

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA ELEVATÓRIO PREDIAL EM FUNÇÃO DO PERFIL DE CONSUMO

Felipe Cioffetti Marques
Centro Universitário Padre Anchieta

1. Resumo

O dimensionamento de reservatórios, tanto para residências quanto em edifícios, é baseado em valores médios de consumo e não leva em consideração a variação deste consumo ao longo do tempo, sendo também comum a divisão de volumes entre o reservatório inferior e o reservatório superior sem base analítica ou experimental.

Será apresentado neste trabalho, uma breve síntese dos tipos de sistemas abastecimento prediais atuais, algumas ferramentas para otimização disponíveis no mercado, a formulação matemática do problema proposto e as considerações aplicadas para o desenvolvimento do mesmo e os resultados obtidos.

2. Abstract

The sizing of reservoirs in such a way for residences how much on buildings, it is based on average values of consumption and does not take in consideration the variation of this consumption throughout the time, and also inferior and superior the division of volumes between reservoirs is effected without analytical or experimental base.

One brief synthesis of the types of current land systems will be presented available supplying, some tools for optimization in the market, the mathematical formularization of the considered problem and the considerations applied for the development of the same and the gotten results.

3. Objetivo

Minimizar a somatória dos níveis máximos dos reservatórios superior e inferior para priorizar a reserva inferior, pois quanto maior o reservatório superior, maior é a carga da edificação, o que resulta custos elevados na estrutura.

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Tipos de abastecimento

O sistema de abastecimento pode ser classificado basicamente em sistema direto e indireto. Tais sistemas podem ser divididos da seguinte forma:

a) Sistema direto sem bombeamento

Consiste em uma ligação direta dos pontos de consumo na rede urbana, desde que essa ligação garanta as condições de vazão, pressão e continuidade suficientes para o bom desempenho da instalação.

b) Sistema direto com bombeamento

Quando a vazão e/ou a pressão não podem ser garantidas pelo o sistema direto sem bombeamento, é necessário a introdução de um sistema de bombeamento para que haja o funcionamento correto e o desempenho esperado da edificação.

c) Sistema indireto com reservatório superior

É classificado sistema indireto quando há uma separação pelo meio atmosférico entre tubulação de alimentação da rede urbana e a da edificação, geralmente isso ocorre por meio de uma torneira de bóia e um reservatório. Dessa forma, as pressões e vazões são garantidas por um reservatório imediatamente superior aos pontos de consumo.

d) Sistema indireto com reservatório superior e bombeamento

Quando a pressão não é suficiente para abastecer o reservatório superior é instalado um sistema de bombeamento para elevar a pressão podendo assim superar a altura da edificação.

e) Sistema indireto com reservatórios inferior e superior

Este tipo de instalação é a mais comum no Brasil para vencer as elevadas alturas dos edifícios, e consiste em um reservatório inferior que recebe o abastecimento da rede urbana por meio de um sistema de bombeamento que alimenta o reservatório superior, que por sua vez será responsável pelo abastecimento dos pontos de consumo, garantido as condições de vazão, pressão e continuidade.

4.2. Ferramentas de otimização

a) Histórico

A otimização faz parte da índole humana. Desde seu surgimento, o *homo sapiens* vem se dedicando a minimizar esforços e maximizar os retornos de alguma atividade por ele desenvolvida, que no princípio de sua existência limitava-se à própria sobrevivência. Durante a segunda guerra mundial, a United States Air Force organizou um grupo de pesquisadores de nome SCOOP (Scientific Computation of Optimum Program), sob a direção de Marshall K. Wood, para tentar solucionar o problema de alocação de recursos limitados de modo a otimizar objetivos. George B. Dantzig era um dos membros deste grupo, e embora nenhum método de expressivo sucesso fosse descoberto durante a guerra, ele formulou o problema de programação linear geral e inventou o Método Simplex em 1947. No entanto, o seu trabalho só foi amplamente avaliado em 1951, quando Cowles Commission Monograph nº 13 o publicou.

Foram desenvolvidos alguns métodos práticos de solução para o problema de programação linear baseado no Método Simplex entre 1948 e 1952. Durante estes anos, algumas atenções foram dirigidas para uso dos primitivos equipamentos computacionais, limitados em alcance e sucesso. Os quatro maiores obstáculos para resolver problemas de programação linear - PL foram enfrentados em 1952 e durante os dois ou três anos posteriores. Segundo o autor foram eles:

- a) Achar uma solução básica inicial, ponto de partida do algoritmo;
- b) Resolver o problema de guardar a situação de degeneração;
- c) Reduzir a área de memória e o número de operações aritméticas requeridas sem causar limitações de uso;
- d) Manter precisão numérica suficiente para a obtenção de resultados significativos.

(LOESCH, 1999, p.15)

Foi prontamente reconhecido que achar uma solução básica viável inicial era o mesmo problema que achar uma solução ótima partindo daquela. Problemas de degeneração e semidegeneração foram amplamente discutidos em vários trabalhos publicados na época, e as dificuldades ocasionais foram resolvidas. Com relação à redução de operações aritméticas e espaço de armazenagem, a forma produto da inversa foi desenvolvida em 1953 e bem aceita, exceto em algumas circunstâncias muito especiais como a forma Standard, o método Simplex Revisado, desenvolvido por Dantzig e outros para RAND Corporation foi publicado neste ano. Em 1954, o uso da

dupla precisão numérica veio a resolver o último dos obstáculos mencionados, se bem que o uso da dupla precisão numérica aumente o tempo de operação aritmética, suscitando muita controvérsia sobre o dilema da precisão numérica versus tempo computacional.

A parametrização do lado da mão direita do problema de PL, bem como dos coeficientes da função objetivo, são extensões importantes do problema, e estas técnicas foram inicialmente usadas em 1954 e 1955, tornando-se de amplo uso em 1957. Os algoritmos de parametrização foram desenvolvidos simultaneamente.

Em 1957 outros aperfeiçoamentos ocorreram: o aperfeiçoamento das técnicas de inversão de matrizes, a manobra de variáveis implicitamente limitadas e a introdução do algoritmo dual, cuja teoria já havia sido lançada em 1953. Nenhum destes desenvolvimentos foi de grande uso durante muitos anos, entretanto eles são agora características padrões, em versões melhoradas, de sistemas de programas computacionais para PL. Desde 1957, todos os aspectos da PL foram desenvolvidos em ritmo veloz. As técnicas de decomposição foram estudadas desde 1953, porém tais técnicas eram na época impraticáveis ou ineficientes. Entretanto, com a publicação, em 1959, do algoritmo Dantzig-Wolfe, o interesse por estas técnicas cresceu muito. Por volta de 1963, os desenvolvimentos voltaram seus interesses para os programas computacionais e considerações sistêmicas, especialmente as técnicas algébricas. Grandes passos também foram dados em discernir novas aplicações para a programação linear.

b) Programação Inteira e Mista

Os problemas de Programação Inteira e Mista são caracterizados com a presença de ao menos uma restrição de integridade. Entende-se por restrição de integridade imposta a uma variável, a exigência feita quanto aos possíveis valores que podem ser assumidos pela variável, o qual deve assumir um número inteiro.

c) Programação Não-Linear

A programação não-linear objetiva otimizar funções (maximizar ou minimizar) sujeitas ou não a um conjunto de restrições. Diferentemente da programação linear, a função objetivo não necessita ser linear, nem mesmo suas restrições necessitam ser lineares. Ao contrário também da programação linear, não existe um método Simplex.

Os algoritmos de resolução de problemas de programação não-linear são classificados pelo seu número de variáveis de decisão, pelo uso ou não da derivada e pela presença ou não de restrições.

d) Algoritmos de Otimização

Existem diversos algoritmos de otimização, porém a utilização requer uma programação direta intensa e exaustiva, pois a maneira de implantação de cada algoritmo ser diferente um do outro.

A partir disso, surgem diversos softwares como interface do usuário e os algoritmos que transformam a linguagem de programação em qualquer algoritmo integrado ao software, alguns permitem a escolha de qual algoritmo o usuário deseja usar.

Alguns destes softwares recebem destaque, como o Solver do Microsoft Excel, AMPL, LINDO, GAMS e etc.

5. Materiais e Métodos

5.1. Descrição do Problema

No problema proposto, existem em suas restrições uma não linearidade que resulta em programação não-linear e também possui variáveis binárias que conseqüentemente induz a uma programação inteira e mista, com a união dos tipos de programação. Nesse sentido, chegamos à conclusão de que os problemas serão solucionados por um algoritmo que consiga otimizar uma programação não-linear inteira e mista.

O propósito da função objetivo, mostrada na equação 5.1, é minimizar a somatória do volume do reservatório superior multiplicado por um coeficiente de priorização e do volume do reservatório inferior multiplicado por um outro coeficiente de priorização, para isso a modelagem desenvolveu-se em três etapas que serão descritas a seguir.

$$MIN(Z) = (V_{inf} \times PR_{inf}) + (V_{sup} \times PR_{sup}) \dots\dots\dots (5.1)$$

Onde:

ZFunção objetivo

V_{inf} Volume do reservatório inferior

PR_{inf} Coeficiente de priorização do reservatório inferior

V_{sup} Volume do reservatório superior

PR_{sup} Coeficiente de priorização do reservatório superior

5.2. Primeira etapa

Nesta primeira fase, elaboramos as equações de forma que tanto as vazões de abastecimento e bombeamento poderiam assumir qualquer valor, respeitando somente limites de continuidade, que restringem os níveis dos reservatórios, sendo elas expressas conforme as equações mostradas abaixo.

$$NV_{(SUP)i+1} = NV_{(SUP)i} - \left(\frac{Qc_i}{A_{SUP}} \right) + \left(\frac{Qb_i}{A_{SUP}} \right) \dots\dots\dots (5.2)$$

$$NV_{(INF)i+1} = NV_{(INF)i} - \left(\frac{Qb_i}{A_{INF}} \right) + \left(\frac{Qa_i}{A_{INF}} \right) \dots\dots\dots (5.3)$$

Onde:

$NV_{(SUP)}$ Nível do reservatório superior;

Qc_i Vazão de consumo;

Qb_i Vazão de bombeamento;

A_{SUP} Área da base do reservatório superior;

$NV_{(INF)}$ Nível do reservatório inferior;

Qa_i Vazão de abastecimento;

A_{INF} Área da base do reservatório inferior;

A equação 5.2 determina que o nível do reservatório superior em um instante futuro seja igual ao nível do instante atual menos o nível de consumo neste mesmo instante mais o nível bombeado também neste mesmo instante.

Já a equação 5.3 determina que o nível do reservatório inferior em um instante futuro seja igual ao nível do instante atual menos o nível bombeado neste mesmo instante mais o nível de abastecimento também neste mesmo instante.

5.3. Segunda etapa

Acrescentaram-se restrições quanto à vazão de bombeamento e o número máximo de horas de funcionamento da bomba.

Para a determinação da vazão de bombeamento foram desprezados os valores de altura de sucção e recalque, bem como perdas de cargas e ponto de funcionamento, e tornou-se uma variável do problema, tendo como único parâmetro a volume total consumido dividido pelo número de horas de funcionamento da bomba, conforme mostrado na equação 5.4.

$$Q_b = \frac{\sum_i Q_{c_i}}{NHF} \dots\dots\dots (5.4)$$

Onde:

Q_b Vazão de bombeamento;

Q_c Vazão de consumo;

NHF Número de horas de funcionamento da bomba;

5.4. Terceira etapa

Como passo final, foi excluída a liberdade da vazão de abastecimento, colocando duas restrições quanto às vazões máximas e mínimas do funcionamento do hidrômetro, conforme mostra as equações 5.5 e 5.6.

$$Q_a \leq Q_{h_{max}} \dots\dots\dots (5.5)$$

$$Q_a \geq Q_{h_{min}} \dots\dots\dots (5.6)$$

Onde:

Qa Vazão de abastecimento;

Qh_{max} Vazão máxima de leitura do hidrômetro;

Qh_{min} Vazão mínima de leitura do hidrômetro;

6. Resultados

Para a aplicação do modelo, foi necessário realizar algumas considerações, conforme lista a seguir:

- a) Admitiu-se um perfil de abastecimento de rede urbana como o perfil de consumo;
- b) Estipulou-se o caso como um sistema elevatório de abastecimento de um edifício composto de reservatório inferior, superior e bomba;
- c) Assumiu-se o valor de consumo médio diário por habitante de $0,15\text{m}^3/\text{dia}$;
- d) Adotou-se uma população de 50 habitantes;
- e) Definiu-se as áreas de base dos reservatórios tanto o superior quanto o inferior de 1m^2 ;
- f) Adotou-se um hidrômetro da linha 9000 de fabricante LAO, cuja sua classificação é *Multijato Classe "C" - modelo M9111C*, que possui as características de funcionamento: vazão máxima de $3,00\text{m}^3/\text{h}$ e vazão mínima de $0,015\text{m}^3/\text{h}$;
- g) Implementou-se um custo no reservatório superior como sendo 20 vezes o valor do custo do reservatório inferior;
- h) Limitou-se o número máximo de horas de funcionamento da bomba em 6 horas;
- i) Utilização do software GAMS (General Algebraic Modeling System);

6.2. Primeira etapa

Lembrando que as variáveis de vazão estão em sua liberdade total, e aplicando o modelo, foram encontrados os resultados mostrados na Tabela 6.1 e na Figura 6.1.

Tabela 6.1 – Resultados da otimização com liberdade total

Tempo [h]	Qa [m ³ /h]	Qb [m ³ /h]	Qc [m ³ /h]	Bomba	Vinf [m ³]	Vsup [m ³]
1	0,165	0,165	0,165	ligada	0	0
2	0,183	0,183	0,183	ligada	0	0
3	0,189	0,189	0,189	ligada	0	0
4	0,204	0,204	0,204	ligada	0	0
5	0,197	0,197	0,197	ligada	0	0
6	0,229	0,229	0,229	ligada	0	0
7	0,233	0,233	0,233	ligada	0	0
8	0,294	0,294	0,294	ligada	0	0
9	0,336	0,336	0,336	ligada	0	0
10	0,355	0,355	0,355	ligada	0	0
11	0,458	0,458	0,458	ligada	0	0
12	0,477	0,477	0,477	ligada	0	0
13	0,457	0,457	0,457	ligada	0	0
14	0,400	0,400	0,400	ligada	0	0
15	0,356	0,356	0,356	ligada	0	0
16	0,340	0,340	0,340	ligada	0	0
17	0,337	0,337	0,337	ligada	0	0
18	0,343	0,343	0,343	ligada	0	0
19	0,393	0,393	0,393	ligada	0	0
20	0,433	0,433	0,433	ligada	0	0
21	0,386	0,386	0,386	ligada	0	0
22	0,279	0,279	0,279	ligada	0	0
23	0,222	0,222	0,222	ligada	0	0
24	0,233	0,233	0,233	ligada	0	0

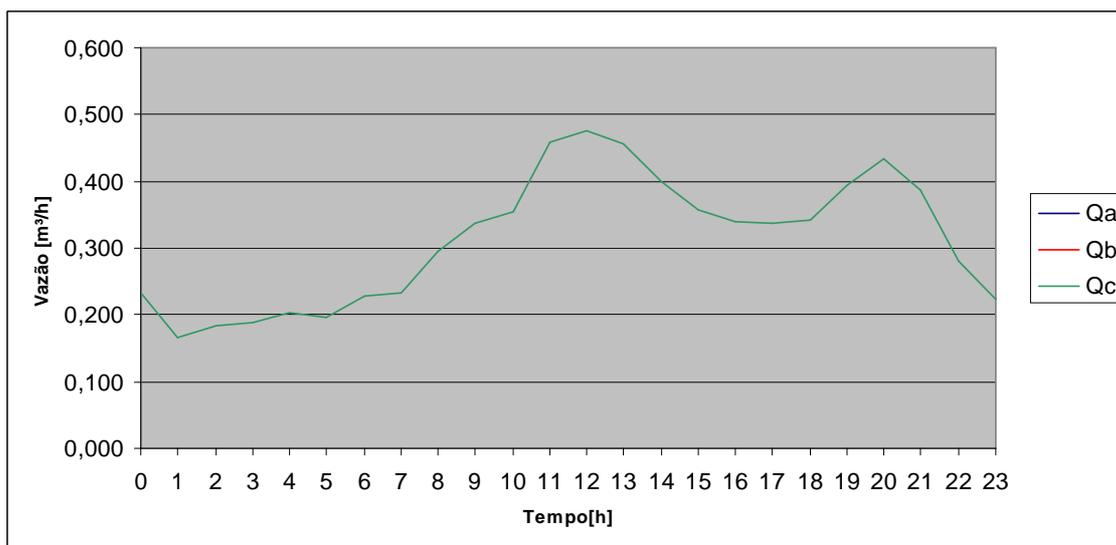


Figura 6.1 – Resultados das vazões otimizadas com liberdade total

Observando a tabela a figura 6.1, nota-se que as vazões de abastecimento, bombeamento e consumo são idênticas, isto se explica devido ao fato de minimização de volume armazenado que nesta etapa é igual à zero, que é o funcionamento de uma instalação predial do tipo direto com bombeamento.

6.3. Segunda etapa

Como nesta fase a vazão de bombeamento deixou de ser livre, e passou a ter um limite de operação, nota-se o reservatório superior mantém o seu nível muito próximo do seu limite inferior e uma vez ele o iguala a zero. Apesar da semelhança com o sistema indireto com bombeamento, nota-se uma grande diferença nos volumes de armazenamento, o qual seria calculado através do produto da vazão média diária da população ($0,15\text{m}^3/\text{h.hab}$) pela sua quantidade (50hab), que resultaria em 7.500 litros, enquanto o modelo nos fornece a quantia de 1.062 litros, conforme pode ser observado na tabela 6.2 e nas figuras 6.2 e 6.3.

Tabela 6.2 – Resultados da otimização com restrição operacional

Tempo [h]	Qa [m ³ /h]	Qb [m ³ /h]	Qc [m ³ /h]	Bomba	Vinf [m ³]	Vsup [m ³]
1	0,000	0,000	0,165	desligada	0	0,553
2	0,000	0,000	0,183	desligada	0	0,388
3	0,000	0,000	0,189	desligada	0	0,205
4	1,250	1,250	0,204	ligada	0	0,016
5	0,000	0,000	0,197	desligada	0	1,062
6	0,000	0,000	0,229	desligada	0	0,865
7	0,000	0,000	0,233	desligada	0	0,636
8	0,000	0,000	0,294	desligada	0	0,402
9	1,250	1,250	0,336	ligada	0	0,108
10	0,000	0,000	0,355	desligada	0	1,022
11	0,000	0,000	0,458	desligada	0	0,667
12	1,250	1,250	0,477	ligada	0	0,208
13	0,000	0,000	0,457	desligada	0	0,982
14	0,000	0,000	0,400	desligada	0	0,525
15	1,250	1,250	0,356	ligada	0	0,125
16	0,000	0,000	0,340	desligada	0	1,020
17	0,000	0,000	0,337	desligada	0	0,680
18	0,000	0,000	0,343	desligada	0	0,343
19	1,250	1,250	0,393	ligada	0	0,000
20	0,000	0,000	0,433	desligada	0	0,857
21	0,000	0,000	0,386	desligada	0	0,423
22	1,250	1,250	0,279	ligada	0	0,038
23	0,000	0,000	0,222	desligada	0	1,009
24	0,000	0,000	0,233	desligada	0	0,786

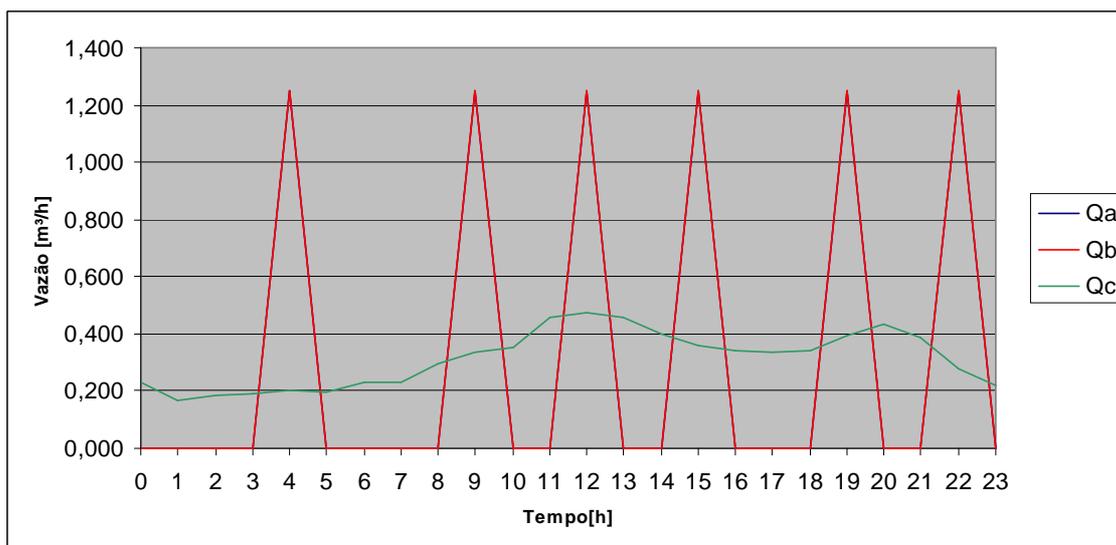


Figura 6.2 – Resultados das vazões otimizadas com restrição operacional

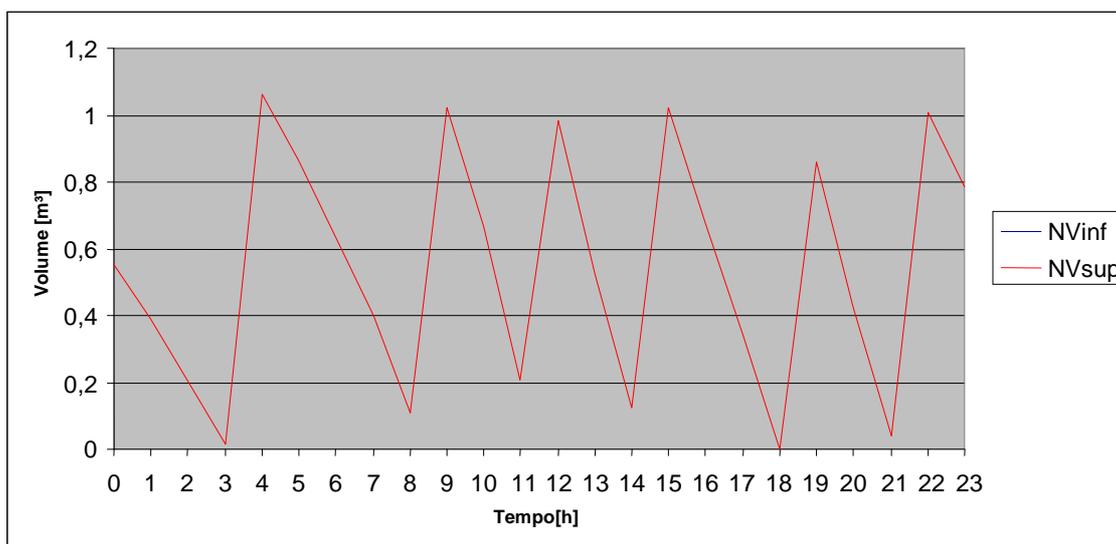


Figura 6.3 – Resultados dos volumes otimizados com restrição operacional

6.4. Terceira etapa

O acréscimo das restrições de limites de vazão mínima e máxima do hidrômetro resultou novamente em um sistema de instalação muito comum e utilizada no Brasil, que é o sistema indireto com reservatório superior e inferior. Porém, novamente com grandes diferenças de valores em relação ao que são normalmente utilizados. Por meio da recomendação para a separação dos volumes de reservatórios superior e inferior, encontraríamos o volume de 3.000 litros para o reservatório superior e 4.500 litros para o inferior, que totaliza os 7.500 litros apresentados na etapa anterior. Mas o modelo

novamente retorna o valor de reservatório superior de 1.062 litros e agora um inferior de 75 litros conforme tabela 6.3 e figuras 6.4 e 6.5.

Tabela 6.3 – Resultados da otimização com restrição operacional e vazões

Tempo [h]	Qa [m ³ /h]	Qb [m ³ /h]	Qc [m ³ /h]	Bomba	Vinf [m ³]	Vsup [m ³]
1	0,015	0,000	0,165	desligada	0,030	0,553
2	0,015	0,000	0,183	desligada	0,045	0,388
3	0,015	0,000	0,189	desligada	0,060	0,205
4	1,175	1,250	0,204	ligada	0,075	0,016
5	0,018	0,000	0,197	desligada	0,000	1,062
6	0,018	0,000	0,229	desligada	0,018	0,865
7	0,018	0,000	0,233	desligada	0,036	0,636
8	0,018	0,000	0,294	desligada	0,054	0,402
9	1,223	1,250	0,336	ligada	0,072	0,108
10	0,015	0,000	0,355	desligada	0,045	1,022
11	0,015	0,000	0,458	desligada	0,060	0,667
12	1,220	1,250	0,477	ligada	0,075	0,208
13	0,015	0,000	0,457	desligada	0,045	0,982
14	0,015	0,000	0,400	desligada	0,060	0,525
15	1,205	1,250	0,356	ligada	0,075	0,125
16	0,015	0,000	0,340	desligada	0,030	1,020
17	0,015	0,000	0,337	desligada	0,045	0,680
18	0,015	0,000	0,343	desligada	0,060	0,343
19	1,175	1,250	0,393	ligada	0,075	0,000
20	0,050	0,000	0,433	desligada	0,000	0,857
21	0,020	0,000	0,386	desligada	0,050	0,423
22	1,180	1,250	0,279	ligada	0,070	0,038
23	0,015	0,000	0,222	desligada	0,000	1,009
24	0,015	0,000	0,233	desligada	0,015	0,786

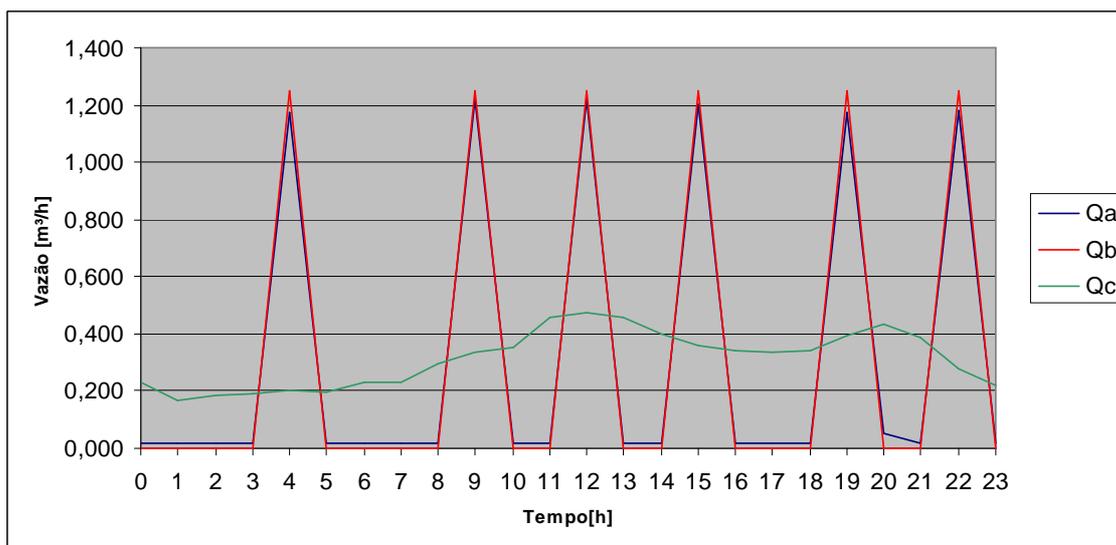


Figura 6.4 – Resultados das vazões otimizadas com restrição operacional e vazões

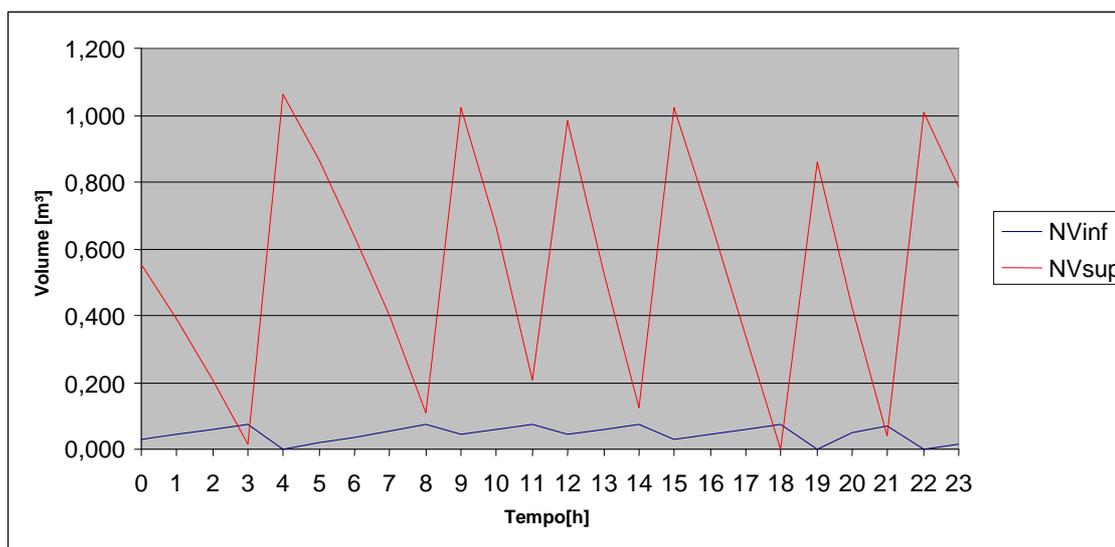


Figura 6.5 – Resultados dos volumes otimizados com restrição operacional e vazões

7. Conclusões

Os volumes de reservatórios podem ser reduzidos bruscamente (cerca de 84%), desde que a concessionária garanta continuidade do fornecimento, lembrando que este modelo fez algumas considerações que não devem ser levadas em um projeto real, pois poderão ocorrer falhas no sistema. Além disso, é necessário um perfil de consumo mais apurado, por falta de pesquisas acerca do deste tema.

8. Referência Bibliográfica

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S/A. 2 ed., 1997.

NETTO, J. M. A. **Manual de Hidráulica**. Editora Edgard Blucher Ltda. 8° ed., 1998.

LOESCHE, Cláudio. **Pesquisa Operacional: Fundamentos e modelos**. Editora da FURB, 1999.

ILHA, Marina Sangoi de Oliveira; GONÇALVES, Orestes M.. **TT/PCC/08: Notas de Aula sobre Sistemas Prediais de Água Fria**. São Paulo, 1994.