

## **PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM POÇO PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO MAUT**

**Madson Bruno da Silva Monte**

Universidade Federal de Pernambuco  
Caixa Postal 7471, Recife-PE, 50.630-971, Brasil  
madsonmonte@gmail.com

**Adiel Teixeira de Almeida Filho**

Universidade Federal de Pernambuco  
Caixa Postal 7471, Recife-PE, 50.630-971, Brasil  
adieltaf@googlemail.com

### **RESUMO**

Na região Nordeste do Brasil, é comum que várias cidades sofram com racionamento de água, mesmo os grandes centros urbanos como a cidade do Recife. Falta de planejamento urbano e escassez de água são motivos que incorrem no racionamento. A situação dos consumidores é piorada devido às manutenções necessárias no sistema de abastecimento. Tão logo, as atividades de manutenção devem ser planejadas considerando a disponibilidade de água para população, além do custo envolvido com as intervenções. Esses dois critérios são conflitantes e, frente a esta situação, este trabalho propõe a aplicação da MAUT vinculada a modelos de engenharia de confiabilidade para definição do intervalo entre manutenções preventivas. A metodologia é aplicada com um gestor de manutenção e a solução encontrada é, portanto, aquela que representa o melhor compromisso entre os dois critérios considerados.

**PALAVRAS CHAVE. Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). Manutenção Preventiva. Distribuição de água.**

**ADM – Apoio à Decisão Multicritério**

### **ABSTRACT**

In Northeastern region of Brazil, it is common that many cities suffer from water rationing, even in large urban centers such as Recife. Lack of urban planning and water shortages are the main reasons for this situation. The injury to the population is even higher due to maintenance interventions in supply system. This way, the maintenance activities should be well planned and consider the availability of water for the population beyond the cost involved with the operations. These two criteria are conflicting, so this paper proposes to resolve this problem by application of MAUT associated to reliability engineering models for setting preventive maintenance interval. The methodology is applied with a maintenance manager and therefore the result is one that represents the best compromise between the two criteria considered.

**KEYWORDS. Multiattribute Utility Theory (MAUT). Preventive Maintenance. Water Supply**

**ADM - Multicriteria Decision Support**

## 1. Introdução

Avaliações independentes para otimização de único critério em geral não refletem a realidade, onde os gestores têm de enfrentar situações onde diversos critérios devem ser atendidos concomitantemente. Uma opção para o problema seria a otimização multiobjetivo, considerando que deve ser procurado um valor ou um conjunto de valores que corresponda ao ótimo de Pareto, ou seja, a região onde não é possível melhorar a solução em um critério sem que isto implique na redução do desempenho no(s) outro(s) critério(s). No entanto, nestes tipos de metodologia, as preferências do decisor não são consideradas. Essa é a vantagem do uso de modelos para a tomada de decisão multicritério (MCDM). Neste trabalho, mais precisamente, são aplicados os conceitos da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) para agregação das preferências do gestor e, assim, encontrar uma solução que, mesmo não sendo a de Pareto para o problema disponibilidade *versus* custo, reflete qual a melhor solução para atender às preferências do gestor nessa questão.

Modelos MCDM têm sido cada vez mais utilizados nas diversas áreas de pesquisa. Eles são explorados em relação à priorização de alternativas e métodos de manutenção, identificação de áreas críticas, definição de políticas de manutenção bem como o sequenciamento de atividades, por exemplo (Li *et al*, 2011; Morais e de Almeida, 2010, 2007; Morais *et al* 2014). Dentro do contexto de recursos hídricos, os modelos têm sido aplicados principalmente no planejamento de sistemas novos ou na reabilitação dos mesmos. Farias *et al* (2013) seguem esta mesma linha de raciocínio afirmando que as decisões sobre reabilitação de redes de distribuição são complexas, não apenas pela sua importância, mas pelo elevado número de possíveis alternativas e dos critérios que podem ser usados na sua avaliação, bem como os conflitos existentes, tais como o custo das alternativas em favor de seu benefício. Trojan e Morais (2012) trazem uma abordagem de decisão em grupo para o problema da priorização das alternativas de manutenção em redes de distribuição de água. Este estudo incidiu sobre o uso racional dos recursos hídricos e redução de perdas de água, com base no pressuposto de que é muito mais econômico desenvolver e melhorar os sistemas existentes em vez de construir novos sistemas em paralelo com o atual. É proposto um modelo de duas fases baseando-se nos métodos ELECTRE II e de Copeland. Segundo os autores, a abordagem multicritério pode não apresentar uma solução ideal para os problemas, mas, entre todas as alternativas possíveis para uma decisão, ele aponta para ao menos aquela alternativa que melhor representa as preferências das partes envolvidas.

Neste texto é aplicado o método considerado um dos mais completos e com melhor base teórica. MAUT é um conjunto de procedimentos indicado para aplicações envolvendo risco e incerteza, escolha de alternativas e análise do comportamento do decisor (Keeney e Raiffa, 1976). Um dos primeiros trabalhos aplicando MAUT em problemas de manutenção analisa um problema na área de telecomunicações (de Almeida e Souza, 1993). Desde então, surgiram diversos trabalhos associando esses dois assuntos (Baker 2010; de Almeida 2005, 2002, 2001; Brito *et al* 2010; Lin e Lin 2011). de Almeida (2012) apresenta um modelo de decisão multicritério para apoiar os tomadores de decisão na escolha do melhor intervalo de serviço com base na combinação de critérios conflitantes, como confiabilidade e custo. Além disso, uma aplicação numérica ilustra a utilização do processo, com base em um estudo de caso real, obtendo resultados importantes no que diz respeito a combinação de métodos de apoio à decisão e a engenharia de manutenção e confiabilidade.

Dentro do contexto de recursos hídricos, o MAUT já vem sendo aplicado (Bazzani 2005, Komaragiri 2007, Latinopoulos 2008). Recentemente, uma publicação de Scholten *et al* (2015) faz uso da MAUT para avaliar as incertezas sobre decisões complexas como a de desenvolvimento de infraestrutura de sistemas de água. Os autores utilizam a metodologia para gerar um ranking e posteriormente apontar, dentre um conjunto de onze alternativas, aquela que melhor satisfaz um conjunto de stakeholders.

O objetivo maior deste trabalho é a definição do intervalo entre manutenções preventivas em um poço que abastece uma região cuja população enfrenta severo racionamento de água. Essa problemática pode requerer critérios discordantes entre si. De acordo com a revisão da literatura apresentada por Almeida *et al* (2015b) sobre modelos de apoio multicritério a decisão aplicados ao

contexto de manutenção, os critérios custo e disponibilidade são os mais utilizados nestes problemas relacionados à engenharia de manutenção. Dentro dessa mesma perspectiva, trabalhos como o de Lienert *et al* (2014) consideram estes mesmos critérios para a construção de modelos para planejamento de sistemas de abastecimento de água.

Portanto, MAUT é inserido no contexto aqui trabalhado como uma forma de conciliar as preferências do decisor sobre estes critérios conflitantes considerando, portanto, sua percepção ao risco em relação às consequências probabilísticas associadas a este tipo de problema. A função utilidade do decisor é otimizada para que seja obtido o intervalo entre manutenções preventivas que maximiza a utilidade, representando a melhor opção dentro desse contexto para esse gestor.

O resultado desse trabalho reforça o benefício que a aplicação de modelos MCDM pode trazer para a gestão de um sistema de produção, podendo ainda ser aliado a outros modelos e ferramentas. Neste caso, são utilizados modelos de engenharia de confiabilidade e manutenção para descrição dos critérios.

## 2. Estudo de Caso

A região estudada localiza-se na Zona Norte da cidade do Recife-PE. São bairros predominantemente residenciais, com alguns pontos comerciais. É constituída por uma população de baixa renda e a densidade demográfica local é altíssima, variando de 20.000 hab/km<sup>2</sup> a 30.000 hab/km<sup>2</sup>, segundo o UNDP (2010). Há deficiências na prestação de serviços públicos e com o abastecimento de água não é diferente: a comunidade sofre constantemente com falta de água.

Nesta área, o abastecimento é realizado através de poços profundos que injetam água diretamente na rede de distribuição. No entanto, não há vazão suficiente para abastecer todos os consumidores simultaneamente. Logo o esquema de rodízio foi criado, onde há uma programação dos dias em que cada subárea recebe água. Além da difícil condição dos moradores, a escolha desta região especificamente justifica-se também pelo sistema ser isolado, não tendo suas características interferidas pelas condições de outros sistemas presentes na cidade. Ainda há o fato da empresa responsável pelo abastecimento ser responsável por aproximadamente outros duzentos sistemas iguais a esse em toda a região metropolitana do Recife.

Até o ano de 2012, a política de manutenção era baseada apenas em manutenções corretivas, as quais eram realizadas apenas quando o poço cessava seu abastecimento devido a uma quebra no motor ou na bomba que ficam submersos no poço. Quando isto ocorre, é necessário a remoção desses equipamentos que demanda muito tempo e recursos. Ou seja, é uma atividade cara e que deixa a população sem água por um longo período de tempo. Por conta disto foi implementada a política de manutenções preventivas, seguindo uma recomendação de realizar as intervenções programadas a cada 30 dias em todos os poços. Salienta-se que a manutenção preventiva corriqueiramente demanda menos tempo e custa muito menos que a corretiva.

As atividades programadas constituem um conjunto de serviços elétricos, mecânicos e hidráulicos bem elaborados que visam o reestabelecimento das condições do poço tornando-o tal qual um poço novo. Um poço em estado de novo deve estar operando nas condições nominais da bomba estabelecidas pelo fabricante, mensuradas através da corrente elétrica, tensão elétrica e temperatura de funcionamento do equipamento. A vazão da bomba também deve estar de acordo com as condições de projeto e alinhadas com a capacidade de abastecimento do aquífero. Além disso, os filtros devem estar desobstruídos, a água livre de sedimentos e com boas condições físico-químicas. Para garantia dessas condições, a manutenção preventiva é constituída de uma lista de atividades que precisam ser realizadas periodicamente.

A partir daí segue a questão: o intervalo generalizado de 30 dias entre as manutenções preventivas é ideal? Sobre isto, o gestor de manutenção foi questionado e o mesmo levantou que um intervalo generalizado facilita a administração dos serviços, mas que um olhar detalhado sobre cada poço pode levantar algumas particularidades. Essas particularidades, por sua vez, podem gerar diferentes funções para modelagem dos critérios e diferentes níveis de importância em cada caso. São exemplos disso a profundidade do poço, que dificulta as manutenções; o tipo de bomba instalada que pode trazer custo adicional para sua substituição; a qualidade da perfuração do poço

e da água bombeada, interferindo na frequência das intervenções de limpeza do poço; a quantidade de pessoas afetadas pela falta de água devido às intervenções; dentre outras questões relevantes.

Ainda segundo a gestão, sobre o poço que abastece a região estudada, a criticidade da falta de água faz com que a disponibilidade do poço seja o critério de maior importância. No entanto, é indiscutível que os custos envolvidos nas intervenções sejam considerados, apesar deste fator não sobrepor a importância do critério anterior. Considerando estes pontos, os critérios citados para este caso em particular são modelados conforme apresentado na metodologia.

### 3. Metodologia

Dada a flexibilidade que a distribuição de probabilidades de Weibull tem de se assimilar aos diversos outros formatos de distribuições, em função de seus parâmetros (Weibull, 1951), o ajuste dos tempos de vida é realizado para esta função. Em outras palavras, são calculados os parâmetros de forma ( $\beta$ ) e de escala ( $\eta$ ) de Weibull. Seja a função de distribuição de Weibull representada na Equação 1.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

A função chamada de confiabilidade é a probabilidade de um equipamento não falhar até um valor de tempo determinado. Na distribuição de Weibull ela é dada pela parcela da função correspondente à Equação 2.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

A função taxa de falha, por sua vez, corresponde à Equação 3.

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} = \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{\beta-1} \quad (3)$$

O valor do parâmetro de forma tem uma implicação importante sobre a taxa de falha e confiabilidade do equipamento, pois havendo  $\beta > 1$ , significa que as falhas se dão por um processo de envelhecimento do equipamento (Cassady e Kutanoğlu, 2003). Em outras palavras, quanto maior a idade do equipamento, maior a chance de haver uma pane. Associando ao modelo que considera a vida útil do equipamento como em 3 fases ou curva da banheira (Figura 1), estes valores de  $\beta$  fazem com que a função taxa de falha modele a terceira parte do ciclo de vida do equipamento.

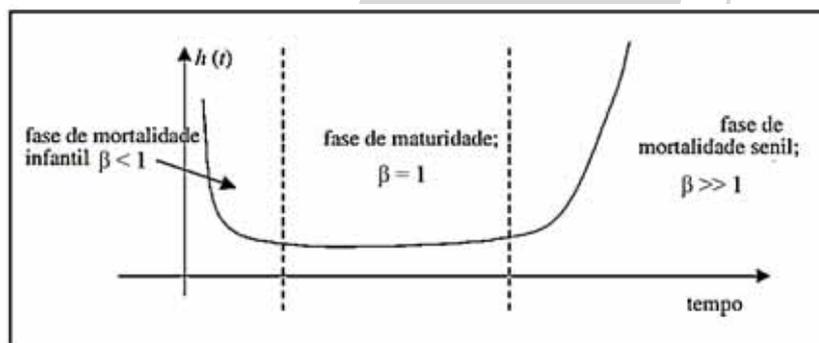


Figura 1: Curva da Banheira (Sellito, 2005)

Logo, se a taxa de falha é crescente ao longo do tempo, este fato justifica o uso de manutenções preventivas para que a vida útil do equipamento seja prolongada, pois a intervenção irá restaurar o sistema através dos serviços descritos na seção anterior.

É conveniente salientar que, na operação de poços, as condições na qual o todo o sistema opera definirá o comportamento das falhas da bomba instalada. Poços que funcionam sob condições ideais conduzem à ocorrência de falhas por um desgaste natural da bomba. No entanto, poços cuja água carregam sedimentos, com sistemas inadequadamente instalados, havendo vazamentos e sujeitos às variações elétricas induzem a um comportamento aleatório das falhas da bomba. Em sistemas desse tipo, ainda que seja realizada uma substituição por um equipamento novo, a quebra pode ocorrer a qualquer momento.

Dito isso, classifica-se a bomba como um equipamento não reparável. Sempre que há uma parada no sistema devido a falha, a troca da bomba é requerida para que o funcionamento normal de todo o sistema seja reestabelecido. Nessa substituição é instalado um novo equipamento. O poço, por sua vez, é o sistema no qual o equipamento está inserido. É classificado como um sistema reparável, cujas condições são restauradas através das intervenções preventivas. Para modelagem considera-se que o reparo é perfeito, tornando as condições do poço imediatamente após a atividade preventiva tais e quais a de um poço recém instalado.

Tendo em vista o modelo matemático utilizado para descrever o comportamento das falhas, a seguir descreve-se os critérios definidos pelo decisor, disponibilidade e custo. Em seguida

#### a) Disponibilidade

Segundo Cassady e Kutanoglu (2003), supõe-se que o equipamento utilizado para o processamento das tarefas está sujeito a falhas a qualquer momento e é governado por uma função de distribuição de probabilidade de Weibull com parâmetro de forma ( $\beta$ ) maior que 1. Neste trabalho, assume-se que a manutenção preventiva restaura a máquina a um estado de “tão boa quanto nova”, de tal forma que a idade da máquina retorna ao valor de zero. Isto implica que a manutenção preventiva não é apenas um reparo, é uma atividade completa que abrange todos os tópicos relatados no estudo de caso incluindo a substituição de itens importantes do sistema, excetuando-se a bomba.

Assumindo uma política de manutenção baseada na idade, a manutenção preventiva deve ser realizada no equipamento após  $\tau$  unidades de tempo em operação. Sendo a manutenção preventiva uma atividade que conduz o equipamento para um estado de tão bom quanto novo, isso pode ser modelado como um processo cíclico (Mamabolo & Beichelt, 2004) de tal forma que a idade do equipamento é  $t = 0$  em dois momentos: no início da sua operação, que corresponde a substituição do mesmo devido a uma falha (imediatamente após a manutenção corretiva), ou ao fim de cada atividade de manutenção preventiva.

Considera-se que a manutenção corretiva só ocorre caso haja uma falha no equipamento, o qual está sujeita a uma distribuição de probabilidade. Da mesma forma, existe uma probabilidade de a bomba continuar funcionando normalmente até a próxima intervenção preventiva. Então, durante a vida útil do equipamento, pode haver três estados: em operação, em manutenção preventiva ou em manutenção corretiva. O tempo que ele permanece em operação corresponde exatamente ao intervalo entre as intervenções programadas. Assim, sejam  $\tau$  o tempo em operação do equipamento,  $t_p$  o tempo gasto em uma atividade de manutenção preventiva e  $t_c$  o tempo gasto em uma manutenção corretiva. Com isso se exprime a equação da disponibilidade segundo, Jiang & Ji (2002) (Equação 4).

$$A(\tau) = \frac{\int_0^{\tau} R(t)dt}{\int_0^{\tau} R(t)dt + t_c F(\tau) + t_p R(\tau)} \quad (4)$$

#### b) Custo

Segundo vários autores, (Beichelt (1976); Glasser (1969) e Chareonsuk *et al.* (1997)), um critério para a avaliação das políticas de manutenção é o custo por unidade de tempo, aqui denominado por  $K$ . Com as mesmas considerações feitas na seção anterior, associa-se o modelo de

substituição por idade à situação estudada. Esse modelo foi desenvolvido por Barlow & Hunter no ano de 1960, sendo referência na otimização de custos em políticas de manutenção preventiva.

Ressalta-se que neste estudo a manutenção preventiva não é considerada como um simples reparo e todos os custos envolvidos nos serviços preventivos devem ser contabilizados. Sendo  $C_c$  o custo de manutenção após a falha unitário, ou seja, o custo de uma manutenção corretiva, e  $C_p$  o custo unitário da manutenção preventiva, o custo por ciclo  $K$  pode ser expresso pela Equação 5 (Barlow & Hunter, 1960; Jiang & Ji, 2002).

$$K(\tau) = \frac{C_c[1 - R(\tau)] + C_pR(\tau)}{\int_0^\tau R(t)dt} \quad (5)$$

Reforça-se que o sistema é reparável, mas o equipamento não. Desta forma, a constante  $C_p$  deve considerar todos os custos envolvidos no reparo das condições do poço. Já em  $C_c$  devem ser incluídos os custos de todos os procedimentos, pessoal e materiais utilizados para a substituição da bomba mais os custos para tornar o poço íntegro novamente.

As funções dos critérios, Equações 4 e 5 devem ser otimizadas. Assim, há um valor de  $\tau_A$  que maximiza a disponibilidade e outro,  $\tau_K$ , que minimiza o custo. Os ótimos definem os limites do espaço de consequência, no qual as alternativas devem estar contidas. Qualquer alternativa fora do intervalo  $[\tau_A; \tau_K]$  é considerada uma alternativa dominada por apresentar pior desempenho em ambos critérios (Almeida *et al*, 2015a). Assim, a Figura 2 faz a representação do espaço de consequências. Note que a curva representa o conjunto de alternativas viáveis do problema e a solução que engloba os dois ótimos ( $K^*$ ,  $A^*$ ) é impossível, o que confere a característica de critérios conflitantes. Então, busca-se a alternativa viável que mais se aproxima deste ponto de acordo com as preferencias do decisor para cada critério, mensuradas a partir de utilidades.

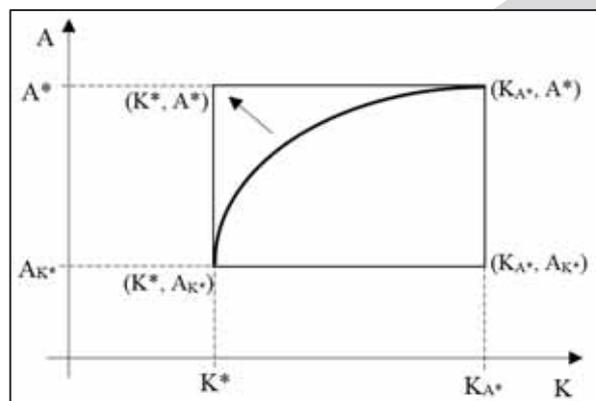


Figura 2: Representação do espaço de consequências

### c) Abordagem multicritério

De posse das funções que descrevem os critérios, cabe agora avaliar a representatividade desses valores para o gestor. Isso é feito em termos de utilidade, o qual permite posteriormente agregar as preferencias numa função utilidade multiatributo que pode ser otimizada para obtenção da alternativa que maximiza a utilidade para o decisor.

A utilidade é um modo de quantificar a satisfação de um indivíduo associado a um resultado. O problema do decisor consiste em escolher uma alternativa que o deixe o mais satisfeito possível (Keeney e Raiffa, 1976). Cada alternativa pode ser expressa na forma de um vetor  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , em que cada valor de  $X$  representa a grandeza de cada um dos atributos (critérios) avaliados na problemática. Como cada um desses atributos contribui de forma diferente para o resultado, devem ser consideradas as funções utilidade de cada atributo individualmente para posteriormente agregar

em um único critério de utilidade. Desta forma, para o caso de dois atributos,  $A$  e  $K$ , tem-se a Equação 6.

$$U(A, K) = f[U_A(A), U_K(K)]$$

Para elicitación das preferências do decisor, é utilizado o procedimento proposto por Keeney e Raiffa (1976). As funções utilidade podem ser de vários tipos e, segundo os autores dessa metodologia, funções lineares e exponenciais representam situações frequentemente encontradas em aplicações práticas. Opta-se pelo uso da função exponencial (Equação 7), já que não se conhece a tendência do decisor em relação ao risco (Keeney e Raiffa, 1976).

$$U(X) = Q_1 \exp(-P_1 X) \quad (7)$$

Na Equação 7,  $X$  representa a função do critério, ou seja,  $X$  representa a Equação 5 para a função utilidade do custo e a Equação 4 para a utilidade da disponibilidade. Para que seja possível compor uma função multiatributo com essas funções é necessário que haja independência em utilidade. Segundo Keeney e Raiffa (1976), haverá independência em utilidade se a utilidade por um critério não variar em relação a alguma alteração no(s) outro(s) critério(s). Desta forma é seguido o procedimento de comparação de loterias, proposto pelo mesmo autor para realizar esta verificação. A comparação entre loterias também é realizada para obtenção das constantes de escala dos atributos.

Sendo  $A$  e  $K$  mutuamente independentes em utilidade, a função utilidade de dois atributos pode ser escrita na forma multilinear (Keeney e Raiffa, 1976). Neste caso, em particular,  $U$  pode ser escrito como na Equação 8.

$$U(K, A) = k_K U_K(K) + k_A U_A(A) + k_{KA} U_K(K) U_A(A) \quad (7)$$

Onde  $U(K, A)$  é normalizado de tal forma que  $U(K^*, A^*) = 1$  e  $U(K_A^*, A_{K^*}) = 0$ ,  $k_K = U(K^*, A_{K^*})$ ,  $k_A = U(K_{A^*}, A^*)$  e  $k_{KA} = 1 - k_K - k_A$ .  $U(K, A)$  é função de  $\tau$  e pode ser otimizada para obtenção da alternativa que maximiza a utilidade para o decisor.

#### 4. Resultados e discussão

Dado que até 2012 utilizava-se apenas a política de manutenção corretiva, as datas das intervenções contidas no histórico de manutenções da empresa coincidem exatamente aos tempos de vida do equipamento. Esses dados, ajustados à função de Weibull fornecem a Equação 8. O ajuste foi realizado com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9313$ , além disso, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a hipótese nula de os dados pertencerem à distribuição de Weibull não pode ser rejeitada. Os parâmetros de Weibull são, portanto,  $\beta = 3,007$  e  $\eta = 7345,885$ .

$$f(t) = 4,093 * 10^{-4} \left[ \frac{t}{7345,885} \right]^{2,0070} e^{-\left( \frac{t}{7345,885} \right)^{3,0070}} \quad (8)$$

Com o parâmetro de forma  $\beta$  maior que 1, é justificável a aplicação de manutenções preventivas no poço. Esta afirmação é melhor observada através do gráfico da taxa de falhas (Figura 3). Como a taxa de falhas aumenta com o passar do tempo, a causa das falhas está principalmente associada à idade do equipamento e nesse caso associada com as condições do sistema. A atividade de restauração leva o sistema para um estado de melhores condições de funcionamento, resultando numa frequência da ocorrência de falhas reduzida e prolongando a vida útil da bomba.

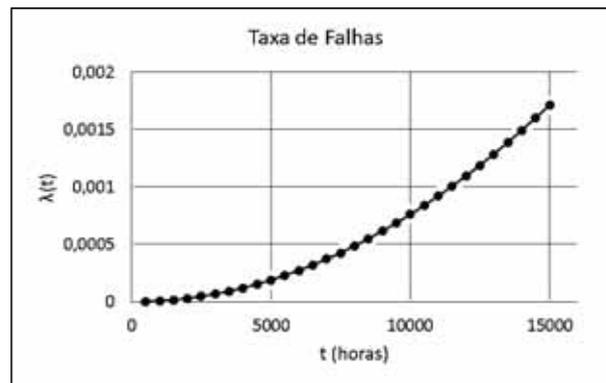


Figura 3: Gráfico da função taxa de falhas

A Tabela 1 resume os dados quanto aos custos envolvidos e tempos demandados para cada tipo de intervenção. Esses valores são utilizados para otimização das funções custo e disponibilidade.

Tabela 1: Dados do problema

<b>Weibull</b>	$\beta$	3,007
	$\eta$	7.345,885
<b>Custo / intervenção (R\$)</b>	Preventiva	1.164,04
	Corretiva	21.842,02
<b>Tempo / intervenção (horas)</b>	Preventiva	4
	Corretiva	16

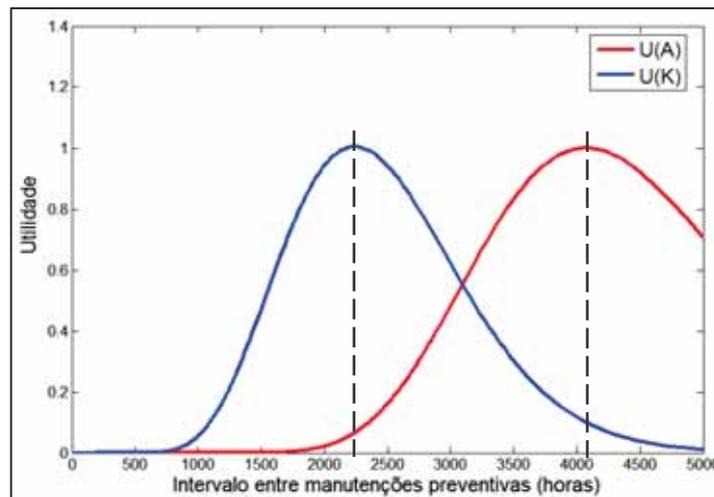
A otimização dos critérios fornece os valores de  $\tau$  que delimitam a região trabalhada. O máximo de disponibilidade é encontrado quando  $\tau_A = 4071$  horas e o mínimo custo se dá em  $\tau_K = 2240$  horas. Note que a otimização dos critérios retorna soluções bastante distintas, caracterizando o conflito entre os critérios.

Esses valores de  $\tau$ , por sua vez, incorrem nas consequências de maior utilidade para cada critério. Dessa forma, em  $\tau_A$  a disponibilidade é de 99,85%, configurando a utilidade máxima para esse critério  $U_A(99,85\%) = 1$ . Nesse mesmo ponto,  $K_{A^*} = 1,1231$ , o qual tem utilidade zero  $U_K(0,7806) = 0$ . Em  $\tau_K$ , o valor de K correspondente é 0,7806, assim  $U_K(0,7806) = 1$ . Nessa situação, a utilidade é mínima para a disponibilidade correspondente de 99,81%, ou seja  $U_A(99,81\%) = 0$ . Sob estas condições, através do procedimento de elicitação, obtém-se as Equações 9 e 10 como as funções utilidade para cada atributo.  $R^2$  representa o coeficiente de determinação do ajuste às curvas representadas na Figura 4, plotadas em função de  $\tau$ .

$$U_K(K) = 185,8 e^{-6,687 K} \quad (R^2 = 0,9859) \quad (9)$$

$$U_A(A) = 9960 e^{-6135 (1-A)} \quad (R^2 = 0,9265) \quad (10)$$

Na Figura 4 está representado o gráfico de toda a função utilidade para os dois critérios, mas ressalta-se que a elicitação foi realizada dentro do intervalo de tempo [2240; 4071], delimitado pela linha tracejada. Os questionamentos realizados através da comparação de loterias apontaram para a independência em utilidade entre os dois atributos. Já a independência aditiva não é apresentada pelo gestor. Isso permite expressar a função multiatributo na forma multilinear como na Equação 11.


 Figura 4: Gráfico das funções utilidade em função de  $\tau$ 

$$U(K, A) = k_K 185,8 e^{-6,687 K} + k_A 9960 e^{-6135 (1-A)} + k_{KA} 1,85 * 10^6 e^{-(6,687 K + 6135(1-A))} \quad (10)$$

Com o procedimento de Keeney e Raiffa (1976), encontra-se as constantes  $k_K = 0,3$ ,  $k_A = 0,6$ , e  $k_{KA} = 0,1$ . Desta forma, é possível encontrar o valor do intervalo de manutenções preventivas que corresponde à máxima utilidade para o gestor. A Figura 5 representa o gráfico da função multiatributo, dentro da faixa do espaço de consequência estudado. O valor máximo em utilidade nesta decisão é de  $U(K, A) = 0,6493$  atingido quando  $\tau = 3883$  horas. A partir desta solução, as consequências esperadas em termos dos dois critérios são  $K = 1,0653$  e  $A = 0,998497$ .

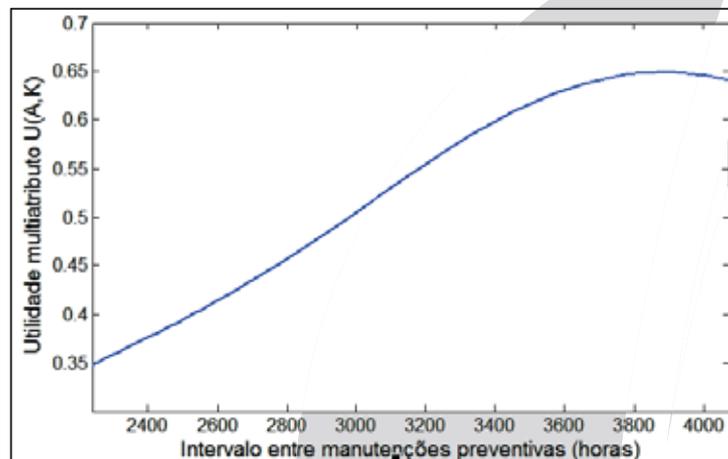


Figura 5: Função Utilidade Multiatributo

Para facilitar a análise e comparação das alternativas, exprime-se o novo resultado para o período de um ano. Desta forma, a Tabela 2 exibe a expectativa de tempo no qual o equipamento fica indisponível durante um ano, bem como o custo esperado com manutenções para o mesmo período tanto para a solução praticada ( $\tau = 30$  dias) como para a de maior utilidade.

Tabela 2: Comparativo entre soluções

Aplicado atualmente			Máxima utilidade		
$\tau$ (dias)	Downtime (horas/ano)	Custo (R\$/ano)	$\tau$ (dias)	Downtime (horas/ano)	Custo (R\$/ano)
30	48,18	14.386,55	161	16,64	9.332,028

O atual intervalo entre intervenções preventivas é de 30 dias e este apresenta algumas vantagens por facilitar a administração do setor manutenções, pois cria um calendário fixo e regular para todos os dias do ano. No entanto, isto pode omitir algumas particularidades de cada poço. A partir deste resultado verifica-se que está havendo um excesso de intervenções preventivas, pois este intervalo está levando o poço para um estado de menor disponibilidade e maior custo. Isto ocorre porque esta é uma solução dominada, ou seja, apresenta desempenhos piores em ambos critérios por estar fora do intervalo entre os ótimos.

Outro ponto a se observar é a importância do valor da disponibilidade. Ao trabalhar com o intervalo de 30 dias, a disponibilidade do poço é de 99,45%. Esta disponibilidade é excelente para a maioria dos sistemas de produção, no entanto, quando se trata de um recurso que já escasso o ganho de algumas horas se torna de grande relevância: as horas sem água significam que os reservatórios das residências não serão cheios para uso nos dias seguintes, já programados para não haver abastecimento devido ao rodízio.

A ganho na disponibilidade também é refletido na disponibilidade das equipes de manutenção. A aplicação apenas neste poço trouxe um ganho de 31,5 horas em um ano. A folga conseguida auxilia na melhor administração do setor de manutenções ou ainda pode ser investido em qualificação profissional, por exemplo. Há, além de tudo o que foi citado os ganhos de difícil mensuração como a melhor imagem da empresa para com os clientes.

Finalmente, através de análise de sensibilidade, avalia-se o modelo aplicado como robusto para esta situação, dada a proporção da variação na solução ótima frente as alterações nos pesos dos critérios. Isto é válido desde que seja mantida a priorização da disponibilidade, como pode-se visualizar nos cenários da Tabela 3. O significado é que, mesmo o decisor estando inseguro sobre suas escolhas nos procedimentos de comparação de loterias, o resultado aqui encontrado sofre poucas variações.

Tabela 3: Cenários da análise de sensibilidade

Cenário	$k_K$	$k_A$	$k_{KA}$	$\tau$ ótimo
1	0,3	0,6	0,1	3883
2	0,2	0,7	0,1	3963
3	0,4	0,5	0,1	3721
4	0,2	0,6	0,2	3890
5	0,25	0,55	0,2	3833
6	0,3	0,5	0,2	3750
7	0,1	0,7	0,2	3965

## 5. Conclusões

A aplicação de modelos de apoio à decisão é indicada para o tratamento de problemáticas envolvendo critérios conflitantes. Além disso, estimula o decisor a melhor analisar o ambiente no qual está inserido sob a luz dos critérios e seus graus de importância e estudar as possíveis consequências das ações. Este trabalho ressalta essa importância pela aplicação em um estudo de caso real, contribuindo para a literatura sobre o tema.

A metodologia consiste a priori da modelagem do sistema baseado no modelo de substituição por idade, com o qual é possível relacionar as propriedades do sistema aos critérios considerados pelo decisor. Para tal, os dados sobre os tempos de falha são ajustados à função distribuição de probabilidades de Weibull, bem conhecida no ramo da Engenharia de Confiabilidade. Dado que trabalha-se com probabilidades de ocorrência de falhas, o uso da MAUT é bastante viável por ter sido concebido para trabalhar em situações de risco e agregar a percepção do decisor sobre isto.

Os resultados obtidos são bastante positivos pois consegue aumentar a expectativa de ganhos em relação aos dois critérios, custo e disponibilidade, comparando-se com a prática anterior. A relevância do quesito disponibilidade é ampliada pois este representa diretamente o benefício à população que sofre com a falta de água. O resultado encontrado neste trabalho implica

num ganho esperado de 31,5 horas/ano para o fornecimento de água. O retorno financeiro esperado é cerca de R\$5000. O ganho em ambos critérios se dá porque a solução praticada é dominada por qualquer outra dentro do intervalo entre os ótimos do custo e da disponibilidade.

Portanto, aqui mostra-se o potencial que as ferramentas aplicadas possuem na gestão de sistemas de produção. Não obstante os resultados aqui obtidos não poderem ser aplicados em outras situações, a metodologia, por sua vez, pode ser aplicada desde que o modelo represente o ambiente que se deseja estudar

### Agradecimentos

Os autores são agradecidos pelo apoio financeiro da CAPES e pelo apoio parcial do CNPq. Agradecem também à COMPESA que gentilmente se dispôs a apoiar esta pesquisa.

### Referências

- de Almeida, A.T.** (2012) Multicriteria Model for Selection of Preventive Maintenance Intervals. *Quality and Reliability Engineering International* 28:585-593
- de Almeida, A.T.** (2005) Multicriteria Modelling of Repair Contract Based on Utility and ELECTRE I Method with Dependability and Service Quality Criteria. *Annals of Operations Research* 138:113-126, Netherland
- de Almeida, A.T.** (2002) Multicriteria Modelling For Repair Contract Problem Based On Utility Function And Electre I Method. *IMA Journal of Management Mathematics* 13(1):29-37
- de Almeida, A.T.** (2001) Multicriteria Decision Making on Maintenance: Spares and Contracts Planning. *European Journal of Operational Research* 129(2):235-241
- de Almeida, A.T., Cavalcante CAV, Alencar MH, Ferreira RJP, Almeida-Filho AT, Garcez TV** (2015a) Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis. *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer, New York
- de Almeida, A.T., Ferreira, R.J.P., Cavalcante, C.A.V.** (2015b) A Review of Multicriteria and Multiobjective Models in Maintenance and Reliability Problems. *IMA Journal of Management Mathematics*. Advance Access published March 16, 2015
- de Almeida, A.T., Souza, F.M.C.** (1993) Decision Theory In Maintenance Strategy For A Two-Unit Redundant Standby System. *IEEE Transactions on Reliability*, 42(3):401-407
- Baker, R** (2010) Risk aversion in maintenance: a utility-based approach. *IMA Journal of Management Math* 21(4):319-332
- Barlow, R.E. e Hunter, L.** (1960) Optimum Preventive Maintenance Polices. *Operations Research* 8(1): 90–100
- Bazzani, G.M.** (2005) An Integrated Decision Support System for Irrigation and Water Policy Design: DSIRR. *Environmental Modeling & Software* 20:153-163.
- Beichelt, F.** (1976) A General Preventive Maintenance Policy. *Mathematische operationsforschung und statistik* 7:927-932
- Brito, A.J.M., de Almeida-Filho, A.T., de Almeida, A.T.** (2010) Multi-criteria Decision Model for Selecting Repair Contracts by applying Utility Theory and Variable Interdependent Parameters. *IMA Journal of Management Mathematics* 21:349-361
- Cassady CR, Kutanoglu E** (2003) Minimizing Job Tardiness using Integrated Preventive Maintenance Planning and Production Scheduling. *IIE Transactions* 35(6):503-513
- Chareonsuk, C., Nagarura, N., Tabucanona, M.T.** (1997) A Multicriteria Approach to the Selection of Preventive Maintenance Intervals. *International Journal of Production Economics* 49(1):55–64

- Farias, A.P.S.; Fontana, M.E.; Morais, D.C.** (2013) Modelo De Sistema De Informação E Decisão Para Intervenções De Reabilitação Em Redes De Distribuição De Água. *Revista Brasileira De Recursos Hídricos*. V. 18, N.2.
- Glasser, G.J.** (1969) Planned Replacement: Some Theory and its Application. *Journal of Quality Technology* 1(2):110–119
- Jiang, R., Ji, P.** (2002) Age Replacement Policy: A Multi-Attribute Value model. *Reliability Engineering and System Safety* 76:311-318
- Keeney, R.L., Raiffa, H.** (1976) *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Wiley, New York
- Komaragiri Srinivasa Raju, A.V.** (2007) Multi Attribute Utility Theory for Irrigation System Evaluation. *Water resources Management* 21(4):717-728
- Latinopulus, D.** (2008) Estimating the Potential Impacts of Irrigation Water Pricing Using Multicriteria Decision Making Modelling. An Application to Northern Greece. *Water Resources Management*. 22(12):1761-1782
- Li, F.; Sun, Y.; Ma, L.; Mathew, J.** (2011) A Grouping Model For Distributed Pipeline Assets Maintenance Decision. In: 2011 International Conference On Quality, Reliability, Risk, Maintenance And Safety Engineering, China
- Lienert, J., Scholten, L., Egger, C., Mauer, M.** (2014) Structured Decision-Making for Sustainable Water Infrastructure Planning and Four Future Scenarios. *Euro Journal of Decision Process*
- Lin, K.L., Lin, C.L.** (2011) Applying Utility Theory to Cost Allocation of Pavement Maintenance and Repair. *J. Pavment. Res. Technol.* 4(4):212-221
- Mamabolo, R.M., Beichelt, F.E.** (2004) Maintenance Policies with Minimum Repair. *Economic Quality Control* 19(2):143 – 166
- 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* 23:937-960
- Morais, D.C., de Almeida, A.T.** (2010) Water Network Rehabilitation: A Group Decision-Making Approach. *Water S.A.* 36:487-493
- Morais, D.C., de Almeida, A.T.** (2007) Group Decision-Making for Leakage Management Strategy of Water Network. *Resources, Conservation and Recycling* 52:441-459
- Sellito, M.A.** (2005) Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. *Produção*, v.15, n.1, p.44-59
- Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P., Mauer, M., Lienert, J.** (2014) Strategic Rehabilitation Planning of Piped Water Networks Using Multi-Criteria Decision Analysis. *Water Research* 49:124-143
- Trojan, F., Morais, D.C.** (2012) Prioritizing Alternatives for Maintenance of Water Distribution Networks: A Group Decision Approach. *Water S.A.* 38:555-514
- UNDP** (2010) *Atlas of Human Development – Brazil* (in Portuguese) <http://www.pnud.org.br/IDH/>. Accessed 25 March 2015
- Weibull, W.** A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 293 – 297, Setembro de 1951