Por Geraldo R. de Almeida *

Capítulo III

Modelos estatísticos, modelos empíricos e modelos de mecânica do meio contínuo

Resumo

A confiabilidade é um ramo da matemática dentro da teoria das probabilidades. A teoria das probabilidades foi formalizada com a plataforma da teoria dos conjuntos por ANDREI KOLMOGOROV. A teoria das probabilidades é o suporte essencial para as funções de densidade de probabilidade usadas na estatística. As funções de densidade de probabilidade operam no domínio fechado [0,1].

A confiabilidade é a capacidade de um sistema cumprir sua missão, dentro de condições previamente especificadas, num intervalo do tempo pré-estabelecido, conhecendo-se o tempo médio para a primeira falha, e a probabilidade do sistema falhar, antes do tempo médio previsto.

A confiabilidade pode ser construída por meio de: observação direta (modelos empíricos), observações de laboratórios (modelos experimentais) e com hipóteses e conjecturas (modelos matemáticos – topológicos).

A confiabilidade pode ser resumida do ponto de vista pragmático em dois parâmetros: MTTF e MTBF. O MTTF (Mean Time To Failure) é aplicável aos componentes não reparáveis, enquanto o MTBF (Mean Time Between Failure) é aplicável a componentes reparáveis.

A confiabilidade dos materiais é guiada pelo parâmetro MTTF – Tempo médio para a primeira falha e pela função de densidade de probabilidade do sistema falhar antes do MTTF. Os materiais são considerados componentes "não reparáveis". Por isso, devem ser substituídos toda vez que for atingido o MTTF. Para componentes reparáveis, a substituição segue o mesmo princípio.

Neste artigo serão apreciados os modelos já disponíveis para avaliar o MTTF dos materiais usados em cabos ACSR e como usá-los em projeto e administração de uma linha de transmissão de energia elétrica.

Introdução

O Modelo Especulativo, também denominado de "observação direta", é o mais antigo e talvez o mais belo de todos os modelos: Ele nasce na Grécia, no começo da História (início da era da palavra escrita), na forma de Mito [01] (Narrativa bem conformada) e a despeito de todo desenvolvimento humano, usamos este modelo até hoje, principalmente na Política e nas Religiões. No caso de materiais, este modelo tem sido implementado da seguinte maneira: (i) Instala-se um engenho, dispositivo, sistema em determinadas condições e passa-se a observar seu desempenho ao longo do tempo; (ii) Descobre-se que existe alguma experiência bem sucedida com algum engenho, dispositivo ou sistema instalado e funcionando há algum tempo e vamos visitá-lo e ouvir as narrativas de desempenho de quem está operando; (iii) Coleta-se informações difusas de sistemas similares e busca-se um modelo que seja melhor para as conveniências. Religião, Política e Mercado aplicam muito este último enfoque.

O Modelo Cosmológico é um modelo universal, pois por onde se observa ele está presente [02] e ainda mais atual e seu crédito é concedido a Gauss.

Para Gauss, a taxa de transformação de qualquer evento no cosmo era diretamente proporcional ao resíduo do evento, pelo tempo decorrido para ter acontecido aquele evento:

$$\frac{dS}{dt} = \kappa t S \quad (01)$$

Não necessita muito esforço para concluir que

$$S = S_0 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2} \quad (02)$$

O Modelo Cosmológico para sua utilização requer quase sempre o acoplamento de algum modelo físico (p.e. a difusão física).

Na complementaridade do ensaio de tensão e deformação, vem o ensaio de fluência (creep na literatura de língua inglesa). A figura 2 mapeia o resultado do ensaio. Neste País ele é adotado com o rótulo de NBR 7303.

Devido sua importância para metais não ferrosos (dúcteis), o resultado do ensaio de fluência é sobreposto ao ensaio de tensão e deformação, para facilitar a análise dos projetistas de linhas de transmissão. De modo geral no mapa consolidado dos dois ensaios, o ensaio de fluência termina com o tempo de 10 anos. Este tempo é mandatório porque neste período ocorre o exaurimento da fase elástica dos materiais dúcteis (0,2% de deformação unitária).

O exaurimento da fase elástica significa que o material condutor foi para a fase plástica e nesta fase ele é muito mais susceptível à falha por fadiga cíclica, mesmo tendo uma taxa de cisalhamento muito menor que aquela da fase plástica (pois a tensão de deformação não pode mais ser aumentada). Apesar da grande fragilidade do alumínio em fadiga cíclica os cabos ACSR não se rompem por causa do aço na alma, deste modo eles podem ser reparados nas falhas do alumínio e duram por cerca de 50 anos ou mais.

O modelo de cinética química teve seu início com trabalhos pioneiros de laboratório do Dr. T. W. Dakin [07].

Ulteriormente foi sistematizado pelo Dr. Stanley E. Kiersztyn [08], que desenvolveu um elegante modelo para estudo de rigidez dielétrica dos materiais isolantes elétricos, que complementou as observações do Prof. Dakin.

O modelo da cinética química, resumido por Kiersztyn na equação a seguir é em tudo análogo ao modelo cosmológico, apenas com a dimensão do tempo muito mais acelerada.

$$\left(\frac{S}{S_0}\right)^N \left(1+\frac{t}{\tau}\right) = 1 \quad (03)$$

Se N → 1 e muito antes da primeira falha (1)

$$\left(\frac{S}{S_0}\right)\left(\frac{t}{\tau}\right) = \frac{dS}{dt} \quad (04)$$

Que é o original modelo cosmológico

Esta analogia é de suprema importância para limitar o horizonte da primeira falha. Na apreciação física desse modelo é comum identificar o expoente N como parâmetro de saúde do material.

Figura 3 - A saúde dos materiais

O Modelo da Mecânica do Meio Continuo é creditado ao Prof. Michael Ashby [09] da Universidade de Cambridge (UK). A motivação dos trabalhos de Ashby foram os acidentes catastróficos dos aviões da BOAC em meados dos anos 50.

Ashby conseguiu medir e mapear a taxa de cisalhamento dos materiais em função da temperatura e do tensor de cisalhamento. A temperatura foi admensionalizada em função da temperatura de fusão do material e o zero absoluto. A ação do tensor de cisalhamento foi admensionalizada em função do tensor ortogonal, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material. O modelo Ashby é um modelo Lagrangeano de imensa utilidade na modelagem de peças (hélices e rotores) em alta temperatura.

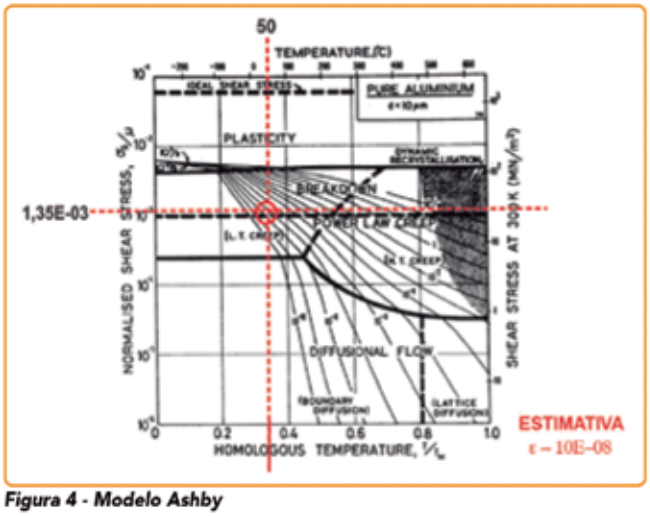

Figura 4 - Modelo Ashby

O modelo matemático (topológico) está em desenvolvimentos nas comunidades científicas mais avançadas [10], [11] e [12]. Este modelo parte da hipótese ergódica, incorpora a mecânica Lagrangeana, alargam o conceito de cadeia de Markov e usam o amostrador de Gibbs (GIBBS SAMPLER) para simular o funcionamento de uma linha de transmissão com assinatura ambiental, mas este modelo está fora do escopo deste trabalho.

Neste trabalho serão abordados e analisados dados de MTTF obtidos em modelos especulativos, modelos empíricos observáveis e modelo de mecânica do meio contínuo.

MTTF nos modelos

Na literatura mais difundida, os melhores dados de falha estão no documento Cigre [13], onde uma estatística com mais de 40 anos resume o desempenho de linhas declarando as falhas de rompimento de fios dos cabos ao longo de 40 anos.

No painel de discussão denominado "EDS Panel", os dados foram recolhidos de diversas linhas de transmissão em concessionárias européias.

Nos dados da tabela 1, cabos ACSR são os tradicionais comercializados desde 1920, Aluminum Conductors são os tradicionais cabos CA construídos com ligas EC1350 (99,5% de pureza e 61 % de condutividade IACS – International Annealed Copper Standard), Aldrey conductors são cabos construídos com liga de alumínio 6201, Steel conductors são os cabos guarda.

Table 2.1 EDS panel recommendations for safe design tensions in percent UTS.

	Unprotected lines	Lines equipped with		
		Armour rods	Dampers	Armour rods and dampers
Copper conductors	26			
ACSR	18	22	24	24
Aluminium conductors	17			
Aldrey conductors	18		26	
Steel conductors				
1. Rigid clamps	11			
2. Oscillating clamps	13			

Tabela 1 - Panel EDS Cigre - 273

Table 2.2 Summary of damaged lines as per the EDS panel

Service life	% of lines damaged	
Years	EDS < 18%	EDS = > 18%
<= 5	5.26	25.00
> 5 <= 10	20.93	35.29
> 10 <= 20	45.00	78.00
> 20	58.93	91.67

Tabela 2 - Panel EDS Cigre – 273 - Statistics

Nos dados da tabela de danos, a publicação deixa presumir que a estatística pode conter: Cabos ACSR, Cabos Aldrey e Cabos de Alumínio puro (EC1350). Todavia, a terminologia EDS é muito mais usada quando se refere a cabos do tipo ACSR.

Na tabela de danos, para linhas com mais de 20 anos de uso, 100% delas apresentaram algum dano quando o EDS > 18 %. Assim, o primeiro MTTF (Mean Time To Failure) para cabos desta estatística (ACSR – AAC – AAAC) é de 10 anos (metade do valor de 20 anos para que todas as linhas apresentassem alguma falha).

No método empírico controlado, os ensaios de tensão e deformação [05] associado ao ensaio de fluência [06] fornecem uma informação experimental de suprema importância para dimensionamento do MTTF de cabos do tipo ACSR, AAC e AAAC.

O ensaio de tensão e deformação é realizado em três estágios com amostras de 10 metros de comprimento: (I) No primeiro estágio com subida de carregamento em degrau, determina-se a carga de ruptura do cabo completo, (II) De posse da carga de ruptura do cabo completo, realiza-se o ensaio em degraus de 15%, 25% 50% 75% e 85% da carga de ruptura, anotando-se os respectivos alongamentos, (III) no terceiro estágio realiza-se o ensaio apenas sobre a alma (aço) do cabo, com o mesmo procedimento anterior.

As duas curvas obtidas com as coordenadas dos pontos de alongamento e as respectivas tensões de alongamento são subtraídas e a curva resultante é uma aproximação do desempenho apenas do alumínio.

O ensaio de fluência (creep na língua inglesa) é também um ensaio conduzido sobre um cabo de 10 metros de comprimento, no qual é aplicada uma carga da ordem de 25% da tensão de ruptura do cabo completo. Algumas vezes, alguns compradores pedem também ensaios de fluência com 15%, 20%, 30% e até 35% da carga de ruptura.

À carga aplicada o alongamento é anotado ao longo do tempo. Modernamente, os ensaios são assistidos por "strain gages" e o alongamento são medidos em tempo real.

De modo geral, o ensaio tem a duração de 1000 horas (~45 dias). Como o andamento da fluência é quase linear, a correlação é extrapolada para 100 000 horas (~ 10 anos).

O tempo de extrapolação foi arbitrado em função do alongamento medido após esta duração. Geralmente, o alongamento do alumínio no tempo de 10 anos é da ordem de 0,2% que, de modo geral, é o alongamento da fase elástica dos metais não ferrosos, sob fluência, na temperatura ambiente neste período.

Deste modo, a AAA considera que, exaurida a fase elástica, o material torna-se frágil e isto coincide com a sequência de falhas enunciada com observação do Cigre.

O modelo da mecânica do meio contínuo é creditado ao Prof. Michael Ashby da Universidade de Cambridge (UK). A motivação dos trabalhos de Ashby foram os acidentes catastróficos dos aviões da BOAC em meados dos anos 50.

Ashby conseguiu medir e mapear a taxa de cisalhamento dos materiais em função da temperatura e do tensor de cisalhamento. A temperatura foi admensionalizada em função da temperatura de fusão do material e o zero absoluto. A ação do tensor de cisalhamento foi admensionalizada em função do tensor ortogonal, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material.

O mapa mostrado na figura abaixo corresponde ao do alumínio puro, ensaiado desde uma temperatura muito baixa (-200ºC) até a temperatura de fusão (660 ºC). Para calcular as coordenadas de Ashby foram usados os dados do cabo Coreopsis resultando a tabela 3.

MÓDULO DE ELASTICIDADE DO ALUMÍNIO	E	N/m²	6,90E+10
COEFICIENTE DE POISSON	v		0,25
MÓDULO DE CISALHAMENTO DO ALUMÍNIO	G	GPa	2,76E+10
ÁREA COREOPSIS	A	mm²	805,36
PESO COREOPSIS	w	DaN/m	2,1355
CARGA DE RUPTURA	Hrup	DaN	11963
EDS			0,25
VÃO PADRÃO	L	m	500
FLECHA	f	m	20
FORÇA DE ATRITO HORIZONTAL H	H	DaN	2991
PESO CISALHANTE MÁXIMO	fs	DaN	534
TENSÃO CISALHANTE DEVIDO H	s	N/m²	3,71E+07
TENSÃO NA ÁREA COREOPSIS (H+P)	s	N/m²	4,38E+07
ORDENADA ASHBY	s/G		1,59E-03
ABSCISSA ASHBY	T	ºc	50
TEMPERATURA DE FUSÃO DO ALUMÍNIO		ºC	660
TEMPERATURA DE DESEMPENHO DO ALUMINIO		ºC	50

Levando as coordenadas [50ºC,1,53E-03] no Mapa de Ashby mostrado abaixo verifica-se que o cisalhamento devido ao creep está $\epsilon_{creep} \geq 10^{-8}\ s^{-1}$ que é inferior aos 10 anos para o alumínio puro.

Confiabilidade e "MTTF"

Se a probabilidade de um material de engenharia falhar for descrita por uma função de densidade de probabilidade qualquer f(x). Então, a certeza de que falha do material descrito por esta função será;

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx \quad (05) \quad ou \quad F(x) = \int_{0}^{\infty} f(x)dx \quad (06)$$

Cabos tracionados seguem uma distribuição estatística de probabilidade denominada Weibull [14]. Entretanto, se a amostra ensaiada for muito grande, vale o teorema do limite central e a distribuição estatística de Gauss é este limite.

Se a função que descreve as falhas forem f(x) e F(x), a confiabilidade do material sobreviver é definida por R(x). Deste modo, podemos aceitar que a probabilidade instantânea [14] de falha durante qualquer tempo pode ser estimada com uma função denominada Hazard Rate, assim;

$$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} \quad (07)$$

Se a função de Gauss (Normal) descreve a probabilidade do material falhar, A primeira falha h(1) ocorrerá quando h(1)=σ , ou seja, o primeiro desvio padrão (~68%).

Se a função de densidade de probabilidade for a de Weibull, a hazard rate será uma função do tempo, muitas vezes denominada simplesmente de curva da banheira.

O Estado atual da arte

Os cabos ACSR de uso generalizado em linhas de transmissão possui um tempo médio para a primeira falha mecânica, MTTF, de 10 anos nos fios de alumínio e 300 anos nos fios de aço no modelo da

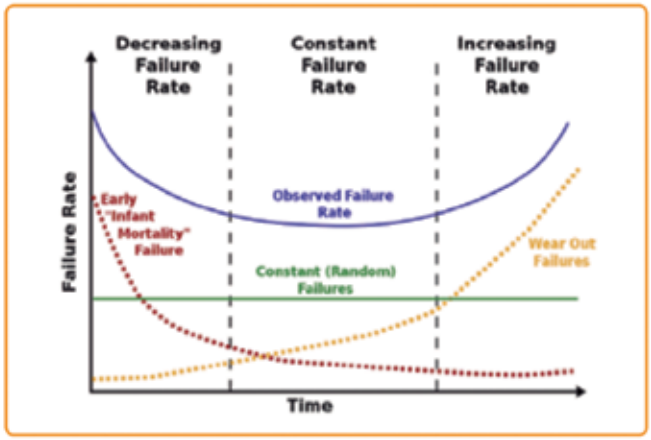

Figura 5 - Taxa de falhas para os materiais

mecânica do meio contínuo de ASHBY. Em um tempo de 20 anos, a probabilidade do cabo falhar é quase 100% nos fios de alumínio. A falha mecânica ocorre nos fios de alumínio, geralmente da camada externa e de forma preferencial quando o cabo possui diâmetro superior a 1´´ (25 mm).

Na figura 6 são apresentadas a construção Drake do ACSR e alguns cabos de diâmetro equivalentes, onde os fios elementares externos são de liga de alumínio.

Usar cabos com diâmetros inferiores a 25 mm é de grande ajuda para mitigar os efeitos de fadiga cíclica devido a vibrações eólicas, mas isto quase sempre significa uso de condutores em "bundle" que eleva os custos da transmissão e deve ser considerada para linhas em AC.

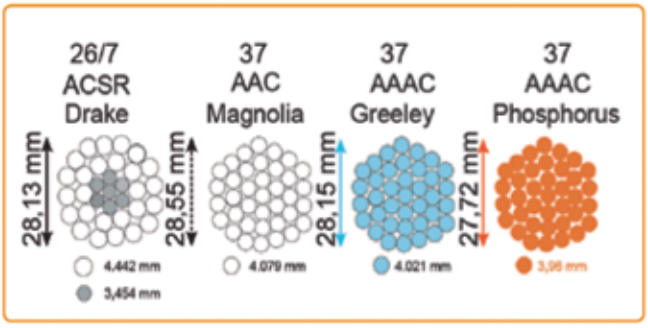

Figura 6 - Cabos aéreos para transmissão

Em HVDC, o campo elétrico é muito intenso e nestas tecnologias exigem-se diâmetros de condutores superiores, da ordem de 40 mm, mesmo em formação em "bundle". Isto pode significar que o MTTF de 10 anos para os fios de alumínio liga (qualquer que seja a composição) é um fato que deve ser considerado nos projetos e gestão dos ativos numa linha de transmissão.

Conclusões

O artigo apresentou de modo amplo o conceito do MTTF, parâmetro de confiabilidade de elementos não reparáveis, como o exemplo de materiais usados como condutores de cabos de linha de transmissão de energia elétrica.

Na teoria geral da confiabilidade existem ferramentas matemáticas formalizadas para uso na determinação do MTTF dos materiais.

Para obtenção do MTTF dos materiais, existem modelos físicos que vão desde os modelos de observação direta até os modelos matemáticos topológicos, passando pelos modelos empíricos e experimentais.

Com base nos conhecimentos disponíveis e de alguns dados colhidos em diversos trabalhos, avançamos as seguintes assertivas e recomendações:

1- o MTTF para o alumínio ligas é de 10 anos (ASHBY);
2 - o MTTF para o cobre é de 30 anos (ASHBY);
3 - o MTTF para o aço é de 300 anos (ASHBY);
4 - cabos ACSR não se rompem porque tem aço na alma;
5 - cabos de ALL tem vida de 20 anos. (Cigre 273);
6 - o MTTF é um parâmetro de administração de ativos;
7 - em conseção de 30 anos o concessionário se obriga a recondutorar a linha antes de devolvê-la.

Agradecimentos

O autor, consultor do grupo Intelli, agradece a permissão para publicar este trabalho.

Referências

[01] HESIODI - Theogonia Opera et dies Scutum. Edidit Friedrich Solmsen. Fragmenta selecta ediderunt. R. Merkelbach et M. L. West. Oxford, Clarendon Press, 1966.

[02] Carl Friedich Gauss - 1821, 1823 and 1826: Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae. Drei Abhandlungen betreffend die Wahrscheinlichkeitsrechnung als Grundlage des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes. (Three essays concerning the calculation of probabilities as the basis of the Gaussian law of error propagation) English translation by G. W. Stewart, 1987, Society for Industrial Mathematics.

[03] Ya. G. Sinai, On the Foundation of Ergodic Hypothesis for a Dynamical System of Statistica Mechanics, Dokl. Akad SSSR 153 (1963), 1261-1264

[04] Francis Bacon Novum Organum (English), Thomas Fowler (ed., notes, etc.) McMillan and Co., Clarendon Press, Oxford (1878), public domain.

[05] NBR 7302 – ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas – Condutores elétricos de alumínio – Tensão e deformação em condutores de alumínio – MÉTODO DE ENSAIO.

[06] NBR 7303 - ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas – Condutores elétricos de alumínio – Fluência em condutores de alumínio – MÉTODO DE ENSAIO

[07] T.W. Dakin – Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon – AIEE Trans Vol 67, 1948 pp 113-122.

[08] Stanley E. Kiersztyn – Formal theoretical Foundation of Electrical Aging of Dielectrics – PAS IEEE 100 Issue 11 NOV 1981.

[09] ASHBY, M.F. Materials Selection and Process in Mechanical Design. Butterworth Heinemann, Oxford, 1999 ISBN 0-7506-4357-9

[10] Gelfand, Alan E.; Smith, Adrian F. M. (1990), "Sampling-Based Approaches to Calculating Marginal Densities", Journal of the American Statistical Association, 85 (410): 398–409, doi:10.2307/2289776, JSTOR 2289776, MR 1141740

[11] Casella, G.; George, E. I. (1992). "Explaining the Gibbs Sampler". The American Statistician. 46(3): 167. doi:10.2307/2685208. JSTOR 2685208. (Contains a basic summary and many references.)

[12] Levin, David A.; Peres, Yuval; Wilmer, Elizabeth L. (2008), "Markov Chains and Mixing Times", American Mathematical Society.

[13] CIGRE 273 – Overhead Conductor Safe Design Tension With Respect To Aeolian Vibration – JUN 2005

[14] Kailash C.Kapur, Lonard R. Lamberson – RELIABILITY IN ENGINEERING DESIGN – WILEY pp 608

[15] AAA (ALUMINUM ASSOCIATION OF AMERICA) – Stress-Strain-Creep curves for Aluminum Overhead Electrical Conductors. A technical report for aluminum association's Electrical Technical Commitee.

GERALDO R. DE ALMEIDA é Engenheiro Eletricista da INTELLI – Terminais e Conectores.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO
Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e outros comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudeeditorial.com.br