



PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DE VIAS NAVEGÁVEIS INTERIORES COM BASE NA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO PREDITIVA

Débora Alves^{*1}, Eric Duviella² e Arnaud Doniec²

¹FEELT - Universidade Federal de Uberlândia

²Institut Mines Telecom Lille Douai, IA, F-59000 Lille, France

Resumo -Este artigo apresenta uma abordagem de otimização preditiva baseada em um método de minimização quadrática para melhorar o planejamento da alocação de recursos hídricos das vias navegáveis interiores. Essas redes são sistemas de larga escala compostos por vários rios interconectados. Sua gestão consiste em manter o nível de água de cada rio próximo a um objetivo, alocando o recurso de água disponível entre a rede. Sendo importante no contexto da mudança global, onde as vias navegáveis são fortemente impactadas por períodos de inundações e seca. A abordagem de otimização preditiva é alcançada considerando horizontes preditivos futuros com o objetivo de reduzir os impactos de eventos climáticos extremos graças à antecipação das ações de gerenciamento. Os métodos de planejamento de alocações de recursos hídricos, que foram recentemente propostos na literatura, são citados. A influência do tamanho do horizonte preditivo é discutida.

Palavras-Chave- Gestão de recursos hídricos, Planejamento, Otimização quadrática, Otimização preditiva, Sistemas de larga escala, Sistema de água.

IMPROVEMENT OF WATER RESOURCE ALLOCATION PLANNING OF INLAND WATERWAYS BASED ON PREDICTIVE OPTIMIZATION APPROACH

Abstract - This paper presents a predictive optimization approach based on a quadratic minimization method to improve the water resource allocation planning of inland waterways. These networks are large scale systems composed of several interconnected reaches. Their management consists in keeping the water level of each reach close to an objective by allocating the available water resource among the network. It is particularly required in the context of global change where inland waterways should be strongly impacted by flood and drought events. The designed predictive optimization approach is achieved considering future horizons with the aim to reduce the impacts of extreme climate events thanks to anticipation of the management actions. The obtained management improvement comparing to water resource allocation planning methods that have been recently proposed in the literature is high-

lighted. The influence of the size of the predictive horizon is discussed.

Keywords - Water-resource management, Planning, Quadratic optimization, Predictive optimization, Large scale systems, Water system.

I. INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande potencial para o transporte hídrico, com aproximadamente 63000 km de rede de rios e lagos, no entanto é pouco aproveitado, sendo apenas 21000 km de rios navegáveis que estão inclusos na logística de transporte. O governo brasileiro está buscando desenvolver o Transporte Hidroviário Interior com o projeto “Plano Hidroviário Estratégico” [1], que teve início no ano de 2012, visando dar maior dinamismo e competitividade à economia do país. As vias navegáveis européias, desenvolvida desde o século XIX, são excelentes exemplos de infra-estrutura para o transporte hídrico brasileiro. Um exemplo é o projeto de Rede transeuropeia de transportes (RTE-T) [2] que visa desenvolver uma nova política de infra-estrutura de transporte para os Estados-Membros que quer garantir uma cadeia de transporte sem descontinuidade, tendo em vista as variações climáticas e o aumento de navegação.

Para lidar com esses fatores uma arquitetura de controle adaptativo e preditivo foi proposta [3] baseada na abordagem de modelagem múltipla escalar proposta [4] para reproduzir a dinâmica das redes de navegação interior durante os eventos de inundação e seca. O planejamento de alocação de recursos hídricos é realizado de forma determinística, definindo-se problemas de satisfação de restrição (CSPs - Constraint Satisfaction Problems) [5, 6], com otimização quadrática [7] considerando uma parte das vias navegáveis interiores do norte da França em [8]. Neste artigo, o planejamento preditivo de alocação de recursos hídricos baseia-se em um solucionador de programação quadrática que produz resultados precisos numericamente em um número finito de etapas. Esta nova abordagem leva a uma melhoria dos resultados obtidos [8] por parte das vias navegáveis interiores do norte da França.

O artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 demonstra a arquitetura de simulação, sendo subdividido em dois

*adeboracris@gmail.com

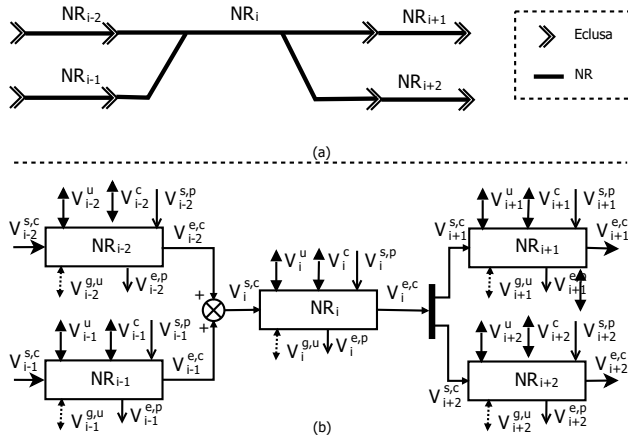
assuntos: os objetivos e métodos de modelagem, que visam facilitar a implementação do problema do planejamento de alocação; e o detalhamento do planejamento de alocação preditiva. Na seção 3 os resultados da simulação são fornecidos.

II. ARQUITETURA DE SIMULAÇÃO

A. Modelos e objetivo do planejamento de recursos hídricos

As vias navegáveis interiores são compostas por vários Rios de Navegação (NR- Navigation Reache) interligados, eles são ligados principalmente por eclusas (ver Figura 1.a). Com o objetivo de entender o deslocamento do volume de água na rede um modelo integrado é proposto e apresentado na Figura 1.b.

Figura 1: a) Rede de navegação interior, b) Modelo integrado.



Este modelo é determinístico e visa reproduzir a dinâmica da rede, calculando o deslocamento do volume de água em cada NR_i a cada instante k , como:

$$V_i(k) = V_i(k-1) + V_i^{s,c}(k) - V_i^{e,c}(k) + V_i^c(k) + V_i^{s,p}(k) - V_i^{e,p}(k) + V_i^u(k) + V_i^{g,u}(k) \quad (1)$$

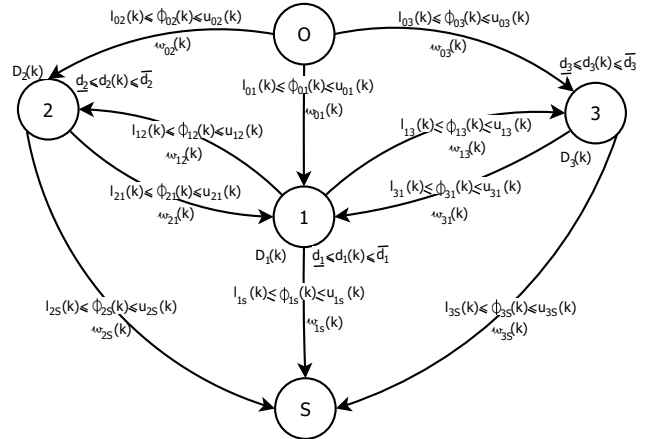
com $V_i(k)$ o volume de água no NR_i no momento k e:

- $V_i^{s,c}(k)$: volume controlado de água que abastece o NR_i (s: supply, c: controlled),
- $V_i^{e,c}(k)$: volume controlado de água que esvazia o NR_i (e: empty),
- $V_i^c(k)$: volume controlado de água que é armazenado em tanques que pode abastecer ou esvaziar os NR_i ,
- $V_i^{s,p}(k)$: volume controlado de água que pode ser bombeado para abastecer o NR_i (p: pumped),
- $V_i^{e,p}(k)$: volume controlado de água que pode ser bombeado para esvaziar o NR_i ,
- $V_i^u(k)$: volume não controlado de rios naturais, chuva-escoamento, etc. (u: uncontrolled),
- $V_i^{g,u}(k)$: volume não controlado das trocas com as águas subterrâneas (g: groundwater),

onde $V_i^c(k)$, $V_i^u(k)$ e $V_i^{g,u}(k)$ são marcados: positivo se o NR_i é abastecido, caso contrário, negativo.

O principal objetivo da gestão das redes de navegação interior é garantir a condição ideal de navegação. É necessário manter o nível da água próximo ao nível de navegação normal (NNL) e dentro do retângulo de navegação definido pelos limites Nível de Navegação Inferior (LNL- Low Navigation Level) e Nível de Navegação Superior (HNL- High Navigation Level). Para tal é necessário expressar as trocas hídricas do sistema entre cada NR_i a cada instante k . Utiliza-se o modelo de grafo de fluxo (ver Figura 2) para representar o deslocamento de água entre os NR_i , para sua construção é necessário utilizar o modelo integrado, foi demonstrado como construí-lo no artigo [5]. O grafo de fluxo é composto de um conjunto de nós (vértices) \mathcal{N} e um conjunto de arcos (arestas direcionais) \mathcal{A} . Sendo os nós numerados que correspondem ao NR e dois nós adicionais, um de origem comum O representando todo recursos hídricos que entram no sistema e o nó S que são todos os recursos que saem do sistema. Os arcos são definidos como um par $a = (i, j)$, $a \in \mathbb{R}^{\alpha}$ com $\alpha = \text{card}(\mathcal{A})$, onde i e j são os nós de origem e de destino. Em cada arco está associado um fluxo $\phi_a(k) = \phi_{ij}(k)$ que representa os volumes de água transferidos entre os nós i e j no momento k . Esses fluxos são limitados pelas características físicas dos dispositivos hidráulicos. Assim, cada fluxo deve respeitar $l_{ij}(k) \leq \phi_{ij}(k) \leq u_{ij}(k)$, onde $l_{ij}(k)$ e $u_{ij}(k)$ são as restrições de limite inferior e superior, respectivamente.

Figura 2: Exemplo de um Grafo de fluxo de controle composto de três nós.



A equação (1) pode ser facilmente aplicada à rede baseada em grafo de fluxo considerando uma dinâmica de volume relativa e fornecendo uma capacidade de cada nó, com exceção dos nós de origem O e de saída S . A capacidade dinâmica de cada nó é expressa como:

$$d_i(k) = d_i(k-1) + \phi_{a^+}(k) - \phi_{a^-}(k) \quad \text{com } i \in \mathcal{N} - \{O, S\}, \quad (2)$$

onde a^+ é o conjunto de arcos que entram no nó i , a^- o conjunto de arcos que deixam o nó i e $d_i(k-1)$ é a capacidade do período anterior do nó i .

O objetivo de volume relativo correspondendo ao NNL é introduzido, denotado $D_i(k)$, com $i \in \mathcal{N} - \{O, S\}$, e com

$D_i(k) = 0$. Para manter esse objetivo, o volume de água que alimenta cada nó deve ser igual ao volume de água que o esvazia, a cada instante k . Entretanto para sistemas reais não se pode garantir esse objetivo, então aplica-se um intervalo em torno do $D_i(k)$ que corresponde aos limites LNL e HNL sendo a $\underline{d}_i \leq d_i(k) \leq \bar{d}_i$, com \underline{d}_i e \bar{d}_i os limites inferior e superior. A capacidade $d_i(k)$ pode ser negativa ou positiva.

B. Planejamento de alocação preditiva

A alocação de recursos hídricos consiste em satisfazer os objetivos de cada nó, $D_i(k)$, otimizando os fluxos $\Phi(k)$ em termos de custo mínimo. Dois vetores $\Phi(k)$ e $\Delta(k)$ são introduzidos para reunir o conjunto de fluxos $\phi_{ij}(k)$ e de capacidades $d_i(k)$ no momento k respectivamente. A seqüência ideal de fluxos Φ^H é determinada considerando um horizonte de gerenciamento $H = n \times T_M$ com $n \in \mathbb{N}$ e T_M o período de gerenciamento (em horas) para garantia os objetivos $D_i(k)$ no horizonte H [9]. O critério para minimizar é:

$$f^H(x) = \sum_k^H \left[\sum_i^\eta W |D_i(k) - d_i(k)| + \sum_a^\alpha \omega_a(k) \times \phi_a(k) \right], \quad (3)$$

com η o número de nó, retirando os nós O e S e α o número de arcos. As condições iniciais são $d_i(k-1) = 0$ para $i \in [1, \eta]$.

O método de programação quadrática *quadprog* no Matlab é usado para minimizar $f^H(k)$ sob as restrições definidas:

$$\min f^H(x) \text{ such that } \begin{cases} L^H(k) \leq x^H(k) \leq U^H(k), \\ A_{eq}^H \cdot x(k) = b_{eq}^H(k), \\ A^H \cdot x(k) \leq b^H(k) \end{cases} \quad (4)$$

onde $x^H(k)$ é o vetor no momento k reunindo $\Phi^H(k)$ e $\Delta^H(k)$. Os $L^H(k)$ e $U^H(k)$ são vetores que compreendem todos os limites de $\phi^H(k)$ e $d_i^H(k)$ e devem ser calculados de acordo com o limite escolhido para o horizonte H . A segunda condição é a relação dinâmica de cada nó, em que b_{eq}^H contém os valores de d_i no período anterior e A_{eq}^H é um vetor composto por 0 ou 1 seguindo a estrutura do sistema. Finalmente, a última condição é a representação dos coeficientes lineares, sendo A^H e b^H iguais a zero.

Para calcular a matriz L_b^H (respectivamente U_b^H) é necessário conhecer os limites inferiores (resp. limites superiores) em Φ^H para todo horizonte H . A matriz Ω^H é composta pelo custo de todos os arcos para cada tempo de etapa $k \in [1, n]$ do horizonte de gerenciamento H . Esses vetores são obtidos com a concatenação de cada linha das matrizes. Por exemplo, se $H = 3$:

$$L_b^H = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

o vetor $L_b^H(k)$ é igual a:

$$L_b^H = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9]. \quad (6)$$

O vetor $b^H(k)$ é calculado de $\eta \times n$ elementos $b_{i,l}^H(k)$ com $i \in [1, \eta]$ e $l \in [1, n]$. O índice i representa o número do nó no

intervalo de tempo l . Considerando apenas um nó ao longo do horizonte de tempo $H = n \times T_M$ e a relação (2), é possível escrever as relações que fornecem o valor da capacidade $d_1(l)$ em cada etapa de tempo:

$$\begin{cases} d_1(1) = d_1(0) + \phi_{a^+}(1) - \phi_{a^-}(1) \\ d_1(2) = d_1(1) + \phi_{a^+}(2) - \phi_{a^-}(2) \\ \dots \\ d_1(n-1) = d_1(n-2) + \phi_{a^+}(n-1) - \phi_{a^-}(n-1) \\ d_1(n) = d_1(n-1) + \phi_{a^+}(n) - \phi_{a^-}(n) \end{cases} \quad (7)$$

onde $d_1(0)$ corresponde à capacidade inicial do nó, $\phi_{a^+}(l)$ (resp. $\phi_{a^-}(l)$) são os arcos saindo (resp. entrando) no nó 1 no intervalo de tempo l . Assim, é possível expressar o valor de $d_1(n-1)$ no momento $n-1$ como:

$$d_1(n-1) = d_1(0) + \sum_{m=1}^{n-1} [\phi_{a^+}(m) - \phi_{a^-}(m)]. \quad (8)$$

Assim, os componentes do vetor $b^H(k)$ podem ser calculados. Seus primeiros elementos $b_{i,1}^H(k)$, $i \in [1, \eta]$ são iguais a 0. Os seguintes elementos são calculados de acordo com as relações (2) e (8) como:

$$b_{i,l}^H(k) = b_{i,1}^H(k) + \sum_{m=1}^{l-1} [\phi_{a^+}(m) - \phi_{a^-}(m)], \quad (9)$$

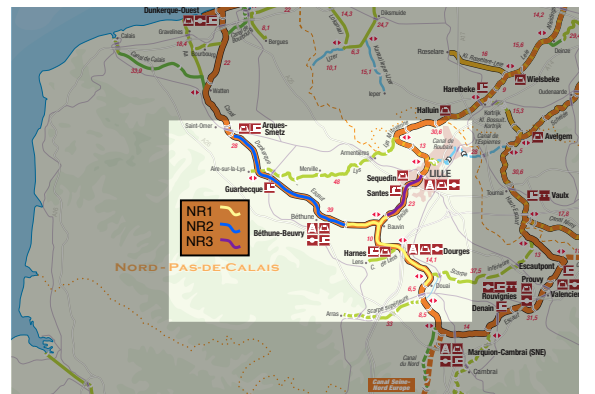
com $i \in [1, \eta]$, $l \in [2, n]$, onde $\phi_{a^+}(m)$ (resp. $\phi_{a^-}(m)$) são os arcos saindo (resp. entrando) do nó i no intervalo de tempo m .

Também é necessário criar a matriz Ω^H que é composta pelos custos de todos os arcos em cada intervalo de tempo $k \in [1, n]$.

III. ESTUDO DE CASO DO SISTEMA CUINCHY-FONTINETTES

As vias navegáveis interiores estudadas são compostas por três NR que estão ligados ao alcance de Cuinchy-Fontinettes (ver NR_3 figura 3); O NR_3 é particularmente importante para o gerenciamento das hidrovias no norte da França. é um canal artificial que pode ser usado para distribuir água entre três bacias hidrográficas. O alcance Cuinchy-Fontinettes também é um alto consumidor de água, possuindo uma eclusa que consome mais de 25.000 m^3 a cada operação.

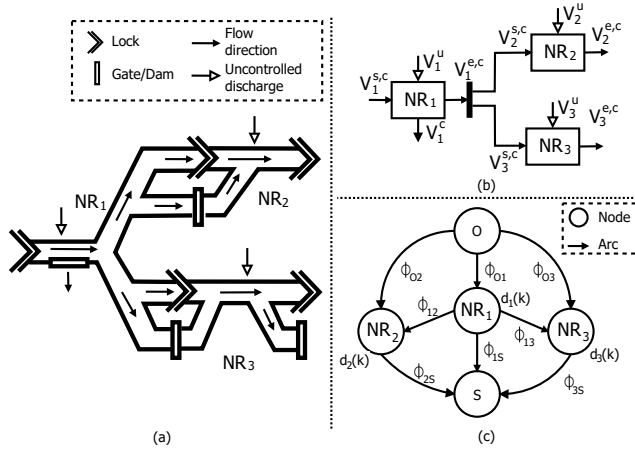
Figura 3: Parte das vias navegáveis no norte da França.



O NR_1 tem uma configuração afluente que desagua nos NR_2 e NR_3 , graças a um portão e uma eclusa, respectivamente. Uma

representação esquemática da rede estudada é representada na Figura 4.

Figura 4: (a) Rede estudada, (b) modelo de volume integrado, (c) grafo de fluxo.



As características físicas dos três NR são dadas na Tabela

1.

Tabela 1: Dimensões dos NR_i, objetivos de nível NNL e limites de navegação.

NR	NR ₁	NR ₂	NR ₃
Length [km]	56.724	42.3	25.694
Width [m]	41.8	52	45.1
NNL [m]	3.7	4.3	3.3
LNL [m]	-0.05	-0.05	-0.05
HNL [m]	+0.1	+0.05	+0.05

Em cada operação que utilize a eclusa, uma quantidade de volume de água é trocada entre o NR montante e o NR jusante, denotado v^{ch} . Essas trocas de volume de água dependem apenas da demanda de navegação. Sendo permitido a navegação somente no período do dia e tendo um recesso no domingo. Os portões são controlados para fornecer uma descarga dentro de uma faixa operacional. As faixas de operação das eclusas são dadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características dos NR

NR	NR ₁	NR ₂	NR ₃
Q_i^f [m ³ /s]	[-1; -1]	-	-
Q_i^u [m ³ /s]	6.56	0.63	1.2
Q_{up}^d [m ³ /s]	-	[0; 6.4]	[0; 30]
Q_{dw}^d [m ³ /s]	-	-	[0; 60]
v_{up}^{ch} [m ³]	6.709	3.526	5.904
v_{dw}^{ch} [m ³]	-	23.000	7.339

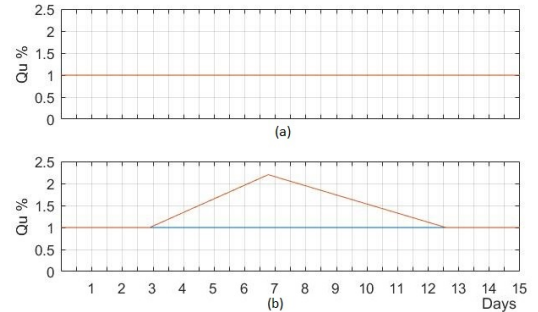
Supõe-se que os volumes de água que fornecem ou esvaziam a rede dos rios naturais $\{\phi_{02}, \phi_{03}, \phi_{15}\}$ têm menos prioridade que os outros $\{\phi_{01}, \phi_{12}, \phi_{13}, \phi_{25}, \phi_{35}\}$. Assim, dois custos diferentes são escolhidos, como $\{\omega_{01}, \omega_{12}, \omega_{13}, \omega_{25}, \omega_{35}\} = 0$ e $\{\omega_{02}, \omega_{03}, \omega_{15}\} = 1$. Além disso, o custo é ajustado como $C_{max} = 2000$, um valor arbitrário.

O modelo integrado proposto dos sistemas Cunchy-Fontinettes foi implementado em Matlab / Simulink. Uma função Matlab foi definida para usar a abordagem de otimização proposta.

Em seguida, dois cenários foram simulados definidos para estimar os impactos de eventos extremos no sistema e para estudar a melhoria da estratégia de gerenciamento preditivo. Supõe-se que estes eventos extremos tenham apenas impactos nas descargas descontroladas dos rios naturais. O primeiro cenário corresponde a um período normal, onde $Q_u(i)$ é contínuo

(ver Figura 5 .a). O segundo cenário é baseado em um período chuvoso com forte intensidade, começando no dia 3 e parando apenas no dia 12 (ver Figura 5 .b).

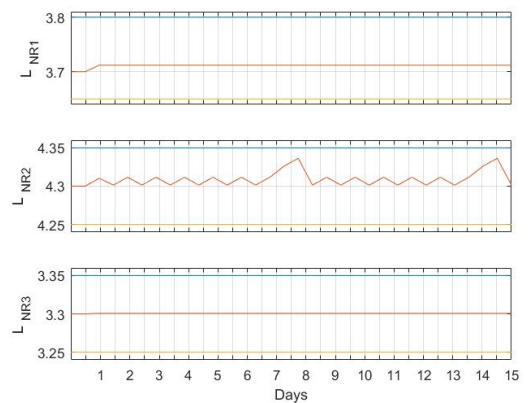
Figura 5: Percentual de descargas não controladas Q^u para os dois cenários.



Para destacar a melhoria proporcionada pela abordagem de otimização preditiva, são considerados dois horizontes preditivos diferentes: $H = 1$ não tendo uma previsão futura, isto é, levando em conta somente o instante presente e $H = 5$ dias, sendo previsto 10 etapas de simulação futuras.

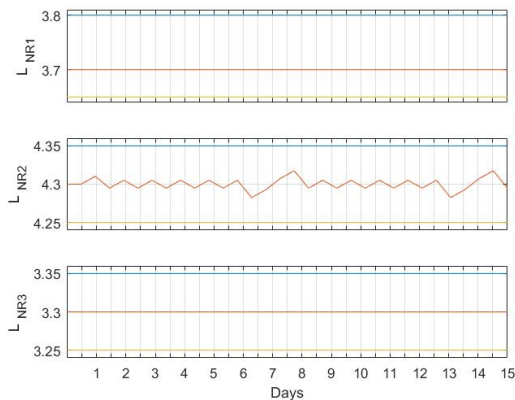
Os resultados da simulação do primeiro cenário são mostrados na Figura 6. A linha vermelha é o nível da água. A linha azul corresponde ao HNL, o amarelo ao LNL. É mostrado que os níveis em NR₁ e NR₃ permanecem próximo ao NNL. O mais impactado é NR₂, que não pode ser esvaziado durante a noite e durante o domingo, porque nenhuma navegação é autorizada, assim, seu nível aumenta. Quando a navegação é permitida, as operações de eclusas são utilizadas para manter os níveis o mais próximo ao objetivo desejado.

Figura 6: Cenário 1: Níveis nos três NR em [m] para H=1.



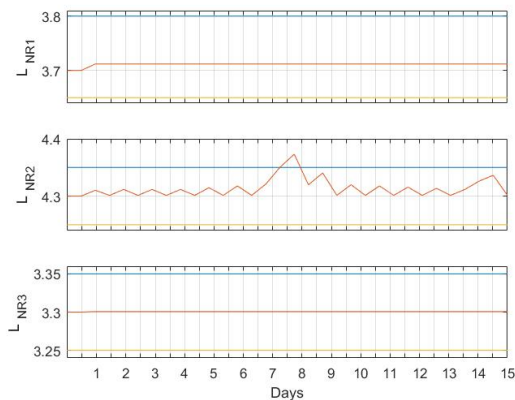
Quando o horizonte de tempo ($H = 5$) é usado, não há efeito em NR₁ e NR₃ (ver Figura 7.a e c). A antecipação do setpoint de descarga em NR₂ leva a uma diminuição do nível da água durante os períodos de navegação para limitar sua magnitude durante os períodos sem navegação. A principal melhoria pode ser vista ao domingo. O nível de água de NR₂ oscila em torno do NNL, sendo uma estratégia para impedir o desperdício de recursos diminuído assim o custo global de gerenciamento.

Figura 7: Cenário 1: Níveis nos três NR em [m] para $H=5$



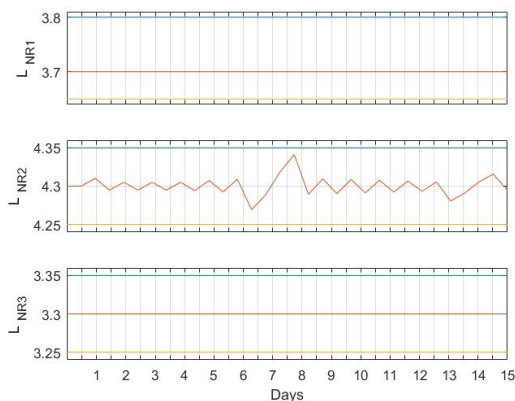
O segundo cenário destaca os impactos de uma forte chuva no sistema Cuinchy-Fontinettes para $H = 1$ (ver Figura 8.b). A combinação da intensidade da chuva forte e o dia sem navegação leva a um estouro em NR_2 nos dias 7 e 8, criando assim uma inundação.

Figura 8: Cenário 2: Níveis nos três NR em [m] para $H=1$



O impacto da chuva é altamente reduzido quando o horizonte $H = 5$, como é mostrado para NR_2 na Figura 9.b. Há uma antecipação na determinação do setpoint que permite esvaziar mais o NR_2 antes do dia sem navegação. Mesmo que o nível da água esteja próximo ao HNL no sábado, o nível da água é mantido dentro dos limites definidos.

Figura 9: Cenário 2: Níveis nos três NR em [m] para $H=5$



Estes resultados mostram que otimizar o problema de alocação de água considerando o horizonte preditivo leva a um melhor desempenho, sendo necessário a análise para para o

tamanho do horizonte de predição, neste caso o horizonte de predição $H = 5$, mostrou -se satisfatório, porem em cada sistema sera necessário uma análise, pois o horizonte de predição pode precisar de ajustes.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo, uma abordagem de otimização preditiva baseada em um método de minimização quadrática é proposta para melhorar o planejamento da alocação de recursos hídricos das vias navegáveis interiores. Um estudo de caso realista, o sistema Cuinchy-Fontinettes é considerado para avaliar essas melhorias, considerando os cenários de período normal e chuvoso. Os resultados da simulação mostram que a antecipação de eventos extremos leva a um gerenciamento eficiente das vias navegáveis interiores. No entanto, mesmo que algumas melhorias sejam obtidas, as incertezas sobre os impactos de eventos climáticos extremos não foram levadas em conta. Será a principal preocupação de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- [1] Plano Hidroviário Estratégico, http://www.transportes.gov.br/images/TRANSPORTE_HIDROVIARIO/PHE/RELATORIO_CONSULTASPUBLICAS.pdf, 08 8 2018".
- [2] Trans-European Transport Network, http://www.transportes.gov.br/images/TRANSPORTE_HIDROVIARIO/PHE/RELATORIO_CONSULTASPUBLICAS.pdf, 08 8 2018".
- [3] E. Duviella and L. Rajaoarisoa and J. Blesa and K. Chuquet, "Adaptive and predictive control architecture of inland navigation networks in a global change context: application to the Cuinchy-Fontinettes reach", in *IFAC MIM conference, Saint Petersburg, 19-21 June, 2013*.
- [4] E. Duviella and K. Horvath and L. Rajaoarisoa and K. Chuquet, "Multi-scale modeling approaches of inland navigation networks for their management in a global change context.", *Transport Research Arena, Paris La Défense, France, 2014*
- [5] H. Nouasse and L. Rajaoarisoa and A. Doniec and P. Chiron and E. Duviella and B. Archimède and K. Chuquet, "Study of drought impact on inland navigation systems based on a flow network model.", *ICAT, Sarajevo, Bosnie Herzegovia, 2015*
- [6] H. Nouasse and A. Doniec and G. Lozenguez and E. Duviella and P. Chiron and B. Archimède and K. Chuquet, "Constraint satisfaction problem based on flow transport graph to study the resilience of inland navigation networks in a climate change context.", *IFAC Conference MIM, Troyes, France, 28-30 June, 2016*
- [7] H. Nouasse and A. Doniec and E. Duviella and K. Chuquet, "Efficient management of inland navigation reaches equipped with lift pumps in a climate change context.", *4th IAHR Europe Congress, Liege, Belgium 27-29 July, 2016*

- [8] Eric Duviella and Arnaud Doniec and Houda Nouasse, “Adaptive water-resource allocation planning of inland waterways in the context of global change.”, *Journal of water resources planning and management - Accepted* , 2018
- [9] E. Duviella and H. Nouasse and A. Doniec and K. Chuquet, “Dynamic Optimization Approaches for Resource Allocation Planning in Inland Navigation Networks.”, *ETFA'2016, Berlin, Germany, September 6-9, 2016*