

Eixo Temático ET-08-018 - Recursos Hídricos

ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS NA AVALIAÇÃO DE RISCO DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO DE CAMPINA GRANDE/PB

Flavio Santos Oliveira¹, Adriano Oliveira da Silva², Rui de Oliveira³, João Paulo Vidal dos Santos⁴

¹Graduando em Engenharia Sanitária e ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). E-mail: flvsnts.santos@gmail.com; ²Graduando em Engenharia Sanitária e ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). E-mail: adriano@hotmail.com; ³Engenheiro Civil pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Professor PhD da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). E-mail: ruideo@gmail.com; ⁴Geógrafo pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Mestre em Manejo e Conservação do Solo e Água pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Professor da Universidade Vale do Acaraú (UVA-UNAVIDA). E-mail: jpvidalst@gmail.com.

RESUMO

A maioria das operações de sistemas de abastecimento de água nos municípios brasileiros ainda atende a um comportamento principalmente empírico necessitando a introdução de conceitos e instrumentos científicos. O gerenciamento da qualidade da água tratada requer a elaboração de modelos capazes de prever sua degradação em diferentes cenários caracterizados por fatores diversos, entre os quais capacidade, constituição e idade das tubulações, bem como a situação da operação e manutenção do sistema. O objetivo do presente trabalho baseia-se no levantamento de dados de indicadores sentinelas para a avaliação das alterações da qualidade da água num sistema de abastecimento de Campina Grande (PB), através da avaliação de risco com a análise de árvore de falhas. Também foram estudados pontos de amostragem representativos da rede de distribuição, bem como do principal reservatório do sistema. Com a avaliação de risco pelo método análise de árvore de falhas foi possível determinar as combinações de defeitos de componentes de um sistema ou erros humanos poderiam acarretar a ocorrência do evento indesejado, e quais combinações de falhas são as que mais contribuem para a ocorrência deste evento. Com base nos resultados obtidos na pesquisa, observou-se a importância desta metodologia de avaliação para a prevenção ou um rápido direcionamento no tratamento e manutenção de sistemas de abastecimentos urbanos de porte médio.

Palavras-chave: Análise de Árvore de Falhas (AAF); Indicadores Sentinelas; Qualidade da Água.

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água tratada é uma das preocupações do sistema de abastecimento de água no mundo inteiro. O aspecto da qualidade da água tem em vista os riscos à população pela presença de contaminantes. O aumento da contaminação

deve-se em sua maioria às excretas humanas e as de animais que introduzem microrganismos patogênicos na água, um veículo de transmissão de doenças.

Para controle de doenças de veiculação hídrica é necessário melhorias no saneamento ambiental, pois proporcionam oportunidade de higiene, conforto e bem estar para toda a sociedade.

Cabe ao sistema de abastecimento hídrico se responsabilizar em levar água com qualidade adequada ao consumidor e que atenda as exigências dos padrões de qualidade estabelecidos pela Portaria nº 2.914/2011, do Ministério da Saúde. Porém, é necessário que as empresas responsáveis pelo serviço realizem de maneira eficiente a captação, o tratamento, transporte e distribuição da água.

O cloro é o agente desinfetante mais utilizado nas estações de tratamento de água por ser mais vantajoso e eficiente servindo como barreira em uma eventual contaminação por ruptura da tubulação. Mas, o cloro por tratar-se de uma substância não conservativa e de elevado potencial reativo é facilmente consumido na presença de matéria orgânica contidas na água e nos materiais das diversas tubulações da rede de distribuição. O problema agrava-se ainda mais com o distanciamento entre as unidades operacionais e os centros de consumo.

Alguns operadores do sistema, sem conhecimento sobre o comportamento do cloro na rede, aplicam altas dosagens de cloro nas estações de tratamento, visando manter o residual de cloro em toda a rede. Entretanto, pode ocasionar diversos problemas como a possibilidade de produzir gosto, odor e produtos carcinogênicos (AZEVEDO NETTO e RICHTER, 1998). A legislação, portanto, estabelece as concentrações mínimas e máximas permitidas a serem seguidas pelas empresas prestadoras do serviço de abastecimento de água, a fim de garantir qualidade e segurança.

A análise da qualidade da água para consumo humano deve levar em consideração os principais indicadores (microbiológicos, físicos, químicos e radioativos) contidos no padrão de potabilidade estabelecido na Portaria MS nº 2.914/2011. Dentre os principais indicadores utilizados em sistema de abastecimento estão os indicadores sentinelas (cloro residual livre e turbidez) e os indicadores auxiliares (pH, temperatura, cloro residual combinado, cor e bactérias heterotróficas).

O uso destes indicadores auxilia o monitoramento e manutenção da qualidade da água nos sistemas de transporte e distribuição, vale ressaltar a grande importância da presença de um residual de cloro, onde este garante a proteção da água contra a presença de microrganismos prejudiciais à saúde humana.

A avaliação de risco é uma das três etapas da análise de risco, consistindo num processo orientado para a quantificação da perda máxima provável que dele possa decorrer, ou seja, da quantificação da probabilidade de ocorrência desse risco e de suas consequências e/ou gravidades (CARMO et al., 2008). A avaliação do risco descreve os fatores, agentes ou situações que determinam a ocorrência do risco.

Existem diversas técnicas de avaliação de risco, entre elas: Análise de Perigos e Operabilidade (HazardandOperabilityStudies - HAZOP), Estudo de Caso, Análise Preliminar de Riscos (APR), Análise de Árvore de Eventos, Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FailureModeandEffectsAnalysis - FMEA) e Análise de Árvore de Falhas(FailureTreeAnalysis-AAF), entre outras.

A Análise de Árvore de Falhas utilizada nesse trabalho foi primeiramente concebida por H.A.Watson dos Laboratórios Bell Telephone em 1961, a pedido da Força Aérea Americana para avaliação do sistema de controle do Míssil Balístico

Minuteman. A AAF é um método excelente para o estudo dos fatores que poderiam causar um evento indesejável (falha) e encontra sua melhor aplicação no estudo de situações complexas. Ela determina as frequências de eventos indesejáveis (eventos topo) a partir da combinação lógica das falhas dos diversos componentes do sistema.

A finalidade da Árvore de Falhas é propor quais possíveis convenções de falhas de componentes de um sistema ou erros humanos poderiam determinar a ocorrência de um fenômeno indesejado e quais destas combinações cooperam para a ocorrência deste evento (Figura 1).

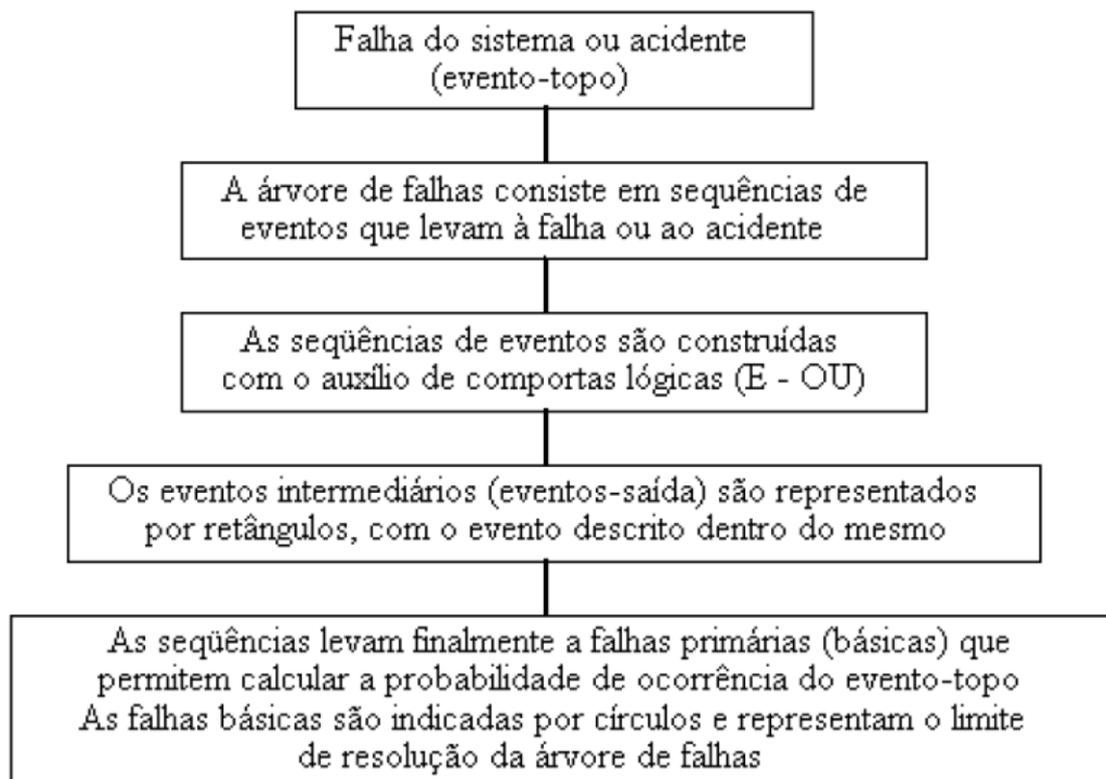


Figura 1. Estrutura básica de construção de uma árvore de falhas. Fonte: Gerenciamento de riscos, disponível em: <<http://alternativorg.wdhouse.com.br>>.

A elaboração da árvore acompanha um método inverso, em termos cronológicos, pois seguindo do evento topo (o resultado final) investigam-se as causas do evento.

As etapas do método AAF são:

- Reconhecimento das ocorrências indesejáveis;
- Ramificação dos acontecimentos em grupos com origens semelhantes;
- Identificação do evento topo;
- Construção dos níveis consecutivos ou ramos da árvore de falhas;
- Determinação das combinações mínimas de falhas para que se origine o evento topo, por eliminação dos eventos repetidos, aplicando-se as propriedades da álgebra booleana;

- Quantificação da probabilidade do acidente;
- Recomendações de medidas preventivas.

As seqüências dos eventos na representação gráfica são construídas com o auxílio de comportas lógicas (E - OU), os retângulos representam o evento topo ou os eventos intermediários, tendo o evento descrito dentro da figura, enquanto que, as falhas primárias são representadas por círculos e permitem estimar a probabilidade de ocorrência do evento topo(JANUÁRIO, 2013).

A Figura 2 ilustra as principais representações utilizadas na elaboração da árvore e a Figura 3 ilustra um modelo de árvore de falhas.

	Módulo ou comporta "E"
	Módulo ou comporta "OU"
	Módulo ou comporta de inibição. Permite aplicar uma condição ou restrição à seqüência
	Identificação de um evento particular, topo ou contribuinte
	Falha primária de um ramo ou série. Evento básico
	Normalmente um evento que sempre ocorre, a menos que ocorra falha
	Evento não desenvolvido. Falta de informação ou de consequência suficiente.
	Indica ou estipula restrições
	Símbolo de conexão a outra parte da árvore

Figura 2. Representações gráficas para a elaboração da árvore de falhas. Fonte: Nascimento e Oliveira (2011).

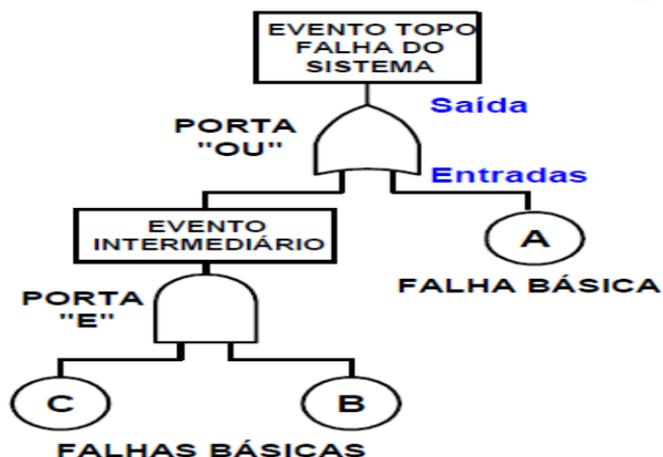


Figura 3. Modelo de árvore de falhas. Fonte: Sucena (2008)

OBJETIVO

Avaliar a qualidade da água em um sistema de abastecimento de porte médio utilizando uma abordagem de análise de risco pelo método árvore de falhas através de indicadores sentinelas.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido na cidade de Campina Grande-PB, situada a 112 km da capital João Pessoa, a 551 m acima do nível do mar, tendo como coordenadas 7° 13' 51" Sul e 35° 52' 54" Oeste.

As atividades de coleta e análise de amostras foram realizadas no sistema de abastecimento de água de porte médio, ilustrada esquematicamente, na Figura 04, particularmente na adução, reservação e distribuição.

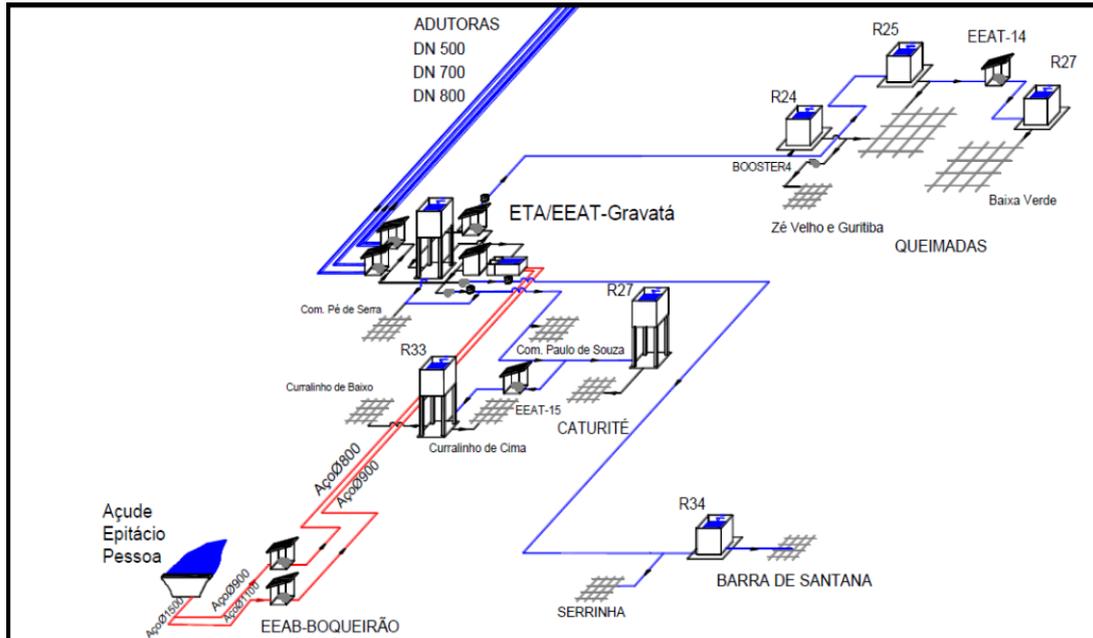


Figura 4. Representação esquemática do sistema de abastecimento de água de Campina Grande. Fonte: Adaptado da CAGEPA (2010).

Os pontos de controle foram: Adutoras que chegam ao reservatório R9 (AD500, AD700, AD800) e o P12-ML: Grupo Escolar Melo Leitão, situado na Rua Anacleto Elói, Bairro do Quarenta, Campina Grande-PB, ponto de saída do reservatório R9.

Contudo, foi analisado o conjunto dos 15 (quinze) dados coletados. A metodologia utilizada foi baseada na recomendada para o monitoramento da vigilância da qualidade da água para consumo humano (BRASIL, 2007).

A coleta é realizada através de uma torneira externa, tomando os devidos cuidados de assepsia da mesma. No R0 a amostra é coletada numa torneira externa do próprio reservatório, sendo representativa para a entrada das três adutoras. No R9 essas amostras são coletadas na chegada dos três pontos de amostragem, AD 500, AD 700 e AD 800. As coletas foram realizadas semanalmente.

Cloro Residual Livre

Para a determinação do CRL foi utilizado o método titulométrico DPD – SFA. A análise deve ser feita no local, no mesmo instante em que a coleta foi realizada, para evitar a degradação e a reação desse Cloro com outros agentes externos, que possam vir a influenciar no resultado final. Neste método, as espécies de cloro residual são determinadas por análise volumétrica de oxidação-redução, utilizando o sulfato ferroso amoniacal (SFA) como titulante e o oxalato ou sulfato de N, N-dietil-p-fenilenediamina (DPD) como indicador.

O CRL reage instantaneamente com o DPD, na ausência de íons iodeto, com a produção de coloração avermelhada cuja intensidade está relacionada à quantidade de CRL disponível. O cloro livre pode ser imobilizado com glicina (ácido aminoacético) permitindo a determinação de frações interferentes de bromo e iodo sendo este valor usado para subtrair do resultado de uma prova na qual o cloro livre não tenha sido imobilizado.

A Portaria MS nº 2.914/2011 recomenda que, após a desinfecção, a água deve conter um teor mínimo de cloro residual livre de 0,5 mg/L, sendo obrigatória a manutenção de no mínimo 0,2 mg/L, e um máximo de 2,0 mg/L em qualquer ponto da rede de distribuição.

Turbidez

Foi determinada pelo método nefelométrico com a utilização de turbidímetro portátil provido de fonte de luz de filamento de tungstênio, sendo a distância atravessada pela luz incidente não maior que 10 cm. A legislação preconiza que o valor máximo permissível (VMP) para ETAs que possuam o tratamento completo e filtração rápida deve ser de 0,5 unidade de turbidez (uT) na saída da Estação de Tratamento de Água (ETA), e 5uT no ponto mais desfavorável da rede de distribuição.

Análise de Árvore de Falhas

O método de avaliação de risco utilizado foi à análise de árvore de falhas, a partir dos parâmetros dos indicadores sentinelas das análises feitas nos pontos de controle, fazendo a relação de acordo com as exigências dos padrões de qualidade da água estabelecida pela Portaria MS nº 2.914/2011. A execução da atividade iniciou-se do evento topo, ou seja, a não conformidade da qualidade da água nos pontos de controle, e sempre observando quais os níveis subsequentes ou ramos da árvore que estão gerando a falha.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A concentração de Cloro Residual Livre, representada na Figura 5, em todos os pontos de monitoração está acima dos padrões estabelecidos pela legislação vigente. Tal cenário pode estar ocorrendo devido a uma falta de gestão no plano de monitoração de vigilância da qualidade da água.

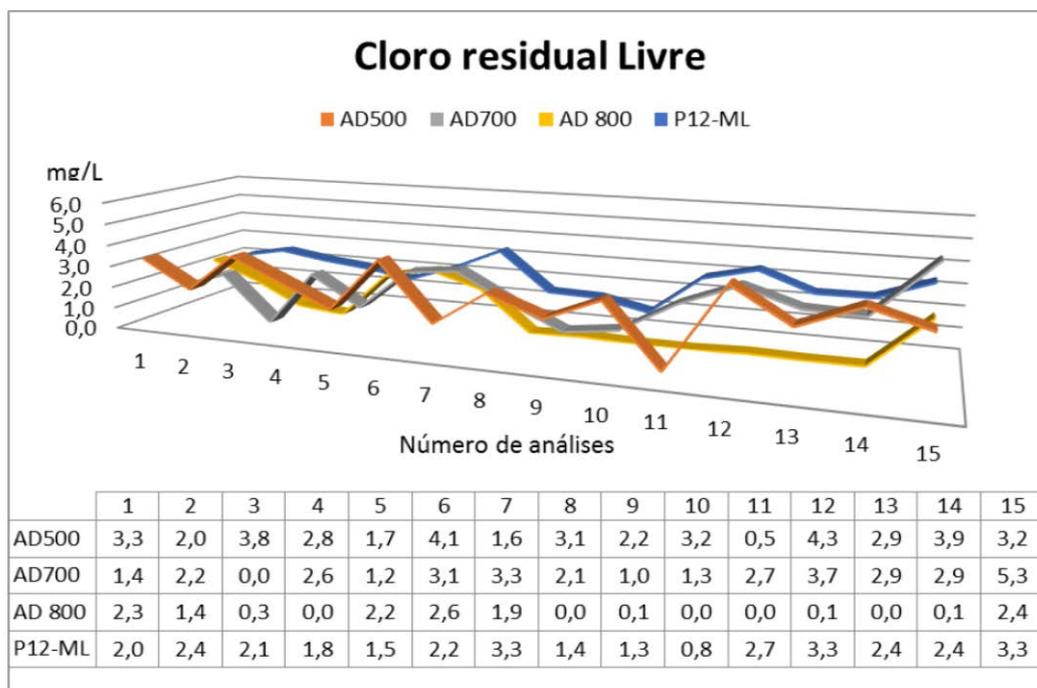


Figura 5. Resultado parcial da variação do indicador cloro residual livre nos quatro pontos de monitoração.

O parâmetro de turbidez apresentou-se acima do permitido, sendo o maior valor encontrado de 18,57 uT (Figura 6), podendo ser atribuído, principalmente à ausência da manutenção do sistema.

Para analisar os resultados obtidos dos indicadores sentinela, a árvore de falhas foi desenvolvida considerando três níveis de eventos, sendo definido como primeiro nível o evento topo da árvore, a não conformidade no ponto, representado por (A). Os eventos intermediários se referem à não conformidade com os indicadores sentinelas, que, de acordo com a análise da Portaria MS nº 2914/2011, apresentaram Turbidez > 5,0 UT (B); CRL > 2,0 mg/L (C); CRL < 0,2 mg/L (D) (Figura 7).

Para o segundo nível considerou-se as possíveis falhas básicas causadoras dos eventos intermediários que, foram agrupados a um conjunto mais extenso de falhas na operação, na manutenção e na idade do material dos componentes do sistema de abastecimento, esse último conjunto foi tido como terceiro nível.

A árvore foi planejada baseando-se nas características do sistema de abastecimento de Campina Grande e dos pontos de coleta, identificando os indicadores sentinelas que serviram de parâmetro para o estudo e análise das falhas que levaram a não conformidade no ponto de amostragem.

As falhas que podem ocasionar ao evento turbidez maior que 5,0 UT, num determinado ponto da rede de distribuição são: a turbidez elevada na saída da ETA, a distância entre o ponto e o reservatório de abastecimento, a baixa pressão na rede e a formação de biofilmes. A distância entre o ponto e o reservatório contribui para a não conformidade da turbidez, do mesmo modo à ausência da manutenção do sistema, podendo isto ter ocasionado o elevado índice de turbidez de 18,57 UT.

O evento $CRL < 0,2 \text{ mg/L}$ é ocasionado, geralmente, por falhas como distância entre o ponto e o reservatório, decaimento de residual no reservatório, baixa pressão na rede, substâncias redutoras presentes na água ou estrutura de biofilmes nas tubulações. O evento mediano $CRL > 2,0 \text{ mg/L}$ ocorre em virtude da supercloração na saída da ETA e à distância entre o ponto e o reservatório, sendo esses fatores de caráter operacional.

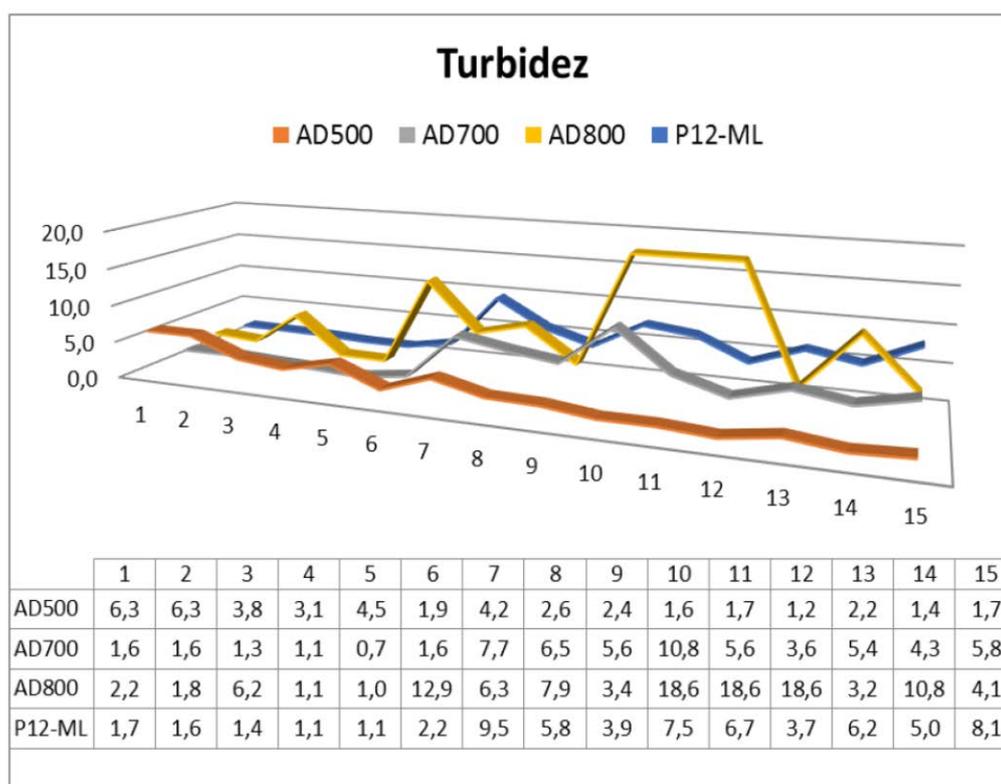


Figura 6 - Resultado do indicador turbidez nos quatro pontos de monitoramento.

A supercloração é uma moderação que, muitas vezes, é utilizada a fim de assegurar uma concentração mínima do residual de cloro em todos os pontos da rede de distribuição, principalmente quando a rede é muito extensa e não apresenta pontos de recloração.

Segundo Januário (2013), a perda do residual de cloro no reservatório de distribuição é uma falha que, também, favorece a diminuição da concentração do residual de cloro no ponto, provocada pela falta de limpeza dos reservatórios e, conseqüentemente, presença de sedimentos e substâncias em seu interior que reduzem o cloro, sendo caracterizada como uma falha de manutenção e de idade do material dos componentes do sistema. Visto que, os materiais usados, em geral, nas juntas das tubulações e na vedação de roscas devem ser considerados como possíveis locais para colonização microbiana, formação de biofilme e aumento do consumo de cloro na rede de distribuição.

No sistema de abastecimento de Campina Grande, o ponto que se localiza próximo ao reservatório (R-9) e adutoras apresentou concentração de turbidez elevada,

devido à água que abastece o R-9 chega por efeito de alta pressão e o reservatório opera como dispositivo de descompressão. Diferentemente ao que ocorre em outros pontos mais distantes do reservatório de distribuição, onde a turbidez é elevada, gradualmente ao longo da rede, pela presença de sedimentos procedentes das tubulações.

Os problemas com a baixa pressão na rede de distribuição demonstram uma falha tanto de execução como de manutenção, visto que no período noturno, funciona-se com o mínimo de bombeamento para economizar energia, provocando uma variação de nível no reservatório e, portanto, uma diminuição na vazão. E se, além disso, ainda houver o descuido com a manutenção da rede, o ambiente se torna mais propício ao aumento da turbidez e diminuição das concentrações dos residuais de cloro.

Há a necessidade de se obter maiores informações pertinentes ao sistema de abastecimento como registro técnico da rede de distribuição, transparência no atendimento ao consumidor, relatórios de consertos, rompimentos e vazamentos na rede que dariam subsídios para estabelecer a probabilidade que cada falha teria para a não conformidade em cada ponto. Assim as falhas básicas não podem ser quantificadas, porém, é possível avaliar quais falhas são mais preocupantes e como elas influenciam na qualidade do produto final, a água de abastecimento de Campina Grande.

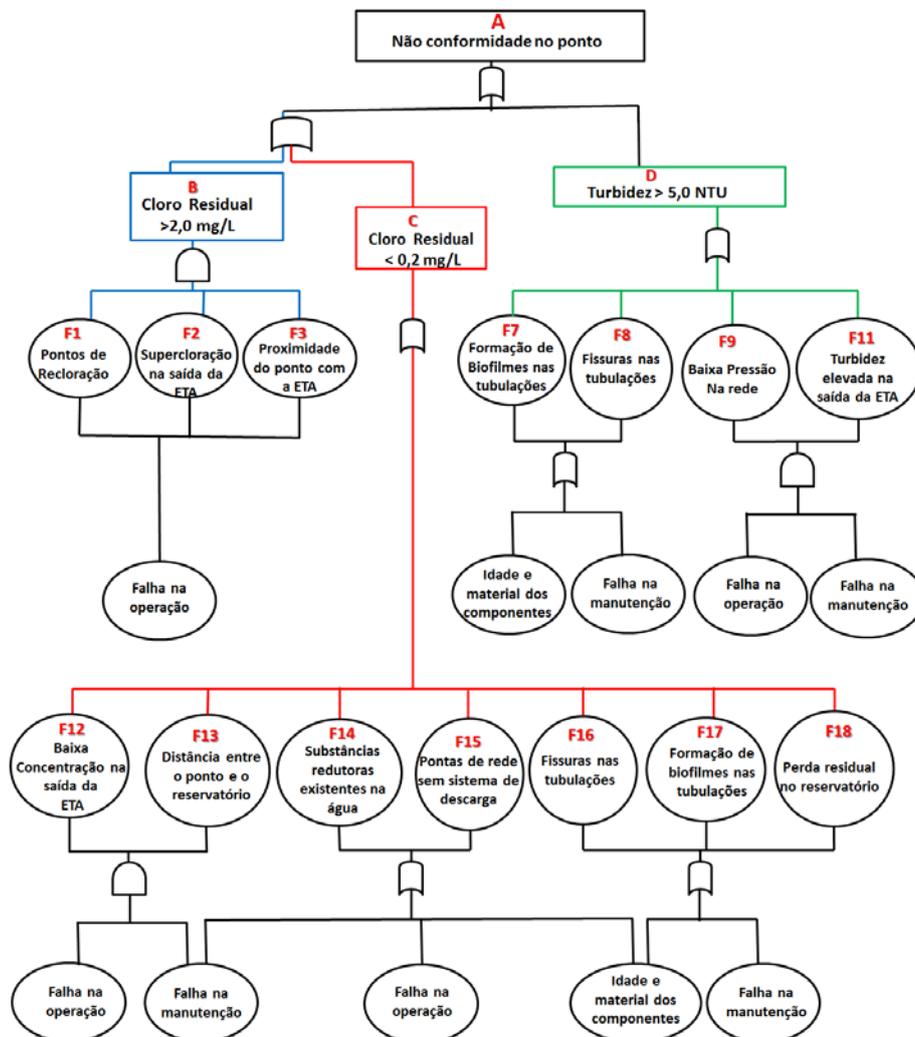


Figura 7. Árvore de falhas do Sistema de Abastecimento de Campina Grande (indicadores sentinelas).

CONCLUSÕES

A árvore de falhas foi eficiente para avaliar através de indicadores sentinelas o monitoramento na qualidade da água no sistema de adução. Com essa metodologia foi possível identificar as combinações de defeitos de componentes da rede de distribuição. Dentre esses podemos destacar problemas de operação, de manutenção e o comprometimento da idade do material da tubulação, o que propicia o aumento da turbidez e diminuição das concentrações dos residuais de cloro. Com isso, a árvore de falhas possibilita um rápido direcionamento para o aperfeiçoamento do sistema, consequentemente reduz-se gastos no tratamento e perdas na rede, mostrando-se significativa sua aplicação para o abastecimento de água da Cidade de Campina Grande-PB.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, Y.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8 ed. São Paulo: Edgar Blüncher, 1998.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). **Vigilância ambiental em saúde**. Brasília: FUNASA/MS, 2001.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2914**. Disponível em: <http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 25 jan. 2015.

CARMO, R. F.; BEVILACQUA, P. D.; BASTOS, R. K. X. Vigilância da qualidade da água para consumo humano: abordagem qualitativa da identificação de perigos. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 13, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v13n4/a11v13n4.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2015.

Gerenciamento de riscos. Disponível em: <<http://alternativorg.wdhouseDNS.com.br>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

JANUÁRIO, P. B. **Análise de conformidade de indicadores sentinelas da qualidade da água de abastecimento de Campina Grande (PB)**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2013. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental).

LEAL, E. S. **Modelagem da degradação de cloro residual livre em sistemas de adução de água de abastecimento de porte médio**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2012. (Dissertação de Mestrado do Curso de Engenharia Civil e Ambiental).

MENESES, R. A. **Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: o caso de Campina Grande**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2011. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental).

MORENO, J. **Avaliação e gestão de riscos no controle da qualidade da água em redes de distribuição**: estudo de caso. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009. (Tese de Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento).

NASCIMENTO, R. S.; OLIVEIRA, R. **Avaliação de Risco**. Aula proferida na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campina Grande, 2011.

SUCENA. M. P. **Módulo 6. Árvore de Falhas**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.sucena.eng.br/IME/Mod6_ArvoreFalhas2008.pdf> Acesso em: 08 jan. 2015.