Aporte Santiaguino 8, 2015: 291-305
ISSN 2070-836X

Optimization of basic technical characteristics of tractive combines for the agricultural crop transport. Study case: sugar cane production

JOSÉ ARZOLA RUIZ[1] Y VLADIMIR ALVARES SÁNCHEZ[2]

ABSTRACT

In the present work an interrelated system of mathematical models to describe the process of determination of the basic constructive parameters of the tows for the transfer to agricultural centers for industrial processing of crops are offered.
Starting from a basic mathematical model, that is decomposed on the basis on it mathematical structure in an interconnected system of models according a scattered dispersed structure which solution by parts and the posterior conciliation of the model component parts allows to solve the original model.
This model, as well as the solution of the detailed system has been applied by the authors to transportation problems of Cuban sugar cane production.

Keywords: transport harvested production; operational research; decomposition optimization tasks.

INTRODUCTION

The predominant tendency in the agricultural production consists on the cluster of several blocks of agricultural production around processing centers of the obtained production [1]. A study case is constituted by the sugar cane production in agricultural blocks and its transportation to the factories producers of sugar, other derived production of cane, energy, etc [3]. So, the task arises as conforming optimal tractive combines' characteristics for the transport of the production from the different blocks to the processing center. Studying the predominant tendencies in the design of tractive combines for the transportation of goods Conçalves in [7] presents the result of an investigation which main objective was to determine the future tendency in the development of the transport until the year 2021. 28 technological events were studied contained in 6 categories: security, alternative fuels, and materials for their construction, operations outlines, comfort and saving the environment. After carrying out surveys between experts, and personnel familiarized with the activity, was obtained that the future tendency is toward:
1. The prevalence of electronic engines with smaller level of pollutants emissions
2. The implementation of advanced systems of controls, for example, the ABS systems
3. The wide use of slight and highly resistant materials.
4. The booth control of temperature and sound isolation.
5. The wide use of telematics in the vehicular control.
6. New types of active security for alert in the face of drowsiness to the steering

1 Instituto José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba
2 Universidad Oscar Lucero Moya, Holguín, Cuba.

wheel.
7. A wider use of intelligent functions, for example, to emit alert sound or light when a door is open.
8. The prevalence of the biodiesel fuel.
9. The employment of slight load vehicles (4 to 10 tons).
10. The use of more torque engines

Once analyzed the ten predominant tendencies, it is deduced that in the first place should head to guarantee a higher security and comfort in the activities of transport (points 2, 4, 5, 6, 7 and 9); in second place, higher efficiency is looked for in the transport activity, based on the employment of more slight materials, wider employment of biodiesel and more torque engines that allow a more load capacity (points 3, 8 and 10); in third place, it is sought that a bigger respect exists on the environmental contamination.

Stand out the tendency of achieving a smaller mass of the transport equipment by means the use of slighter materials and the employment of more torque engines to achieve bigger tractive force that assures the transport of a more load capacity for trip.

Conçalves [8] also carries out a detailed analysis of the load transport activity and explains how due to the ecological pressures the use of slighter materials is impelled, and it is shown that in the year 2005 Kaewtrakulpong, K [9] explains that with the employment of the aluminum in the construction of tires and in the of load zones of the sugar cane tows, it is possible to reduce the mass of the tractive combines in 4,3 t, with increase the transportation efficiency when diminishing the consumption of fuel.

The basic constructive parameters of the tractive combines for the transportation of goods, in general, and for the agricultural crop transportation associated to the posterior processing by the industry, in particular, condition for themselves certain structure of intrinsic costs during the exploitation of these combines, what is studied in depth in [7]. The methodological base of the next study of the optimal composition of tractive combines will be established by the methodology of Analysis and Synthesis of Engineering Systems developed exposed in the works [1, 2].

SYSTEM ANALYSIS OF THE CROPS TRANSPORTATION TASK

The more spam system is constituted by:

1. The crop blocks with a certain variety and readiness of agricultural products, located at given distances from the industry, with well-known values of yields and density of these products according to the sowed varieties and the climatic conditions.
2. Recollection brigades integrated by the cropper, the mover tractor and the carts in charge of transporting the crows inside the yield.
3. The transportation roads of the crop to the processing center that are characterized by the resistance coefficient of rolling (f) and the adherence coefficient (φ) that impact, respectively, in the traction effort of the combine and in the maximum tractive force that can be exercised on the land [10].

More spam system variables:
Types of mover tractor (*TTipo*).
Predominant way (*Tcam*).
Cropper's Type (*Tcos*) to which the discharge yield (*Wd*) by schedule is associated.
Efficiency Indicators:
Although several indicators can be selected, the intrinsic expenses of the tractive combine (*Gi*): The sum of the expenses that depend in an independent way from the basic technical characteristics will select.
Decision variables:
Load Capacity of the tows (*CC*).
Mean technical going speed of the tractive combine (*Vi*).
Mean technical returning speed of the tractive combine (*Vv*).
Constructive parameters of the area of load of the tows (high, longitude, wide and bend radio between the lateral walls and the bottom).
Quantity of tows that is part of tractive combine (*Ir*).

Conceptual mathematical model of the task

The intrinsic expenses of the tractive combines in one labor, are expressed in function of the total fuel consumption costs and of the depreciation expenses of the tractor equipment and of the tows that must to be minimized

$$Gi = Gi\ (Ccom,\ G\ det,\ Gdr) \quad (1)$$

Where:
Gi: Intrinsic expenses of tractive combines
Ccom: Fuol cost.
Gdet: Depreciation expenses of tractive moving equipment
Gdr: Depreciation expenses of the tows.
The other exploitation expenses components of the transport of the crop are not considered because they are not direct functions of the basic technical characteristics.
The restrictions that are imposed to the mathematical model conform the solution space that are given by the conditions in which the transportation is carried out, the technical characteristics of the moving machines and the restrictions that imposes the industry to the freshness of the product. Next the same ones are detailed, for any tractive combine.
The necessary tangential force to move the train of tows cannot be bigger than the biggest force that the moving elements can exercise over the land without skating [10].

$$Ptg\ I(CC,\ ccet,\ Gr(CC),\ Ir,\ \psi,\ Get\ (TTipo)) \leq P\varphi\ (Get(TTipo),\ \varphi(Tcam)) \quad (2)$$

Where:
ψ: Reduced coefficient of the resistance to the road
Gr: Mass of the tows, that is a function of CC
ccet: proper load capacity of moving machine
Get: Mass of the moving machine

$P\varphi$: maximal tangential forces that can be applied on the land.

The demand of the effective power cannot overcome the value of the available effective power, so during the going trip as in the return one [10].

$Nei(\psi,Get,ccet,Ir,Gr(CC),CC,Vi,\delta) \leq Nemc(TTipo)$ (3)

$Nev(\psi,Get,ccet,Ir,Gr(CC),CC,Vv,\delta) \leq Nemc(TTipo)$ (4)

The summary transportation time ($Ttras$), from the beginning of loading the tow until the product arrive to the final destination should be less than the critical time determined by inadmissible deterioration of the product. As critical time (tc) is defined the sum of the time that the recollected product remains in the field (tri) minus the time waiting in the industry before it processing (tpa) without its industrial yield affectation [4].

$tc=tri - tpa$

$Ttras(CC,ccet,Wdc\ (Tcos),\ D,Vi,Tft,te,tdes\ tpo,tca) \leq tc$ (5)

Where:

Wdc: it is the discharge effectiveness of the gathering combine

te: Time of couple.

tde: Time of detachment.

tpo: Time of positioning.

tca: Time of change of the tow from the combine.

$tdes$: time of discharge of the moving machine

Restrictions of non-negativity of the going and of return speeds of the tractive combine.

Both variables Vi and Vv most to be greater than or equal to 0. Starting from the logical nature of the problem.

$Vi \geq 0$ (6)

$Vv \geq 0$ (7)

Decomposition of the task by component elements

The mass of the load zone is proportional to it area (Azc) and for each load capacity a given volume exists, that corresponds to the minimum value of the area. Therefore, a certain relation exists among the mass of the tows, the areas of the load zone and its load capacity ($Gr(Azc(CC))$). That means: to each value of load capacity of the tow correspond a given volume, and to this volume an optimal design of the load zone is associated and determined by a minimum value of its mass and production cost (or buying price). This means that the exit of the optimization procedure of the load capacity generates the required information for the optimal design of the load zone of the tow. But for solving the model of the load capacity with the necessary rigor, it is needed to know the expression of the mass and the price as functions of the load capacity, expressed through the optimal value of the total area of the load zone of the tow.

On the other hand, for each transportation distance could be generated an optimal value of load capacity of the tows (and it optimal quantity), but as for the transport entity becomes complicated the organization of the work with the increment of the

composition of tows, it determination could be started from the supposition that the entrepreneurial decider determines the number of them that must be included in the park of the company. This information is given in quality of proposals, and posteriorly, it is evaluated which of them corresponds to the minimum of total summaries intrinsic transportation expenses are achieved during the whole harvest for the agricultural company.

From the previous analysis could be concluded:

- To solve the model of the intrinsic expenses as possible exactly, it is necessary to know the expression of the mass of the tows, ($Gr(Azc(CC))$), its prices and the load zone as functions of the optimal load capacity.
- The $(tractive\ combine)_i$ is determined while evaluating the intrinsic expenses model for different transportation distances and constitute the starting proposals $(prop)_j$ for the evaluation of the intrinsic expenses model for different transportation distances for the selection of the optimal tractive combine(s) to be used in the agricultural enterprise for all the recollection campaign.
- The load capacity (CC*) value corresponding to the optimal tractive combine it is an entrance information to determine the optimal parameters of the load zones of the tows, based on which the technical task that serve as starting point for the final point of the tows is elaborated.

In such a way, it becomes possible to establish a triple decomposition outline, corresponding to the dispersed-conciliated structure organization of the preparing and making decisions system that is illustrated in figure 1- This structure is deduced based in the foundations that could be found in [5, 6]

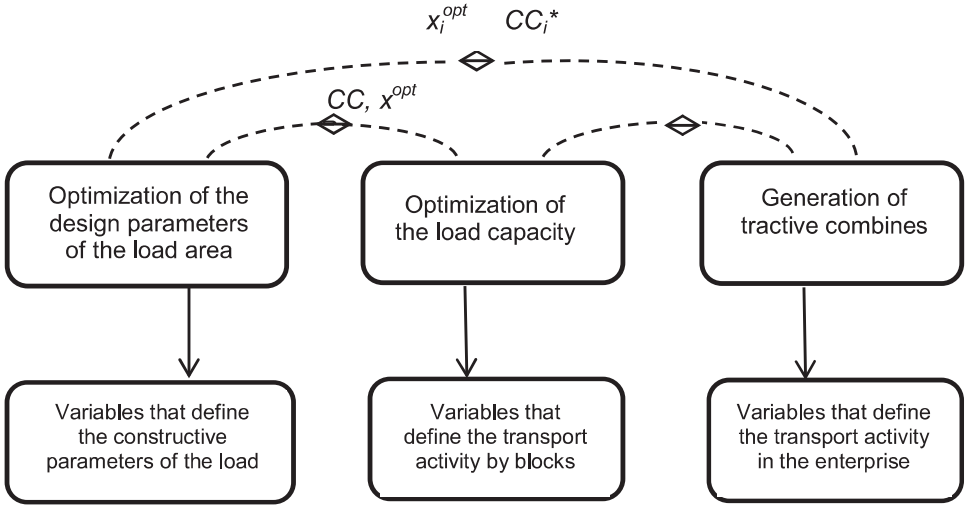


Figure 1. Disperse conciliated decomposition structure deduced from the original task mathematical structure

Mathematical model for the optimization of the load zone

In the determination of the constructive parameters of the load zone of the tows, for a load capacity value, the task is reduced to minimize the area that defines the load volume (Azc), with the objective of diminishing the tow mass what impacts in diminishing the production costs and of the fuel consumption.
The required mathematical optimization model it is similar to a classic Mathematical Analysis task [2].
Minimize

$$Azc = 2\cdot\left(\left(\left(H\cdot Bb\right)+2(H-R)R+\left(\frac{\pi R^2}{2}\right)\right)+\left(L(H-R)+L\left(\frac{\pi R}{2}\right)\right)\right)+$$
$$+\left(L\cdot Bb\right) \qquad (8)$$

Satisfying the restrictions:

$$0\le H\le H^{max} \qquad (9)$$

$$0\le B\le \mathrm{B}^{\max} \qquad (10)$$

$$B-\left(2\cdot R\right)\ge Bb \qquad (11)$$

$$0\le L\le L^{max} \qquad (12)$$

$$L\cdot\left(\left(H\cdot Bb\right)+2(H-R)R+\left(\frac{\pi R^2}{2}\right)\right)=\frac{CC}{\S} \qquad (13)$$

Where:

B: Wide of the load zone.
Bmax: Maximal wide of the load zone.
Bb: Minimal wide of the chassis.
H: Height of the load zone.
Hmax: Maximal height of the load zone.
L: Longitude of the load zone.
Lmax: Maximal Longitude of the load zone.
R: Ratio defined between the union of the lateral walls and the bottom of the load zone.
§: Volumetric density of mass.

The volumetric mass density value is demonstrated in [95], [96] and it is a function of the yields of should be established on the basis of historical data that are obtained in the corresponding companies.
Foundation of the restrictions:
The height of the load zone (*H*) is restricted by it maximal height (*Hmax*) that is define as the difference between the maximal height that could be reached (*H*

lim) and the minimal height of the superior part of the chassis with respect to the ground (*hmin*) [2].

$$H^{max} = H\,lim - h\,min$$

Where

H lim: Limit height. In the case of the tows that are loaded located under the recollection combine the limit is imposed by the work height of the transporter; in the case that they are filled with auto-weighing tows, the limit is imposed by the maximum height that allow the transportation laws and the lateral stability conditions.

hmin: minimum height of the superior part of the chassis to the ground (m).

The maximum width of the load zone (*B*) defined as the difference among the maximum width that allow the highway norms to the self-driven vehicles (Amax) minus the security width that establish this norm, given by the oscillation of the tow due to the lateral not controlled moving by the highway.

$$B^{max} = Amax - As$$

Where:

Amax: Maximal width of a vehicle in the road

As: Security width (m).

The minimal width of the chassis (*Bb*) is determined by technological restrictions.

The calculation volume ($Vc = Ac\,L$), area of the traverse section multiplied for the chassis longitude, will be similar to the necessary volume (*Vn*).

The objective function (8) express the minimum of the area of the load zone of the tow, what presupposes the minimum of it mass and it production cost and, therefore, of the depreciation of the tow.

The restriction (9) establishes that the height of the tow could not surpass that settled down by the transportation norms.

To consider the technological factors of the manufacturing industry it is settled down that the width of the chassis should not be inferior to the minimum value that allow the conditions created in each industry (restriction (10)).

Different limitations could establish a maximum value to the permissible longitude of the tows, what expresses the restriction (11).

The restriction (12) determines that the volume that limits the area of the load zone should be similar to the load volume corresponding to the design capacity.

The formulated task constitutes a classic non lineal optimization model with equality and inequality restrictions. In it solution could be used, among others, the classic mathematical analysis optimization methods. The model solutions could determine the optimal constructive dimensions that determine load capacity values

The optimization model's solution for several values of load capacity and the later processing of the results allow to elaborate approximation functions of the optimal constructive dimensions $x_i^{opt}(CC)$ and, therefore, the mass *Gr*(*CC*) and the depreciation expenses *Gdr*(*CC*) as functions of the load capacity.

Optimization of the load capacity of the tows for each given distance to the reception center

When substituting the approximation functions obtained in the original model, for the determination of the load capacity and of the optimal number of tows, for the equal distances agro blocks to the discharge center. This model constitutes the following one for tractive combine options generation.

Minimize $Gi = Com + Gdet + Gdr$,

Assuring the execution of the restrictions (2) - (7) for given *CC* values by the solution of the model (8) - (13) and of *TTipo, ccet,* ψ, φ given by the coordination variables values of the task in solution process.

The task is solved for blocks of agricultural recollection to the Reception Center. The generated solutions, for the different distances of the recollections blocks to the reception center, constitute options among those it is required to select the most appropriate for the whole agricultural enterprise.

Mathematical model for the selection of tractive combines for the agricultural enterprise

In this phase the system determines the blocks that better link to each tractive combine option previously generated. The system should assure the calculation of the minimum total costs corresponding to the selection that is carried out, corresponding to the following mathematical model [4].

Minimize

$$\sum_{k \in K} \sum_{j} \theta_{k,j} G_{k,j} \tag{14}$$

Assuring:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j} \theta_{k,j} = N \tag{15}$$

$$\sum_{k \in K} \theta_{k,j} = 1, \qquad , \forall j \in J \tag{16}$$

$$\theta_{k,j} \; boolean$$

Where

$\theta_{k,j}$ = tractive combines generated.

1 – If the block *j* it is associated the *k* option of

0 – in other case

K Group of indexes of tractive combines generated

N: Quantity of tractive combines selected by the decider (included in the group *K*).

Gj: Total intrinsic expenses executing the complete harvest using only the *j* tractive combine in the whole agro enterprise.

J: Set of recollection blocks.

The objective (14) expresses the requirement to minimize the total intrinsic expenses in carrying out the whole crop recollection.

The restriction (15) establishes the necessity to select the *N* options of tractive combines previously established by the decider

The restriction (16) establishes the necessity to assure that for all and each one of the crop blocks is used one and just one of the tractive combines selected by the decider.

The last restriction establishes the discrete character of the variable $\theta_{k,\ j}$. In combination with the two previous restrictions forces this variable adopts values 0 or 1.

Implementation of the optimization task in the study case adopted

The decision variables of the objective function (8) are constituted by the width of the tow, the maximum height of the load zone, the radius between the lateral walls and the bottom of the load zone and the longitude of the load zone.

The general procedure of preparing and making of implemented decisions it is constituted for the following steps [4]:

1. Optimization of the constructive parameters of the load zone, for different values of load capacities using the Generalized Reduced Gradient method.
2. Elaboration of approximation functions of the mass of the tows and of the prices of its acquisition as functions of the load capacity helped by the well-known data processing methods.
3. Optimization of the load capacity of the tows, going and returning speeds and number of tows of the train (for a given tractive combine and each one of the distances from the gathering blocks to the processing center, what is carried out by the reduced gradient method.
4. Solution of selection between generated options of the tractive combines task the optimal for the company for the different distances from the blocks to the processing center that in this moment is carried out by Exhaustive Search, but it is possible to use a great number of heuristic for tasks of great dimension.

As an example, in the table 1 could be observed the results obtained of the optimal dimensions of tows for sugar cane transportation depending on the influencing parameters

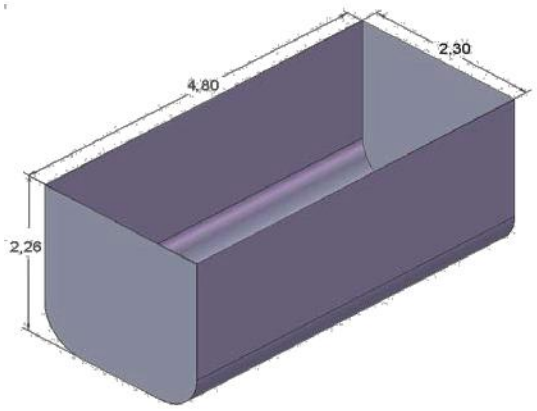


Table 1. Optimal dimensions of the load zone for the interval CC= (5500 a 8200) kg.

Load Capacity (CC) kg.	Area (Azc) of the Load zone m².	Dimensions of the Load Zone m.			
		Width (B)	Ratio (R)	Height(H)	Lengh(L)
5500	32,893	2,3	0,55	1,72	4,8
5600	33,322	2,3	0,55	1,75	4,8
5700	33,751	2,3	0,55	1,78	4,8
5800	34,18	2,3	0,55	1,81	4,8
5900	34,608	2,3	0,55	1,84	4,8
6000	35,037	2,3	0,55	1,87	4,8
6100	35,466	2,3	0,55	1,9	4,8
6200	35,895	2,3	0,55	1,93	4,8
6300	36,323	2,3	0,55	1,96	4,8
6400	36,752	2,3	0,55	1,99	4,8
6500	37,181	2,3	0,55	2,02	4,8
6600	37,61	2,3	0,55	2,05	4,8
6681	37,957	2,3	0,55	2,07	4,8
6700	38,038	2,3	0,55	2,08	4,8
6800	38,467	2,3	0,55	2,11	4,8
6845	38,66	2,3	0,55	2,12	4,8
6900	38,896	2,3	0,55	2,14	4,8
7000	39,325	2,3	0,55	2,17	4,8
7100	39,753	2,3	0,55	2,2	4,8
7200	40,182	2,3	0,55	2,23	4,8
7285	40,547	2,3	0,55	2,26	4,8
7300	40,611	2,3	0,55	2,26	4,8
7400	41,04	2,3	0,55	2,29	4,8
7500	41,468	2,3	0,55	2,32	4,8
7600	41,897	2,3	0,55	2,35	4,8
7700	42,326	2,3	0,55	2,38	4,8
7800	42,755	2,3	0,55	2,41	4,8
7900	43,183	2,3	0,55	2,44	4,8
8000	43,612	2,3	0,55	2,47	4,8
8100	44,064	2,3	0,539	2,5	4,8
8200	44,945	2,3	0,359	2,5	4,8
8300	It is not a solution that satisfies the restrictions.				

Figure 2. Load zone of the optimized tow

From the analysis of the table 1 are deduced that the magnitude (*H*) as a lineal variation, until the value 8100 kg, where it reaches the maximum value and like the dimensions width and length arrived to their limit values, then the variable "*R*"

diminishes its values as the volume continue growing until, a point in which was not found a viable solution to the objective function in the region defined by the restrictions.

The analysis of table 1 could be also deduced that for the optimal dimensions, the area maintains a lineal dependence of the load capacity. Using software Statgraphic the regression equation that links the area of the load area (*Azc*) with the load capacity (*CC*) was found.

Simple Regression Equation - *Azc* vs. *CC*
Dependent variable: *Azc*
Independent variable: *CC*
Final dependence *Azc* = 9,08079+0,00432357*(CC) (17)

Correlation Coefficient = 0,999719
R-quadrate = 99,9438 percent

R-quadrate (adjusted for g.l.) = 99,9418 percent
Estimated standard error = 0,0818845
Error absoluto medio = 0,0372458

Equation (17) expresses the existing dependence among the la load capacity and the minimal area of the tows from the conditions of Cuban sugar industry

In a similar way were obtained the expressions for the calculation of the mass and the price of the tows, as a function of the area:

$Gr = 2195{,}14 + 14{,}8227 \cdot Azc$ (18)

$Pr = 2009{,}95 + 54{,}769 \cdot Azc$ (19)

The expressions (18) and (19) were elaborated for the conditions of the Cuban industry of machines construction.

When substituting the equation (17) in (18) and (19), it is obtained

$Gr = 0{,}064 \cdot CC + 2330$ (20)

$Pr = 0{,}2368 \cdot CC + 2507{,}30$ (21)

The expressions (20) and (21) constitute the approximation functions of the mass and the price of the tows in dependence of the load capacity for the optimal constructive values of the area of the load zone.

Determination of the Basic Technical Characteristics of the Tractive Combine for the given study case

I. Data related with the mover tractor. In this case a tractor MTZ-80 was adopted, with the following data:

1. Nominal power - 58,82 kW
2. Specific consumption of effective fuel (ge) - 248,00 g/kWh
3. Maximal power demand 50,00 kW
4. Mass of the mover tractor 3 300,00 kg
5. Price of the mover tractor (Pet) $12 000,00 $
6. Moving force 14,0 kN

7. Coefficient of the speed variation (Kvv) 1,3
8. Maximal speed 4,15 m/s

DATA THAT CHARACTERIZE THE TYPE ON THE WAY
1. Type of the way - good technical state according entrepreneurial organization
2. Resistance coefficient to the rolling (*f*) 0,025
3. Adherence coefficient of (φ) 0,50
4. Angle of the maximum slope (α) 1º

For this type of way, according Chudakov [31], it is considered that the value coefficient (δ), in the case of the tractors with wheels could reach the value 0.18%.
Implementation of the optimization task of the intrinsic expenses

The implementation of the task was done using the Solver of Excel. As Solver doesn't guarantee obtaining a global minimum, the decision variables are initialized several times repeating the calculation every time. As the result obtained were the same all the occasions, the decision variables values were accepted as the best solution.
The calculations and optimization processes were repeated using the same procedure for the distances from 1 to 10 kilometers from the agro-blocks to the processing center.

Table 2. Original data for the distance of 1 km.

DATA OF THE MOVING TRACTOR	MTZ-80
Nominal potential power of the engine	58,60
Power corresponding to minimum consume	50,00
Specific consumption of effective fuel	230,00
Mass of the tractor equipment (kg)	3300,00
Price of the tractor equipment ($)	18000,00
Load capacity of the moving tractor (*ccet*)	0
Maximal speed (m/s)	4,15
Force of the moving tractor (KN)	14
DATA OF THE TYPE ON THE WAY	
Resistance coefficient of rolling (*f*)	0,025
Adherence coefficient (φ)	0.5
Maximal slope (α)	1
Skating losses (δ)	0,18
CROPPER'S DATA	
Yield of the cropper (*Wdc*)	25600
DATA FOR BEING EVALUATED IN EVERY CALCULATION PROCESS	
Mean transportation distance	1000
CHARACTERISTIC DATA FOR AN ENTERPRISE	
Milling daily norm (*Nd*)	4116000
Price of fuel (*Pc*)	0,822
Transmission losses (σ)	0,100
Effective time of the working period (*Tetur*)	72000
Time of couple (*Te*)	120
Time of detachment (*Tde*)	90
Time of positioning. (*tpo*)	420
Time of change of the tow from the combine (*tca*)	60
Time of discharge of the moving machine (*tdes*)	0
Longitude of the field (*Lc*)	200
Speed of the loaded tractor inside the field (*Vcc*)	1,000
Technical readiness (*DT*)	0,9
Slope of the equation of the mass of the tow (*m*)	0,064
Constant of the equation of the mass of the tow (*c*)	2330
Slope of the equation of the price of the tow (*b*)	0,237
Constant of the equation of the price of the tow (*d*)	2507
Number of tows in the tractive combine (*Ir*)	3
Coefficient of variation of the speed (*Kv*)	1,3

The task is solved so many times as existent means distances among the agro-blocks to the processing center.

In the following table 3 there are shown the results obtained solving this task for 1 Km distance.

Table 3. Results obtained

DECISION VARIABLES	
Load capacity (*CC*)	7309
Going speed (*Vi*)	1,98
Returning speed (*Vi*)	4,15
RESTRICTIONS	
Tangential force of adherence	14,00
Effective power in the going direction	50,00
Effective power in the returning direction	36,486
Total time of transportation	52,77
OBJECTIVE FUNCTION	
Intrinsic expenses	267
fuel consumption cost	258
Depreciation expenses of of the moving tractor	14
Depreciation expenses of the tows	15
INDICATORS OF MECHANICAL EFFICIENCY	
Expenses for the transport of a ton- kilometer	0,00007
Coefficient using of the traction effort	90,2
Index of metallic capacity	0,383
Coefficient using of the tangential power of the load	65,22
INTERMEDIATE VARIABLES OF INTEREST	
Mass of the 3 tows (Gr)	8394
Reduced coefficient of the resistance to the road (ψ)	0,0424
Critical time (2 hours)	7200

Implementation of the optimization task of the intrinsic expenses

For the solution of the model (14) – (16) in the study case the exhaustive search was used. The deciders determine the final composition of tows for every agro-block until the moment. In the elaboration of systems for the heuristic methods are used for presenting populations of the most promising decisions for entrepreneurial deciders.

CONCLUSIONS

On the basis of application of used methodology of Analysis and Synthesis of Engineering Systems was formulated the general mathematical model of the determination of basic technical characteristic of tractive combines and it decomposition in a disperse-conciliated structure of interrelated models.

The solution procedure of the interrelated system of models was applied with success to the determination of the basic technical characteristics of tractive combines for the transportation of the sugar cane from the cultivation blocks until the processing center.

The objective was satisfied when determining the optimal values of basic technical characteristics of the tractive combines, minimizing intrinsic expenses of the activity of transport of the crop.
Numerical solutions presented show that using elemental software as the solver of Excel could be used while solving the systems of models elaborated.

REFERENCES

[1] Álvarez S., V., Remolque para Granos. Patente 1909. Dado en la Ciudad de la Habana, 4 de agosto de 1997

[2] Álvarez S., V. Fundamentos para la determinación de la capacidad de carga de un remolque cañero durante su proceso de diseño. Revista Ingeniería Mecánica. Vol. 12. Número 2. Mayo-Agosto/2009.

[3] Álvarez S, V, and Arzola R. J. Determinación de la configuración geométrica óptima de la zona de carga en un remolque cañero. Revista Ingeniería Mecánica, Vol. 12. Número 3. Septiembre-diciembre/2009.

[4] Álvarez S. V. Determinación de las características técnicas básicas para el diseño de los conjuntos tractivos del transporte de la Cosecha cañera. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Holguín, Cuba, 2011

[5] Arzola R., J. Sistemas de Ingeniería. Editorial Félix Varela, , La Habana, 2000.

[6] Arzola R., J. Análisis y síntesis de sistemas de ingeniería. Monografía ISSN 978-958-261-299-0, www.bibliomaster.com, 2009

[7] Conçalves M., Dulce A. Escenario perspectivo tecnológico para el transporte rodoviario en Brasil. Dissertação para Obtenção do Título de
Mestre em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011, disponible en en:http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/anpet/PDF/5_153_AC.pdf

[8] Conçalves M., Dulce A.ndré; Influência do Grau de Especialidade dos Respondentes Numa Consulta Delphi em Relacão à Prospecção Tecnológica da Frota de Caminhões no Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

[9] Kaewtrakulpong, K. Multi objective optimization for cost reduction of mechanical harvesting and transportation in thailand. A dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy IN Agricultural Science. University of Tsukuba. Thailand, January del 2008.

[10] Szczcpaniak, C. AND Aragónr. Teoría del Automóvil. Editorial Félix Valera, La Habana, Cuba, 2000.

Correspondencia

José Arzola Ruiz
jarzola@cemat.cujae.edu.cu

V

MANEJO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y ENERGÉTICOS

Aporte Santiaguino 8, 2015: 309-326
ISSN 2070-836X

Ampliación de la capacidad de la red como parte de la transición de suministro de agua intermitente a suministro continuo

AMILKAR ERNESTO ILAYA-AYZA[1], JOAQUÍN IZQUIERDO[1], RAFAÉL PÉREZ-GARCÍA[1] Y ENRIQUE CAMPBELL[2]

RESUMEN

En el presente artículo se propone la cuantificación de la capacidad de una red de suministro de agua a través del caudal máximo teórico, en base al cual se puede evaluar los sistemas con suministro intermitente y analizar la factibilidad de realizar la transición a suministro continuo. Generalmente, las redes con suministro intermitente tienen una capacidad muy reducida, lo cual disminuye drásticamente las presiones de servicio y genera un suministro inequitativo. Por estas razones, el planteamiento de un proceso de transición de suministro intermitente a suministro continuo requerirá la ampliación de la capacidad de la red; esta ampliación se dificulta si el operador del servicio se encuentra en estado de escasez económica, por lo que se propone un proceso por etapas.

Palabras clave: capacidad de la red; ampliación de la capacidad de la red; caudal máximo teórico; suministro intermitente.

ABSTRACT

This article proposes to quantify the capacity of a water supply network through theoretical maximum flow, which allows us to evaluate systems with intermittent water supply and analyse the feasibility of transition to continuous supply. Usually, intermittent water supply networks have a very low capacity, which drastically reduces the pressures and produces an inequitable supply. For these reasons, the transition approach from intermittent supply to continuous supply requires increased network capacity; this expansion is hindered if the water company has economic scarcity, then we propose a staged process.

Keywords: capacity of water network supply; increase of network capacity; theoretical maximum flow; intermittent water supply.

INTRODUCCIÓN

La población mundial va aumentando a un ritmo acelerado, los recursos hídricos disponibles se reducen debido a la contaminación y a efectos del cambio climático; aumenta la severidad de las sequías y se incrementan los eventos extremos [1], lo cual genera gran presión sobre los servicios públicos. Estas razones hacen que la brecha

1 FluIng – IMM, Universitat Politècnica de Valencia, España.
2 Berliner Wasserbetriebe, Berlin, Alemania.

entre la oferta y la demanda sea cada vez más grande; en varios países el crecimiento urbano ha superado, y continúa superando, al crecimiento de la infraestructura de abastecimiento [2], estableciendo condiciones para que los operadores de los sistemas de abastecimiento de agua opten por tener suministro intermitente de agua (SIA) [3]. Gran cantidad de países en África, Asia y Latinoamérica cuentan con SIA como forma de acceso al agua [4].

Como parte de los objetivos de desarrollo del milenio, se busca reducir la pobreza y mejorar la salud de la población [5]; el logro de este objetivo es amenazado por: la escasez de agua, la garantía de suministro [6] y la calidad del agua de suministro. Aunque se considera que el agua potable suministrada por tubería es segura, muchos estudios demuestran que las deficiencias de la red, causadas por los SIA, pueden generar condiciones para no proporcionar agua segura y fiable [7]. La escasa fiabilidad de los sistemas de suministro de agua en los países en vías de desarrollo, puede ir socavando gran parte de la esperanza de mejoras en la salud pública [8].

Los SIA generalmente buscan reducir la demanda *per cápita* de agua, bajo una idea de ahorro en costes de inversión y operativos. Sin embargo, en lugar de ser una estrategia inteligente, trae consigo consecuencias negativas que prevalecen sobre los factores positivos [9], [10]. Los síntomas de carencia del sistema son niveles de presión muy bajos en la red y la insuficiencia en el suministro en los puntos más alejados y elevados. Generalmente, el suministro intermitente es adoptado por necesidad más que por diseño, lo cual se traduce en graves problemas en el sistema [11].

Debido a las horas de suministro limitadas, el factor pico se puede incrementar a valores de 4 a 6 [12] en SIA que tienen suministro simultáneo para toda la red. Esta situación exige grandes diámetros en la red para satisfacer los requisitos hidráulicos y de demanda. Según varios estudios [13], [14], los SIA's producen presiones insuficientes en los sectores o zonas más desfavorables. Este tipo de situaciones produce inequidad en el suministro [11].

La escasez económica y la mala gestión [10], son dos de las causas principales del origen de los SIA. Las mejoras del sistema en estos escenarios no pasan por el incremento de agua de las fuentes de suministro, sino por mejoras en la infraestructura y la gestión del sistema. La escasez económica no permite al operador realizar grandes inversiones, por lo que deben buscarse estrategias rentables y planificadas a largo plazo; en ese sentido, las mejoras graduales o por etapas pueden ser una buena opción.
El crecimiento de las ciudades se produce horizontalmente y/o verticalmente, como resultado de la construcción de nuevas viviendas [15]. Este crecimiento exige ampliar la capacidad de la red. De esta forma se busca corregir las anomalías o la reducción del desempeño del sistema [16].

Generalmente, los SIA's tienen una capacidad insuficiente en la red. Esta situación puede ser imperceptible debido a que se logra cubrir los caudales demandados a través de la diferenciación de horarios de suministro, la sectorización y la presencia de depósitos domiciliarios. La rehabilitación y ampliación de la capacidad de la red, en SIA's que busquen llegar a suministro continuo de agua (SCA), es una tarea que debe ser analizada cuidadosamente.

El presente trabajo evalúa el subsistema de la zona sur de la ciudad de Oruro (Bolivia), el cual fue construido para tener suministro continuo, pero actualmente tiene suministro intermitente. Se plantea una metodología para ampliar la capacidad actual de la red, como parte de las acciones que permitan llegar a SCA. En base a la clasificación de los SIA [10], el sistema solamente presenta escasez económica y problemas de gestión, no escasez física del recurso; de esta forma, solamente se analiza las acciones relacionadas con la mejora de la infraestructura.

Para ampliar la capacidad de la red, se propone un procedimiento que usa el caudal máximo teórico y el índice de ampliación, indicadores basados en el conocimiento de la curva de consigna del sistema. Adicionalmente, se considera el coste del tramo a reemplazar o a ampliar, con lo que se garantiza que cada selección de tramos en el proceso de ampliación priorice a los más económicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se propone un procedimiento para ampliar la capacidad de la red, como parte de un proyecto de transición gradual a SCA, considerando que el sistema tiene escasez económica.
En base a la red actual de la zona sur de Oruro, se busca identificar y priorizar el orden de aquellas tuberías que deben ser reemplazadas, bajo criterios económicos e hidráulicos, con el fin de ampliar gradualmente la capacidad de la red, para lograr una infraestructura necesaria para transformar el SIA a SCA, 24/7. También se usará el caudal máximo teórico, además del indicador de ampliación.

Curva de consigna

La curva de consigna es una herramienta muy útil en la operación y gestión de un sistema de suministro de agua. La curva representa la necesidad de producción energética en la cabecera o fuente, en relación al caudal inyectado al sistema, garantizando siempre la presión mínima en los puntos desfavorables.
Una red de distribución no posee una curva resistente definida [17], [18], pues esta cambia de pendiente en función de las exigencias de caudal y la resistencia impuesta en la red por parte de la demanda de los usuarios [19]; sin embargo, la curva de consigna mantiene una posición estable, lo cual es muy ventajoso y útil para la resolución de problemas relacionados con el suministro de agua, figura 1.

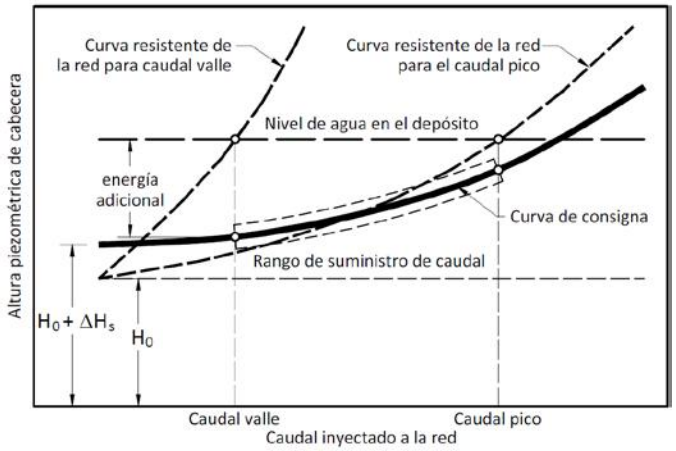


Figura 1. Representación de las curvas resistentes de la red y la curva de consigna

Para el cálculo de la curva de consigna, debe disponerse de un modelo matemático de la red fiable; de esta forma es posible evaluar las pérdidas de carga en función a los diferentes estados de carga soportados por la red. El seguimiento de la curva de consigna asegura en cada momento que la presión inyectada en las acometidas es la estrictamente necesaria para tener un buen servicio, por lo que se establece un ahorro energético; asimismo, el seguimiento de la curva reduce las fluctuaciones de las presiones en la red, reduciendo las implicancias negativas de estas variaciones en la vida útil de la red [18].

La curva de consigna es utilizada para regulación en sistemas de bombeo [18] y en la optimización energética de sistemas de suministro de agua [20], [21], [22]. Asimismo, una aproximación a la curva de consigna, es la utilizada como curva de modulación del flujo o curva de consigna para Válvulas Reductoras de Presión (PRV), en la optimización de la operación de los *District Metered Area* (DMA) [23], [24].

El diagrama de flujo expuesto en la figura 2, resume los pasos seguidos para la determinación de la curva de consigna, cuando se tiene solo un punto de alimentación. Teniendo el modelo matemático de la red, es necesario establecer la presión mínima de servicio en los nudos (P_{min}), este valor definirá el grado de servicio que se quiere alcanzar; posteriormente, se deberá generar escenarios para diferentes estados de carga *j*, definidos por el factor de punta *K* aplicado a la demanda de todos los nudos. Cada estado de carga establece un caudal inyectado en la red (Q_j), que requiere una altura piezométrica en la cabecera (H_a) que garantice la presión mínima en el nudo más desfavorable, el conjunto de puntos describe la curva de consigna.

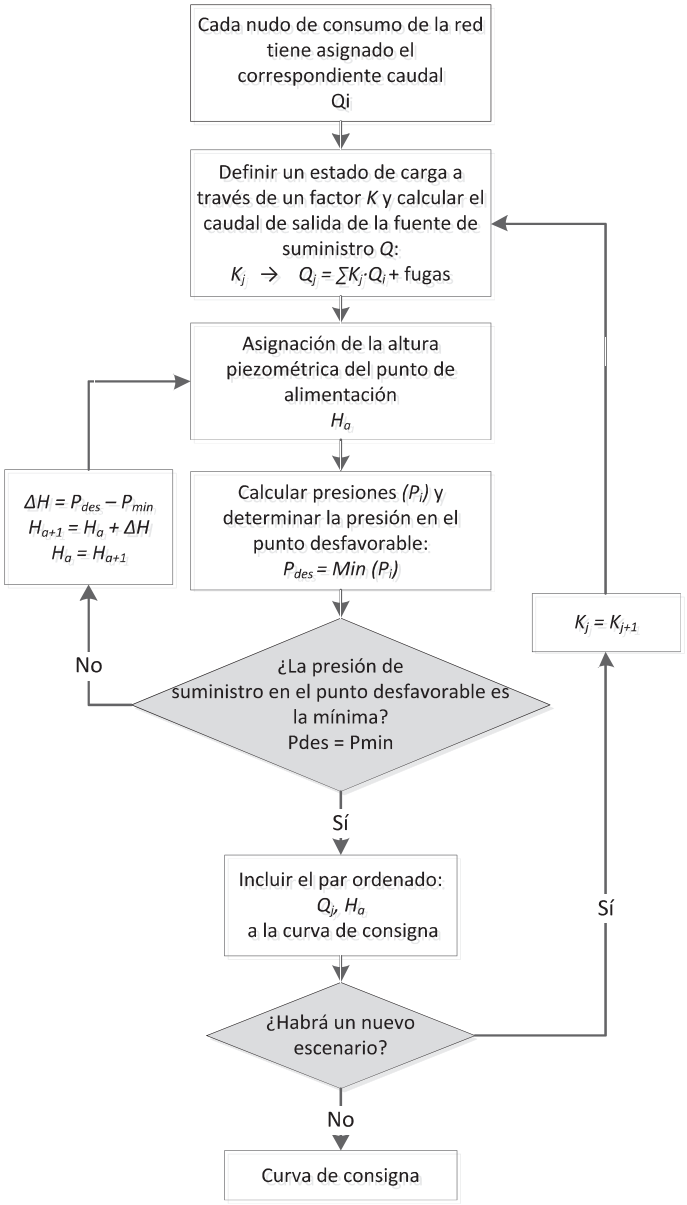


Figura 2. Diagrama de flujo para la determinación de la curva de consigna

Caudal máximo teórico

Al igual que en una tubería simple es posible calcular el caudal máximo que circula por la misma, tomando en cuenta las condiciones de contorno aguas arriba y abajo, como presiones o alturas manométricas, en una red puede hacerse lo mismo. Las

condiciones de contorno aguas abajo, son fijadas por la curva de consigna, la cual es elaborada para cumplir una presión mínima (P_{min}) definida. La condición aguas arriba, que limita las posibilidades hidráulicas de la red, está delimitada por la altura piezométrica disponible en el punto de suministro (Hs), puede ser un depósito de almacenamiento o una bomba. El caudal máximo teórico (Q_{maxt}) es determinado por la intersección de la curva de consigna y la curva de suministro, figura 3.

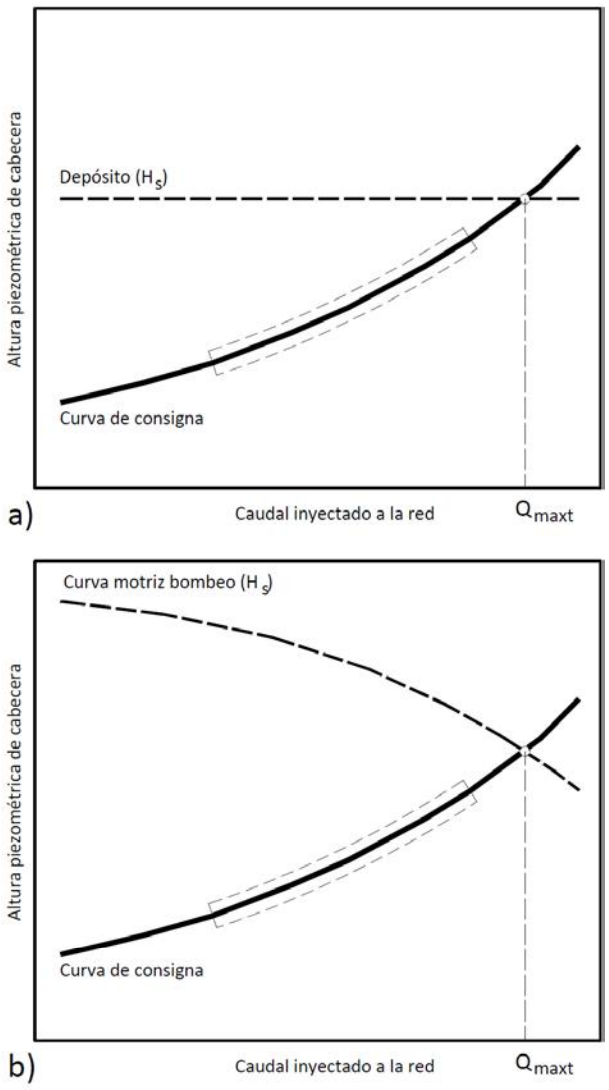


Figura 3. Caudal máximo teórico para el suministro por: a) un depósito, b) una bomba

El caudal máximo teórico, depende de la curva de consigna, la cual a su vez varía en función de la configuración de la red, de la modificación en los tramos o de la

presión mínima de servicio. Una forma de incrementar la capacidad de la red sin alterar la curva de suministro, es a través de la modificación de la pendiente de la curva de consigna, lo cual puede lograrse con el cambio de algunas características físicas en los tramos.
Generalmente, el concepto de capacidad de la red es considerado como un elemento cualitativo de la red, el cual puede ser identificado mediante la reducción de presiones y las quejas de la población [25].

Caudal máximo requerido

Para el proceso de ampliación de la capacidad de la red, es necesario tener un elemento de referencia, un punto objetivo, definido por el caudal máximo requerido (Q_{maxr}) y la altura piezométrica de cabecera correspondiente. En un SCA, el caudal máximo requerido corresponde al caudal máximo horario.
El caudal máximo requerido es calculado en base a la demanda de la población con las previsiones de crecimiento, pérdidas o fugas y otros usos o necesidades de agua en el futuro.

La capacidad de la red y su relación con el suministro intermitente

La capacidad de la red es un elemento clave para el diagnóstico de un sistema con suministro intermitente. Una red de suministro debe ser capaz de transportar el caudal demandado o requerido por la población, otorgando la suficiente presión de servicio en cada uno de los nudos. Por lo tanto, siempre que el caudal máximo teórico sea superior al caudal máximo requerido se cumplirá esta condición.

Para evaluar el funcionamiento de una red, tanto si tiene suministro intermitente como si tiene suministro continuo, debe relacionarse el caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido en suministro continuo. De esta forma es posible identificar las deficiencias en capacidad de la red, lo cual puede traducirse en un suministro continuo con presiones muy bajas o suministro intermitente.

Tabla 1. Relación entre el caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido y sus implicancias en el tipo de suministro

Caudal máximo teórico y Caudal máximo requerido	Observaciones referentes al tipo de suministro
$Q_{maxt} >> Q_{maxr}$	La red está sobredimensionada, las presiones de suministro son muy grandes. La red garantiza el suministro continuo. Si trabaja con suministro intermitente, permite el abastecimiento simultáneo sin la necesidad de sectorización.
$Q_{maxt} > Q_{maxr}$	La red trabaja de forma adecuada, las presiones de suministro son mayores a las demandadas. La red garantiza el suministro continuo. Si trabaja con suministro intermitente puede necesitar sectorización.
$Q_{maxt} = Q_{maxr}$	La red trabaja de forma óptima, las presiones de suministro son iguales o mayores a las demandadas. La red garantiza el suministro continuo. Si trabaja con suministro intermitente puede necesitar sectorización.
$Q_{maxt} < Q_{maxr}$	La red puede trabajar con suministro continuo pero de forma deficiente, las presiones de suministro son menores a la mínima requerida. Existe el riesgo de tener suministro intermitente. Para que siga trabajando con suministro continuo con presiones adecuadas requiere ampliación de la capacidad de la red.
$Q_{maxt} << Q_{maxr}$	La red no puede trabajar con suministro continuo por lo que se recurre al suministro intermitente, se obtiene presiones negativas en el modelo matemático de la red calculando en *Demand Driven Analysis*. Para que trabaje con suministro continuo requiere la ampliación de la capacidad de la red.

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento de ampliación de la capacidad de la red

El proceso de ampliación de la capacidad de la red, es muy útil para la transformación de una SIA a SCA, el proceso está basado en la modificación de las características de la red, con el fin de reducir la pendiente de la curva de consigna, hasta superar el valor del caudal máximo requerido, figura 4.

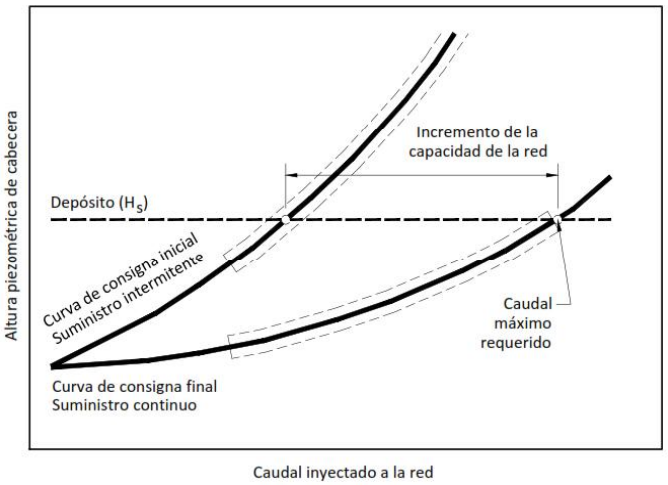


Figura 4. Proceso de ampliación de la capacidad de la red

En base a la red actual, cada uno de sus tramos es sustituido con un tramo de diámetro diferente. Este cambio es evaluado calculando el caudal máximo teórico; de esta forma, es posible calcular el incremento de capacidad que implica cada uno de los cambios, incorporando el coste de la sustitución del tramo se determina el índice de ampliación.

$$q_{p,d} = \frac{Q^{p,d}_{\max t} - Q^{o}_{\max t}}{C\left(D_p\right) \cdot L_p} \qquad (1)$$

donde:

$q^{p,d}$ = índice de ampliación, producido por la sustitución del tramo p con un nuevo diámetro d.
$Q^{o}_{max t}$ = caudal máximo teórico de la red original o de la red modificada en una etapa anterior.
$Q^{p,d}_{max t}$ = caudal máximo teórico, tras la sustitución del tramo p con un nuevo diámetro d.
$C(D_p)$ = coste por longitud del tramo p sustituido con diámetro D_p.
L_p = Longitud del tramo p modificado.

El índice de ampliación, es muy útil en la identificación de tuberías que reducen la capacidad de la red. Para caudales de ampliación pequeños, este indicador puede llegar a las mejores soluciones.

Otra forma de seleccionar los tramos a sustituir, priorizando el caudal de incremento de la red sobre el coste, es elevando la diferencia de caudal del índice de ampliación a un exponente *(n)*; de esta forma, inicialmente se modificarán los tramos a un diámetro mayor, lo cual más adelante permitirá compensar el coste inicial con la

sustitución de tramos de diámetro más pequeño.

$$q_{p,d}^{n} = \frac{\left(Q_{\max t}^{p,d} - Q_{\max t}^{o}\right)^{n}}{C\left(D_{p}\right) \cdot L_{p}} \qquad (2)$$

Al utilizar el índice de ampliación en cada una de las etapas de ampliación, se identifica a la tubería que corresponde modificar o reemplazar, aquella que presente el mayor valor de índice de ampliación.

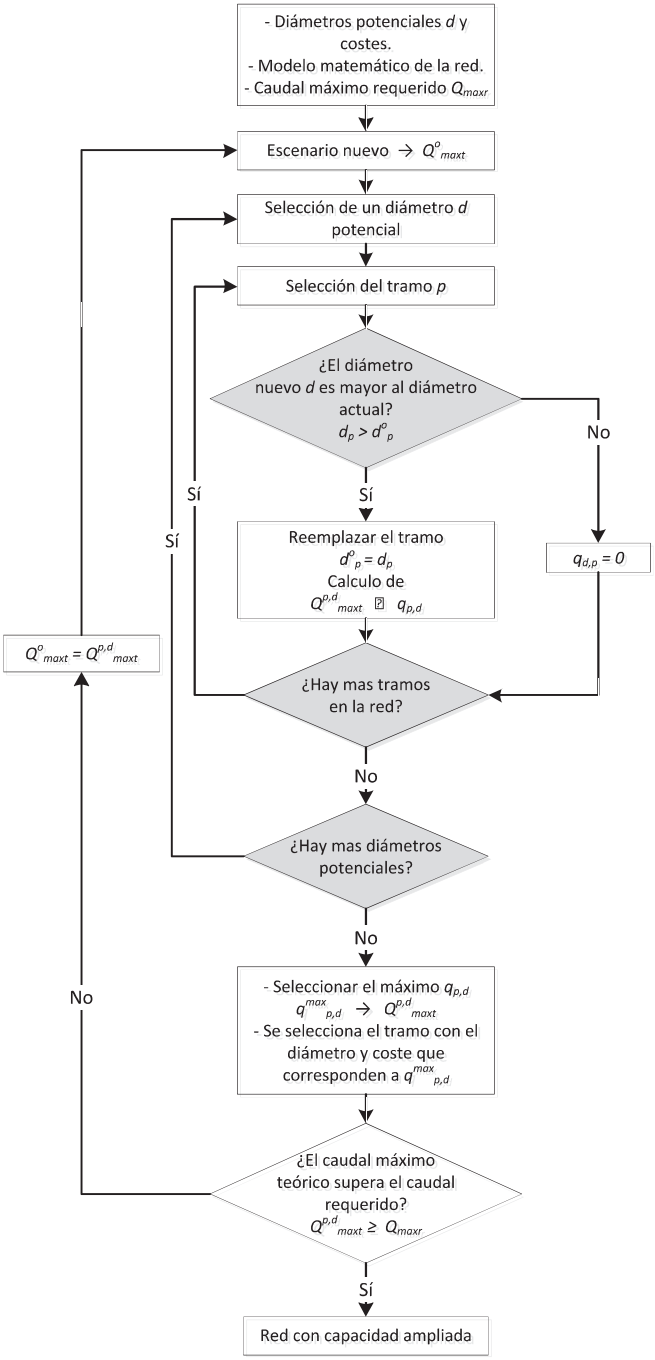


Figura 5. Diagrama de flujo para el proceso de ampliación de la capacidad de la red

El proceso detallado en el diagrama de flujo de la figura 5, permite definir una nueva configuración de la red, ampliando su capacidad, tras la sustitución de aquellos tramos que representan el menor coste. Asimismo, se conoce el orden de prioridad para la sustitución de los tramos, lo que permitirá planificar el proceso de ampliación de la capacidad de la red de forma gradual, el coste total podrá ser dividido en etapas en base a esta priorización.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El subsistema de la zona sur de Oruro (Bolivia) (figura 9), tiene una capacidad de la red actual de:

$$Q_{maxt} = 36.75 \text{ l/s}$$

El caudal máximo requerido para tener suministro continuo es:

$$Q_{maxr} = 91.98 \text{ l/s}$$

$$Q_{maxt} < Q_{maxr} \qquad (3)$$

La red tiene capacidad insuficiente, por lo que el suministro es intermitente, se necesita ampliar esta capacidad para lograr un suministro continuo.
Debido a la escasez económica del sistema, la ampliación será gradual o por etapas, por lo que se requiere conocer el orden de sustitución de los tramos. El monto disponible por año para el proceso de ampliación de la capacidad de la red es de Bs. 600 000.00 (seiscientos mil bolivianos) (equivalentes a 76 739.50 €). La presión mínima requerida al ingreso de cada sector es 20 mca.
Los costes unitarios, que incluyen todos los elementos necesarios para la sustitución de los tramos en función del diámetro de instalación son presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Costes unitarios para la sustitución de tramos en base al diámetro

Diámetro (mm)	Coste unitario Bs/m
75	385.02
100	399.66
150	442.46
200	502.93
250	608.39
300	703.17
350	832.61
400	1030.54
500	1371.51

Cuando se realiza el cambio por tramos de mayor diámetro, el caudal máximo teórico de la red se va incrementando, (figura 8). Este incremento es más notorio en algunos tramos como en P-1, P-2, P-3, P-4, P-11, P-13, lo es aún más en las tuberías P-12 y P-17. Estos tramos son los más representativos de la red, son cuellos de botella, por lo que cualquier acción de ampliación de la red debe pasar por ellos. En los tramos restantes, la ampliación del diámetro produce incrementos mínimos a la capacidad de la red, por lo que su importancia en el incremento de la capacidad de la red es mínima. Generalmente, el primer cambio de diámetro superior al actual produce cambios significativos en la capacidad de la red, los incrementos de diámetro siguientes no producen el mismo efecto, la curva tiende a un comportamiento asintótico (figura 6).

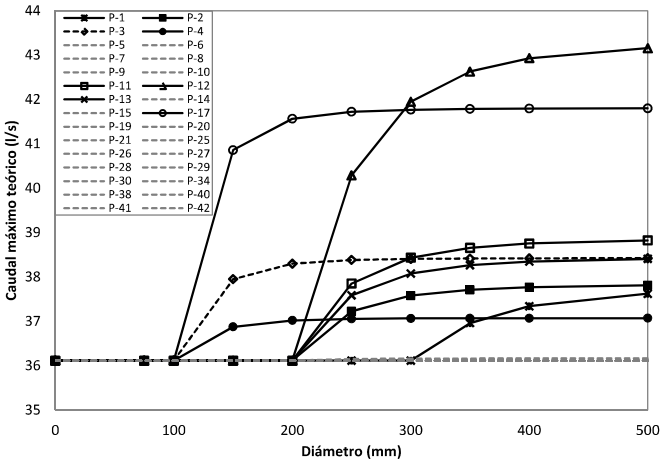


Figura 6. Incremento de la capacidad de la red en base a la modificación del diámetro en los tramos

El proceso de ampliación fue elaborado con el índice de ampliación *q*, para $n = 1$, $n = 2$ y $n = 3$. Dependiendo del caudal máximo requerido al que se quiera llegar conviene el uso de uno u otro indicador (figura 7). El uso del indicador con exponente superior a 1, permite llegar a costes menores cuando el caudal de ampliación es mayor. Sin embargo, cuando el caudal máximo requerido es menor puede usarse $n = 1$. De todas formas, es bueno realizar la comparación entre indicadores.

Para llegar al caudal máximo requerido de 91.98 l/s, el menor coste es el que produce el indicador para $n = 2$, la curva de consigna se modifica gradualmente en cinco pasos, definiendo el orden de actuación para la mejora gradual (figuras 8 y 9). Con esta priorización, se constituyen tres etapas de inversión (tabla 3 y figura 9).

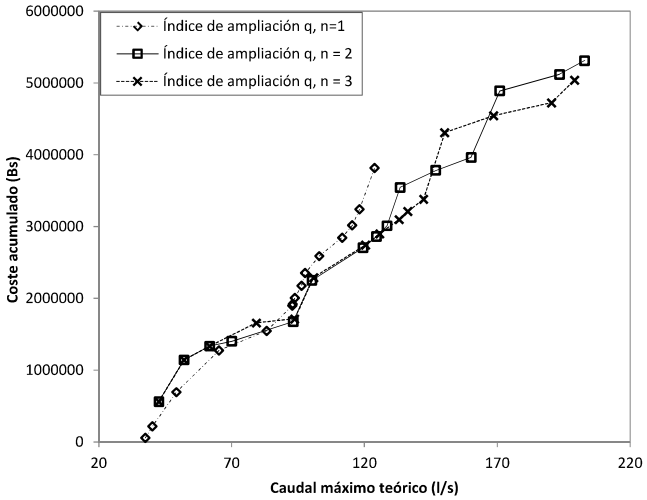


Figura 7. Comparación del coste acumulado en función del índice de ampliación

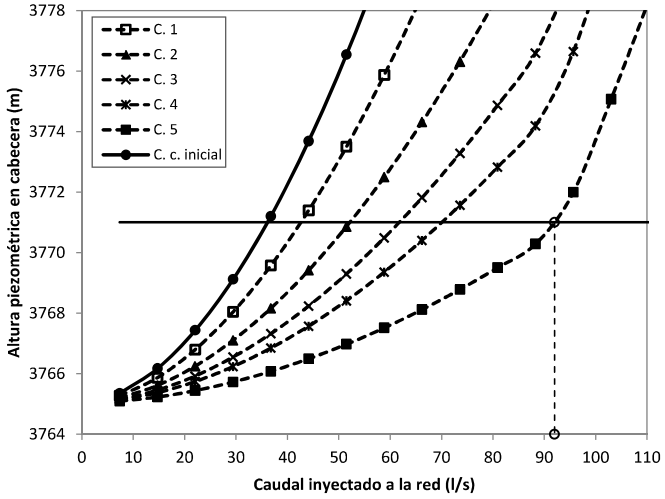


Figura 8. Evolución de la curva de consigna en el proceso de ampliación

Tabla 3. Resultados del proceso de ampliación de la capacidad de la red

Nº	q_{max} n=2	Tramo sustituido	Coste tramo (Bs)	Coste etapa (Bs)	Q_{maxt} incrementado (l/s)
1	0.075	P-12	562303.90	562303.90	6.51
2	0.156	P-17	581264.92	581264.92	9.52
3	0.485	P-11	190736.95	532875.95	41.04
	1.002	P-2	68333.76		
	1.956	P-13	273805.24		
		Total:		1676444.77	57.07

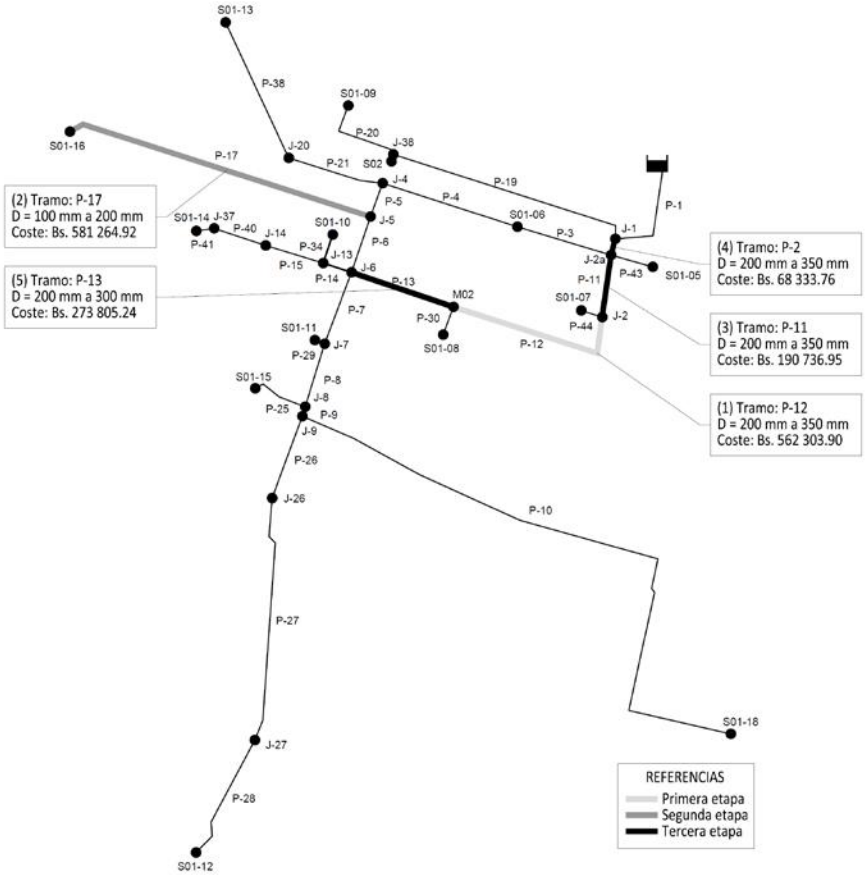


Figura 9. Tuberías modificadas para la ampliación de la capacidad de la red

Debido al incremento de las pérdidas reales que se producen tras la transición de suministro intermitente a suministro continuo [3] y que, consecuentemente, incrementa el caudal máximo requerido, es necesario implementar medidas de Control Activo de Fugas de forma simultánea al incremento de la capacidad de la red. Esta medida permite evitar el sobredimensionamiento y la pérdida de agua.

CONCLUSIONES

Aunque su uso es aplicado generalmente a sistemas con suministro continuo, la curva de consigna es una herramienta muy útil para la evaluación y mejora de sistemas con suministro intermitente.

El planteamiento del caudal máximo teórico, permite otorgar a la capacidad de la red su verdadera dimensión, le otorga el carácter cuantitativo necesario para la toma de decisiones en la evaluación, gestión, mantenimiento, explotación y diseño de una red de agua potable. Específicamente, en el presente trabajo, permite evaluar un sistema con suministro intermitente, analizar su origen y proponer soluciones.

Un proceso de ampliación de la capacidad de la red, como parte de la transición de suministro intermitente a suministro continuo en entornos de escasez económica, es difícil de ejecutar en entornos de escasez económica, por lo que priorizar los tramos a sustituir gradualmente, en base al mayor impacto conseguido sobre la calidad del servicio al menor coste, es un criterio muy conveniente.

REFERENCIAS

[1] Arnell N. W. 2006. *Climate Change and Water Resources: A Global Perspective, of Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 167-176.

[2] Islam S. y Alekal P. 2009. Achieving 24x7 water and waterloss management in intermittent supply environment. http://www.iwawaterwiki.org/xwiki/bin/view/Articles/Achieving24x7waterandwaterlossmanagementinintermittentsupplyenvironment. [Consulta: 15-10-2013].

[3] Charalambous B. 2012. *The Effects of Intermittent Supply on Water Distribution Networks, de Water Loss*. Manila, Philippines.

[4] Van den Berg C. y Danilenko A. 2011. *The IBNET Water Supply and Sanitation Performance Blue Book*. Washington D.C.: The World Bank.

[5] ONU. 2000. *Declaración del Milenio*. New York.

[6] Fan L., Liu G., Wang F., Ritsema C. J. y Geissen V. 2014. *Domestic water consumption under intermittent and continuous modes of water supply*. Water Resource Management, vol. 28, pp. 853-865.

[7] Kumpel E. y Nelson K. L. 2013. *Comparing microbial water quality in an intermittent and continuous piped water supply*. Water Research, vol. 47, pp. 5176-5188.

[8] Hunter P. R., Zmirou-Navier D. y Hartemann P. 2009. *Estimating the impact on health of poor reliability of drinking water interventions in developing countries*. Science of the total environment, vol. 407, pp. 2621-2624.

[9] Woo C. K. 1994. *Managing water supply shortage: Interruption vs. pricing*. Journal of Public Economics, vol. 54, pp. 145-160.

[10] Totsuka N., Trifunovic N. y Vairavamoorthy K. 2004. *Intermittent urban water supply under water starving situations*. De 30th WEDC International Conference, Vientiane, Lao.

[11] Vairavamoorthy K., Gorantiwar S. D. y Pathiranaa A. 2008. *Managing urban water supplies in developing countries*. Climate change and water scarcity scenarios, Physics and Chemistry of the Earth, vol. 33, p. 330–339.

[12] Dahasahasra S. V. 2007. *A model for transforming an intermittent into a 24x7 water supply system*. Geospatial today, pp. 34-39.

[13] Vairavamoorthy K., Akinpelu E., Lin Z. y Ali M. 2001. *Design of sustainable water distribution systems in developing countries*. De ASCE conference, Orlando, Florida.

[14] De Marchis M., Fontanazza C. M., Freni G., La Loggia G., Napoli E. y Notaro V. 2010. *A model of the filling process of an intermittent distribution network*. Urban Water Journal, vol. 7, nº 6, p. 321–333.

[15] Neelakantan T., Rammurthy D., Smith S. T. y Suribabu C. 2014. *Expansion and Upgradation of Intermittent Water Supply System*. Asian Journal of Applied Sciences, vol. 7, pp. 470-485.

[16] Alegre H. y Covas D. 2010. *Gestão patrimonial de infra estruturas de abastecimento de água. Uma abordagem centrada na reabilitação, Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico.

[17] Bosserman B. E. 1999. *Pump system hydraulic design*. Water distribution systems handbook, McGraw-Hill Professional Publishing.

[18] Martínez F., Vidal R. y Andrés M. 2009. *La regulación de los sistemas hidráulicos, de Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua*. 3ª ed., vol. II, Valencia,

España, ITA-UPV.

[19] Shammas N. K. y Wang L. K. 2015. *Water Engineering: Hydraulics, Distribution and Treatment*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.

[20] Planells P., Tarjuelo J. y Ortega J. 2001. *Optimización de estaciones de bombeo en riego a la demanda*. Ingeniería del agua, vol. 8, nº 1, pp. 39-51.

[21] Planells P., Carrión P., Ortega J., Moreno M. y Tarjuelo J. 2005. *Pumping Selection and Regulation for Water-Distribution Networks*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 131, nº 3, pp. 273-281.

[22] Oyarzún S. A. 2011. *Optimización energética de las redes de abastecimiento de Murcia, Valencia*. Universitat Politècnica de València.

[23] Prescott S. L., Ulanicki B. y Shipley N. 2003. *Analysis of district metered area (DMA) performance*. Advances in water supply management, Taylor & Francis, pp. 59-67.

[24] Ulanicki B., AbdelMeguid H., Bounds P. y Patel R. 2008. *Pressure control in Dstrict Metering Areas with boundary and internal pressure reducing valves*. The 10th International Water Distribution System Analysis Conference WDSA2008, Kruger National Park, South Africa.

[25] Alegre H., Baptista J. M., Cabrera Jr. E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W. y Parena R. 2006. *Performance indicators for water supply services*. IWA publishing.

Correspondencia

Amilkar Ernesto Ilaya-Ayza
amilay@upv.es

Aporte Santiaguino 8, 2015: 327-346
ISSN 2070-836X

Estrategias para la modelación de una red de abastecimiento de agua a partir de información limitada

LAURA PASTOR JABALOYES[1], BRUNO MELO BRENTAN[2], ENRIQUE CAMPBELL[3], MARIO ALEJANDRO NUDELMAN[4], RAFAEL PÉREZ-GARCÍA[1] Y JOAQUÍN IZQUIERDO[1]

RESUMEN

En la actualidad, sobre todo en países emergentes o en vías de desarrollo, un gran número de medianas y pequeñas poblaciones se enfrentan al problema del aumento de la demanda de agua potable; si bien no disponen de herramientas y medios para dar una solución fundamentada desde el punto de vista técnico. El empleo de modelos estratégicos de la red de suministro sería, para dichas poblaciones, un potente soporte en la toma de decisiones, particularmente dentro del ámbito de la planificación de esta infraestructura en el medio y largo plazo. No obstante, el contexto en el que se presenta esta necesidad suele estar caracterizado por la escasez, entre otros datos no menos importantes, de información básica para la aplicación de técnicas de modelación convencionales, sumadas a una situación sociopolítica y económica que no permite paliar esta carencia en el corto plazo a través de los recursos técnicos habituales. En consecuencia, la pregunta que surge es: bajo estas condiciones, que afectan fuertemente a la infraestructura, ¿cómo se puede conseguir un modelo matemático de una red de abastecimiento de agua que arroje resultados útiles para la toma de decisión en la planificación estratégica? El objetivo principal de este trabajo es dar respuesta a la pregunta planteada. Para ello, se pretende complementar la metodología convencional de modelación con el aprovechamiento de información secundaria y procedente de poblaciones distintas a la del problema a resolver, esencialmente a través de técnicas de clasificación, como el Análisis Clústering y los Support Vector Machines. En la fase de calibración, se pretende absorber la incertidumbre de una realidad que dista de estar descrita de forma clara y unívoca con la asistencia de técnicas y conceptos propios del Soft Computing: los algoritmos genéticos y las funciones de pertenencia de los subconjuntos difusos. Esta estrategia ha sido aplicada al caso de estudio de Nogoyá, población perteneciente a la provincia de Entre Ríos, Argentina. La misma ha permitido obtener un modelo que arroja resultados coherentes con la realidad, si bien es importante destacar que serían necesarios otros estudios complementarios para evaluar la incertidumbre asociada a dichos resultados.

Palabras clave: algoritmos genéticos; calibración; datos limitados; modelación; sistema de distribución de agua.

ABSTRACT

Nowadays, especially in emerging and developing countries, a large number of medium and small towns are facing the problem of increasing demand for drinking water, although these don't have any tools and resources to provide a logical solution

1 FluIng – IMM, Universitat Politècnica de Valencia, España.
2 Universidade Estadual de Campinas, Brasil.
3 Berliner Wasserbetriebe, Berlin, Alemania.
4 Universidad Autónoma de Entreríos, Oro Verde, Argentina.

from the technical point of view. The use of strategic water supply network models would be a powerful support for the decision-making process for these towns, particularly within the scope of the planning of this infrastructure in the medium and long term. However, the context in which this need usually appears is characterized by the lack of basic information for the application of conventional modeling techniques (among other equally important problems), combined with a bad socio-political and economic situation, which does not allow to reduce this gap in the short term through the usual technical resources. Consequently, a question arises: under these circumstances, which heavily affect the infrastructure, how can one get a mathematical model of a water supply network which gives an useful outcome for the decision making process in the strategic planning? This project's main target is to answer this question. To do this, it aims to supplement conventional modeling methodology with the use of secondary information coming from towns different to the town problem to solve, essentially through sorting/classification techniques such as Clustering Analysis and Support Vector Machines. In the calibration phase, it pretends to absorb the uncertainty of a reality that is away from being described clearly and unequivocally, with the assistance of techniques and concepts of Soft Computing: genetic algorithms and membership functions of fuzzy subsets. This strategy has been applied to the study case of Nogoyá, municipality located in the region of Entre Rios, Argentina. It allowed getting a model that gives results consistent with reality. Nevertheless, additional studies will be needed to evaluate the uncertainty associated with these results.

Keywords: calibration; genetic algorithm; limited data; modeling, water distribution system.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura de abastecimiento de agua potable juega un papel fundamental en la vida de los seres humanos a los que da servicio. El gestor de dicha infraestructura debe conocer el estado y planificar la evolución de ésta para asegurar su sostenibilidad en el tiempo, lo cual significa que de forma continuada se proporciona agua a los habitantes de una población en cantidad suficiente, con la calidad necesaria y a un coste razonable, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

Los modelos estratégicos de la red de suministro de agua son un instrumento básico que asiste a la planificación a medio y largo plazo de la infraestructura de abastecimiento de agua. Constituyen el fundamento de los estudios que requiere dicha planificación, sin cuyos resultados las decisiones tomadas carecen de un soporte técnico robusto. No obstante, la elaboración de esta herramienta solicita una cantidad de información notablemente exhaustiva en el espacio y el tiempo, que no siempre está disponible.

En la actualidad, sobre todo en países en vías de desarrollo, un gran número de medianas y pequeñas poblaciones se enfrentan al aumento de la demanda o al envejecimiento de su infraestructura de suministro de agua, si bien no poseen un

instrumento como los modelos matemáticos de la red para dar solución a estos problemas con una base sólida según criterios técnicos. Esta necesidad se plantea en un contexto caracterizado por la escasez, entre otros datos no menos importantes, de información básica para la aplicación de técnicas de modelación convencionales, sumadas a una situación sociopolítica y económica que no permite paliar esta carencia en el corto plazo a través de los recursos técnicos habituales.

El objetivo principal de este estudio es conseguir un modelo matemático de una red de abastecimiento de agua que arroje resultados útiles para la toma de decisiones en la planificación estratégica que afecta a esta infraestructura, partiendo de una situación de información disponible limitada. En esta línea, existen investigaciones inspiradoras con el propósito de reducir las necesidades de recogida de datos, como es el caso de [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**], que usa la generación de escenarios aleatorios y el concepto de entropía para encontrar la menor cantidad de puntos de presión conocida que ofrece mayor información y, a partir de éstos, prevé dicha variable en otros puntos con series históricas disponibles mediante el entrenamiento de una red neuronal. Por otra parte, [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**] intenta estudiar de qué forma la teoría de los subconjuntos difusos ("fuzzy set") puede asistir en el análisis de la incertidumbre inherente a algunas de las variables que intervienen en un modelo matemático obtenido por métodos convencionales, como es el caso de la rugosidad de las tuberías. Si bien los anteriores artículos parten de entornos controlados, existen investigaciones realizadas *ad hoc* para enfrentarse a problemas con carencias de información. Un ejemplo de ello es [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**], en el que se presenta una herramienta que permite estimar el trazado de la red, cuando éste es desconocido, a partir de información secundaria fácilmente accesible, como un mapa de las calles; otro ejemplo es [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**], que emplea la potencia de distintos algoritmos genéticos para la calibración de modelos elaborados a partir de información limitada, de ahí que introduzcan como variable de decisión la demanda base de los nudos, entre otros.

Para conseguir el objetivo planteado, se pretende complementar la metodología convencional de modelación con el aprovechamiento de información secundaria y procedente de poblaciones que se sitúan en la misma región que la del problema a resolver, gracias a la asistencia de técnicas estadísticas para el análisis de datos y el uso de herramientas englobadas dentro del Soft Computing. No obstante, los procedimientos descritos parten de unas condiciones específicas de información disponible limitada y, en este sentido, no pretenden dar respuesta a cualquier casuística que pueda ofrecerse, aunque posiblemente provean de ideas para la resolución de problemas de la misma índole. Esto se debe a que el trabajo realizado está estrechamente ligado al caso de estudio que se presenta en esta misma ponencia: la red de abastecimiento del municipio de Nogoyá (Entre Ríos, Argentina).

MATERIALES Y MÉTODOS

Dentro del proceso completo de modelación de un sistema de distribución de agua (SDA) se pueden distinguir: la fase de elaboración del propio modelo matemático, en la que se define cada uno de sus elementos, y la fase de calibración, en la que se valida el mismo a través del ajuste de los parámetros de la red [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]. A su vez, dichas fases se dividen en sub-etapas. Las estrategias propuestas para mitigar la escasez de información disponible se centran en las de análisis y asignación de consumos registrados y ajuste del modelo. Por otra parte, se lleva a cabo un clústering de tuberías, relacionado con su rugosidad, y uno de nudos, tocante a los coeficientes de descarga, con el propósito de reducir el número de grados de libertad en el ajuste del modelo.

Análisis y asignación de consumos registrados

Los consumos constituyen uno de los principales *inputs* en la elaboración del modelo de una red. Si bien, en ocasiones no existe ningún dato robusto acerca del mismo, en tanto que la facturación del servicio de suministro de agua no se realiza a través del volumen registrado por un parque de contadores. En tal caso, se plantea caracterizar dicho consumo a través de los datos de micromedición de otro abastecimiento con rasgos análogos a los del que se pretende modelar, tal y como se procede en ciertas ocasiones al diseñar una nueva instalación ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]). Estos datos de micromedición deben estar relacionados con las características de la propiedad inmobiliaria a la que corresponden, como, por ejemplo, la superficie construida y total de una parcela, información que constituye el denominador común entre la población del caso a resolver y la del que proceden los datos de micromedición. Para el aprovechamiento de estos últimos, se expone a continuación un procedimiento vertebrado por la hipótesis de que resulta esperable que propiedades inmobiliarias de características similares, pertenecientes a distintos municipios de la misma región, posean como grupo una variabilidad parecida en relación al consumo. Esta hipótesis encuentra fundamento en estudios como [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]. Dicho procedimiento, en primer lugar, busca mediante técnicas de clústering una estructura en los datos de micromedición disponibles en relación a las características de las propiedades inmobiliarias. Las tipologías determinadas sirven como dato de entrada para el entrenamiento y validación de un C-Support Vector Maching ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]), con el cual se busca catalogar a su vez las propiedades inmobiliarias del caso a resolver según la estructura encontrada. A continuación, se aplica la técnica de asignación de cargas más conveniente, con el objetivo de adjudicar las propiedades inmobiliarias de los distintos tipos que le corresponden a cada nudo de consumo definido. El siguiente paso es aplicar un análisis clústering a estos últimos, con la intención de agruparlos en clases según la cantidad de propiedades inmobiliarias de cada tipo que llevan asociadas. Para cada clase resultado y a partir de los datos de micromedición disponibles, se generan aleatoriamente 1000 individuos de la variable *demanda base de los nudos de consumo de la*

clase i, muestra que permite definir una función de densidad que caracteriza dicha variable.
Los *softwares* utilizados para ejecutar los procedimientos expuestos son R Statistics (en especial, el paquete *cluster* para el análisis clústering ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**])), la librería de Matlab LibSVM ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]), que también está implementada en el paquete de R *e1071*, y Visual Basic Application (VBA) de Microsoft (MS) Excel.

Proceso de calibración del modelo

Sobre escenarios en los que la información de entrada es limitada, tanto en la fase del modelo como en la de calibración, se hace necesario responder a: ¿cómo absorber la incertidumbre de una realidad que dista notablemente de estar descrita de forma clara y unívoca? Para ello se acude a técnicas y conceptos propios del Soft Computing: los algoritmos genéticos y las funciones de pertenencia de los subconjuntos difusos.
El empleo de algoritmos genéticos en el ajuste del modelo de una red tiene amplio recorrido ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]). En este caso, se justifica su uso por ser una herramienta potente a la hora de enfrentar problemas no lineales de alta complejidad, así como por llevar a cabo búsquedas múltiples en el espacio de solución, lo cual, junto con el hecho de que utilizan reglas de transición probabilísticas, asegura el poder encontrar distintos sub-espacios de soluciones útiles ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]). Estas propiedades permiten conseguir el propósito de obtener varias configuraciones del sistema (posibles modelos diferentes) que alcancen un valor de la función objetivo considerado como admisible. Estas configuraciones y sus respectivos resultados se estudiarán para estimar el rango de variación de las variables que intervienen, que podrían interpretarse como bandas de confianza.
Por otro lado, el concepto de funciones de pertenencia de los subconjuntos difusos se toma para introducir en la función objetivo la incertidumbre asociada a las observaciones de presiones y de caudal inyectado (datos de calibración), así como la inherente a la demanda base de los nudos de consumo. En consecuencia, no se pretende, por ejemplo, que los resultados de cada individuo probado en el proceso de búsqueda reproduzcan con exactitud los valores observados, ya que los registros de los que proceden se han empleado asumiendo fuertes hipótesis que introducen incertidumbre. Por el contrario, únicamente se intenta discernir entre resultados "buenos", "aceptables" e "inadmisibles". Esta forma "vaga" de calificar un resultado, permite absorber parte de dicha incertidumbre. La función de pertenencia define un subconjunto difuso A del referencial X en tanto que empareja un elemento de X con un valor del intervalo [0, 1] ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]), el cual calibra en qué grado ese elemento forma parte de A. Esto es precisamente lo que se pretende al definir funciones de penalización que tienen como *input* los resultados y cuyo *output* determina el valor alcanzado por la función objetivo. Estas funciones se han definido en el caso de la demanda base de los nudos de consumo, a

partir de las funciones de densidad obtenidas anteriormente, mientras que, en el caso de las presiones y el caudal inyectado observados, a partir de las mediciones disponibles.

El software empleado para implementar estas ideas es Evolver, un programa auxiliar de MS Excel que tiene como principal propósito la resolución de problemas de optimización mediante algoritmos genéticos. El enlace entre la herramienta de MS y Evolver facilita el empleo del Toolkit de Epanet a través del lanzamiento de distintas subrutinas en etapas concretas del proceso completo de búsqueda. Dicho proceso se resume en el diagrama de la figura 1, en el que, dada una hoja de cálculo abierta con Evolver correctamente configurada, en cada iteración, después de que éste realice las operaciones de cruce y mutación, se lanza una subrutina que adquiere los valores de las variables de decisión pertenecientes al nuevo individuo y los introduce en el modelo elaborado. Esa misma subrutina, lleva a cabo una simulación en Epanet y los resultados que arroja son registrados en la hoja de cálculo original, de forma que ya se está en disposición de evaluar la función objetivo. Dicho valor es leído por Evolver, a partir del cual determina la aptitud del individuo. Seguidamente, comprueba los criterios de parada: si se cumplen, detiene el proceso de búsqueda; en caso contrario, continúa con la siguiente iteración.

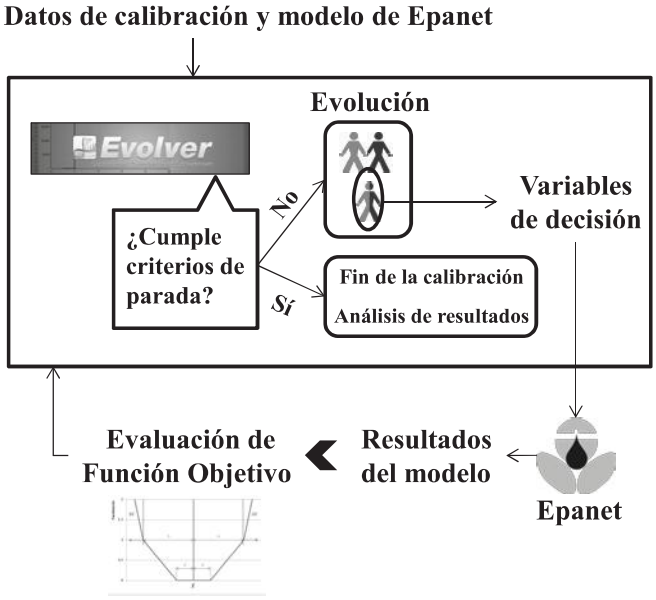


Figura 1. Esquema del proceso de calibración con Evolver del modelo de una red de abastecimiento de agua

Las variables de decisión incluidas en este proceso de calibración están ligadas a las resoluciones adoptadas en la fase del modelo. Así, las fugas se representan mediante

el elemento emisor, implementado en Epanet ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]), y, por ello, el *coeficiente de descarga* es una de dichas variables de decisión. En relación a los nudos de consumo, tal y como se ha hecho en otros estudios dentro del mismo contexto ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]), se tienen en cuenta la *demanda base* y el *patrón* que describe ésta a lo largo del periodo simulado, que es único para la totalidad del sistema. Por último, se suma la *rugosidad* de las tuberías.

Clústering de tuberías y nudos

La cantidad de variables de decisión es considerable, de ahí que sea interesante efectuar un clústering de tuberías y nudos. Ambos se basan en la hipótesis de que elementos de características parecidas sometidos a condiciones similares se comportaran de forma análoga. En el caso del clústering de tuberías, siguiendo las ideas acerca de los factores que afectan a la rugosidad expuestas en [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**] y propuestas por Mostkov en [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**], se tienen en cuenta como variables de entrada las *coordenadas del punto medio* de la tubería (2 variables numéricas), ya que la ubicación de este elemento está relacionada con el régimen hidráulico al que está sometido, y su *material*, *edad* y *diámetro* (2 variables nominales y 1 numérica, respectivamente). En el caso del clústering de nudos en relación al coeficiente de descarga, al ser consultados los distintos términos del Índice Estructural de Fugas en [**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**] queda explicada la elección de las variables *coordenadas* y *cota* del nudo (3 variables numéricas), asociadas indirectamente con la presión a la que está sometido este elemento; *longitud de tubería ponderada* (1 variable numérica), considerando el esquema completo de la red; y *densidad de acometidas* (1 variable numérica), estimadas a partir del número de viviendas.

Caso de Estudio

El presente estudio gira en torno a la red de abastecimiento de agua potable del municipio argentino de Nogoyá, cuya población ronda los 24000 habitantes. Es cabecera del departamento con igual nombre y perteneciente a la provincia de Entre Ríos, que tiene como capital la ciudad de Paraná, ubicada a 100 km al Noroeste de Nogoyá (Figura 2).

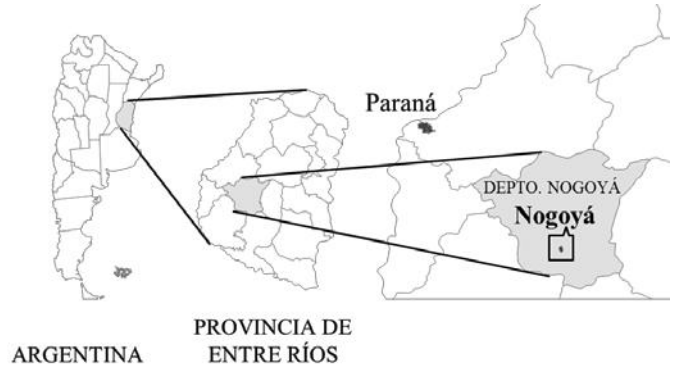


Figura 2. Ubicación geográfica de Nogoyá a escala estatal, provincial y departamental

El sistema de abastecimiento está subdividido en tres sectores, cada uno alimentado por sus propios puntos de producción. Sólo ha podido ser modelado completamente uno de ellos, en tanto que es el único en el que se dispone de datos de calibración. Este sector es el más grande: abastece a 18600 habitantes y alcanza una longitud total de tubería de 81.9 km, aproximadamente. Dispone de dos puntos de alimentación: el de mayor importancia, compuesto por siete pozos que bombean agua al tanque principal del sistema (500 m^3 de capacidad), y el que cumple la función de reforzar la presión en las zonas más distantes del primero, constituido por un pozo conectado de forma que puede inyectar agua directamente a la red o impulsarla para el llenado de un tanque auxiliar (85 m^3 de capacidad). Aguas abajo del tanque principal hay instalada una válvula reductora (VRP) que controla las presiones en cabecera de red, para asegurar que éstas no alcanzan un límite tal que genera roturas en las tuberías más antiguas con déficit de resistencia. Añadir que en casi la totalidad de las parcelas hay construida una única vivienda y ésta corresponde a una edificación de tipo unifamiliar de máximo 2 plantas. El 50% de las mismas, aproximadamente, disponen de tanque domiciliario. Por otro lado, señalar que todas las actividades económicas que producen consumos de agua notables disponen de sus pozos privados para abastecerse.
A continuación, se exponen las operaciones realizadas en la mayor parte de las sub-etapas de la modelación de dicho sector, así como la información de entrada disponible en cada una de ellas.

Esqueletización de la red

El conocimiento que se tiene de la topología de la red y de las características básicas de las tuberías y nudos de conexión es medianamente bueno. No obstante, la forma en la que está presentada en general esta información no es aprovechable directamente, por lo que su post-proceso con la asistencia de un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es ineludible y trascendente para los siguientes pasos. A partir del esquema completo de la red obtenido de dicho post-

proceso, se lleva a cabo la operación de simplificación, que queda ceñida en este caso a la supresión de los ramales, los cuales se sustituyen por su punto inicial (figura 3). El resto de tuberías, aun siendo de pequeño diámetro, se incluyen en el modelo, ya que *a priori* no se puede evaluar su capacidad de transporte.

Por otra parte, los puntos de producción están definidos con poca precisión. Es por ello que el conjunto formado por el tanque principal y los siete pozos asociados se modela como un punto de inyección simplificado, compuesto por un embalse al que se le aplica un patrón de alturas que reproduce la cota de energía aguas abajo de la VRP, punto en el que la presión es conocida. Éste se conecta directamente a la red mediante una tubería ficticia, que no genera ningún impacto en el comportamiento del modelo. El otro punto de producción, dado que normalmente trabaja inyectando agua directamente a red las 24 horas del día, se ha reducido a un embalse cuya cota de energía coincide con la profundidad a la que está instalada la bomba, ya que se desconoce tanto la curva de descenso dinámico en el pozo como el nivel estático, enlazado mediante la misma a la tubería de conexión correspondiente.

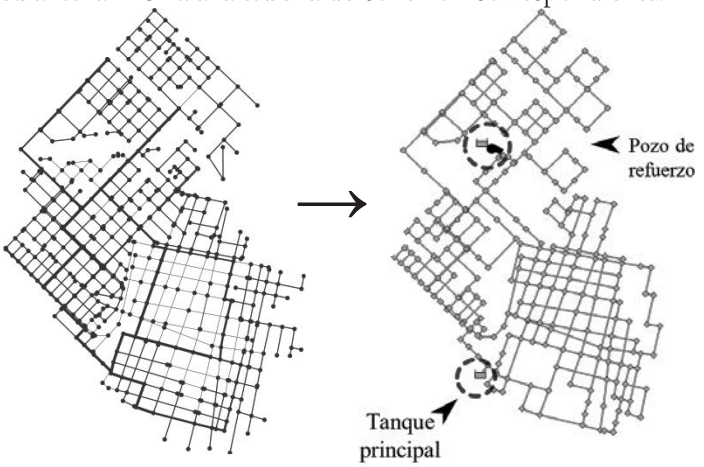


Figura 3. A la izquierda está el esquema completo de la red, a la derecha el modelo simplificado con los puntos de producción identificados

Análisis y asignación de consumos registrados

El mayor *hándicap* a la hora de enfrentarse a la modelación del sistema de abastecimiento de Nogoyá proviene de la inexistencia de micromedición. La solución propuesta a este inconveniente aprovecha los datos sobre consumo obtenidos del parque de contadores de María Grande, un municipio de la misma zona que Nogoyá y de menor población (9000 habitantes). Dichos datos están emparejados con la superficie total de la parcela y la superficie construida correspondientes. Una vez post-procesados los registros de parcelas de ambos municipios, se aplica la metodología propuesta anteriormente. Así pues, se prueban distintas técnicas, medidas de disimilaridad (cuando era posible) y cantidad de agrupaciones para el clústering de parcelas de María Grande ([**¡Error! No se encuentra el origen de la**

referencia.]), pues *a priori* no se sabe cuál es la combinación idónea. De entre todas las soluciones alcanzadas, se selecciona aquella que genera varios clústeres con un tamaño importante, quedando en segundo plano la compacidad de los mismos, tal y como puede observarse en la figura 4. El resultado es el dato de entrada para el entrenamiento y validación de un C-SVM. El registro depurado de 989 vectores procedente de María Grande se divide en tres grupos: entrenamiento (60%), validación (20%) y test (20%). A su vez, el grupo de validación se sub-divide en 13 grupos, de forma que el desempeño del C-SVM se evalúa a través de la media de los errores cometidos en cada uno de ellos. Por un lado, los grupos de entrenamiento y validación son empleados para encontrar el valor óptimo del parámetro C, que regula la importancia relativa que se concede a las clasificaciones incorrectas realizadas por parte del C-SVM, estando comprendidos los valores candidatos entre 1 y 1500, separados por intervalos de 50 unidades. Por otro lado, se comprueba la precisión del C-SVM entrenado con el grupo de test: el 97.2 % de los vectores incluidos en él son correctamente clasificados. En consecuencia, se puede afirmar que la calibración del C-SVM es válida y está en disposición de ser aplicado a los datos de Nogoyá. El resultado de esta última operación también está plasmado en la figura4.

A continuación, se procede a la asignación de cargas. Para ello, con la asistencia de un software de SIG, se generan las dos capas que se muestran en la figura 5. Ambas han sido editadas con el propósito de que a cada nudo de consumo le corresponda como mínimo 20 parcelas. Se escoge este umbral en un intento de alcanzar una solución de compromiso entre: a) una distribución uniforme de nudos de consumo a lo largo de la red; b) un nivel de agregación de consumos que permita suponer una modulación de éstos suave, no afectada por la aleatoriedad intrínseca a la demanda. El tipo de asignación por la que se ha optado sería una combinación entre la realizada por *mallas* y *zonas* ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]). En concreto, se ha distinguido áreas de influencia que comprenden una malla, sus nudos y los ramales que parten de la misma. A su vez, dichas áreas cubren un número entero de manzanas, en las que se ubica parcelas de distinta clase. Es decir, las áreas de influencia delimitadas constituyen la entidad espacial empleada para relacionar parcelas con nudos de consumo.

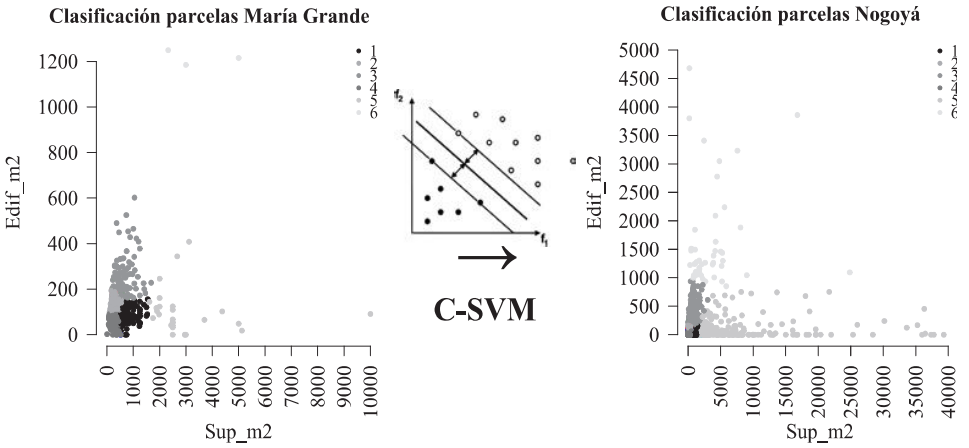


Figura 4. A la izquierda, se aprecia el resultado final del clústering de parcelas de María Grande, en el que se han distinguido 6 tipologías distintas de parcela según su superficie total y construida. A la derecha se encuentra la clasificación de las parcelas realizada mediante el C-SVM, entrenada y validada con los datos procedentes de María Grande.

Seguidamente, se ejecuta un clústering de nudos de consumo para agruparlos según la cantidad de parcelas de cada tipología que les corresponden. En este caso, se ha elegido la combinación de técnica, disimilaridad y cantidad de clústeres que minimiza el coeficiente de variación para las distintas tipologías de parcela dentro de cada clase o agrupación de nudos de consumo diferenciada.



Figura 5. A la izquierda, se encuentra la capa de polígonos que representan las áreas de influencia definidas y, a la derecha, la de nudos de consumo, ambas pertenecientes al modelo de la red de Nogoyá

Para finalizar, a partir de los datos de María Grande, se genera una muestra aleatoria de observaciones simuladas de demanda base de cada variable *nudos de consumo de la clase i*. Posteriormente, ésta es empleada para la estimación no paramétrica de tipo Kernel (o Núcleo) de las funciones de densidad, que caracterizan la demanda base de cada una de dichas variables (figura 6).

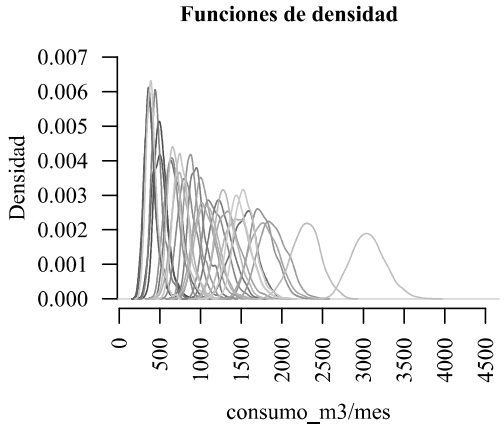


Figura 6. Funciones de densidad correspondientes a la demanda base para cada clase definida en el clústering de nudos de consumo

Análisis y asignación de consumos no registrados

En este caso, el consumo no contabilizado se reduce a las fugas en la red. Éstas se han modelado mediante los emisores de EPANET, es decir, se han considerado dependientes de la presión. El exponente del emisor se ha dejado con el valor por defecto, 0.5, mientras que los coeficientes de descarga se ajustarán durante la calibración del modelo.

Ajuste del modelo

La información que afecta a la fase de calibración es escasa. Se dispone únicamente de mediciones del caudal inyectado desde el tanque principal. El registro abarca doce días de la primera quincena de diciembre de 2014, permitiendo establecer el periodo de simulación en una semana y el paso de tiempo en una hora. El valor representativo para los días con dos registros fue la media y, a la curva resultado, se le aplicó una media móvil previa, con el objetivo de suavizar oscilaciones de la medición asociadas a ruido. En cuanto a las presiones, por una parte, está el registro de un medidor ubicado aguas abajo de la VRP, coincidente en fechas con el del caudal inyectado, al que se le ha aplicado operaciones análogas a las descritas. Por otra parte, están las mediciones de presión en once puntos distribuidos por el sector

modelado. Éstas se tomaron de forma espaciada en el tiempo y, además, no cubren en ninguno de dichos puntos una semana completa. A esto se suma, que los registros pertenecientes a tres de ellos no han podido emplearse: en el caso de uno, por estar ubicado en un ramal que ha sido suprimido en el modelo final, y en el de los otros dos, porque la toma de datos se produce sólo en otoño y/o invierno, mientras que el registro de caudal inyectado es de finales de primavera.

Las variables de decisión que intervienen, por un lado, son la *rugosidad*, los *coeficientes de descarga* y los *factores de demanda* (tabla1). En el caso de esta última, los límites impuestos no plantearon ningún inconveniente, en cambio, en el caso de las dos primeras, cuya cantidad total de elementos es resultado del clústering de nudos y tuberías nombrado en la metodología, tuvieron que llevarse a cabo un número considerable de pruebas para ajustar los rangos (tabla 2). Por otro lado, los límites de la *demanda base* de los nudos de consumo están definidos por las funciones de densidad (figura 6).

Tabla 1. Número total de elementos por cada tipo de variable de decisión

Variables de decisión	**Número total**
Rugosidades de las tuberías	25
Coeficientes de descarga	39
Factores de demanda	168
Demanda base de los nudos de consumo	160

Tabla 2. Rangos mínimos y máximos para las variables de decisión (excepto la *demanda base*)

	Mínimo	**Máximo**
Rugosidades de las tuberías	0.01	0.35
Coeficientes de descarga	0.01	0.2
Factores de demanda	0	2.2

Un aspecto de gran importancia en el proceso de calibración es la definición de la función objetivo (FO). La adoptada en este caso debe tender a 0 y tiene cinco términos (1). Los dos primeros hacen referencia a las mediciones de presión y caudal inyectado. En tanto que la incertidumbre e imprecisión inherentes a dichos datos son considerables, emularlos con la mayor exactitud posible no tiene razón de ser. Por consiguiente, se ha acudido al concepto de función de pertenencia de los subconjuntos difusos y, a partir de la información proporcionada por las propias mediciones, se ha establecido tres zonas: una central, en torno al valor representativo de la medición, en la que si cae el resultado, éste se considera "bueno" y, por ello, la penalización es 0; otra más amplia, adyacente a la anterior, donde el resultado es "aceptable" y la penalización aumenta linealmente hasta 1; de quedar fuera de la anterior zona, la solución se considera "inaceptable" y de ahí que se aplica una

penalización fuerte en otro orden de magnitud (figura 7). Cabe añadir que estos dos términos se calculan a partir del promedio de las penalizaciones en cada hora de una serie observada, debido a que los registros de presión abarcan periodos de tiempo con distinta extensión ([**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**]).

$$FO = P + Q + DBp + DBc + RD \qquad (1)$$

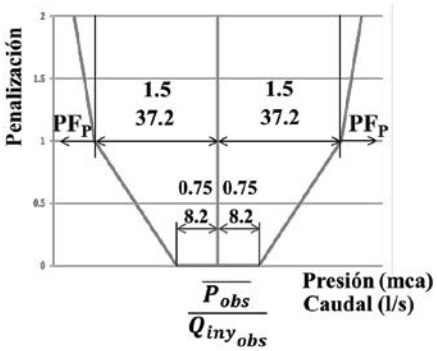


Figura 7. Función de penalización asociada a los caudales inyectados y presiones observados, evaluada para cada hora

Tabla 3. Valor máximo admisible para cada término de la FO, en su caso.

Término de la FO	**Descripción de la variable a la que va asociado**	**Valor máx. admisible**
P	Presiones observadas.	8
Q	Caudal inyectado medido.	2
DBp	Distribución de la población.	1
DBc	Demanda base de los nudos de consumo.	1
RD	Restricción dura.	-

Los siguientes dos términos están relacionados con la demanda base. El primero intenta favorecer que el caudal consumido en una zona sea proporcional a la población que habita en ella. El segundo pretende guiar la demanda base, seleccionada para cada nudo de consumo, hacia el valor medio definido por la función de densidad correspondiente, que es, al fin y al cabo, el más probable. Con el último término se consigue no perder tiempo de simulación en configuraciones del

sistema en las que el caudal consumido está muy próximo al inyectado, para el caso que nos ocupa.

Es importante añadir que cada uno de los términos definidos tiene un valor admisible (tabla 3), de forma que, una solución se considerará como buena siempre y cuando no supere dichos valores admisibles en cada uno de los términos.

Restaría señalar dos aspectos: las pruebas realizadas se configuraron escogiendo combinaciones aleatorias de los parámetros del algoritmo genético, dado que a priori no se podía saber cuál de ellas iba a provocar un mejor desempeño del mismo; por su lado, el criterio de parada de *progreso* es el más adecuado entre los disponibles en Evolver. Éste depende del porcentaje (%P) y número de iteraciones (NI). Finaliza el proceso de búsqueda cuando, durante el NI fijado, el valor de la función objetivo no varía en el %P establecido, por lo que es el menos estricto y depende del resultado que se va obteniendo. Sin embargo, en previsión de que ese criterio no terminase en un tiempo razonable y teniendo en cuenta que los recursos computacionales eran limitados, se empleó también el *número máximo de iteraciones*.

RESULTADOS

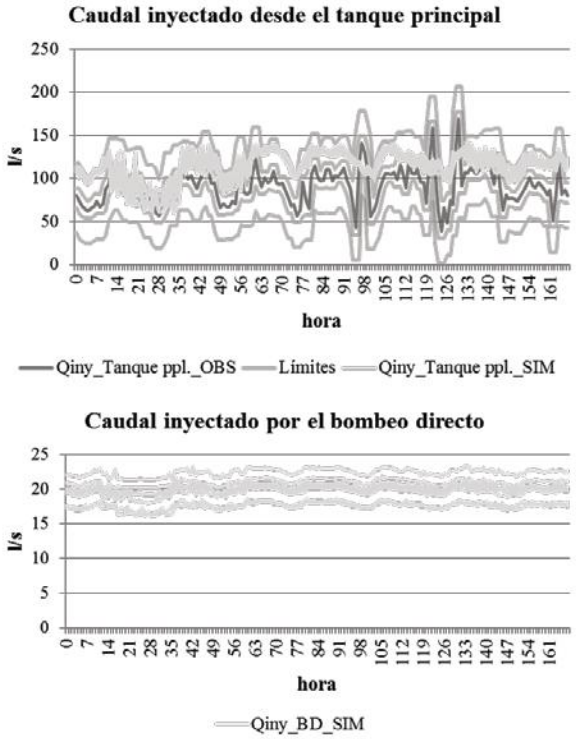


Figura 8. Resultados de las calibraciones consideradas como admisibles en referencia al caudal inyectado

Del análisis de las soluciones que se consideran admisibles, se observa sobre el caudal inyectado, consumido y fugado que: a) las distintas variables presentan mayor rango de variación el martes, único día en el que no existen mediciones de presión; b) las variables desconocidas, como el caudal inyectado mediante bombeo directo (figura 8), son las que absorben su propia incertidumbre, mostrando un rango de variación con una amplitud considerablemente mayor al de aquellas que están más acotadas; c) en ninguna de las simulaciones llevadas a cabo ha sido posible encontrar una configuración del sistema que situara el volumen fugado por debajo del 50% del volumen total inyectado; d) la modulación del caudal inyectado desde el tanque principal no ha conseguido reproducirse correctamente, sobre todo los dos picos nocturnos que tienen lugar jueves (figura 8, horas número 96-98) y viernes (figura 8, horas número 120-122) a la media noche. Estas dos últimas observaciones parecen ser indicios de que parte de la demanda debería haber sido modelada como dependiente de la presión, atendiendo al hecho de que en este sistema existe una fuerte presencia de tanques domiciliarios.

Con respecto a las variables de decisión, se observa en el caso de la *rugosidad* que aquellas tuberías pertenecientes a clústeres cuyo rango de variación posee un intervalo intercuartílico menor que 0.1 conducen agua hasta zonas que abastecen a mayor número de parcelas, así como zonas en las que se ha cargado mayor cantidad de fugas en los distintos modelos. Una posible explicación es que, al tener mayor incidencia en las presiones de las distintas configuraciones del sistema encontradas, no todos los posibles valores del rango tienen cabida a la hora de emular los datos empleados para la calibración. Las agrupaciones que han alcanzado una mediana por encima de 0.2 son de distinto diámetro, material y edad. Por otro lado, los grupos a los que se les ha adjudicado un *coeficiente de descarga* con una mediana por encima de 0.2 no corresponden a aquella zona con mayor número de acometidas y longitud de tubería ponderada por nudo. Los clústeres con un intervalo intercuartílico por debajo de 0.05 tienden normalmente a tener medianas bajas. La lectura general parece indicar que existe un área a la que se le ha asignado un volumen importante de fugas y, en consecuencia, ello conlleva a que queden acotados los posibles valores que toman un amplio número de puntos en otras zonas. Para finalizar, los *factores de demanda*, por su lado, presentan una gran variabilidad y las *demandas base* de los nudos se mueve por todo el rango permitido, no centrándose en la zona donde la penalización es cero.

En relación a las presiones alcanzadas en el sistema, en la figura 9 se muestra la ubicación de aquellos puntos en los que, en alguna de las configuraciones del sistema encontradas, o la presión mínima está por debajo de 5 mca y/o la máxima por encima de 20 mca. La distribución de los mismos es acorde a lo esperado: los nudos con presiones mínimas relativamente bajas están alejados de los puntos de producción o tienen una cota alta con respecto a los puntos de su alrededor; por su parte, los nudos con presiones máximas relativamente altas se encuentran o cerca de los puntos de producción o bien en zonas de cota baja.

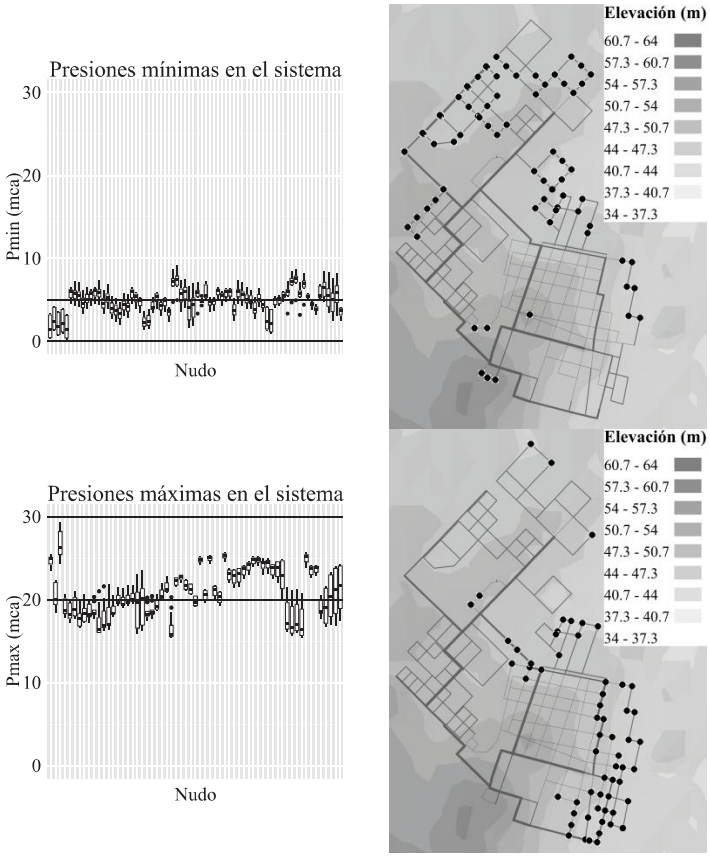


Figura 9. Las figuras superiores hacen referencia a los puntos en los que se dan presiones mínimas por debajo de 5 mca en alguna de las configuraciones del sistema encontradas, las inferiores a los de presión máxima por encima de 20 mca

Para finalizar este sub-apartado, se presenta la figura 10 con los resultados obtenidos en uno de los puntos en los que se dispone de registro de presiones, pero que ha sido descartado como dato de calibración. La modulación mostrada en las series observada y simulada es innegablemente parecida, en consecuencia, podría afirmarse que la bondad del ajuste del modelo resulta razonablemente buena, salvando las distancias.

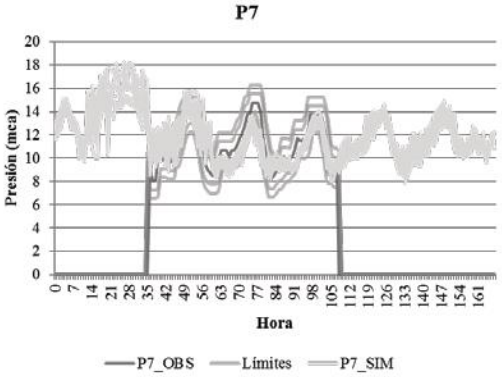


Figura 10. Gráfico de resultados correspondientes a uno de los puntos que disponen de presiones observadas, pero que han tenido que ser descartadas por distintas razones

CONCLUSIONES

Pese a que la metodología propuesta permite obtener un resultado que tiene en cuenta la incertidumbre, plantea una serie de incógnitas aún por resolver. Particularmente, se desconoce la sensibilidad de los resultados obtenidos frente a las decisiones trascendentes tomadas a lo largo de la fase de elaboración del modelo y, en consecuencia, quedan planteadas preguntas como: ¿Cuál es la repercusión del umbral elegido sobre el número mínimo de parcelas por nudo de consumo y la distribución adjudicada a éstos? ¿De qué manera afecta el número de clústeres seleccionado cada vez que se ha aplicado esta técnica? ¿Es imprescindible modelar parte de la demanda como dependiente de la presión? Por su lado, en la fase de calibración existen infinidad de posibles soluciones que emulan de forma admisible los caudales y presiones observados, ya que en el problema de búsqueda planteado interviene un gran número de variables y hay pocos datos de calibración disponibles. Algunas de estas soluciones no tendrán sentido, por lo que se cree necesario acotar el espacio de las mismas a través de las restricciones aplicadas a las variables, si bien, como contrapartida se genera la posibilidad de descartar alguna solución factible. Por tanto, establecer los límites de las variables es una decisión que debe ser tomada habiendo realizado una cantidad de pruebas considerable. Además, las bandas de resultados proporcionados por las distintas configuraciones del sistema admisibles, están sujetas también al número de procesos de calibración llevados a cabo. Es por esto que se cree necesario realizar estudios complementarios, con el propósito de establecer directrices fundamentadas acerca de los límites de las variables y la cantidad total de pruebas a ejecutar. A dichos estudios, habría que añadir el análisis de casos controlados, en los que sea posible confeccionar un modelo de la red aplicando los procedimientos convencionales y, a su vez, simular distintas casuísticas con respecto a las condiciones de información limitada, de forma que los resultados

obtenidos con la metodología presentada tendrían con qué compararse y sería posible evaluar el error que se comete empleando la misma. Con ello, también cabría la posibilidad de validarla y de comprobar algunas de las hipótesis de partida asumidas como ciertas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean dar las gracias al Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universitat Politècnica de València, que concedió una ayuda económica que permitió realizar una estancia con el propósito de llevar a cabo trabajo de campo.

REFERENCIAS

[1] Ridolfi, E., Servili, F., Magini, R., Napolitano, F., Russo, F. y Alfonso, L. 2014. "Artificial neural networks and entropy-based methods to determine pressure distribution in water distribution systems". Procedia Engineering 89, pp. 648-655.

[2] Haghighi, A. y Asl, A. Z. 2014. **"**Uncertainty analysis of water supply networks using the fuzzy set theory and NSGA-II". Engineering Applications of Artificial Intelligence 32, pp. 270-282.

[3] Mair, M., Rauch, W. y Sitzenfrei, R. 2014. **"**Improving incomplete water distribution system data". Procedia Engineering 70, pp. 1055-1062.

[4] Takahashi, S., J. G. Saldarriaga, J.G., Vega, M.C. y Hernández, F. 2010. "Water distribution system model calibration under uncertainty environments". Water Science & Technology, 10.1, pp. 31-38.

[5] López, G., Fuertes, V. y Ayza, M. 1996. "Modelización Matemática de una Red en Funcionamiento". Ingeniería hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua (Ed. Cabrera *et al*), vol. II, pp. 729-760, España.

[6] García-Serra, J., Pérez, R. y Ayza, M. 1996. "Redes de Distribución. Trazados y Criterios Prácticos de Diseño". Ingeniería hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua (Ed. Cabrera *et al*), vol. II, pp. 549-602, España.

[7] Cubillo, F., Moreno, T. y Ortega, S. 2008. "Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid". Cuaderno de I+D+I 4, Canal Isabel II, España.

[8] C.-C. Chang y C.-J. Lin. 2013. "LIBSVM: A Library for Support Vector Machines". Department of Computer Science, National Taiwan University.

[9] Kaufman, L., y Rousseeuw, P.J. 1990. "*Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*". Wiley, New York.

[10] C.-W. Hsu, C.-C. Chang y C.-J. Lin. 2010. "A Practical Guide to Support Vector Classification". Department of Computer Science, National Taiwan University.

[11] Haestad Methods, Walski, T., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W. M. y Beckwith, S. 2003. "Advanced Water Distribution Modeling and Management". Haestad Press, Waterbury, USA.

[12] Valero, S. 2010. "Arquitectura de Búsqueda Basada en Técnicas Soft Computing para la Resolución de Problemas Combinatorios en Diferentes Dominios de Aplicación". Tesis Doctoral por la Universitat Politècnica de València.

[13] Trillas, E. *et al.* 1994. "*Fundamentos e Introducción a la ingeniería Fuzzy*". Omron Electronics, Madrid.

[14] Rossman, L. 2001. "Manual de usuario de Epanet 2". Traducción al español de Fernández Martínez Alzamora, Grupo IDMH. Dep. Ingeniería Hidráulica y M.A., Universidad Politécnica de Valencia.

[15] Echávez, G. 1997. "Increase in losses coefficient with age for small diameter pipes", J. Hydraul. Eng.123:157-159.

[16] Idelchik, I. E.1994. "*Handbook of hydraulic resistance*", 3rd ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, Fla.

[17] Winarni, W. 2009. "Infrastructure Leakage Index (ILI) as Water Losses Indicator", technical note, Civil Engineering Dimension, Vol. 11, No. 2, 126-134. ISSN 1410-9530 print / ISSN 1979-570X online.

[18] Pastor, L. 2005. "Propuesta de estrategias para la modelación de un sistema de abastecimiento con información limitada. Caso de estudio del municipio de Nogoyá (Entre Ríos, Argentina)". Tesina del Máster de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València.

Correspondencia

Laura Pastor Jabaloyes
pastolova@gmail.com