta suporte).

Contudo, a curva de Weibull apresenta uma estimativa distante da realidade dos tempos de vida em determinada região dos pontos. A investigação desta constatação levou ao fato que se fazia necessária a estratificação dos dados de sobrevivência, visto que os transformadores mais antigos (ano de instalação igual ou menor a 1999) possuíam projeto estrutural diferente dos mais novos (COELBA, 2012). Desta forma, o procedimento anterior foi repetido considerando o fato observado.

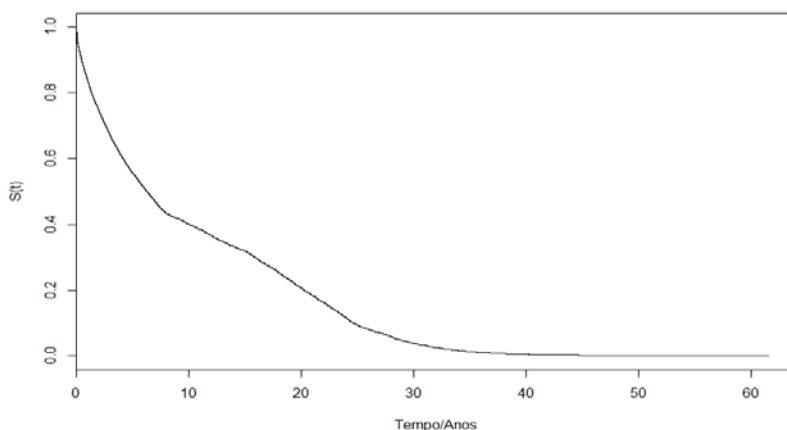


Figura 3: Curva de sobrevivência para os transformadores instalados entre 1946 e 2010.

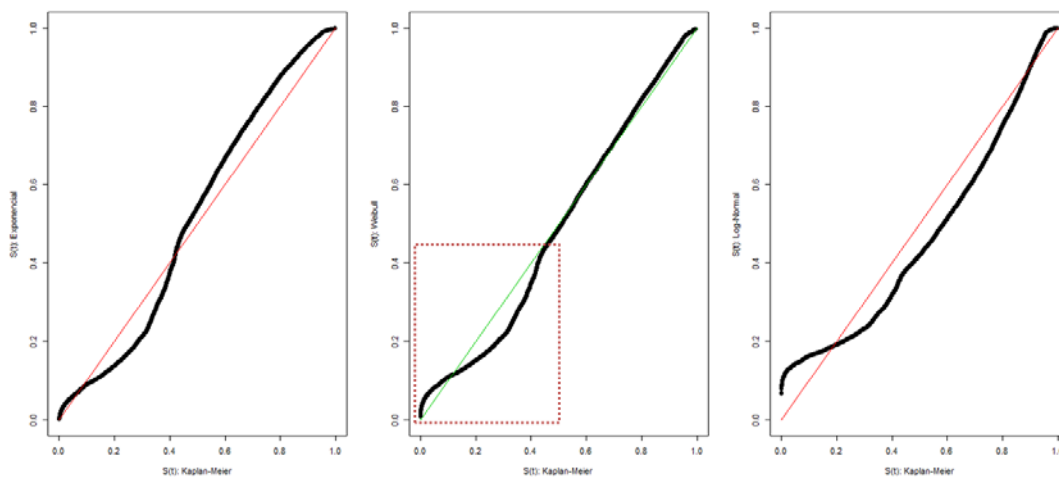


Figura 4: Avaliação gráfica do ajuste das distribuições de probabilidade exponencial, de weibull e lognormal (da esquerda para direita).

A Figura 5 apresenta as curvas de sobrevivência para os transformadores mais novos e dos antigos. A curva de sobrevivência dos transformadores novos foi ajustada parametricamente com a distribuição exponencial. Como é possível observar, o tempo de vida destes se mostrou comparativamente menor que os da curva de sobrevivência com todos os tempos de vida, fato este explicado pela impossibilidade de análise da grande quantidade de dados censurados que em suma maioria corresponde aos tempos de vida de transformadores mais novos. Por sua vez, a curva de sobrevivência dos transformadores mais antigos mostrou-se extremamente ajustada pela distribuição de Weibull (Figura 5).

A Tabela 1 apresenta a estimativa do tempo médio de vida para todo o conjunto de transformadores utilizados nesta análise, para os transformadores instalados em 1999 ou em anos anteriores e para os transformadores instalados a partir do ano 2000.

Tabela 1: Resumo dos resultados da análise do TVU

Grupo de dados	Data de instalação dos transformadores	PDF	Tempo de vida útil/anos
1	1946 a 2010	Weibull	10,4
2	1946 a 1999	Weibull	19,1
3	2000 a 2010	Exponencial	2,9

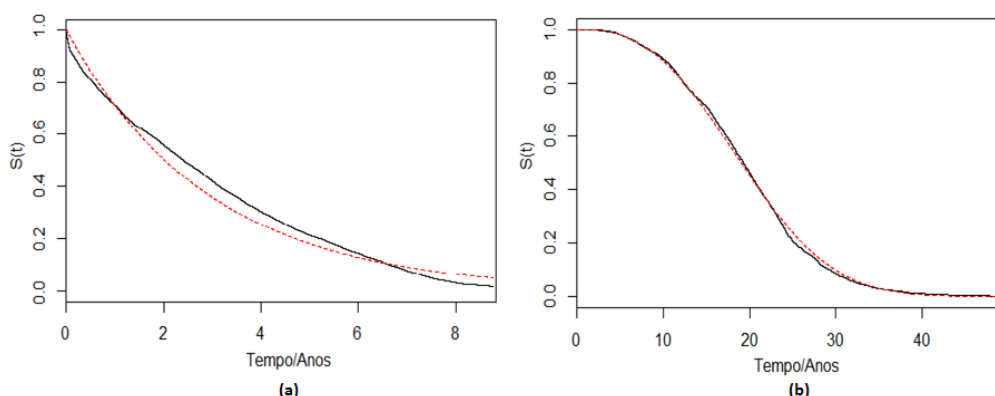


Figura 5: Curva de sobrevivência dos transformadores instalados após 1999 (a) e dos transformadores instalados antes de 1999 (b).

Modelo de regressão da curva de sobrevivência

Como o ajuste dos tempos de vida dos transformadores do grupo 2 obteve bom desempenho, partiu-se para a construção de um modelo de regressão para a curva de sobrevivência buscando verificar o impacto das características dos transformadores no seu tempo de vida.

A Equação 15 apresenta o modelo de regressão sem variáveis preditoras (equivalente à PDF ajustada aos dados), por ser este o modelo mais generalizado da curva de sobrevivência, o mesmo será utilizado como referência nos testes de razão de verossimilhança.

$$S(t) = \exp \left\{ - \left(\frac{t}{21,53} \right)^{2,56} \right\} \quad \text{equação (15)}$$

A estimativa dos parâmetros de cada modelo e o valor do logaritmo da função de verossimilhança é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Organização dos modelos de regressão da curva de sobrevivência

Modelos	Equação de Regressão	Coefficientes estimados	Logaritmo da Verossimilhança
1	Nenhuma	$\beta_0 = 3,0693$ $\sigma = 0,3767$	-19122,4
2	$y = \beta_1 x_1 + \beta_0$	$\beta_0 = 3,0404$ $\beta_1 = 0,0008$ $\sigma = 0,3750$	-19113,8
3	$y = \beta_1 x_2 + \beta_0$	$\beta_0 = 2,8337$ $\beta_1 = 0,0885$ $\sigma = 0,3722$	-19060,5
4	$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_0$	$\beta_0 = 2,8310$ $\beta_1 = 0,0002$ $\beta_2 = 0,0919$ $\sigma = 0,3724$	-19060,1
5	$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + \beta_0$	$\beta_0 = 2,6385$ $\beta_1 = 0,0154$ $\beta_2 = 0,1575$ $\beta_3 = 0,0052$ $\sigma = 0,3712$	-19047,9

A verificação da significância de cada variável foi realizada conforme os procedimentos apresentados. O Tabela 3 apresenta o resumo dos testes estatísticos.

Tabela 3: Resumo dos testes estatísticos para seleção das variáveis do modelo de regressão

Variável Avaliada	Razão de Verossimilhança	<i>p-value</i> do teste
x_1x_2	$TRV_1 = 2(19060,1-19047,9) = 24,4$	$8 \cdot 10^{-7}$
x_1	$TRV_2 = 2(19122,4-19113,8) = 17,2$	$3 \cdot 10^{-5}$
x_2	$TRV_3 = 2(19113,8-19060,1) = 107,4$	0

Os testes concluíram a inclusão de todas as variáveis propostas no modelo e, portanto, o modelo 4 (Tabela 2) foi selecionado para a regressão da curva de sobrevivência dos transformadores do grupo 2 por sua simplicidade. Para avaliação da adequação do modelo proposto partiu-se para verificação gráfica dos resíduos de Cox-Snell do modelo (Figura 6) que, conforme apresentado na metodologia, demonstrou a aleatoriedade destes resíduos. Ponto este, positivo para aceitação do modelo de regressão.

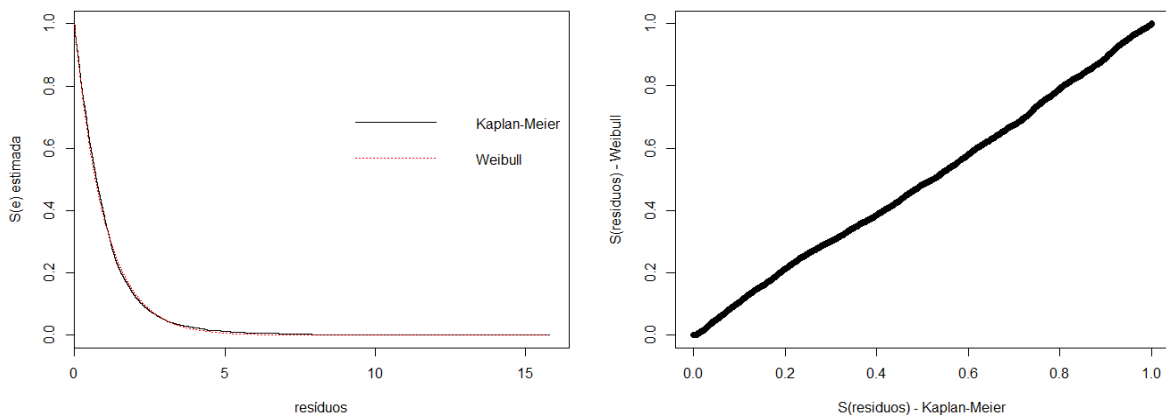


Figura 6: Avaliação dos resíduos Cox-Snell (a) plotados contra o estimador não paramétrico de Kaplan-Meier e (b) contra a função de taxa de falha acumulada

Em seguida, para visualização gráfica do efeito das variáveis no tempo de vida foram plotados os gráficos da Figura 7. No gráfico à esquerda, foram plotadas as curvas de sobrevivências para transformadores de potência nominal de 75 kVA com número de fases iguais a 2 e 3, indicando que os transformadores com maior número de fases possuem um maior tempo de vida médio. O gráfico à direita da Figura 7 apresenta as curvas de sobrevivência de transformadores com número de fases igual a 3 e potência nominal igual a 75 kVA e 500 kVA. Os resultados indicam que os transformadores de maior potencial nominal possuem maior tempo de vida médio.

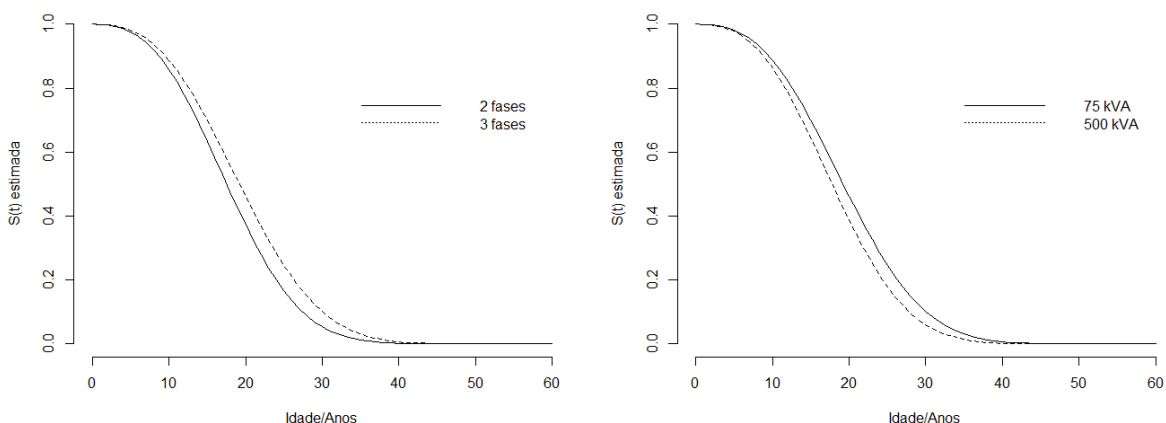


Figura 7. Curvas de sobrevivência de transformadores (a) com potências nominais iguais e (b) com número de fases iguais.

Aplicação dos resultados obtidos em análises de ciclo de vida

O tempo médio de vida de um produto em um ACV é um importante ponderador dos potenciais impactos ambientais de determinado produto. Como observado em Aktas (2011), estudos de ACV que não associem corretamente o tempo de vida do produto avaliado além de não serem conclusivos podem levar a comparações errôneas com outras ACV. A construção da curva de sobrevivência além de fornecer o tempo médio de vida do equipamento garante ao analista da ACV uma importante ferramenta para definição do número de elementos que irão compor sua unidade funcional.

Em Yokote (2003), por exemplo, definiu-se como unidade funcional do estudo de ACV dos transformadores o número destes equipamentos em 1 km de rede de transmissão de energia em 20 anos. Como as informações disponíveis estavam na base de 25 anos, a solução encontrada no referido estudo foi realizar uma interpolação linear dos dados que os converteu de 25 anos para 20 (fator multiplicador = $25/20 = 0,8$). Contudo, esta consideração é exata quando a função de sobrevivência é do tipo linear (e.g. distribuição uniforme), que em geral não ocorre quando a variável de estudo é o tempo de vida de um equipamento (KUAN, 2008).

Como o fator multiplicativo pode ser obtido pela razão do percentual de equipamentos que falham em 20 anos e o percentual que falha em 25 anos, são apresentados na Tabela 4, os fatores multiplicativos de curvas de sobrevivência para os dados desta pesquisa, com distribuições uniforme, exponencial, de Weibull e lognormal de forma a verificar as discrepâncias no valor do fator multiplicativo em função da PDF assumida.

Tabela 4: Comparação dos fatores multiplicativos para diferentes distribuições de probabilidade do tempo de vida dos transformadores.

Distribuição	Equação	Percentual de falha em 20 anos	Percentual de falha em 25 anos	Fator multiplicativo
Uniforme	$S(t) = 1 - \frac{t}{38,3}$	52%	65%	0,80
Exponencial	$S(t) = \exp\left(\frac{-t}{19,14}\right)$	65%	73%	0,89
Weibull	$S(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{21,53}\right)^{2,65}\right\}$	56%	77%	0,73
Lognormal	$S(t) = \Phi\left\{-\frac{\log t - 2,86}{0,47}\right\}$	61%	78%	0,78

Os diferentes valores do fator multiplicativo para as distribuições de probabilidade são um importante indicativo da incerteza devido às escolhas em uma ACV como resultado do desconhecimento ou não uso das informações contidas na curva de sobrevivência do equipamento (BENEDET Jr., 2007). A interpolação linear neste caso pode ser interpretada como uma aproximação à base de cálculo pretendida pela reta tangente no ponto na curva de sobrevivência em que os dados originalmente foram estimados. Portanto, quanto mais distantes forem as bases de cálculo a interpolação linear torna-se menos exata, com pode ser visualizado através da Figura 8.

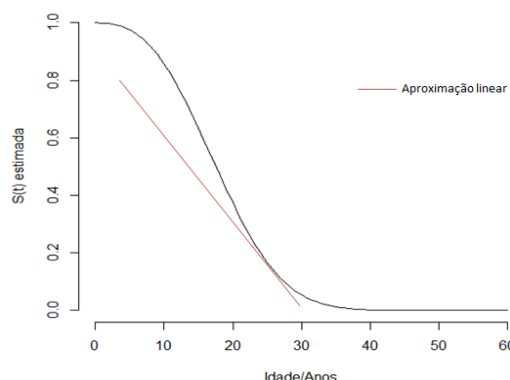


Figura 8: Aproximação linear das bases de cálculo considerando a distribuição de Weibull para os dados de tempo de vida.

Através do desenvolvimento do estudo de TVU também foi possível verificar a existência de grupos de transformadores com diferentes tempos médios de vida, fato este condizente com os diferentes processos construtivos destes transformadores e que em uma ACV permitiria uma definição mais exata do objeto de estudo, uma vez que a não estratificação do conjunto de dados levaria a associar determinado potencial impacto ambiental a produtos com desempenhos diferentes.

A regressão da curva de sobrevivência ajustada permite agregar mais informações de determinadas escolhas no desenvolvimento de uma ACV, pois como pode ser verificada na Figura 6, a regressão permite verificar se equipamentos com diferentes características possuem tempos de vida semelhantes. Caso estes também possuam componentes com similaridade em composição e massa, isto poderá ser um indicativo para a elaboração de uma única ACV para os diferentes tipos de equipamentos.

CONCLUSÕES

O uso de ferramentas estatísticas que permitam a predição de propriedades e identificação de padrões é fundamental para melhor compreensão dos fenômenos que envolvem seu objeto de estudo. Independente da área do conhecimento, o conhecimento e uso da estatística é um importante instrumento para tomada de decisões baseada em critérios matemáticos.

Num período em que a obsolescência planejada tornou-se prática comum do mercado, a avaliação do tempo de vida útil (TVU) dos produtos associado aos estudos de análise de ciclo de vida permitem o entendimento de quão prejudicial ao meio ambiente está prática se torna.

O estudo de TVU dos transformadores de distribuição da COELBA demonstraram diferenças significativas no tempo de vida dos equipamentos pelo seu processo construtivo e estimou o tempo médio de vida dos equipamentos mais antigos em 19,1 anos. O ajuste da curva de sobrevivência através da distribuição de Weibull mostrou-se de boa aderência. Com base nestas informações é possível aprimorar os procedimentos de manutenção da empresa em busca da melhoria do desempenho destes equipamentos, redução da falha dos transformadores nos primeiros anos de operação e diminuição dos potenciais impactos ambientais do sistema de distribuição elétrica.

A regressão da curva de sobrevivência demonstrou-se outra importante ferramenta para conhecimento da influência das características dos transformadores em seu tempo de vida útil. Nas próximas etapas deste projeto o estudo da regressão do TVU será aprofundado incorporando características ambientais da região de instalação dos transformadores (temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade e direção dos ventos, pluviometria média etc.). Além da regressão linear multivariada para predição do tempo médio de vida dos transformadores, o uso das técnicas de redes neurais artificiais também será aplicado buscando verificar relações não lineares entre as variáveis ambientais / características de construção dos equipamentos e o tempo médio de vida destes.

O conhecimento da curva de sobrevivência, conforme foi abordado, permite a redução de incertezas nos resultados da ACV por uso de aproximações que muitas vezes podem não ser lineares. Além disto, as informações geradas pela interpretação do estudo de TVU vêm a definir de maneira mais exata o objeto de

estudo e a unidade funcional tornando os resultados da ACV mais consistentes. Sugere-se para futuros trabalhos a análise de sensibilidade de resultados de uma ACV em função da distribuição de probabilidade assumida para o produto em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKTAS, C. B. Impact of Product Lifetime on Life Cycle Assessment Results. Dissertação de PhD. Swanson School of Engineering - University of Pittsburgh, 2011.
2. ARAÚJO, M. N. M. Análise de Sobrevida do Tomateiro A *Phytophthora infestans*. Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Estatística Aplicada e Biometria. Dissertação de Mestrado, 2008.
3. BASTOS, J. et al. Análise de Sobrevida. *Arqui Med*, São Paulo, São Paulo, Vol. 20, Nº 5/6, p. 185-188, 2006.
4. BENEDET JR. G. avaliação de incertezas em inventários do ciclo de vida. programa de pós-graduação em engenharia ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado, 2007.
5. BOTELHO, F. et al. Epidemiologia explicada – Análise de Sobrevida. *Acta Urológica*, Lisboa, Portugal, Vol. 26; Nº 4: p. 33-38, 2009.
6. COLOSIMO, E. A; GIOLO, S. Análise de Sobrevida Aplicada. 1ª Edição, Editora Blucher, São Paulo – SP, Brasil, 2006.
7. COSTA, W. C. P. et al. O Modelo Exponencial Para Dados De Sobrevida E Confiabilidade Na Presença De Censuras Do Tipo II. Universidade Estadual de Goiás, Curso de Matemática, 2008.
8. COUTRO, L. Avaliação de Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão. CETEA/ITAL, 2007.
9. DANTAS, M. A. Modelagem de dados de falha de equipamentos de sub-superfície em poços de petróleo da bacia Potiguar. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Engenharia de Produção. Dissertação de Mestrado, 2004.
10. GUITARD, R. Reliability Data - A Practical View. *Microelectron. Reliab.*, Vol. 29, No. 3, pp. 405-413, 1989.
11. HONG, B. Y., Meeker, W. Q., & McCalley, J. D. Prediction of Remaining Life of Power Transformers Based on Left Truncated and Right Censored Lifetime Data. *The Annals of Applied Statistics*, 3, 857-879, 2009.
12. KUAN, W. W. Mathematics of Survival Analysis. Apostila, 2009.
13. ISO. NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura, 2001.
14. LAWLESS, J. F. Statistical Models and Methods for Lifetime Data. Wiley-Interscience; 2ª Edição, 2002.
15. MAZHAR, M. I. Remaining life estimation of used components in consumer products: Life cycle data analysis by Weibull and artificial neural networks. *Journal of Operations Management* 25 (2007) 1184–1193, 2007.
16. MONTEGOMERY, D.C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 3ª Edição, Editora: John Wiley & Sons, Inc. 2003.
17. PAWITAN, Y. In All Likelihood: Statistical Modelling and Inference Using Likelihood. Cork: Oxford, 2001.
18. R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Vienna, Austria: ISBN 3-900051-07-0, 2012.
19. PANDEY, M. D.; DATLA, S. V. Estimation of life expectancy of wood poles in electrical distribution networks. *Structural Safety* 28 (2006) 304–319, 2005.
20. SI, X. S. et al. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research* 213 (2011) 1–14, 2010.
21. SILVA JR. H. X. Aplicação Da Metodologia de Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV): Refrigeradores Comercializados no Brasil. *RECIE*, Uberlândia, v. 15, n. 1/2, p. 19-26, jan.- dez. 2006.
22. SIKORSKA, J. Z. et al. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. *Mechanical Systems and Signal Processing* 25(2011)1803–1836, 2010.
23. YOKOTE, A. Y. Inventário de ciclo de vida da distribuição de energia elétrica no Brasil. 2003. 341 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.