

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE VÁLVULAS E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO VOLUMÉTRICA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SALVADOR/BA

L. M. Almeida¹, lucasmascalmeida@gmail.com

K. P. O. Esquerre¹, karla.esquerre@gmail.com

B. B. S. Silva¹, brennerbiasiss@gmail.com

¹Faculdade Politécnica da Universidade Federal da Bahia, R. Prof. Aristίδes Novis, 2 - Federação, Salvador - BA, 40210-630

Resumo: O Sistema de abastecimento de Água da cidade de Salvador, Bahia, apresenta elevado índice de perdas de água, e as válvulas e instrumentos de medição volumétricas, como o hidrômetro, são acessórios da rede que podem ser caracterizados como elementos críticos na rede distribuição. No presente trabalho foi utilizada a técnica não paramétrica do estimador de Turnbull para a estimativa da função de sobrevivência das válvulas e dos instrumentos de medição volumétricas considerando o evento de interesse (falha), a manutenção corretiva em válvulas e instrumentos de medição volumétricas, baseado em dados históricos de manutenção corretiva referentes a janela temporal compreendida por Janeiro de 2005 à Dezembro de 2014. Através da modelagem realizada indica-se que tempo mediano de sobrevivência em hidrômetros é de 0,32 dias e para as válvulas é de 1,12 dias.

Palavras Chaves: Análise de Confiabilidade, Manutenção Corretiva, Válvulas, Instrumentos de Medição, Turnbull.

1. INTRODUÇÃO

Segurança hídrica e acesso a água potável são alguns das metas definidas e defendidas para a população mundial (UN, 2012), entretanto o atual cenário da capital do estado da Bahia, Salvador, é oposto as demandas de segurança hídrica, pois possui um elevado índice de perdas de água (Bahia, 2015), que proporciona vários impactos negativos, principalmente em relação a redução da disponibilidade de recursos hídricos devido à maior demanda de água para suprir o abastecimento (Morais; De Almeida; Figueira, 2014).

Estudo recente (Bahia, 2015) indica que a demanda de água potável do sistema de abastecimento de água de Salvador é estimada em 10.8 m³/h, entretanto o índice médio de perdas relativo é de 50%. Tubos, conexões e equipamentos acessórios são componentes básicos de uma rede de distribuição de água. Válvulas e medidores volumétricos são classificados como acessórios operacionais em tubulações, e são essenciais para operação e gerenciamento das redes de distribuição de água, em função da possibilidade de determinação, controle, interrupção e mensuração dos fluxos (Azevedo Netto e Fernandez y Fernandez, 2015), e são elementos importantes para concepção de projetos e análises de confiabilidade na rede de distribuição de água (Jun, 2005).

Dentre os possíveis uso dos acessórios da rede de distribuição, o emprego adequado de válvulas para controle de pressão e prevenção contra golpes hidráulicos-mecânicos ajudam a mitigar perdas de água, bem como as válvulas de bloqueio podem facilitar manutenções dado a facilidade de restringir tubos em subconjuntos para eventual serviço de reparo de um ou mais componentes que falharam ou demandam manutenção (AWWA, 2006). Dado estas circunstâncias, as válvulas podem ser consideradas como um elemento crítico, do ponto de vista de garantir a confiabilidade, em uma rede de distribuição. E a falha de um ou mais componentes da rede pode desencadear falhas em cascata no sistema, que proporcionarão reações de maior escala, podendo até comprometer o abastecimento adequado de água potável (Shuang *et al.*, 2017).

Os principais instrumentos de medição volumétrica (IMV) em uma rede de distribuição de água são os macro e micromedidores, sendo o último conhecido popularmente como hidrômetro ou padrão. Os IMV para as Empresas de Águas possibilitam melhor gerenciamento e operação de zonas de abastecimento, localizando e quantificando as demandas. Proporcionam também melhor controle do volume de água a ser faturado e análises do balanços hídrico, as quais permitem indicar o índice de perdas (ABES, 2015). Para uma gestão efetiva de uma zona de abastecimento é necessário o monitoramento voltado para manutenção dos hidrômetros instalados, principalmente os mais antigos, pois em função do envelhecimento é possível a perda da capacidade funcional, como a submedição de consumo de água que acarretará em prejuízo econômico para a Empresas de Águas (AESBE, 2015).

A análise de confiabilidade é um método que permite verificar a probabilidade de falhas em sistemas. Os componentes a serem analisados podem ser indivíduos, processos e conjunto de indivíduos, a fim de se obter maiores informações quanto suas funcionalidades e ou quanto ao aspecto operacional e as relações entre essas os elementos em análise, e a falha pode ser conceituada como a não capacidade do sistema ou elemento de efetuar sua função (Colosimo e Giolo, 2006).

Em sistemas de abastecimento de água a avaliação de confiabilidade corrobora para projetos, diagnósticos e ajustes operacionais, pois poderá servir como ferramenta para tomada de decisão, podendo elucidar melhor o desempenho do sistema. Neste estudo de caso foram avaliados dados de manutenção corretiva no sistema de abastecimento de água, para os elementos do sistema classificados como válvulas e IMV (AWWA, 2006).

O objetivo deste trabalho foi analisar a confiabilidade das válvulas e dos instrumentos de medição volumétrica em uma rede de distribuição de águas do município de Salvador, Bahia, e a aplicabilidade a partir de uma modelagem de sobrevivência não-paramétrica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Análise de Sobrevivência

No presente trabalho foi utilizada a técnica não paramétrica do estimador de Turnbull (Turnbull, 1976) para a estimativa de função de sobrevivência do indivíduo (Tempo *versus* Probabilidade de falha) sabendo dados históricos de manutenção corretiva. O evento de interesse (falha) deste estudo foi a manutenção corretiva executada em válvulas e instrumentos de medição.

A abordagem de análise de sobrevivência depende muito do tempo inicial e da determinação do tempo de falha, também é de fundamental importância a declaração do evento de interesse, este tem que está definido de forma clara e precisa. Sendo o evento de interesse bem definido ele não necessariamente está restrito um único sistema, podendo assumir várias formas. Após a definição do evento de interesse o que se segue é o tratamento para encontrar o tempo entre falhas, que é a diferença entre o tempo de ocorrência da falha e o tempo inicial do indivíduo que falhou (Colosimo e Giolo, 2006).

A probabilidade de um sistema falhar em um determinado tempo pode ser encontrado através da função de sobrevivência, função esta que pode ser obtida por técnicas paramétricas e/ou não paramétricas (Colosimo e Giolo, 2006). Para uma estimativa não-paramétrica pode-se utilizar estimadores empíricos de Kaplan-Meier (Kaplan e Meier, 1958) ou Turnbull (Turnbull, 1976).

Dados de sobrevivência são caracterizados por usualmente virem acompanhados por informações censuradas, as censuras são categorizadas como censura intervalar e/ou seus casos especiais que são as censuras à direita ou as censuras à esquerda. Pode-se afirmar também que a censura mais comum dentre as citadas é a censura à direita, que acontecem quando não é observado o evento de interesse (falha) em um determinado indivíduo durante o período de estudo.

Em análises de sobrevivência o estimador Kaplan-Meier é destacado nas modelagem não-paramétricas, devido a sua flexibilidade no tratamento de dados censurados, esse estimador considera a presença de dados censurados à direita. Quando o objeto de estudo tem seus dados de sobrevivência com censuras do tipo intervalar é comum observar a aplicação do estimador Kaplan-Meier em uma simplificação dos dados censurados como a média dos intervalos censurados, simplificando as censuras como apenas à direita.

Esse tipo de prática pode gerar uma tendência no conjunto de dados que pode aumentar conforme o tamanho do intervalo aumente, para evitar esse tipo de abordagem pode-se utilizar o estimador de Turnbull. Esse estimador é do tipo não paramétrico de máxima verossimilhança, também denominado como estimador produto-limite, ele é usado em situações em que os dados têm censura intervalar. Como o objetivo deste trabalho foi analisar os dados de sobrevivência que o estimador retorna, não será apresentado o desenvolvimento matemático. Para mais detalhes destes, recomenda-se a leitura do artigo original.

Uma estatística simples e muito útil de uma curva de sobrevivência é o tempo mediano de sobrevivência. Pode-se esperar que aproximadamente 50% da população em estudo irá sobreviver além da mediana. O tempo mediano de sobrevivência é usado com muito mais frequência do que a média como um índice estatístico devido às dificuldades em estimar médias a partir de dados fortemente censurados, sem fundamentos paramétricos bem consolidados. Mais formalmente, o tempo mediano de sobrevivência é definido como o valor que a função de distribuição cumulativa retorna para o tempo mediano (Brookmeyer, 2005).

2.2. Estudo de Caso e Banco de Dados

O Sistema de Abastecimento de Água de Salvador é composto por cinquenta e uma Zonas de Abastecimento de Água, e estima-se que possui elevado índice de perdas de água (Bahia, 2015). O presente trabalho foi desenvolvido baseado em informações do banco de dados de solicitação de serviços referentes a janela temporal compreendida por Janeiro de 2005 à Dezembro de 2014, para os serviços analisados e caracterizados como serviços de manutenção corretiva em válvulas e em instrumentos de medição volumétricos na rede de distribuição água de uma Zona de Abastecimento, sendo analisado 3118 eventos de falha.

A modelagem de confiabilidade foi realizada a partir do *software* R versão 3.4.3 acoplado ao *software* RStudio versão 1.1.423 do pacote survival (Therneau, 2017) modelagem matemática.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise Exploratória dos Dados de Sobrevivência

Para o presente estudo de caso, foi possível inferir através da análise exploratória de dados que nos anos de 2005, 2006 e 2007 houve uma baixa quantidade de solicitações quando comparado com os anos posteriores, como pode ser verificado visualmente na Figura 1. Tal fato motivou que a modelagem de análise de confiabilidade fosse desenvolvida utilizando os dados do ano de 2008 até 2014.

Pode-se perceber também uma crescente quantidade de solicitações de serviço de reparo, entretanto não pode-se afirmar com certeza o porquê desse crescimento, como sabe-se que os itens tendem a perder a confiabilidade ao longo do tempo de vida, pode-se justificar que o crescimento no quantitativo de solicitações anual se deu pelo decaimento da confiabilidade no sistema. Outra justificativa que pode ser adicionada as citadas anteriormente é que o sistema de cadastro de solicitações de serviço da Empresa de Águas foi alterado durante essa janela temporal, isso pode ter gerado um aumento significativo na ocorrência de solicitações.

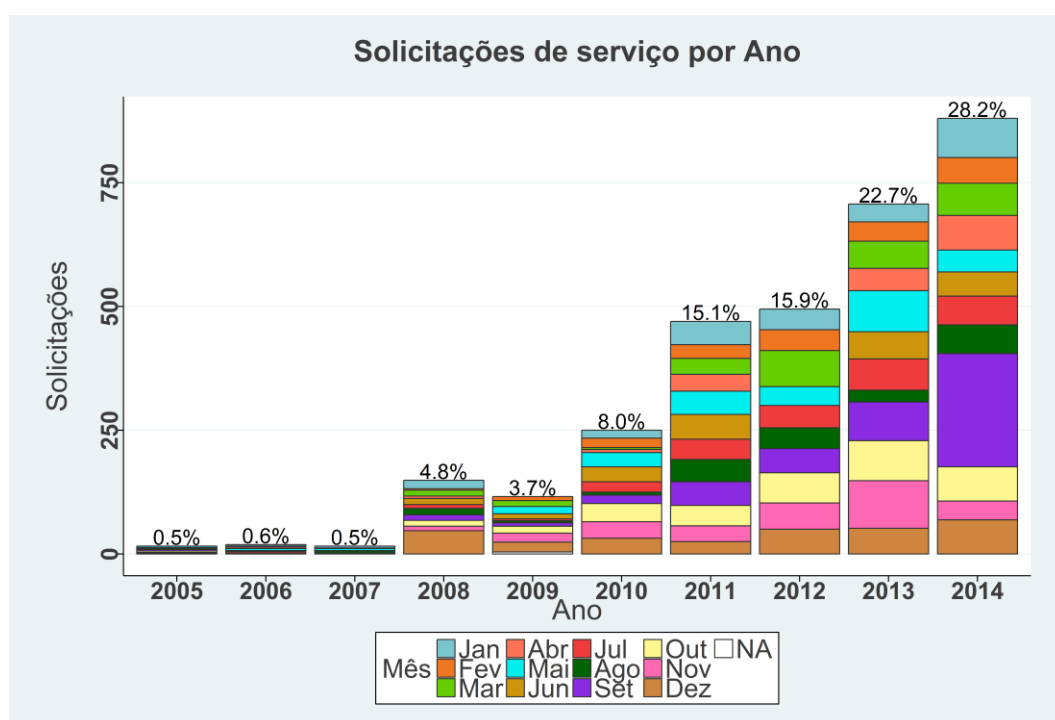


Figura 1: Solicitações de Serviço por Ano e por Mês

Também através da análise exploratória foi possível verificar que anualmente são reparados minimamente 78 IVM e 21 válvulas, e ao nível máximo de 853 reparos de IVM e 35 válvulas, como pode ser verificado na Tabela 1. Percebe-se também grande dispersão da incidência anual de solicitações de serviço para IVM.

Tabela 1 – Solicitações de Serviço.

	IMV/Anos	IMV/Meses	Válvulas/Anos	Válvulas/Meses
Mínimo	78	151	21	9
1º Quartil	171,50	183,50	23,50	13,75
Média	407,30	237,60	27,29	15,92
Mediana	433,00	229,00	27,00	15,50
3º Quartil	572,00	269,20	30,50	18,25
Máximo	853	421	35	22

Ao todo foram contabilizadas 3.118 (três mil e cento e dezoito) solicitações de serviço para reparos em válvulas e instrumentos de medição volumétrica. Deste total de solicitações, 93% foram referentes a serviços em hidrômetros, e 7% em válvulas, como pode ser visualizado na Figura 2.

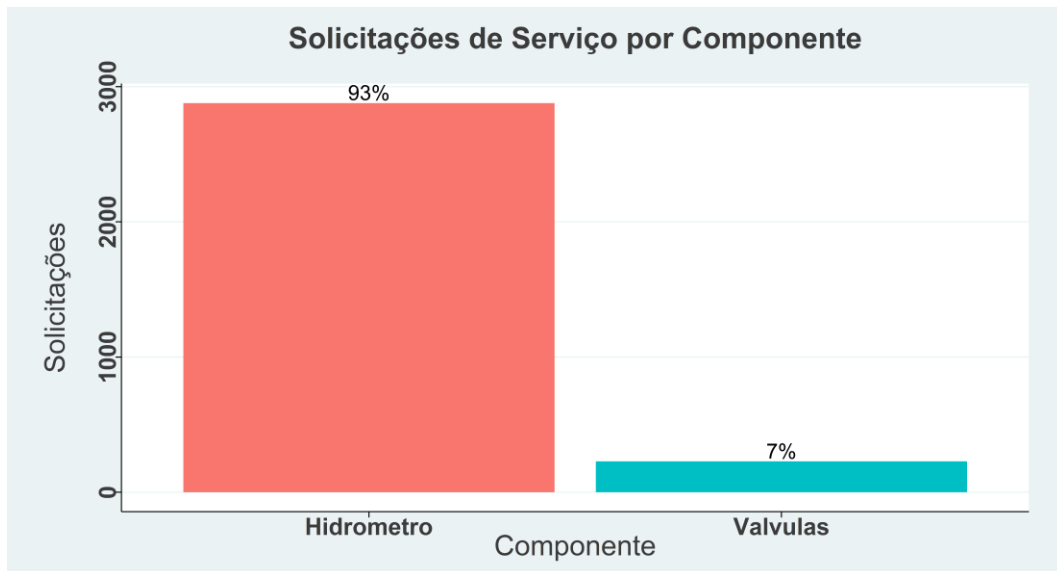


Figura 2: Solicitação de Serviços por Elemento

A fim de analisar melhor possíveis correlações com as solicitações, subdividiu-se o banco de dados em função do turno do dia, desta maneira foi possível verificar também que praticamente todas as solicitações de serviço são realizadas nos turnos diurno (manhã e tarde), como demonstrado na Figura 3. Tal cenário pode ser descrito em função do procedimento de cadastramento de dados da Empresa de Águas, em visita técnica pode-se investigar tal procedimento e constatou-se que solicitações que acontecem após o horário comercial só são devidamente cadastradas no banco de dados de controle após o início da jornada de trabalho do dia seguinte, esse cadastramento é feito manualmente e muitas vezes preenchido com o horário e dia do cadastramento e não da solicitação, para minimizar as tendências que a falta de informação pode gerar uma característica de censura intervalar é adicionada aos dados.

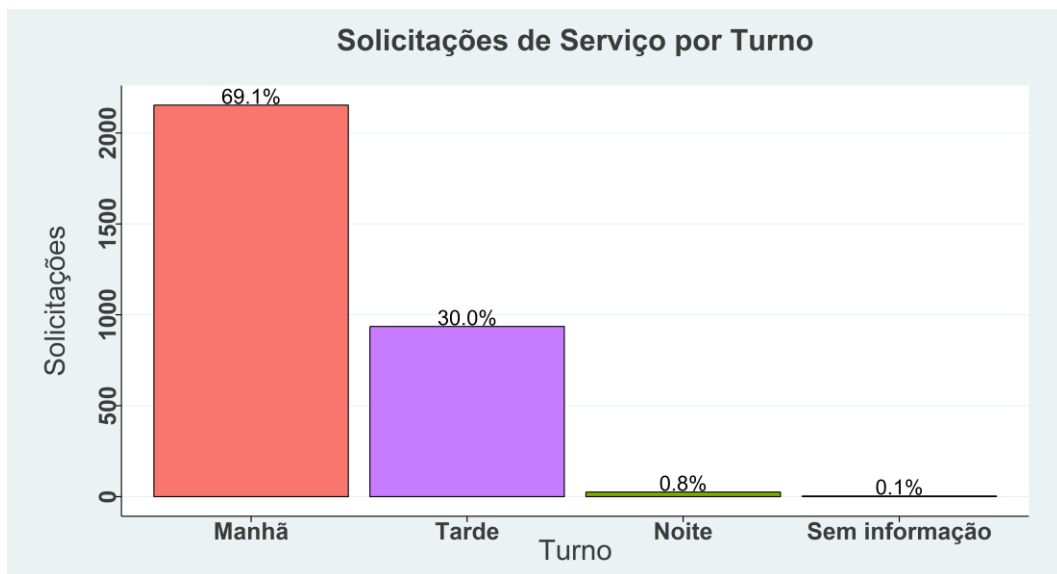


Figura 3: Solicitação de Serviços por Turno

3.2. Análise de sobrevivência

A Figura 4 apresenta o comportamento da função de sobrevivência não-paramétrica para as válvulas. A curva decai rapidamente para curtos tempos entre falhas, de zero até dez dias, e depois passa a decair com uma certa cadência. A interpretação dos índices de quantidade de eventos acumulados e porcentagem em risco sugerem uma necessidade de uma aprofundamento na análise dos tempos entre falhas de pequenas amplitudes.

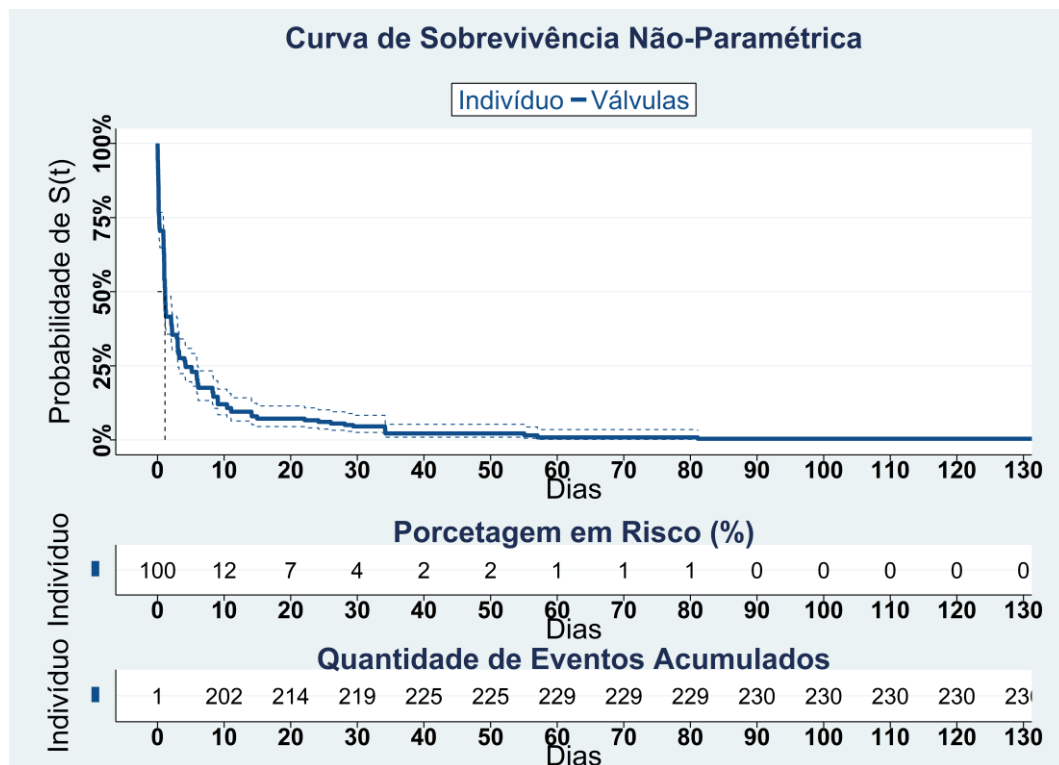


Figura 4: Curva de Sobrevivência para as Válvulas.

Afim de analisar o comportamento dos tempos entre falhas de pequenas amplitudes e de extrair o valor de tempo mediano de sobrevivência, a curva da função de distribuição acumulada foi produzida e apresentada na Figura 5. Este gráfico aponta para uma estatística de tempo mediano de falha de aproximadamente 1,12 dias. Trazendo para interpretação física do sistema, pode-se entender que a cada um dia tem-se uma probabilidade de 50% de ocorrer uma manutenção corretiva em uma válvula.

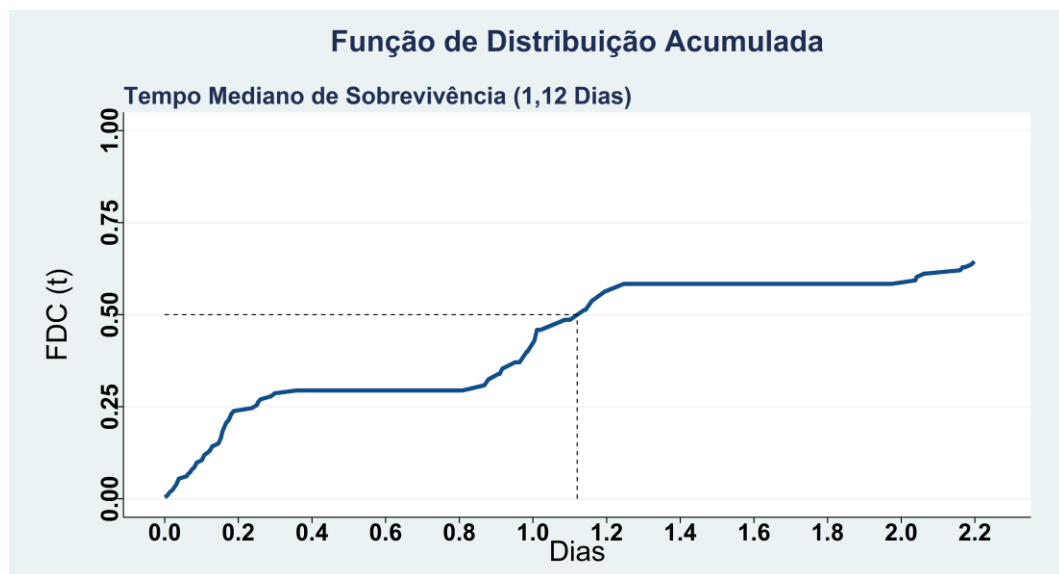


Figura 5: Curva da Função de Distribuição Acumulada para as Válvulas.

Para dados de manutenção em medidores obtivemos a curva representada pela Figura 6. A curva apresenta uma queda muito grande para amplitudes pequenas de tempo. Essa queda fica mais evidente quando se observa os valores de porcentagem em risco e quantidade de eventos acumulados, note que no tempo zero existiam 2.879 (dois mil e oitocentos e setenta e nove), já no tempo referente a vinte e cinco dias apenas 15 indivíduos permanecem operando.

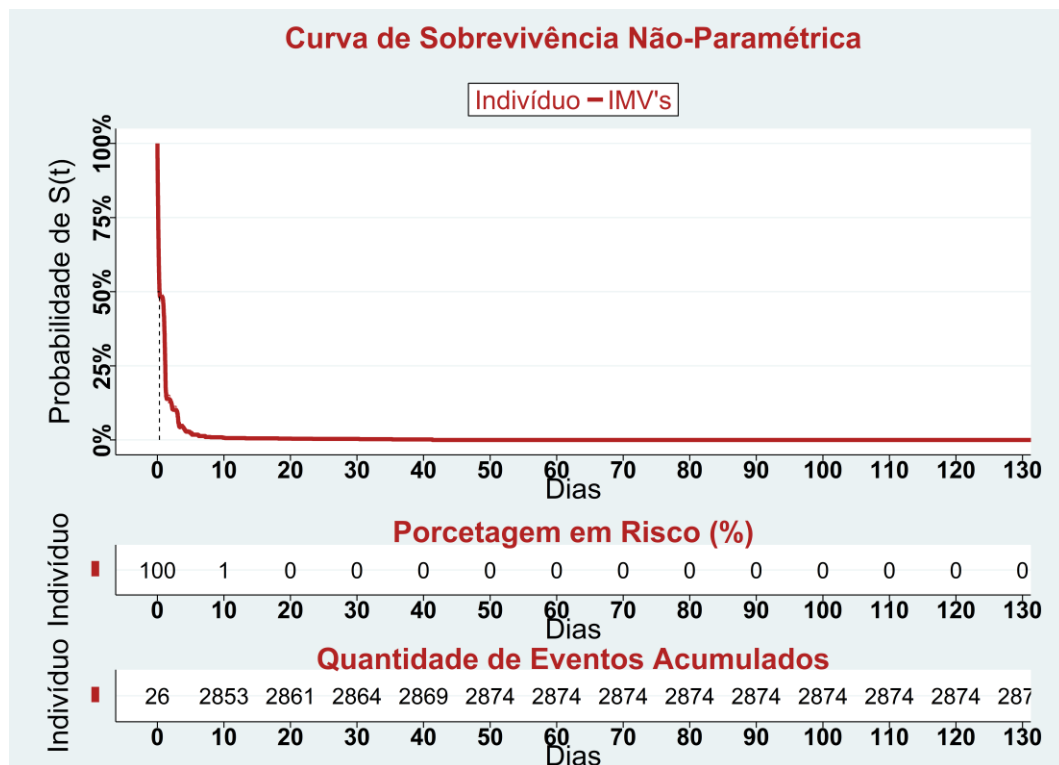


Figura 6: Curva de Sobrevivência para os IMV's.

A partir da Figura 7 é possível extrair a informação da estatística do tempo mediano de sobrevivência, para os IMV's é de aproximadamente 0,32 dias. Esse comportamento da estimação não-paramétrica pode ser interpretado como uma provável alta taxa de falha para pequenas amplitudes de tempo, já que existe uma alta densidade de falhas para os tempos de recorrência iniciais.

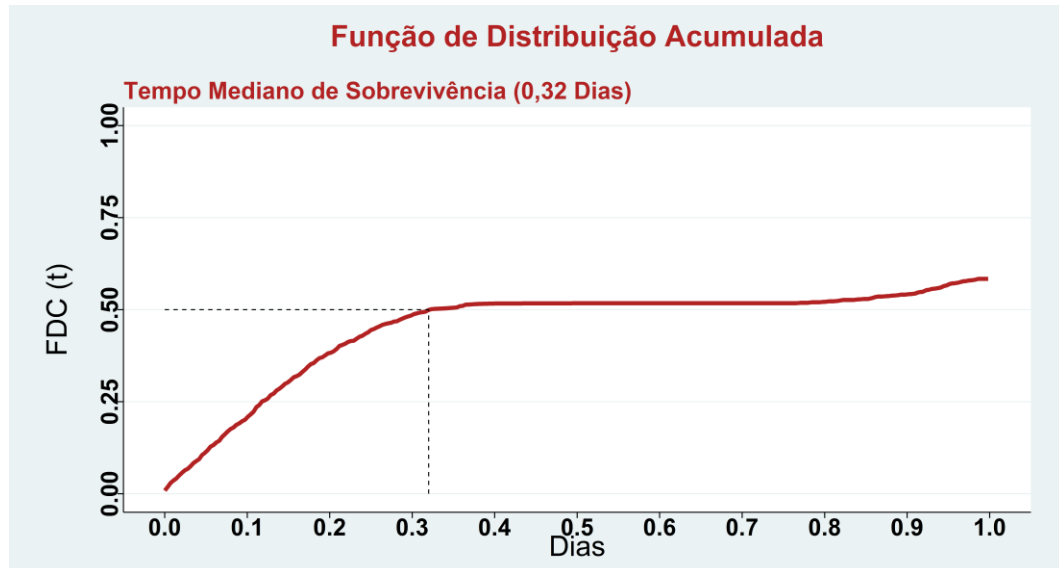


Figura 7: Curva da Função de Distribuição Acumulada para os IMV's.

Por fim uma tabela de valores que apresenta as estatísticas dos tempos medianos de sobrevivência é representada pela Tabela 2. Esta tabela pode ser um exemplo de diagnóstico que auxilie tomadas de decisão.

Tabela 2 – Valores dos Tempos Medianos de Sobrevivência.	
<i>Função de Sobrevivência Não-Paramétrica</i>	<i>Tempo [dias]</i>
Manutenção nas Válvulas	1.12
Manutenção nos Hidrômetros	0.32

4. CONCLUSÃO

Através da modelagem realizada baseada no estimador proposto por Turnbull indica-se que para o conjunto de dados de solicitações de serviço de uma Zona de Abastecimento do Sistema de Abastecimento de Água de Salvador, o tempo mediano de sobrevivência em hidrômetros é de 0,32 dias e para as válvulas é de 1,12 dias. Não se pode afirmar com certeza qual o evento que causa a falha do indivíduo, entretanto, as variações e picos de pressão na rede de distribuição de água aliados ao desgaste da peça ao longo do tempo, podem ser objetos de estudos de confiabilidade para complementar este diagnóstico.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi apoiado pela Fundação Baiana de Amparo à Pesquisa (FAPESB), pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI) e pelo grupo GAMMA (Growing with Applied Multivariate Analysis) da Universidade Federal da Bahia.

6. REFERÊNCIAS

- ABES, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária., 2015, “Controle e Redução de perdas nos Sistemas Públicos de Abastecimento de Água” Associação Brasileira de Engenharia Sanitária - ABES. Porto Alegre. Disponível em: <http://abes-sp.org.br/arquivos/perdas_abesv2.pdf>.
- AESBE, Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento., 2015, “Guia Prático de Procedimentos Para Estimativa de Submedição no Parque de Hidrômetros”. Série Balanço Hídrico. Vol.3. pp. 44.
- Brookmeyer, R., 2005, “Median Survival Time” in Encyclopedia of Biostatistics. John Wiley & Sons, Nova York.
- Azevedo Netto, J. M de; Fernandez y Fernandez, M., 2015. “Manual de Hidráulica.” Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 632p.
- Bahia, Secretária de Infraestrutura Hídrica e Saneamento da Bahia - SIHS., 2016, In: “Plano de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara.” Fase IV. Tomo I. Relatório Sinopse. Salvador. pp. 82.
- Colosimo, E. A.; Giolo, S. R., 2006, “Análise de Sobrevivência Aplicada.” Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 369 p.
- Jun, H. 2005, “Strategic Valve Locations in a Water Distribution System.” Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Kaplan, E. L.; Meier, P. 1958, “Nonparametric estimation from incomplete observations”. Journal of American statistical Association, v. 53, n. 282, pp. 457–481.
- Morais, D. C.; De Almeida, A. T.; Figueira, J. R., 2014, “A Sorting Model for Group Decision Making: A Case Study of Water Losses in Brazil”. Group Decision and Negotiation, v. 23, n. 5, pp. 937–960.
- AWWA - American Water Works Association., 2006, “Distribution Valves: Selection, Installation, Field Testing, and Maintenance (M44)”. American Water Works Association, Denver.
- Shuang, Q., Liu, Y., Tang, Y., Liu, J. and Shuang, K., 2017, “System Reliability Evaluation in Water Distribution Networks with the Impact of Valves Experiencing Cascading Failures”. Water, v. 9, n. 6, pp. 413.
- Therneau, T. M., 2017, “Survival Analysis.” R package version 2.41-3. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/survival/survival.pdf>>.
- Turnbull, B. W., 1976, “The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored and truncated data”. Journal of the Royal Statistical, v. 38, n. 3, pp. 290–295.
- UN, U. N., 2012, “O Futuro que Queremos”: United Nations Conference on Sustainable Development. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://rio20.un.org/sites/rio20.un.org/files/a-conf.216l-1_english.pdf>.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores Lucas Mascarenhas Almeida, Karla Patrícia Santos Oliveira Rodriguez Esquerre e Brenner Biasi Souza Silva são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

RELIABILITY ANALYSIS OF VALVES AND VOLUMETRIC MEASURING INSTRUMENTS AT WATER DISTRIBUTION NETWORK OF SALVADOR/BA

L. M. Almeida¹, lucasmascalmeida@gmail.com
K. P. O. Esquerre¹, karla.esquerre@gmail.com
B. B. S. Silva¹, brennerbiasiss@gmail.com

¹Polytechnique Scholl of Federal University of Bahia 2 Prof. Aristides Novis St, Salvador-BA, 40210-630, Brazil.

Abstract: *The system water supply of the Salvador city, Bahia, presents high index water losses, and valves and volumetric measuring instruments, such as hydrometer are accessories network that can be characterized as critical at the network water distribution. In this paper was used technique non-parametric of Turnbull's estimator to estimate of the valves' survival function and volumetric measuring instruments' survival function considering the event of interest (failure), the corrective maintenance on valves and volumetric measuring instruments, based on historical data corrective maintenance regarding the period understood from January 2005 to December 2014. The results of modelling indicates the median survival time for hydrometer are 0.32 days and for valves are 1.14 days.*

Keywords: *Reliability Analysis, Corrective Maintenance, Valves, Measuring Instruments, Turnbull.*