



PROGNÓSTICO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Bruno Santos Vieira

Mestrando em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-graduação de Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
brunosanvi@gmail.com

Enzo Morosini Frazzon

Doutor em Engenharia de Produção (Doktor-Ingenieur, Dr.-Ing.) pela Universität Bremen/Alemanha
enzo.frazzon@ufsc.br

Lucila Maria de Souza Campos

Pós-doutorado (bolsista PDE CNPq) na University of London, Royal Holloway College e doutorado na UFSC, com sanduíche na Stanford University.
lucila.campos@ufsc.br

Resumo

O planejamento de ações para minimização de riscos e garantia da eficácia de sistemas de abastecimento de água requer a utilização de modelos de previsão adequados. De fato, a previsão de comportamentos e a análise de cenários futuros podem ser apoiadas com o uso de técnicas e modelos de simulação. Neste artigo, é proposto um procedimento para simular a atuação de decisores ao planejar a operação desse tipo de sistema, de modo a obter um prognóstico operacional e financeiro que considere influências dinâmicas. A aplicabilidade do procedimento proposto é demonstrada através de um problema de planejamento de sistemas urbanos de abastecimento de água. Como resultado obteve-se uma distribuição de probabilidades de custos do sistema, informação esta que aprimora a tomada de decisão no contexto do sistema analisado. Além disso, o procedimento proposto tem aplicabilidade a outros tipos de sistemas complexos sujeitos a influências dinâmicas.

Palavras-chave: Simulação. Otimização. Sistemas de abastecimento de água.

WATER SUPPLY SYSTEMS OPERATIONAL PROGNOSIS

Abstract

The actions planning to minimize risks and ensure the effectiveness of water supply systems requires the use of appropriate forecasting models. In fact, forecasting the behavior and analysis of future scenarios can be supported with the use of techniques and simulation models. In this article, we propose a procedure to simulate the actions of decision-makers in planning the operation of this system type in order to obtain an operating and financial prognosis that consider dynamic influences. The applicability of the proposed procedure is demonstrated through an urban systems planning problem of water supply. As a result we obtained a system costs distribution odds, which improves decision making in the context of the analyzed system. Additionally, the proposed procedure is applicable to other types of complex systems subject to dynamic influences.

Keywords: Simulation. Optimization. water supply systems.

EL PRONÓSTICO DE LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Resumen

La planificación de acciones para minimizar los riesgos y garantizar la efectividad de los sistemas de abastecimiento de agua requiere el uso de modelos de predicción adecuados. De hecho, la previsión de la conducta y el análisis de escenarios futuros puede ser apoyado con el uso de técnicas y modelos de simulación. En este artículo, se propone un procedimiento para simular las acciones de los tomadores de decisiones en la planificación de la operación de este tipo de sistema, con el fin de obtener un funcionamiento y el pronóstico financiero que debe tener en cuenta las influencias dinámicas. La aplicabilidad del procedimiento propuesto se demuestra por un problema de la planificación de los sistemas de abastecimiento de agua urbanos. Como resultado se obtuvo un sistema de distribución de probabilidades de cuesta, esta información que mejora la toma de decisiones en el contexto del sistema analizado. Además, el procedimiento propuesto es aplicable a otros tipos de sistemas dinámicos complejos sujetos a influencias.

Palabras clave: simulación. Optimización. sistemas de abastecimiento de agua.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao ritmo acelerado de urbanização, governantes e prestadores de serviços públicos de água têm tido dificuldades para ampliar os investimentos e gerir a prestação dos serviços, especialmente em cidades com infraestrutura precária e em cidades de países em desenvolvimento (WWAP, 2015). Esta dificuldade remete a uma necessidade de prospecção de cenários, a qual se fez presente durante toda a evolução da civilização. Nos tempos atuais, a utilização de modelagem matemática e de computadores tem permitido a análise do conhecimento e a simulação dos resultados

de possíveis ações futuras (Wierzbicki, 2007). A partir deste último ponto de vista, Wierzbicki (2007) sintetiza as várias formas de representar o conhecimento, sendo elas: a) na forma tradicional de um texto com ilustrações; b) sob a forma multimídia contemporânea; e c) sob a forma de modelos computadorizados.

Em um sentido mais amplo, conhecimento é a herança da humanidade ou de indivíduos (Popper, 1972). Prusak & Davenport (1998) afirmam que conhecimento é algo que vai além da informação, agregando valores e uma visão de experiência. Segundo Gavira (2003), simulação computacional pode ser uma ferramenta satisfatória na transformação de informação em conhecimento. O autor ainda afirma que os investimentos em novas tecnologias são altos e arriscados, embora sejam fundamentais para a permanência das organizações no mercado, tornando a simulação um dos recursos que contribuem para a eficácia e para a minimização de riscos desses investimentos em novas tecnologias.

É usual em sistemas haver a necessidade de replanejamentos frequentes. Em médio prazo, o horizonte de planejamento costuma ser dividido em períodos de tempo nos quais são definidas as ações a serem realizadas. Ocorre que mesmo definindo um plano de ação para todos períodos, são implementadas apenas as decisões definidas para o primeiro, uma vez que o contexto provavelmente será diferente do planejado ao final do primeiro período. Durante este período, podem-se usar outros modelos voltados a operacionalização para tomar as decisões de curto prazo, sendo que no final de cada um deles, deve-se voltar e resolver o modelo em médio prazo que passará então a cobrir um período a mais, além dos considerados anteriormente, sendo que todas as informações coletadas durante o período são usadas para atualizar o modelo (Bredström, Flisberg & Rönnqvist, 2013; Sahin, Robinson & Gao, 2008).

Por outro lado, há consenso de que o replanejamento frequente em nível tático pode aumentar os custos e gerar instabilidade (Venkataraman & Nathan, 1999). Tang & Grubbström (2002) afirmam que, normalmente, a pressão para replanear ocorre por causa das mudanças de circunstâncias operacionais, sendo que existem, basicamente, duas condições que conduzem para replanejamento. A primeira delas ocorre para incluir novos períodos de planejamento. A segunda condição ocorre quando a demanda é incerta, há sempre um erro de previsão, e, portanto, o plano tem de ser modificado para se adaptar às novas informações de modo a manter o custo de produção o nível de serviço. Em Araujo, Arenales & Clark (2004), os autores utilizam a estratégia replanejamentos frequentes com o intuito de reduzir a complexidade do problema e avaliar os impactos dessa redução. Não foram consideradas aleatoriedades nesse caso. Araujo, Arenales & Clark (2007) salientam que não vale a pena dispendar tempo para resolver um problema de modo exato quando os dados de entrada são imprecisos e instáveis. Fazê-lo seria, portanto, resolver de modo exato um problema errado.

Nesse contexto, este artigo objetiva formular um procedimento para prognóstico a partir da simulação de sistemas complexos com incertezas, onde replanejamentos se fazem necessários. O artigo abrangerá a aplicação e análise do procedimento proposto para o problema específico de Sistemas de Abastecimento de Água (SAA).

O procedimento permite avaliar um dado método de planejamento diante de aleatoriedades, de modo a se obter um histograma dos resultados possíveis e avaliar assim, se os resultados têm aderência com alguma distribuição de probabilidades discreta específica. Pela teoria da probabilidade, uma distribuição de probabilidades descreve o comportamento aleatório de um fenômeno. Duas típicas distribuições são, por exemplo, as uniformes e as normais. Segundo Walpole, Myers, Myers & Ye (2011), nas distribuições uniformes a probabilidade de ocorrência de um dado fenômeno é a mesma para qualquer valor em um intervalo fechado. Ainda segundo os autores, na distribuição normal, por sua vez, também conhecida por distribuição Gaussiana, a probabilidade de ocorrência é maior nos valores mais próximos da média, tendo seu comportamento descrito por dois parâmetros: desvio padrão e média.

Sendo a água um recurso fundamental para os seres vivos, o conhecimento antecipado sobre o desempenho do SAA possibilita que as prestadoras do serviço sejam mais assertivas em suas previsões e que seus investimentos sejam mais bem alocados, contribuindo para que novos investimentos em expansão e melhoria passem a ser viáveis, tornando o recurso de água mais acessível para toda sociedade.

A principal contribuição desta pesquisa, portanto, está no método de avaliação proposto, cuja aplicabilidade foi demonstrada ao tratar um problema de planejamento de sistemas de abastecimento de água, recurso cada vez mais escasso tanto para consumo direto, quanto para produção de culturas.

Outros estudos quanto ao impacto do custo de regras alternativas de planejamento em planejamentos rolantes podem ser encontrados em Städtler (2000), Simpson (2001) e Zhao, Xie & Jiang (2001). Estudos sobre avaliações em SAA de outros aspectos além do financeiro podem ser encontrados em Moura e Fermino (2014), Wang, Singh & Zhu, Y (2007).

O artigo foi estruturado em cinco seções. Nesta seção, a introdução e uma breve revisão de literatura foram apresentadas. Na seção dois, o procedimento de avaliação é proposto. Na seção três, o procedimento é aplicado ao planejamento de operações de uma rede urbana de abastecimento de água. Na seção quatro, os resultados obtidos a partir da aplicação do método são discutidos e finalmente, na seção cinco, as considerações finais são explicitadas.

2. METODOLOGIA

Este trabalho consiste no uso de técnicas de modelagem para descrever o funcionamento de um sistema (ou parte dele) ou simular sua operação (Filippini, 1997).

Considerando-se as metodologias existentes, pode-se definir que este trabalho será orientado pela metodologia de pesquisa baseada em modelos quantitativos, de natureza empírica e descritiva, já que o objetivo que se pretende atingir é o de descrever como seria a utilização de métodos de planejamento para um problema real (Bertrand & Fransoo, 2002).

Assim, este artigo se propõe a avaliar métodos de planejamento em cenários com variáveis aleatórias de modo a se obter conhecimento sobre um dado sistema. Sua aplicação resulta em uma distribuição de probabilidades de resultados do planejamento.

A metodologia pode ser descrita pelo fluxograma da Figura 1, no qual estão explicitados os seguintes procedimentos:

1. Inserir condições iniciais do problema no método a ser utilizado: trata-se da inserção das condições iniciais no método a ser aplicado. Pode-se citar como exemplo: níveis iniciais de estoques de produtos; valor inicial de variáveis de estado em problemas com variáveis binárias;
2. Prever a demanda dos próximos T períodos: trata-se da previsão de demanda, a qual servirá de base para o planejamento;
3. Aplicar método de planejamento e obter plano para os T períodos: trata-se da aplicação do método escolhido para obtenção do plano;
4. Guardar custo esperado para os próximos T períodos: tal procedimento se faz necessário, pois ao final dos T períodos simulados, serão comparados os valores realizados com o planejado, obtido neste procedimento;
5. Realizar solução prescrita pelo método para o período corrente: trata-se da simulação de realização do 1º período do plano obtido;
6. Simular parâmetros aleatórios para o período corrente: tal procedimento é o que representará as variáveis aleatórias que se farão presentes no caso em estudo. Como exemplo, podem-se citar variáveis aleatórias representando: demandas; produtividades; níveis de qualidade; taxas de atendimento.
7. Guardar custo realizado do período corrente: este custo será somado de modo a compor o custo realizado dos T períodos;
8. Atualizar condições iniciais do método a partir das condições de contorno do período anterior, do plano realizado e dos parâmetros simulados para o período corrente: a partir das condições

de contorno no período anterior, simulando a realização do plano e dos parâmetros aleatórios para o período corrente, é possível estabelecer a condição ao final do período, a qual irá representar a condição inicial do período seguinte;

9. Guardar custo realizado dos T períodos anteriores: com a soma de custos realizados nos T períodos anteriores será possível compará-lo com o custo planejado para os T períodos, obtido no planejamento. Se $A=T$ obtém-se X valores para comparação. Se $A>T$, obtém-se $(A-T)X$ valores.
10. Construir distribuição de custos realizados: trata-se da elaboração de uma distribuição de probabilidades dos valores a serem obtidos ao aplicar o método, no contexto modelado.
11. Avaliar diferença entre custos realizados e previstos: a partir dos resultados simulados é possível avaliar a diferença ocorrida dos valores esperados.

Ao repetir os procedimentos acima por um elevado número de vezes (X), será possível traçar uma distribuição de probabilidades de custo do planejamento, para um dado método.

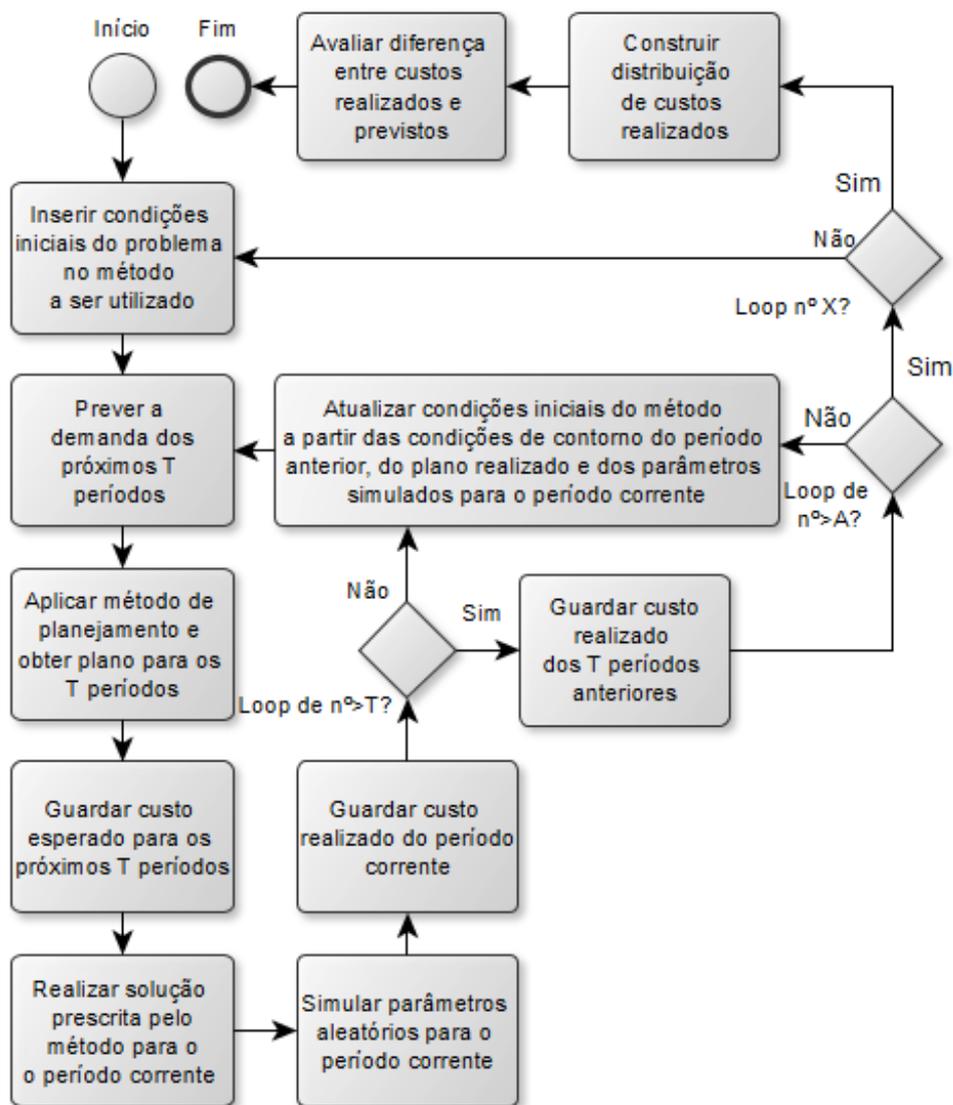


Figura 1 - Procedimento desenvolvido.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O procedimento poderá ser utilizado para:

1. avaliar o efeito em custos de parâmetros aleatórios do planejamento ao utilizar determinado método de planejamento. As variáveis aleatórias representadas podem ser, por exemplo: demandas; produtividade; disponibilidades; índices de qualidade. Como resultado desta aplicação, obter-se-á uma distribuição de probabilidades da função objetivo e será possível fazer comparativo com o caso de não haver aleatoriedades;
2. Comparar métodos. Como resultado, obter-se-á a distribuição de probabilidades da função objetivo para cada método;

Uma limitação do método é sua exigência computacional. Para métodos de planejamento mais exigentes de tempo computacional, terá que se estabelecer o número de cenários e critérios de parada para o método, de modo a obter a distribuição no tempo desejado. Por outro lado, vale ressaltar que sua aplicação será de apenas uma vez para todo o horizonte de planejamento, o que o torna mais permissivo quanto a tempos maiores para obtenção de resultados.

3. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Com o intuito de avaliar a aplicabilidade do procedimento proposto, buscou-se aplica-lo em um problema operacional de SAA existente na literatura. O problema escolhido está elucidado no artigo de Toledo, Santos, Arenales e Seleguin (2008), no qual os autores propõe um modelo para o problema de distribuição de água em redes urbanas, visando a racionalização energética.

3.1. O PROBLEMA

A captação e distribuição de água em redes urbanas geralmente envolvem consumo significativo de energia elétrica. A racionalização energética envolvendo a captação e distribuição de água em regiões urbanas tem sido abordada em muitos trabalhos e em sua maioria são voltados para o projeto otimizado da rede física de distribuição, sendo raros aqueles trabalhos que focalizam o problema de otimização da operação desse tipo de sistema (Toledo *et al.*, 2008). Segundo Albuquerque (2007), para melhorar a eficiência energética em sistemas de abastecimento de água, pode-se:

1. trocar motores antigos com pouca eficiência por novos e modernos;
2. corrigir o fator de potência dos motores;
3. reavaliar a demanda contratada junto à concessionária de energia elétrica;
4. mudar o horário de acionamento das máquinas para horários de tarifas de menor custo.

Toledo *et al.* (2008) afirmam que, de modo genérico, é devido ao fato das tarifas cobradas pelas distribuidoras de energia serem diferenciadas ao longo do dia que surgem as oportunidades de racionalização energética. Por outro lado, Cunha (2009) lembra que o que acontece na maioria dos sistemas do mundo inteiro é que as regras de operação implementadas nesse tipo de sistema são em sua maioria de natureza empírica, visando principalmente, a garantia de continuidade do abastecimento público, sem a busca pela minimização de custos com energia.

O problema abordado pelos autores é mostrado na Figura 2 e foi baseado em três reservatórios da cidade de São Carlos (SP). Os círculos representam os poços, os reservatórios são representados pelos cilindros, as bombas pelos triângulos e os centros consumidores (abastecidos pelos reservatórios) representados pelos retângulos. O custo por manter ligada a bomba durante às 18h, 19h e 20h é de 60 unidades monetárias, cujo valor é o dobro dos demais períodos do dia, conforme se baseiam as tarifas praticadas pelas distribuidoras de energia elétrica do Estado de São Paulo para contratos de fornecimento com diferenciação horo sazonal. O custo de transferência entre reservatórios é de 1 unidade monetária por m³, sendo que não é permitida a transferência direta entre os reservatórios 1 e 3. O volume mínimo para os três reservatórios é igual a 270 m³ e o limite máximo é igual a 2000 m³ para o primeiro e 1000 m³ para os outros dois.

O modelo foi resolvido pelos autores para horizontes de planejamento de 2, 7 e 180 dias, através de um modelo de programação linear e de um modelo de otimização inteira mista. Para cada horizonte de planejamento foram gerados previamente, seis cenários com demandas aleatórias, sendo que para os bairros 2 e 3, as demandas geradas foram uniformemente distribuídas entre intervalos que representam estimativas máximas e mínimas em cada período (Quadro 1) e para o primeiro bairro as demandas foram geradas de forma totalmente aleatória no intervalo [0, 270], objetivando verificar se o modelo responde bem a situações adversas. Uma vez geradas as demandas, estas passaram a ser consideradas pelos autores como determinísticas para a obtenção das soluções de cada cenário.

Tabela 1.

Faixas de demanda dos bairros 2 e 3

Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Hora	0-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Min	10	90	105	121	190	152	167	183	198	214	229	245	260	260	198	135	73	10	5
Max	30	110	125	141	210	172	187	203	218	234	249	265	270	270	218	155	93	30	20

Fonte: Adaptado de Toledo, F., Santos, M. O. d., Arenales, M. N., & Selegim Júnior, P. (2008). Logística de distribuição de água em redes urbanas: racionalização energética (p.82). *Pesquisa Operacional*, 28(1), 75-91.

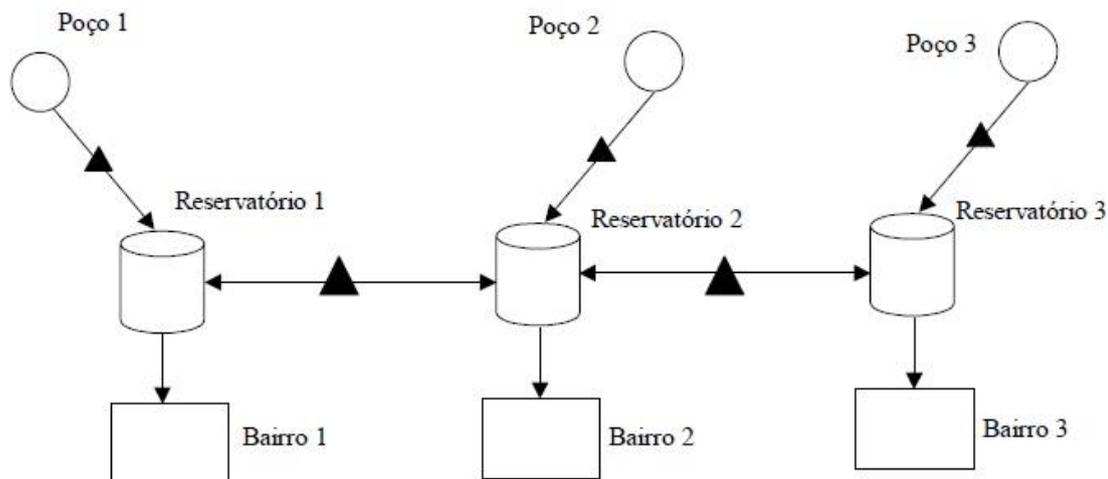


Figura 2. Exemplo de uma rede de abastecimento.

Fonte: Toledo, F., Santos, M. O. d., Arenales, M. N., & Seleglim Júnior, P. (2008). Logística de distribuição de água em redes urbanas: racionalização energética (p.78). *Pesquisa Operacional*, 28(1), 75-91.

3.2. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

A metodologia proposta será utilizada para avaliar o modelo de programação linear, proposto pelos autores, diante das aleatoriedades de demanda, para o horizonte de dois dias do problema exposto. Será considerado que o replanejamento através do modelo será feito a cada final de período, caracterizando um planejamento com horizonte rolante.

É válido ressaltar que outras variabilidades poderiam ser simuladas, como a vazão de bombeamento, eventos extraordinários de vazamentos; ou ainda outros métodos que não fossem programação linear, como Programação Inteira Mista, heurísticas ou meta-heurísticas.

O planejamento será otimizado considerando valores esperados de demanda para um horizonte de planejamento de 19 períodos (1 dia). Os valores esperados são as médias entre mínimos e máximos da Quadro 1 para os bairros 2 e 3, e o valor médio de 135 (média de 0 e 270) para o primeiro bairro. Os volumes iniciais dos reservatórios foram definidos arbitrariamente em 500m^3 , apenas para exemplificar a utilização da metodologia em uma situação em que de fato fosse esta a quantidade inicial do reservatório. O custo de transferência entre reservatórios foram fixados em 6 unidades monetárias por $\text{m}^3\cdot\text{h}$ para os horários entre 18h e 21h, e 3 unidades monetárias por $\text{m}^3\cdot\text{h}$ para os demais horários. As vazões foram definidas em $300\text{m}^3/\text{h}$ dos poços para os reservatórios e $60\text{m}^3/\text{h}$ entre reservatórios.

Uma vez encontrado o plano ótimo dos próximos 19 períodos, passa-se a simular sua utilização no caso real, ou seja, utiliza-se somente a solução prescrita para o primeiro período, o qual terá sua demanda gerada aleatoriamente conforme as especificações do problema. Em virtude de as demandas aleatórias provavelmente terem seus valores diferentes daquelas consideradas no modelo de otimização, os níveis dos reservatórios no final do primeiro período, serão também diferentes dos

valores esperados. Sendo assim, os níveis dos reservatórios serão atualizados no modelo como parâmetros iniciais para a próxima rodada de otimização, quando o mesmo passará a ser solucionado novamente.

Após 39 rodadas, obter-se-á o custo realizado de dois dias do horizonte de planejamento e ao executar as mesmas 39 rodadas por 500 vezes, serão encontrados 10.000 valores esperados pelo modelo de otimização e 10.000 valores simulados, representando o que se esperaria obter num caso real. A partir desses valores, uma distribuição de probabilidades do resultado do planejamento poderá ser definida.

A Figura 3 resume todo o procedimento realizado.

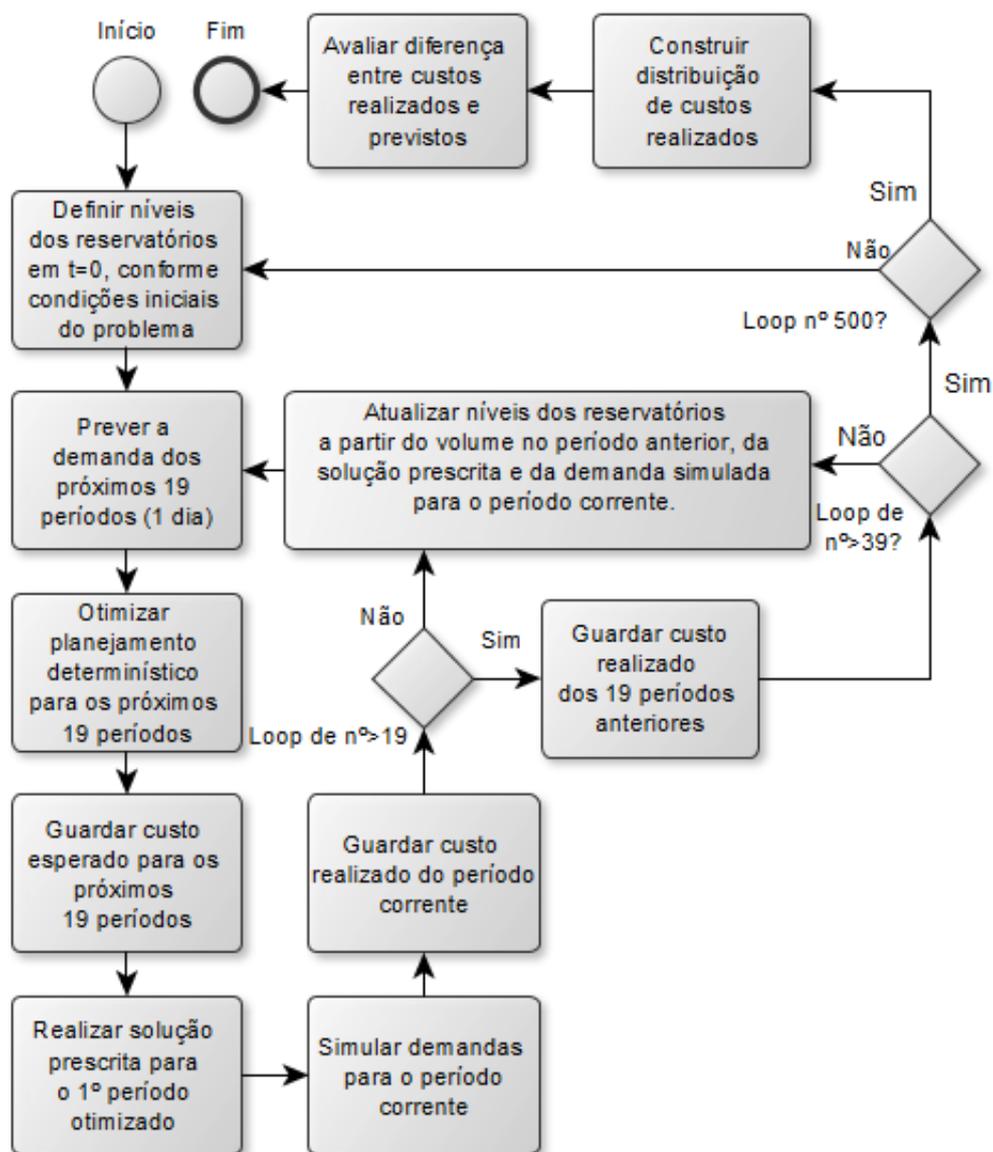


Figura 3 - Procedimento adaptado ao caso em estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores.

É válido mencionar que, em qualquer tempo, ao realizar uma solução para o 1º período e simular a demanda estocástica, os reservatórios poderiam ultrapassar o limite superior, o que não

deveria ocorrer numa situação prática. Sendo assim, definiu-se o seguinte procedimento: quando a solução prescrita acarretasse em níveis não permitidos de reservatório, reduzia-se o tempo definido para as respectivas variáveis de bombeamento de modo a não exceder a capacidade e tal efeito era considerado para computar o custo realizado do período.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O planejamento com horizonte rolante, descrito no item anterior, foi simulado por 500 vezes, em cerca de 38 minutos, em um processador Intel® Core™ i3, 2350M, 2,3 GHz, 4GB de memória RAM. Como resultado, obteve-se 10.000 valores passíveis de comparação entre valores esperados do modelo de otimização e valores simulados. A média dos valores obtidos com a otimização foi de 926 unidades monetárias (U.M.), contra uma média de 1037 U.M. obtidas com as simulações dos replanejamentos, o que representa um aumento médio de 12% dos valores obtidos com os modelos de otimização. Isto significa que deve-se esperar em média 12% a mais de custo que os valores mínimos obtidos a partir da aplicação de Programação Linear para o problema em questão, sendo que tal fato se deve às aleatoriedades do problema.

Os valores obtidos a partir do modelo de otimização tiveram uma mediana de 901 U.M., enquanto que a simulação dos replanejamentos resultou em valores com uma mediana de 1038 U.M., o que representa um aumento de 15% dos valores esperados. A frequência de ocorrência de diferentes faixas de valores dos modelos de otimização e dos obtidos via simulação dos replanejamentos se encontram nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

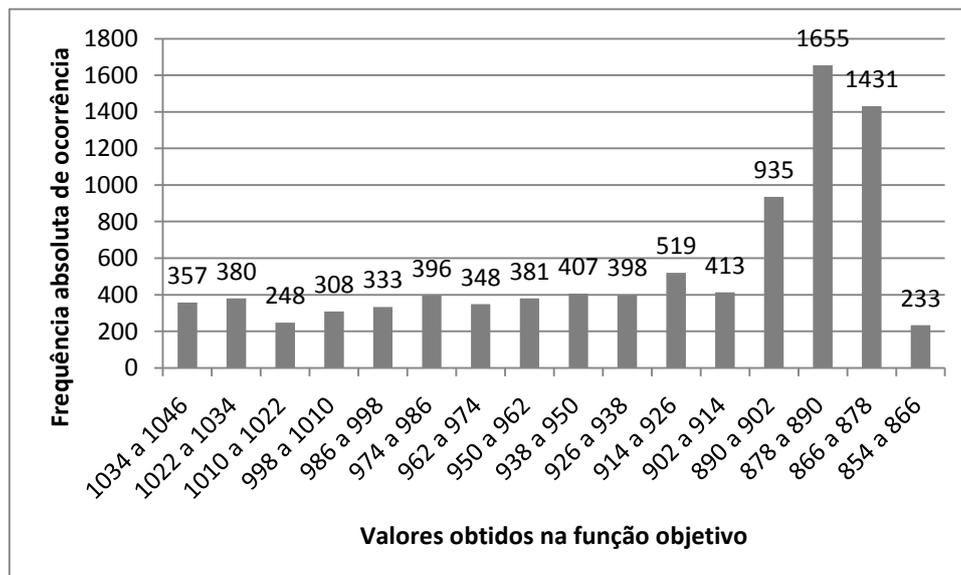


Figura 4 - Valores obtidos a partir do modelo de otimização.

Fonte: Elaborado pelos autores.

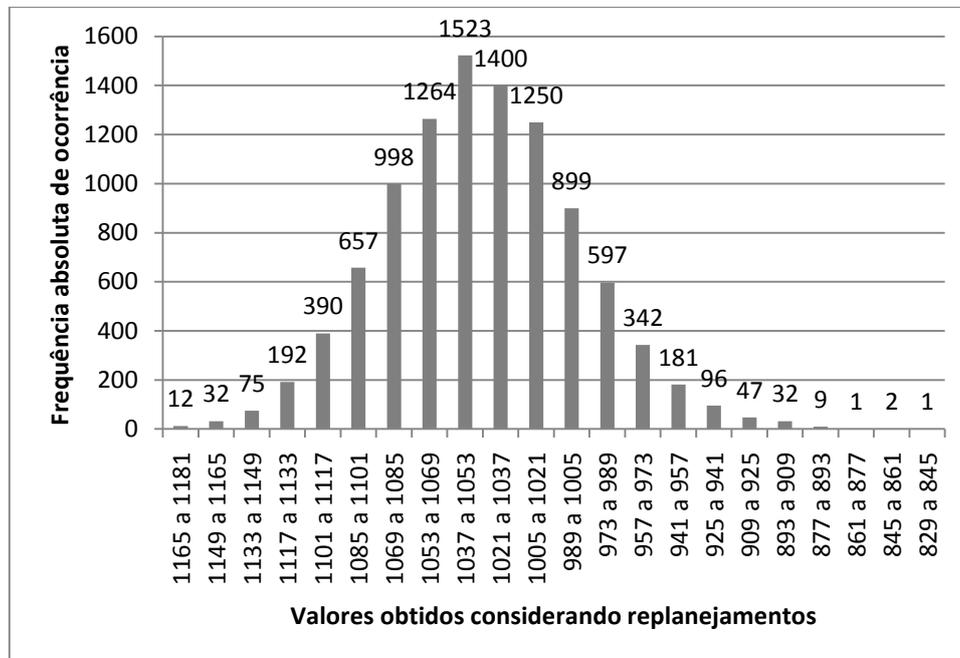


Figura 5 - Valores obtidos a partir da simulação de replanejamentos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Percebe-se na Figura 5 que os resultados obtidos tiveram um comportamento próximo de uma curva normal, embora os dados de entrada fossem uniformemente distribuídos. Tal fato ocorreu provavelmente, em virtude de que cada valor obtido contém informações de 19 períodos simulados e que em alguns deles a previsão de demanda do modelo otimizador foi subestimada e em outros foi superestimada. Deste modo, os valores normalmente distribuídos podem ter sido obtidos devido ao fato de às somas dos erros dos 19 períodos serem frequentemente próximas a um valor médio. De outro modo, tal fato não é anômalo, uma vez que é conhecido o princípio de que a distribuição da soma de mais de uma variável uniformemente distribuída não resulta em uma distribuição uniforme.

Na Figura 6 é mostrada diferença percentual entre valores esperados e aqueles obtidos ao replanejar a cada período. Observa-se que em 54% das ocorrências, obtiveram-se valores entre 9% à 21% a mais que o valor esperado pelo modelo de otimização sem considerar os replanejamentos frequentes, com destaque para os erros entre 15% e 18% que tiveram uma frequência de ocorrência de 15%.

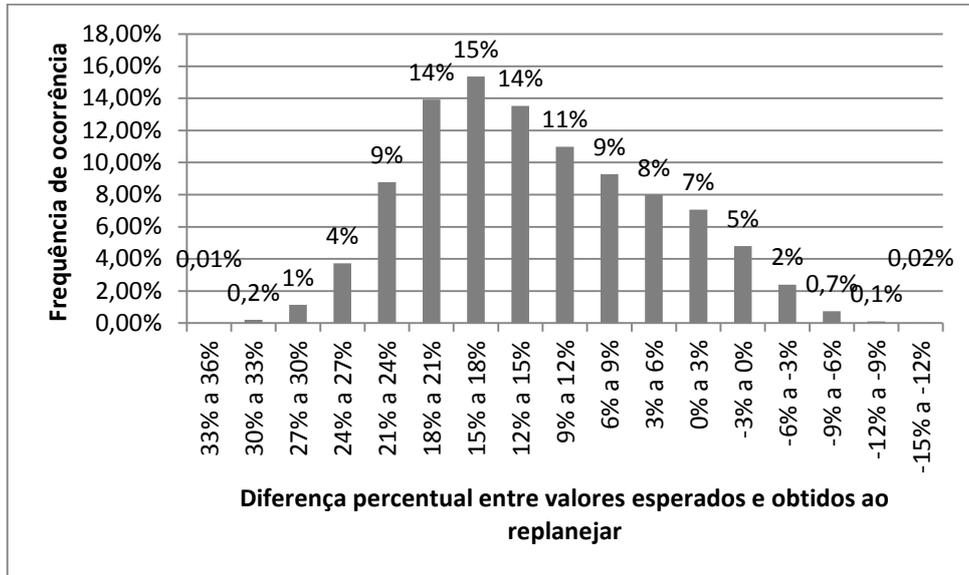


Figura 6 - Frequência de ocorrência das diferenças percentuais entre os valores esperados e obtidos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se ainda que as diferenças (erros) obtidas entre valores esperados e obtidos de fato variam de acordo com os valores esperados. Tal característica fica evidenciada na figura 7, onde se percebe que a dispersão de valores de erros relativos reduz-se à valores próximos a zero quando a função objetivo (valores esperados) resulta em valores próximos a 1050. Percebe-se que os erros relativos tendem a ser tão maiores quanto menores forem os valores obtidos na função objetivo, o que corrobora o fato de a média e mediana dos valores obtidos ao se considerarem os replanejamentos serem maiores que os valores esperados.

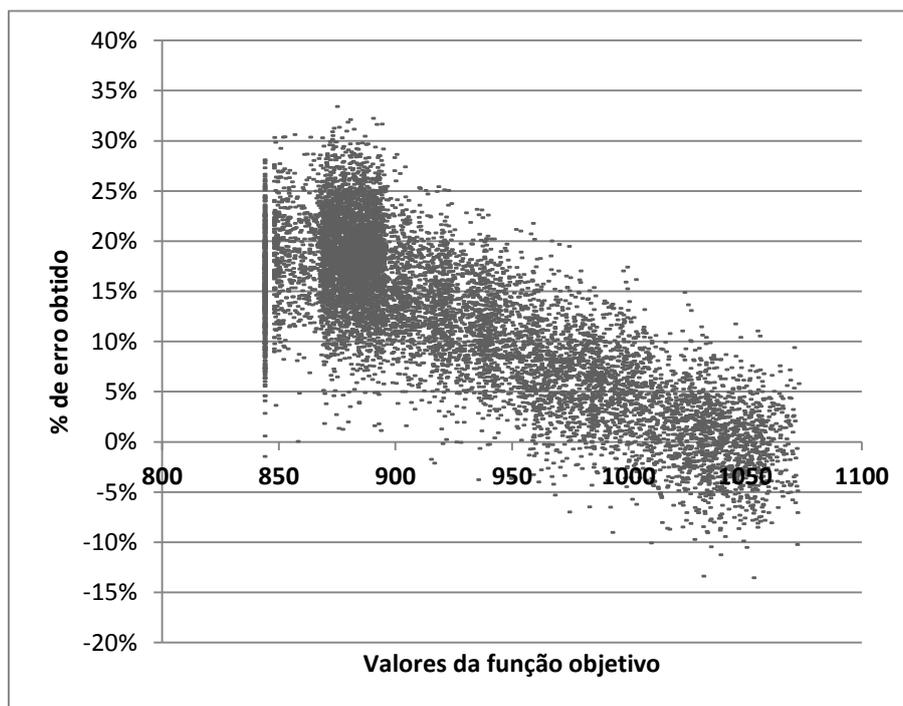


Figura 7 - Frequência de erros em relação aos valores esperados.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados obtidos ilustram a forma de como o método proposto nesta pesquisa é capaz de avaliar o real desempenho de um dado método de planejamento. Usualmente, após se planejar um sistema, obtêm-se apenas um valor de custo planejado, o qual costuma estar sujeito a uma série de adversidades que poderá alterar este valor. O método proposto permite conhecer as reais probabilidades de se obter os valores do custo planejado ao se utilizar de um dado método, o qual no exemplo elucidado foi o de Programação Linear, para realizar o planejamento.

Usualmente, trabalhos na literatura comparam somente as diferenças entre custos planejados e se além em como produzir tais resultados alterando suas variáveis de decisão. O método aqui proposto se incumbem de avaliar quais reais probabilidades de se obter os custos previstos no planejamento.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi proposto um procedimento genérico para avaliação dos efeitos de erros aleatórios em problemas de planejamento, de modo a gerar conhecimento sobre o sistema desejado. A metodologia foi então aplicada ao problema tratado em Toledo *et al.* (2008) e como resultado, obteve-se a distribuição de probabilidades da função objetivo, devido às aleatoriedades de demanda, permitindo que se obtivesse um prognóstico do comportamento do sistema, conhecendo assim com exatidão as possíveis respostas e suas probabilidades.

Pode-se esperar que, caso as aleatoriedades de demanda estejam bem representadas e nenhuma outra aleatoriedade se faça presente, as distribuições de probabilidade dos custos a serem obtidos sejam válidas para as tomadas de decisão, para o problema tratado.

Observou-se ainda que ao aplicar o método de programação linear para solucionar o problema tratado em Toledo *et al.* (2008) em horizonte rolante, é possível atingir valores abaixo do custo previsto pelo modelo de otimização. No entanto, tal ocorrência foi menor que 10% nos 10.000 valores simulados. Observou-se também que ao se aplicar o método de programação linear para o problema em questão, obteve-se um custo realizado em média 12% maior que os custos previstos pelo modelo de otimização (mínimo na função objetivo).

Assim, pode-se concluir que o método proposto mostra-se capaz de auxiliar e dar subsídios à tomada de decisão, sobretudo quanto ao real desempenho de um dado método de planejamento e de uma forma de atuação dos decisores no decorrer no horizonte de planejamento. Usualmente, após se planejar um sistema, obtêm-se um custo planejado, o qual estará sujeito a uma série de aleatoriedades, as quais irão alterar o custo esperado. O método proposto permite conhecer as reais probabilidades de se obter os valores de custo planejado..

Como forma de atenuar a limitação do tempo computacional da utilização do procedimento, foi sugerido que se defina, tanto um número de cenários, quanto um critério de parada para o método de planejamento, compatível com o tempo que se está disposto a aguardar pelos resultados. Um atenuante para esta limitação está no fato de que o procedimento proposto será realizado poucas vezes para um dado horizonte de planejamento, o que poderá permitir maior tempo de espera pelos resultados.

Como perspectiva para trabalhos futuros, poder-se-ia avaliar, por exemplo, como o método seria aplicado em problemas mais complexos, ou como seria sua aplicação com outros métodos de planejamento, ou ainda como seria sua aplicação para avaliar os tamanhos dos períodos do horizonte de planejamento, e finalmente como os valores iniciais influenciam no resultado.

Finalmente, conclui-se que a partir da utilização do procedimento é possível obter conhecimento à respeito do comportamento de sistemas complexos, diante de aleatoriedades e da atuação de decisores.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, A. A. (2007). Análises e Métodos de Otimização para Eficiência Energética de Estações Elevatórias em Sistemas de Abastecimento de Água. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Araujo, S. A., Arenales, M. N., & Clark, A. R. (2004). Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte. *Gestão & Produção*, 11, 165-176.
- Araujo, S. A., Arenales, M. N., & Clark, A. R. (2007). Joint rolling-horizon scheduling of materials processing and lot-sizing with sequence-dependent setups. *Journal of Heuristics*, 13(4), 337-358.
- Bertrand, J. W. M., & Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(2), 241-264.
- Bredström, D., Flisberg, P., & Rönnqvist, M. (2013). A new method for robustness in rolling horizon planning. *International Journal of Production Economics*, 143(1), 41-52.
- Cunha, A. A. R. (2009). Otimização Energética em Tempo Real da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

- Filippini, R. (1997). Operations management research: some reflections on evolution, models and empirical studies in OM. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(7), 655-670.
- Gavira, M. O. (2003). Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- Moura, D., & Fermino, F. S. (2014). Aspectos da qualidade da água para abastecimento público na represa Paulo de Paiva Castro/Sistema cantareira-SÃO PAULO/SP. *Revista Metropolitana de Sustentabilidade*, 4(2), 96
- Popper, K. R. (1972). *Objective knowledge: An evolutionary approach*.
- Prusak, L., & Davenport, T. H. (1998). *Conhecimento empresarial: como as organizações gerenciam o seu capital intelectual*. Rio de Janeiro: Campos.
- Sahin, F., Robinson, E. P., & Gao, L.-L. (2008). Master production scheduling policy and rolling schedules in a two-stage make-to-order supply chain. *International Journal of Production Economics*, 115(2), 528-541.
- Simpson, N. (2001). Questioning the relative virtues of dynamic lot sizing rules. *Computers & Operations Research*, 28(9), 899-914.
- Stadtler, H. (2000). Improved rolling schedules for the dynamic single-level lot-sizing problem. *Management Science*, 46(2), 318-326.
- Tang, O., & Grubbström, R. W. (2002). Planning and replanning the master production schedule under demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 78(3), 323-334.
- Toledo, F., Santos, M. O. d., Arenales, M. N., & Selegim Júnior, P. (2008). Logística de distribuição de água em redes urbanas: racionalização energética. *Pesquisa Operacional*, 28(1), 75-91.
- Venkataraman, R., & Nathan, J. (1999). Effect of forecast errors on rolling horizon master production schedule cost performance for various replanning intervals. *Production Planning & Control*, 10(7), 682-689.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2011). *Probability and statistics for engineers and scientists*. Pearson Education.

Wang, D., Singh, V. P., & Zhu, Y. (2007). Hybrid fuzzy and optimal modeling for water quality evaluation. *Water resources research*, 43(5).

Wierzbicki, A. P. (2007). Modelling as a way of organising knowledge. *European Journal of Operational Research*, 176(1), 610-635. doi: 10.1016/j.ejor.2005.08.018

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris, UNESCO, 2015.

Zhao, X., Xie, J., & Jiang, Q. (2001). Lot-Sizing Rule and Freezing the Master Production Schedule Under Capacity Constraints and Deterministic Demand. *Production and Operations Management*, 10(1), 45-67.