



Título del Trabajo Fin de Máster:

***DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN  
SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE  
AGUA DE LLUVIA COMO RECURSO  
COMPLEMENTARIO***

Intensificación:

***HIDRÁULICA URBANA***

Autor:

***LUQUE GONZÁLEZ, GEMA MARÍA***

Director/es:

***PEREZ GARCIA, RAFAEL***

***IZQUIERDO SEBASTIAN, JOAQUIN***

Fecha: **SEPTIEMBRE, 2013**



Título del Trabajo Fin de Máster:

**DISEÑO MULTI OBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO RECURSO COMPLEMENTARIO**

Autor: **LUQUE GONZÁLEZ, GEMA MARIA**

Tipo	A <input type="checkbox"/>	B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	RAFAEL PEREZ GARCIA		Fecha de Lectura	SEPT. 2013
Codirector1	JOAQUIN	IZQUIERDO		
Codirector2	SEBASTIAN			
Tutor				

Resumen:

**RESUMEN**

*El suministro de agua a las poblaciones tiene un papel básico en el desarrollo económico y social.*

*En los países en vías de desarrollo el acceso a agua potable juega un papel relevante en la mayoría de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, es por ello que en los proyectos de nuevos sistemas de abastecimiento (SDA) es básico un diseño que utilice tecnologías apropiadas. Dichas tecnologías deberán tener en cuenta los costes y medios necesarios para la operación y el mantenimiento de estos sistemas, siendo necesario prestar especial atención a la realidad social y a la disponibilidad de recurso hídrico en los contextos en los cuales van a dar servicio.*

*Por otro lado, en un contexto desarrollado, la escasez y variabilidad de la disponibilidad de recurso hídrico, el creciente interés por la gestión integral del agua y el nexo agua-energía, así como por la optimización de la operación y el mantenimiento de los SDA, además del creciente interés por el diseño urbano sensible al agua (WSUD, en sus siglas en inglés) lleva a que se planteen sistemas de abastecimiento descentralizados, teniendo en cuenta la cosecha de agua de lluvia (RWH, en sus siglas en inglés) como recurso complementario, como alternativa a los sistemas centralizados convencionales de abastecimiento de agua.*

*El objetivo principal de la presente tesina es proponer un modelo alternativo de sistema de abastecimiento de agua descentralizado teniendo en cuenta la cosecha de agua en su versión de sistema dual como recurso complementario. Siendo propuesta una metodología para el diseño multiobjetivo con el uso de AG y una evaluación complementaria de la operación para cada posible solución, logrando una visión global de cada una de las posibles soluciones que constituirán el frente de Pareto.*

*En este trabajo se aborda la problemática de la disponibilidad de recurso hídrico como factor limitante en el diseño e implementación de un SDA nuevo, siendo este problema tenido en cuenta en un horizonte de 25 años en el diseño propuesto.*

*Con el cambio de "filosofía" de sistema centralizado al de sistema descentralizado, añadiendo la alternativa de suministro complementario de agua descentralizado, se conseguirá "amortiguar" la*

*escasez de recurso hídrico y un ahorro en la inversión en infraestructuras, así como en energía e insumos, tanto en los nuevos sistemas como en los que se precisa una ampliación de la cobertura. Para desarrollar lo citado anteriormente se hará uso del programa EPANET y de su Toolkit sobre Visual Basic, siendo desarrollado un programa que permita utilizar los Algoritmos genéticos para la optimización de la función objetivo propuesta y los cálculos requeridos para obtener las soluciones que constituirán el frente de Pareto.*

#### **SUMMARY**

*The water supply to the population has a key role in economic and social development.*

*In developing countries access to safe drinking water plays an important role in most of the Millennium Development Goals, this is the reason why in water supply systems new projects (SDA) a design using appropriate technologies is basic. These technologies should take into account the costs and resources necessary for the operation and maintenance of these systems, being necessary to pay special attention to the social reality and the availability of water resources in the contexts where they will serve.*

*On the other hand, in a developed context, scarcity and variability of water resource availability, the growing interest in integrated water management and water-energy nexus, and in optimizing the operation and maintenance of the SDA in addition to the growing interest in water sensitive urban design (WSUD, its acronym in English) leads to suggest decentralized supply systems, taking into account rain water harvesting (RWH, its acronym in English) as a supplementary resource, as an alternative to conventional centralized water supply.*

*The main objective of this thesis is to suggest a decentralized alternative model of water supply system taking into account water harvesting in its dual system version as a supplementary resource. Being proposed a methodology for multi-objective design using GA and an additional assessment of the operation for each possible solution, getting a comprehensive overview of each possible solution what will make up the Pareto front.*

*This paper deals with problems of water resource availability as a limiting factor in the design and carrying out of a new SDA, being this problem taken into account in a horizon of 25 years in the proposed design.*

*With the change of "philosophy" of centralized to decentralized system, adding decentralized water complementary supply alternative, it will get "alleviate" the shortage of water resources and savings in infrastructure investment, as well as in energy and inputs both in new systems as in which an extension of coverage is needed.*

*To develop the aforementioned it will use EPANET software and its Toolkit in Visual Basic, being developed a program that allows to do use of genetic algorithms for the optimization of the proposed objective function and the required calculations to obtain the solutions that will make up the Pareto front.*

#### **RESUM**

*El suministrament d'aigua a les poblacions te un paper basic en el desenroll economic i social.*

*En els països en vies de desenroll l'accés a aigua potable juga un paper rellevant en la majoria dels*

**Objectius de Desenvolupament del Mil·lenni, es per això que en els projectes de nous sistemes d'abastiment (SDA) es basa un disseny que utilitzi tecnologies apropiades. Dites tecnologies deuran tenir en compte els costos i mitjans necessaris per a l'operació i el manteniment d'estos sistemes, sent necessari prestar especial atenció a la realitat social i a la disponibilitat de recursos HÍDRIC en els contextos en els quals van a donar servei.**

**Per a més costat, en un context desenvolupat, l'escassetat i variabilitat de la disponibilitat de recursos hídrics, el creixent interès per la gestió integral de l'aigua i el nexa aigua-energia, així com per l'optimització de l'operació i el manteniment dels SDA, a més del creixent interès pel disseny urbà sensible a l'aigua (WSUD, en les seues sigles en anglès) porta a que se plantegen sistemes d'abastiment descentralitzats, tenint en compte la collita d'aigua de pluja (RWH, en les seues sigles en anglès) com recurs complementari, com alternativa als sistemes centralitzats convencionals d'abastiment d'aigua.**

**L'objectiu principal de la present tesi es proposar un model alternatiu de sistema d'abastiment d'aigua descentralitzat tenint en compte la collita d'aigua en la seua versió de sistema dual com recurs complementari. Sent proposada una metodologia per al disseny multiobjectiu en l'ús d'AG i una avaluació complementària de l'operació per a cada possible solució, conseguint una visió global de cada una de les possibles solucions que constituïran el front de Pareto.**

**En este treball s'aborda la problemàtica de la disponibilitat de recursos hídrics com factor limitant en el disseny i implementació d'un SDA nou, sent este problema tingut en compte en un horitzó de 25 anys en el disseny proposat.**

**En el canvi de "filosofia" de sistema centralitzat al de sistema descentralitzat, afegint l'alternativa de subministrament complementari d'aigua descentralitzat, se aconseguirà "esmortir" l'escassetat de recursos hídrics i un estalvi en l'inversió en infraestructures, així com en energia i insumos, tant en els nous sistemes com en els que se precisa una ampliació de la cobertura.**

**Per a desenvolupar lo citat anteriorment se farà ús del programa EPANET i de la seua TOOLKIT sobre Visual Basic, sent desenvolupat un programa que permeti utilitzar els Algoritmes genètics per a l'optimització de la funció objectiva proposada i els càlculs requerits per a obtenir les solucions que constituïran el front de Pareto.**

**Palabras clave:**

**<Cosecha de agua de lluvia/ sistema dual de abastecimiento / diseño óptimo>**



**INDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS DEL TRABAJO .....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO HÍDRICO EN LA SOSTENIBILIDAD Y EL DISEÑO DE LOS SDA. ....</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA. ....</b>	<b>19</b>
<b>5.1</b>	<b>Tipos y configuraciones de los sistemas de RWH.....</b>	<b>21</b>
<u>5.1.1</u>	<u>Sistema bombeado .....</u>	<u>22</u>
<u>5.1.2</u>	<u>Sistema alimentado por gravedad .....</u>	<u>25</u>
<b>5.2</b>	<b>Modelización de Rainwater Harvesting como componente del sistema de abastecimiento. ....</b>	<b>27</b>
<u>5.2.1</u>	<u>Análisis de la precipitación.....</u>	<u>27</u>
<u>5.2.2</u>	<u>Depósito de almacenamiento para RWH.....</u>	<u>30</u>
<u>5.2.3</u>	<u>Coeficiente de escorrentía.....</u>	<u>35</u>
<u>5.2.4</u>	<u>Potencial de suministro por cosecha de agua .....</u>	<u>36</u>
<u>5.2.5</u>	<u>Demanda de agua .....</u>	<u>36</u>
<b>6</b>	<b>LA OPTIMIZACIÓN Y EL DISEÑO MULTIOBJETIVO.....</b>	<b>37</b>
<b>6.1</b>	<b>Algoritmos Genéticos y Evolver como herramienta para la resolución.....</b>	<b>44</b>

<b>7</b>	<b>LA FUNCIÓN OBJETIVO.....</b>	<b>46</b>
<b>7.1</b>	<b>Aspectos a tener en cuenta.....</b>	<b>46</b>
<u>7.1.1</u>	<u>Fiabilidad del sistema.....</u>	<u>47</u>
<b>7.2</b>	<b>El modelo hidráulico.....</b>	<b>50</b>
<u>7.2.1</u>	<u>Información necesaria para definir el modelo.....</u>	<u>50</u>
<b>7.3</b>	<b>Definición de la Función objetivo.....</b>	<b>51</b>
<u>7.3.1</u>	<u>Variables de decisión.....</u>	<u>53</u>
<u>7.3.2</u>	<u>Algunas restricciones de la función objetivo.....</u>	<u>53</u>
<u>7.3.3</u>	<u>Función objetivo propuesta.....</u>	<u>54</u>
<b>7.4</b>	<b>Evaluación del coste de operación.....</b>	<b>55</b>
<u>7.4.1</u>	<u>Coste energético.....</u>	<u>56</u>
<u>7.4.2</u>	<u>Coste de la producción de agua potable.....</u>	<u>57</u>
<b>8</b>	<b>CASO DE APLICACIÓN.....</b>	<b>58</b>
<b>8.1</b>	<b>Contexto y datos de partida.....</b>	<b>58</b>
<b>8.2</b>	<b>Adaptación del layout para los sistemas de cosecha de agua de lluvia.....</b>	<b>61</b>
<b>8.3</b>	<b>Datos introducidos en el modelo.....</b>	<b>62</b>
<b>8.4</b>	<b>Simulaciones y proceso de optimización para el diseño.....</b>	<b>64</b>
<u>8.4.1</u>	<u>Sistemas propuestos.....</u>	<u>65</u>
<b>8.5</b>	<b>Coste energético.....</b>	<b>72</b>

---



<b>8.6</b>	<b>Alternativas para la toma de decisión.....</b>	<b>73</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....</b>	<b>74</b>
<b>9.1</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>74</b>
<b>9.2</b>	<b>Desarrollos futuros.....</b>	<b>75</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>76</b>
<b>10.1</b>	<b>Anexo 1. Definición del modelo.....</b>	<b>76</b>
<b>10.2</b>	<b>Anexo 2. Uso de Evolver®. Solver de algoritmo genético para Microsoft Excel. Versión 5.7. ....</b>	<b>93</b>
<b>10.3</b>	<b>Anexo 3. Macro usada.....</b>	<b>97</b>
<b>10.4</b>	<b>Anexo 4. Resultados de la optimización.....</b>	<b>99</b>
<b>11</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>108</b>

### Figuras

Figura 1	Esquema de bombeo directo (Adaptado de Leggett y col., 2001) .....	22
Figura 2	Esquema de sistema de bombeo indirecto de captación de aguade lluvia (Adaptado de Leggett y col., 2001) .....	24
Figura 3	Esquema de sistema alimentado por gravedad (Adaptado de Leggett y col., 2001) .....	25
Figura 4	Escorrentía de tejado mensual media (m <sup>3</sup> ). .....	33
Figura 5	Escorrentía de tejado mensual acumulada .....	33
Figura 6	Estimación de los requisitos de almacenamiento. ....	33

---

DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO

---

Figura 7 Adaptada de Coello A. (2005).....	38
Figura 8 Adaptada de Coello (2005). ....	41
Figura 9 Adaptada de Coello A. (2005).....	42
Figura 10 Adaptada de Coello (2005). ....	43
Figura 11 Plano de la ciudad de Dondon .....	59
Figura 12 Barrios de Dondon .....	60
Figura 13 Trazado de la red de Dondon sin modulo de cosecha de agua.....	64
Figura 14 Modulo de cosecha de agua .....	62
Figura 15 Red con los módulos de cosecha de agua de lluvia .....	61
Figura 16 Red de alimentación de AP sin los módulos de cosecha de agua de lluvia .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

**Tablas.**

Tabla 1 Valores de Coeficientes de escorrentía de tejados de diferente material. ....	35
Tabla 2 Valores de los parámetros de depósitos de cosecha de agua de lluvia según el barrio. ....	63

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

<b>ACRONIMOS</b>	
<b>AG</b>	Algoritmos genéticos
<b>CBA</b>	Análisis coste beneficio, en sus siglas en inglés
<b>CEA</b>	Análisis coste efectividad, en sus siglas en inglés
<b>DSS</b>	Sistema de apoyo a la decisión, en sus siglas en inglés
<b>gbest</b>	Mejor movimiento de grupo
<b>GIS</b>	Sistemas de información geográfica
<b>MCDA</b>	Análisis de decisión multicriterio
<b>pbest</b>	Propio mejor movimiento
<b>POM</b>	Problema de optimización multiobjetivo
<b>RWH</b>	Cosecha de agua, en sus siglas en inglés
<b>SCBA</b>	Análisis coste beneficio social
<b>SUD</b>	Drenaje urbano sostenible, en sus siglas en inglés
<b>SDA</b>	Sistemas de abastecimiento
<b>UV</b>	Ultravioleta
<b>VAN</b>	Valor actual neto
<b>W.C.</b>	Water Close
<b>WLC</b>	Coste a lo largo de la vida, en sus siglas en inglés
<b>WSPs</b>	Suministradores de los servicios de agua, en sus siglas en inglés
<b>WSUD</b>	Diseño urbano sensible al agua, en sus siglas en inglés



## 1. INTRODUCCIÓN

El suministro de agua potable, de forma apropiada al contexto, tiene un papel esencial en el desarrollo social y económico, tanto a nivel urbano como rural.

En un contexto en desarrollo el acceso a agua potable juega un papel relevante en la mayoría de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, es por ello que en los proyectos de nuevos sistemas de abastecimiento (SDA), así como en los de ampliación y/o renovación de los sistemas existentes, es básico un diseño que utilice tecnologías apropiadas. Dichas tecnologías deberán tener en cuenta los costes y medios necesarios para la operación y el mantenimiento de estos sistemas, prestando especial atención a la realidad social y a la disponibilidad de recurso hídrico existente en los contextos en los cuales van a dar servicio.

Por otro lado, en un contexto desarrollado, la escasez y variabilidad de la disponibilidad de recurso hídrico, el creciente interés por la gestión integral del agua y el nexo agua-energía, así como por la optimización de la operación y el mantenimiento de los SDA, además del creciente interés por el diseño urbano sensible al agua (WSUD, en sus siglas en inglés) lleva a que se planteen sistemas de abastecimiento descentralizados, teniendo en cuenta la cosecha de agua (RWH, en sus siglas en inglés) como recurso complementario, como alternativa a los sistemas centralizados convencionales de abastecimiento de agua.

El WSUD es una solución local para los problemas globales creados por la dependencia del transporte, almacenamiento y descarga centralizada del agua en las ciudades. Los diseños que son sensibles al agua implican la conservación del agua y estrategias de retención del agua de lluvia, distribuidos por la ciudad o a nivel localizado para reducir los costes en infraestructuras y la degradación medioambiental de los medios acuáticos **(Coombes y col., 2000)**.

En ambos contextos citados, asegurar la viabilidad técnica y económica, así como la sostenibilidad del SDA debería ser el principal objetivo.

La disponibilidad de recurso hídrico, así como de las infraestructuras y los recursos económicos necesarios para su potabilización, es un factor limitante tanto en la implementación de un nuevo SDA como en el caso de precisar un aumento de la alimentación de recurso a un sistema existente para ampliar su cobertura.

Por lo tanto, cambiando la “filosofía de sistema centralizado”, añadiendo la alternativa de suministro complementario descentralizado, se conseguirá “amortiguar” la escasez de recurso hídrico y un ahorro en la inversión en infraestructuras, así como en energía e insumos, tanto en los nuevos sistemas como en los que se precisa una ampliación de la cobertura.

Los diseñadores de SDA reconocen que es necesario tener en cuenta gran cantidad de aspectos para obtener un diseño adecuado al contexto en el que dicho SDA va a dar servicio, haciendo especial hincapié en la escasez de recursos hídricos que se ve acrecentada por el cambio climático al que se enfrentan los asentamientos humanos en el siglo XXI.

El diseño económicamente óptimo de un SDA trata de minimizar la suma de los costes de inversión y de los costes de operación del sistema. Por otro lado, un diseño multiobjetivo sería adecuado para un SDA, ya que tiene en cuenta un abanico de las mejores soluciones, correspondiendo la decisión acerca de cuál es la mejor solución a la persona o grupo de personas decisoras del proyecto, las cuales usaran criterios de selección influenciados por el contexto económico, social y medioambiental, así como por la subjetividad.

El problema de optimización multiobjetivo (POM), llamado también multicriterio o vectorial, puede definirse como el problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfaga un cierto conjunto de funciones objetivo (**Coello, A. 2005**). Estas funciones objetivo forman una descripción matemática de los criterios de desempeño que suelen estar en conflicto unos con otros y que se suelen medir en unidades diferentes.

El presente trabajo desarrolla **la función objetivo para el diseño óptimo de un SDA teniendo en cuenta el enfoque de sistema semicentralizado de**

---

**suministro**, siendo la opción de sistema de suministro descentralizado utilizada el RWH, y utilizando para su implementación toolkit de EPANET y la aplicación evolver® a partir de la programación en visual basic de Excel. Logrando de este modo no perder el enfoque de abanico de soluciones óptimas, así como el estudio de alternativas según el contexto de implementación del proyecto.

## 2. ANTECEDENTES

Un SDA está constituido por una red de tuberías, puede incluir bombas si no es posible el abastecimiento por gravedad, suele contener válvulas y depósitos, los cuáles a partir de una fuente de agua captada, recurso hídrico que debería ser tratado en una estación de potabilización, distribuyen el agua a los consumidores.

En su forma más simple, la distribución por gravedad, el problema de optimización “típico” es formulado para un trazado de tuberías dado y una demanda específica en los nodos, buscando una combinación de diámetro de tubos que dé lugar a un coste mínimo, y que cumpla las siguientes restricciones:

- La continuidad de caudal en todos los nodos y uniones de la red.
- La pérdida de carga en cada tubo depende del caudal en el tubo, su diámetro, longitud y propiedades hidráulicas.
- La pérdida de carga total en una malla es igual a cero.
- La pérdida de carga a lo largo del camino entre dos depósitos debe ser igual a la diferencia de alturas.
- Las limitaciones de presiones mínimas y máximas deben ser satisfechas.
- Restricciones de diámetros máximos y mínimos pueden ser aplicadas a ciertos tubos de la red.

En el caso de una red existente, otra restricción sería la introducción de tramos de conducción que formarán parte del diseño, es decir, diámetros ya definidos,

siendo incluidas en los problemas de optimización las dimensiones de las tuberías a mantener en el diseño de rehabilitación o ampliación, así como las válvulas, bombas y depósitos ya existentes que serían mantenidos en la red futura que se diseña. En la presente tesina al tratarse del diseño de una red nueva no se tendrá en cuenta dicha restricción.

En lo que se refiere a la garantía de servicio, el proyecto diseñado de una red nueva, de una ampliación o una rehabilitación de una red ya existente, debe garantizar que cumpla con las variaciones de demanda en las diversas situaciones de carga, tales como la de caudal máximo de proyecto, caudal diario medio y periodos de caudal mínimo.

Por lo tanto, el principio elemental de los modelos de optimización normalmente utilizados es la minimización de los costes, teniendo como restricciones básicas el cumplimiento de las demandas con un nivel mínimo de presiones en los nodos de la red, no teniéndose habitualmente en cuenta directamente en la función objetivo el problema de la disponibilidad de recurso hídrico ni los posibles beneficios de combinar sistemas de abastecimiento centralizados y descentralizados.

En lo que respecta a tener en cuenta la introducción de recurso hídrico complementario en el diseño de **un SDA nuevo**. La cosecha de agua de lluvia es una alternativa descentralizada de acceso a recurso hídrico que puede ser utilizada para complementar los recursos de agua subterránea y/o superficial potencialmente captables, en áreas dónde la disponibilidad de agua es inadecuada para satisfacer la demanda existente, y/o se desea limitar los costos de implementación y explotación de dicho sistema.

La cosecha de agua de lluvia es una de las medidas más prometedoras para complementar los escasos recursos de agua superficial y subterráneos en áreas dónde existe un sistema de suministro de agua inadecuado para satisfacer la demanda (**Aladenola y Adeboye, 2009**). El uso de la escorrentía producida por los tejados almacenada en tanques, con una entrada superior de agua de la red de abastecimiento para casos de emergencia (depósito vacío), como complemento a nivel domiciliario del suministro centralizado reduce



significativamente el uso de agua de la red de abastecimiento, sobre todo cuando sus usos son múltiples ver **Coombes y Kuczera (2003 a), y Coombes y col. (2002)**.

**Los programas de gestión de la** demanda de los servicios urbanos ponen como objetivo reducir la demanda de agua potable de la red de abastecimiento a través de la mejora de la eficiencia del uso del agua. Además, las empresas de servicios de agua también consideran programas que promueven la sustitución de agua potable por fuentes de agua alternativas, tales como el agua de lluvia y el agua residual generada tratada, para diversos usos finales, ver **Aladenola y Adeboye (2009); Devi y col. (2005)**.

Según **Villarreal y Dixon (2005)**, el desarrollo urbano y el incremento de la demanda de agua están causando estrés hídrico en los recursos de agua existentes. En estos momentos la atención está puesta en alternativas tales como los sistemas de cosecha de agua, como fuente de agua complementaria con funciones multipropósito. Los tejados representan un importante porcentaje de las grandes áreas impermeabilizadas que cubren las ciudades, por lo tanto, ofrecen una posibilidad significativa para la cosecha de agua.

**Thomas y Martinson (2007)** afirman que la cantidad de agua de lluvia que puede ser cosechada depende del área del tejado, la intensidad de lluvia, el almacenamiento y el coeficiente de escorrentía, que depende del material y el diseño del tejado.

Algunas metodologías de diseño de RWH consideran solo uno o un limitado número de componentes del sistema, tales como el área de captación, características de la lluvia/escorrentía o el tanque de almacenamiento principal, mientras que otras incluyen la evaluación explícita de un rango más amplio de componentes. La evaluación en diferentes escalas espaciales es también posible, algunas metodologías están interesadas sólo en el comportamiento del sistema a nivel de un edificio simple, mientras que otras buscan investigar los impactos de la implementación a mayor escala, tales como el desarrollo o escala a nivel de captación centralizada de un SDA, ver **Sakellari y col. (2005)**.

Algunas metodologías se centran solamente en el comportamiento hidrológico, mientras que otras incluyen elementos adicionales tales como medidas económicas y financieras (p.ej. **Coombes y col., 2002; Villarreal y Dixon, 2005**) y en algunos casos incluyen una evaluación de la sostenibilidad del sistema (**Vleuten-Balkema, 2003; Sakellari y col., 2005**).

**Thomas (2002a)** establece que es solo posible predecir de forma aproximada el comportamiento de un sistema de RWH porque muchos de los factores sobre los cuales las predicciones están basadas, tales como la demanda futura de agua y el clima, son inciertos y difíciles de predecir con exactitud.

Los métodos para incorporar los datos de lluvia en el análisis, pueden ser clasificados en dos categorías claras: series históricas y series de datos sintéticos.

- El método de **series históricas de precipitación** es comúnmente aplicada, se trata del uso de un conjunto continuo de datos que ha sido recogido a través del registro de la intensidad de lluvia caída en una zona dada dentro de un periodo de tiempo determinado. El dato es presentado como intensidad por unidad de tiempo, por ejemplo mm/hora, mm/día o mm/mes según el caso, sería editado en un formato adecuado y usado directamente en el modelo de RWH sin la generación de ninguna nueva información. Este enfoque ha sido usado por numerosos investigadores tales como **Fewkes (1999) y, Liaw y Tsia (2004), entre otros**.
- Las **series de datos sintéticos** pueden ser generadas a partir del análisis estadístico de registros de lluvia históricos. Los métodos estadísticos son útiles para generar series temporales de lluvia sintética para áreas que no tienen datos históricos o donde tales datos son limitados a pocos años, cuando series de datos más largas son requeridas, ver **Roebuck (2007)**. Estos datos deben ser obtenidos de estaciones climatológicas sujetas a un clima similar, y que estén localizadas cerca del lugar de investigación.

**El coeficiente de escorrentía** es la relación entre el volumen de agua que escurre por una superficie y el volumen total de agua que cae sobre ella. Para calcular el coeficiente de escorrentía de un tejado, son recopilados los datos para varios meses o años, pudiendo incluir un gran número de eventos de tormentas. Los valores del coeficiente de escorrentía para cada evento de tormenta son combinados para dar un valor medio. Gran cantidad de investigadores han usado dichos coeficientes para estimar el volumen de escorrentía efectiva, **Zhu y Liu (1998)**, y **Fewkes (1999)** entre otros.

**La incorporación del sistema de suministro de agua público (sistema centralizado) en los modelos de RWH**, está normalmente restringida a medir la cantidad de agua que debe ser aportada por el sistema de suministro cuando la cosecha de agua disponible es insuficiente para satisfacer la demanda de determinados usos, según el caso. Para modelos que incorporan una evaluación financiera, ésta incluiría también las tarifas volumétricas asociadas al suministro de agua potable y la tarifa de saneamiento que suele estar vinculada a dicho consumo, según el caso. Existe un gran número de trabajos que incluyen la función de aporte de agua del SDA centralizado al de RWH, conocido como sistema dual ver **Fewkes, A. (1999)**; **Appan (2000)**; **Fewkes y Butler (2000)**; **Coombes (2002)**; **Coombes y col. (2003a)** y **(2003b)**; **Appan (2000)**; **Villarreal y Dixon (2005)**, entre otros.

Los modelos que incluyen un elemento financiero usan la relación entre el valor del suministro de agua centralizado y el suministro de agua cosechada como el indicador primario del rendimiento financiero, conocido como costes evitados, ya que es la forma principal en la cual los sistemas **RWH** pueden potencialmente suponer un ahorro económico, ver **Shaaban y Appan (2003)** y **MJA (2007)**; entre otros.

**Con respecto a los tanques de almacenamiento**, **Fewkes y Butler (2000)** establecen que la capacidad del tanque de **RWH** es importante tanto a nivel económico como operacional, ya que influye en:

- El volumen de agua ahorrada de la red principal (este ahorro se daría en sistemas duales, como es el caso presentado en la presente tesina);
- Los costes de instalación del sistema;
- El periodo de tiempo que el agua es retenida, lo cual afecta a la calidad final del agua suministrada por el depósito;
- La frecuencia de rebose del sistema, lo cual afecta a la tasa de renovación de los contaminantes de la superficie.
- El volumen de agua que rebosa en la superficie de drenaje de agua o zona de infiltración.

La dimensión del depósito de RWH es un parámetro controlado por el diseñador, por lo tanto es recomendable el uso de una técnica con la cuál determinar la dimensión requerida para lograr un nivel óptimo de servicio. En un sistema de cosecha de agua de lluvia, el tanque de almacenamiento es la construcción principal del sistema en su conjunto y en lo que concierne a la relación de inversión-beneficio. Por lo tanto, el volumen del tanque de almacenamiento es una cuestión primordial para el diseño de sistemas de cosecha de agua, **Che y col. (2008)**.

Hay diversos autores que han trabajado en el dimensionamiento óptimo de depósitos para la cosecha de agua, como **Ngigi (1999)**, **Che y col. (2008)**, **Coombes y Kuczera (2003a)**, **Campisano y Modica (2012)**, entre otros.

Por lo tanto, el tamaño del tanque de almacenamiento seleccionado en la RWH es el parámetro sobre el cual el diseñador tiene control directo en lo que se refiere a los aspectos financieros de la RWH. En general, un tamaño de tanque más grande aumenta los costes de compra/obra e instalación, pero el coste por unidad de volumen tiende a decrecer debido a la economía de escala aunque el tamaño del tanque aumente, ver **Gould y Nissen-Peterson (1999)**.

Según **Appan (2000)**; **Coombes y Kuczera (2003b)**; **Villarreal y Dixon (2005)**, incrementar el volumen del tanque puede inicialmente provocar una mejora más rápida del comportamiento (fiabilidad volumétrica), pero esta relación no es lineal. Es

alcanzado un punto donde un incremento en la capacidad del tanque tiene como resultado un pequeño incremento en la mejora del comportamiento, llegando finalmente a ser el gráfico plano (el gradiente llega a ser cero), por lo que cualquier incremento en el tamaño del tanque no provocará un incremento correspondiente en el suministro de agua cosechada.

Por lo tanto, puede ser razonablemente asumido que el diseñador tendrá limitada la influencia sobre la configuración de otros componentes del sistema de RWH para cualquier sistema dado, y que dimensionar el tanque de almacenamiento es la principal oportunidad de los diseñadores para influir en la efectividad del coste del sistema.

**Thomas (2002a)** subrayó que los datos meteorológicos son pocas veces detallados, fiables y gratuitos. **Wainwright y Mulligan (2004)** establece que el modelo óptimo para representar un depósito de RWH es aquel que contiene suficiente complejidad para explicar el comportamiento observado, pero no más.

La cosecha de agua de lluvia puede considerarse como un elemento dentro del paradigma del drenaje sostenible (SUDs), ver **Shaffer y col. (2004); Wilson y col. (2004); Woods-Ballard y col. (2007), entre otros.**

En lo que respecta a la **evaluación financiera**, la evaluación económica no debería incluir sólo el flujo de caja tangible tal como los gastos de inversión, operación y mantenimiento sino también los gastos intangibles o externalidades. Típicamente las externalidades incluirían costes/beneficios medioambientales y sociales.

En lo que concierne al enfoque del **coste de vida integral del proyecto (WLC)**, los costes de un proyecto han sido "típicamente" divididos en costes de construcción, mantenimiento, operación e imprevistos. El énfasis es a menudo puesto en minimizar los costes de construcción, sin embargo, hay un reconocimiento creciente respecto a que esto puede llevar a un sobrecoste más grande de los gastos de operación y mantenimiento de los que son tomados en cuenta (**Masters y Simm, 2002; apúd Roebuck, 2007**). En determinados contextos, sobre todo en países en vías de desarrollo, este hecho puede llevar a que los proyectos no sean sostenibles.

Por lo tanto, el diseño de cualquier proyecto de un SDA necesita ir más allá de las simples consideraciones de costes constructivos y tomar en cuenta los costes que se prevén en las distintas etapas a lo largo del ciclo de vida de servicio del sistema. Siendo éste el enfoque más aconsejable para seleccionar los parámetros claves de un sistema de apoyo a la decisión (**DSS, en sus siglas en inglés**) para el diseño de un sistema de abastecimiento con un enfoque multicriterio.

El **algoritmo de optimización** que será utilizado en la presente tesina son los algoritmos genéticos (AG) mediante la aplicación Evolver® para Excel.

Algunos investigadores del campo del agua se han embarcado en la implementación del AG para la optimización del diseño, mantenimiento y operación de **SDA**. El trabajo de **Savic y Walters (1997)**, entre otros investigadores del campo de la Ingeniería Hidráulica, manifiesta la importancia que los algoritmos genéticos tienen en el diseño óptimo de sistemas de abastecimiento, así como en la optimización de la sustitución de tuberías principales, de la operación y rehabilitación de sistemas de distribución de agua.

**En Wang y col. (2012)** se presenta un método de detección de fugas en las redes de distribución de agua basado en un modelo no lineal, usando el software EPANET para la simulación del comportamiento hidráulico de la red y algoritmos genéticos para la optimización del modelo. Los resultados muestran que el modelo puede estimar la localización de las fugas y la cantidad de agua fugada.

**Chandapillai y col. (2011)** han trabajado sobre el diseño de una red de distribución considerando el suministro equitativo de agua, además de la minimización del coste y de los requerimientos de presión, durante el periodo de escasez de recurso hídrico. Para resolver el problema multiobjetivo han utilizado algoritmos genéticos, siendo la solución técnica ilustrada usando dos problemas típicos de benchmarking, la red de dos mallas y la red de Hanoi. Los resultados muestran que una mejora considerable en el suministro equitativo puede ser alcanzada con una inversión adicional en tuberías respecto a la solución de mínimo coste.

**Otros investigadores como Nazif y col. (2013)** han desarrollado un marco para incrementar la seguridad física del abastecimiento de agua en áreas urbanas. En

este caso han desarrollado un índice de vulnerabilidad física (PVI) para la evaluación del estado físico de las tuberías principales y un índice de funcionamiento (SPVI). Algoritmos genéticos se utilizan para determinar las formas de mejorar el comportamiento del sistema, potenciando la condición física de la tubería en el sistema a un mínimo coste. Los resultados de este estudio muestran el valor significativo del algoritmo propuesto en el apoyo en la toma de decisiones para la elección adecuada de las tuberías vulnerables a rehabilitar con el objetivo de disminuir la vulnerabilidad del sistema frente a fallos físicos.

En el campo de la ingeniería hidráulica aplicada a **la gestión de recursos hídricos** hay otros autores como **Moharram y col. (2011)** que han utilizado los AG para estudiar la gestión de aguas subterráneas cuándo aumenta la demanda produciendo descensos del nivel freático e interferencias de pozos. La metodología introducida utiliza técnicas matemáticas y algoritmos genéticos. El modelo de optimización está basado en una combinación de MODFLOW con AG. Otros autores como **Hedi Louati y col. (2011)** han utilizado los AG para optimizar la asignación de los recursos de agua dentro un sistema de depósitos múltiples complejo localizado en Túnez. El modelo considera dos objetivos; la asignación de los centros de demanda y el nivel de salinidad del suministro de agua a los usuarios. Los resultados son comparados usando un rango de indicadores de comportamiento del sistema para medir la fiabilidad, la resiliencia y la vulnerabilidad.

**Los criterios de fiabilidad y redundancia** serán tenidos en cuenta en el diseño planteado en la presente tesina, haciendo hincapié en la importancia del contexto en el que dicho SDA deberá dar servicio.

En lo que respecta a **la fiabilidad** de los sistemas de distribución, lo cual implica mantener una configuración mallada de los mismos. **Alprovits y Shamir (1977)**, ya tomaban en cuenta diferentes estados de carga a la hora de concebir sus diseños y que el dimensionamiento de los elementos no podía separarse de las decisiones de operación. **Xu y Goulter (1999)** definieron la fiabilidad como la habilidad del sistema para fomentar el adecuado suministro de agua en condiciones normales y anormales. **Morgan y Goulter (1985)** piden que cada nodo deba estar conectado como mínimo a dos tramos.

---

Por otro lado, se define la **redundancia** de una red de distribución como la característica de la red que permite que los puntos de demanda tengan caminos alternativos de suministro de agua en caso de que alguna de las tuberías de la red quede fuera de servicio.

El enfoque del análisis de fiabilidad de los proyectos de alimentación de agua en países en desarrollo debería dar más peso a la garantía de suministro de agua en detrimento, en condiciones desfavorables, de la calidad del servicio en términos de presión.

### 3 OBJETIVOS DEL TRABAJO

#### **Objetivo Principal.**

El objetivo principal es proponer e implementar una posible función objetivo para el diseño óptimo de un SDA, tanto desde el punto de vista técnico-económico como medioambiental, teniendo en cuenta como fuente complementaria de recurso hídrico el agua obtenida de sistemas de cosecha de agua de lluvia.

#### **Objetivos específicos.**

- Estudiar los posibles parámetros que deben formar parte de la función objetivo para formular el problema de diseño óptimo, contemplando los aspectos técnicos, económicos y medioambientales.
- Proponer una formulación de la función objetivo que permita la evaluación técnica-económica de los diseños de los SDA que incluyen la cosecha de agua como recurso de agua complementario.
- Desarrollar el programa necesario para dicho diseño haciendo uso de Toolkit de Epanet y de la aplicación Evolver®, que implementa Algoritmos Genéticos simples, a través de Visual Basic de Excel.
- Implementación de dicho programa para la resolución de un caso práctico.



- Análisis de las soluciones factibles seleccionadas como las más adecuadas según el contexto, desglosando las bondades y desventajas que presentan cada una de ellas.
- Elección y justificación de la solución seleccionada.

#### **4 LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO HÍDRICO EN LA SOSTENIBILIDAD Y EL DISEÑO DE LOS SDA.**

La mayoría de los países desarrollados dependen en gran medida de SDA y sistemas de potabilización centralizados para prestar un servicio de abastecimiento de agua fiable y seguro a los ciudadanos. La mayor parte de los consumidores de los países desarrollados dan por hecho el acceso a agua potable a través de infraestructuras destinadas a satisfacer la demanda de los consumidores con pocas restricciones en calidad y cantidad, lo que ha llevado a desarrollar SDA que suministran agua con exceso de calidad para la mayoría de los usos dados a dicha agua, por ejemplo, uso del agua potable para la cisterna del W.C. y para el riego de jardines.

Hasta el momento, en la mayor parte de los casos, los incrementos en la demanda de agua han sido satisfechos por la promoción del desarrollo de los recursos hídricos. Diversos autores, entre otros **Hiessl y col. (2001)**, han cuestionado el paradigma del suministro y el tratamiento centralizado que se había seguido como la elección óptima, dado los costes considerables de operación y mantenimiento asociados a dichos sistemas, así como la legislación medioambiental cada vez más rigurosa y la creciente escasez de recursos hídricos.

Entre los beneficios potenciales del uso de RWH como recurso complementario se incluye su capacidad para evitar o atenuar la explotación de nuevos recursos de agua, así como para reducir los caudales pico producidos en los episodios de tormenta, y por lo tanto, el riesgo de inundaciones.

En Suiza, el incremento de la urbanización y el uso generalizado de sistemas centralizados a gran escala han dado lugar a sistemas de abastecimiento de agua

---

que son vulnerables a la escasez de recurso hídrico. Investigaciones han indicado que las medidas de gestión de la demanda, incluyendo la RWH para usos no potables, podrían ayudar a reducir la cantidad de agua requerida por los SDA públicos para los desarrollos urbanos (**Villarreal y Dixon, 2005**).

Por lo tanto, que la introducción de la RWH en el diseño de un SDA sea una opción más o menos rentable dependerá de un gran número de factores, entre los cuales está el coste de inversión en el sistema, los gastos de operación y mantenimiento, el volumen de agua potable de la red de abastecimiento que puede ser sustituida por el agua cosechada y la vida útil estimada del sistema.

En cualquier caso, se puede asegurar que en la gran mayoría de los contextos existirá un ahorro neto en la inversión, en el consumo energético y de consumibles para la potabilización, en la operación y el mantenimiento, así como beneficios medioambientales al reducir en la medida de lo posible la sobreexplotación a la que se ven sometidos los recursos hídricos “convencionales”.

## **5 LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA.**

La **RWH** consiste en la colecta, almacenamiento y uso del agua de lluvia colectada como fuente de agua principal (aquella para consumo humano debería ser potabilizada) o complementaria (caso estudiado en la presente tesina). No toda el agua usada a nivel domiciliario necesita ser de calidad potable, especialmente el agua usada para cisternas de WC, lavadora, riego de jardines y limpieza de vehículos, entre otros.

Los principales usos del agua de lluvia son como:

- La principal fuente de agua potable,
- Una fuente complementaria de agua potable
- Una fuente complementaria de agua no potable, p.ej. para cisternas de W.C., lavado de vehículos, lavado de ropa, riego de jardines, entre otros usos dónde no se requiere calidad de agua potable.

Durante el siglo XX, en un contexto moderno, el uso de las técnicas de RWH disminuyó alrededor del mundo, en cierta medida debido al abastecimiento por medio de grandes sistemas centralizados de suministro de agua, los cuales conllevan la construcción de presas, explotación de las aguas subterráneas y redes de abastecimiento de agua. Sin embargo, en las últimas décadas ha habido un incremento del interés en el uso de la cosecha de agua, ver **Gould y Nissen-Peterson (1999)**.

**Leggett y col. (2001)** señaló que el concepto de **RWH** es tan simple y antiguo que los sistemas pueden variar desde pequeños y básicos, tales como un dispositivo de recogida, a través de un canalón, del agua de lluvia que cae en tejados, a un dispositivo grande y complejo, como los que colectan agua de lluvia de muchas hectáreas y abastecen a una gran cantidad de personas.

Los sistemas de cosecha de agua lluvia están siendo promocionados en muchos países para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos, ya que tienden a ser simples, descentralizados y proporcionan un gran potencial de ahorro económico. La cosecha de agua de lluvia es una forma prometedora de complementar los escasos recursos existentes, tanto subterráneos como superficiales, en áreas donde el SDA existente es inadecuado para satisfacer la demanda y requiere de “mejoras” o “cambios” que permitan un ahorro en la cantidad de agua captada, tratada y transportada para usos que no requieren el nivel de calidad de agua potable.

La reducción en el uso de agua potable del sistema de suministro de agua centralizado, y por lo tanto el ahorro económico que conlleva, es frecuentemente citado en la literatura como uno de los principales beneficios de instalar un sistema de RWH, ver **Leggett y col. (2001)**.

Por lo tanto, los beneficios de la cosecha de agua son diversos, entre otros:

- suministra una fuente de agua gratuita con sólo costes de almacenamiento (en lo que se refiere a la construcción del depósito y a su mantenimiento) y tratamiento (este último, si es necesario, según su uso final).

- aumenta la disponibilidad de las cantidades limitadas de agua superficial y subterránea, al evitar su explotación excesiva
- reduce la escorrentía superficial

### 5.1 Tipos y configuraciones de los sistemas de RWH

**Gould y Nissen-Peterson (1999)** hacen referencia a que todos los sistemas de RWH tienen una serie de componentes en común:

- Una superficie de captación a partir de la cual la escorrentía es colectada, p.ej. superficie de tejado.
- Un sistema para transportar el agua desde la superficie de captación al depósito de almacenamiento.
- Un depósito dónde el agua es almacenada hasta que es necesitada.
- Un dispositivo o instalación, según la tipología de sistema de cosecha de agua, para la extracción de agua del depósito.

Tres tipos de sistemas básicos de RWH, para usos internos y externos de edificios, son identificados por **Leggett y col. (2001)** para abastecer agua no potable; directamente bombeado, indirectamente bombeado y alimentado por gravedad.

En cualquier caso, una vez que el agua cosechada ha sido usada, por ejemplo para la cisterna del WC, se considera que está en la misma categoría de efluente que si hubiera sido utilizada agua potable para el mismo propósito. Por lo tanto, el efluente resultante será tratado de la misma manera sin tener en cuenta la fuente inicial.

En los siguientes apartados se describirán los tres diferentes tipos de sistemas básicos de RWH citados en las líneas anteriores y una cuarta alternativa que se adapta al caso práctico de la presente tesina. En cualquier caso, en el modelo matemático del SDA que será utilizado en la presente tesina se llegará al depósito de cosecha de agua de lluvia, ya que se considera que el siguiente paso es una

elección del usuario, la cual dependerá sobre todo de las condiciones socio-económicas y culturales.

### 5.1.1 Sistema bombeado

Los sistemas bombeados pueden ser clasificados como:

#### 5.1.1.1 *Bombeo directo*

En un sistema bombeado directamente el agua de lluvia es inicialmente trasegada desde la zona de captación y almacenada en un depósito, luego es bombeada directamente al punto de uso requerido de la instalación interior de agua del edificio, p.ej. a las cisternas de WC y lavadoras.

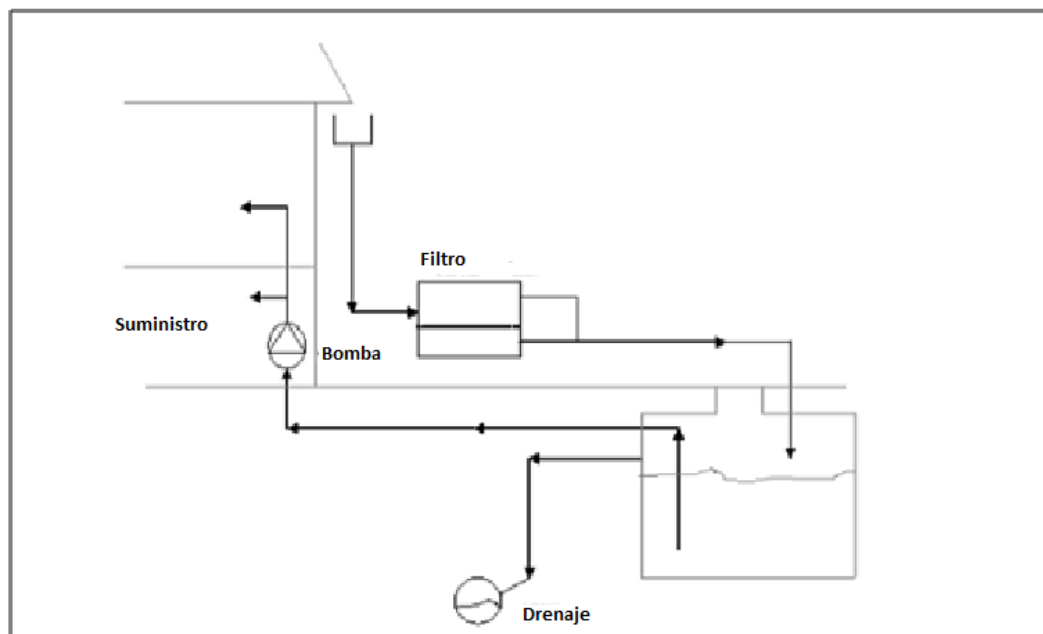


Figura 1 Esquema de bombeo directo (Adaptado de Leggett y col., 2001)

Si se trata de un sistema dual (como el planteado en la presente tesina), en el caso de que el tanque llegue a estar por debajo de un nivel mínimo establecido (situación llamada de fallo), el sistema de alimentación de agua potable llenaría el depósito

hasta un nivel máximo (el cual estaría regulado con una válvula de boya si se trata de una instalación simple), para no llenar todo el depósito con agua potable, que pueda satisfacer a corto plazo la demanda.

Si el tanque de almacenamiento está lleno, cualquier aporte de RWH adicional saldrá vía un desagüe, que normalmente verterá al sistema de saneamiento (pluviales en caso de ser red separativa) o a un sistema de absorción/infiltración para evitar encharcamientos (teniendo dichos sistemas una capacidad limitada de absorción/infiltración).

La principal **ventaja** de los sistemas de bombeo directo es que el agua es suministrada a la presión requerida por el sistema, lo cual es ideal para las mangueras de los jardines y las lavadoras.

La principal **desventaja** es que si la bomba falla debido a un fallo mecánico o de suministro eléctrico, entonces el agua no puede ser suministrada. En todo caso, esta alternativa podría ser estudiada con bombeo solar.

#### *5.1.1.2 Bombeo indirecto*

El agua de lluvia es inicialmente almacenada en un depósito superficial, y posteriormente es bombeada a otro depósito localizado en una posición más alta en el edificio, el cual suele estar localizado en el tejado. El agua es suministrada por gravedad a partir del depósito elevado, el cuál debería estar al menos a 1 metro por encima de los puntos de suministro. Si el tanque de almacenamiento llega a estar seco, el tanque de cabecera es suministrado con agua del sistema de suministro centralizado al tratarse de un sistema dual.

Si el depósito de almacenamiento está lleno, cualquier aporte de RWH adicional saldrá vía un desagüe, que normalmente verterá al sistema de saneamiento (pluviales en caso de ser red separativa) o a un sistema de absorción/infiltración para evitar encharcamientos.

La principal **ventaja** del sistema de bombeo indirecto es que si la bomba falla, debido a un fallo mecánico o de suministro eléctrico, el agua seguirá siendo

suministrada a las instalaciones y accesorios gracias al aporte del sistema de abastecimiento centralizado (agua potable).

La principal **desventaja** es que tiende a suministrar agua a muy bajas presiones, pudiéndose dar un llenado lento de las cisternas de los WC y la falta de presión para trabajar con determinados electrodomésticos.

Este problema de baja presión puede ser resuelto usando **sistemas híbridos**, en los cuales el agua para el WC es suministrado por gravedad desde el tanque de cabecera, mientras que el agua de la lavadora y del jardín es suministrada vía bombeo a partir del depósito de cosecha de agua.

La **ventaja** de este sistema híbrido es que en caso de fallo en el suministro eléctrico es posible llenar el W.C.

Las **desventajas** son que el uso del tanque elevado puede añadir un sobrecoste de inversión al sistema respecto al bombeo directo (aunque no suele ser significativo), y que no siempre hay suficiente espacio en los tejados para colocar dicho tanque. En todo caso, esta alternativa podría ser estudiada con bombeo solar.

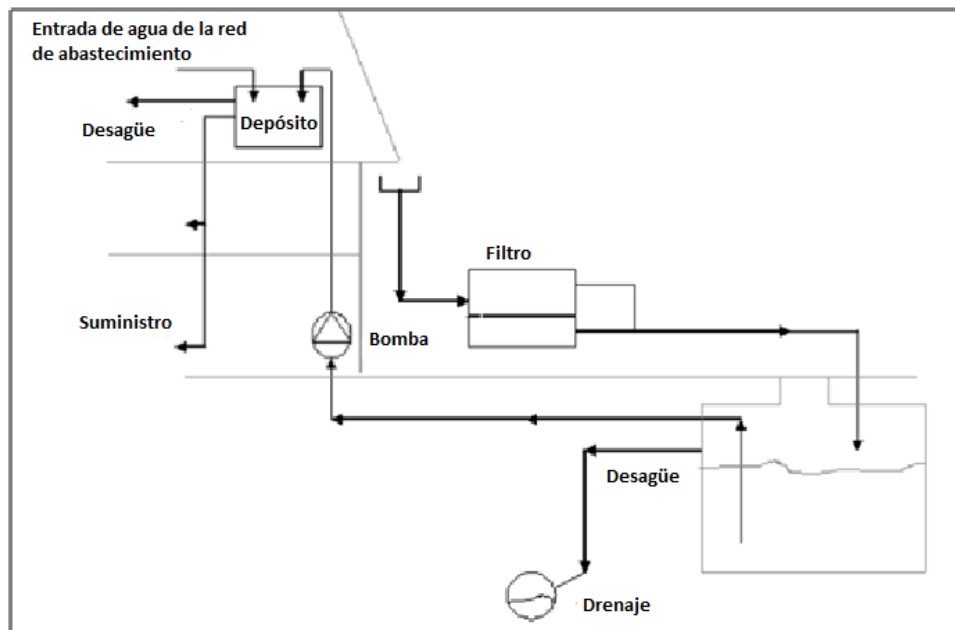


Figura 2 Esquema de sistema de bombeo indirecto de captación de agua de lluvia (Adaptado de Leggett y col., 2001)

### 5.1.2 Sistema alimentado por gravedad

#### 5.1.2.1 *Depósito elevado*

Los sistemas de suministro por gravedad de depósito elevado se diferencian de la variante de bombeo directo e indirecto principalmente en que el tanque de almacenamiento principal está localizado en el tejado del edificio, permitiendo la alimentación de la instalación interior.

El agua de lluvia es colectada en los tejados, filtrada y canalizada por tuberías directamente al tanque de almacenamiento. Si el agua es suministrada por gravedad a la instalación interior, el tanque de almacenamiento debe estar al menos a un metro por encima de los puntos de suministro. Por lo tanto, los niveles relativos de los diversos componentes son críticos para que la combinación de tejado, filtro y tanque funcione hidráulicamente.

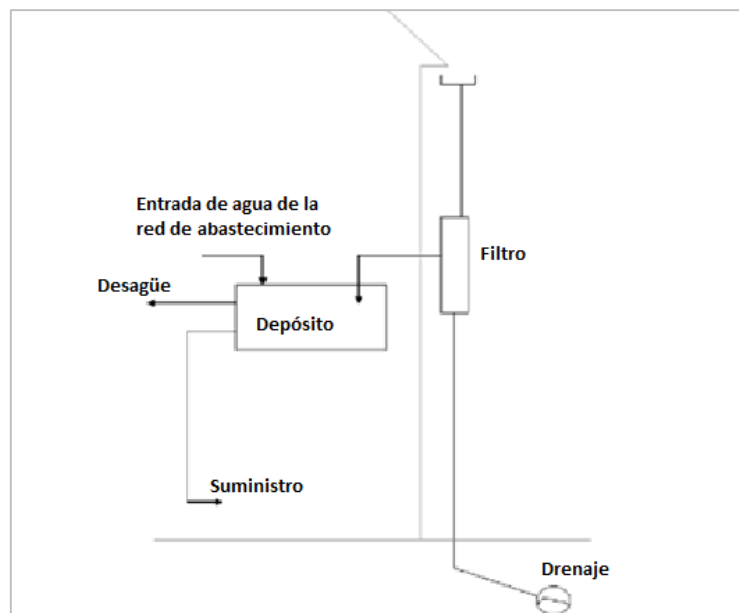


Figura 3 Esquema de sistema alimentado por gravedad (Adaptado de Leggett y col., 2001)

Si el tanque de almacenamiento llega a estar vacío, el agua es suministrada por el sistema centralizado de abastecimiento. Si el tanque de almacenamiento está lleno, cualquier aporte de agua de lluvia adicional saldrá vía un desagüe que normalmente



verterá al sistema de saneamiento (pluviales en caso de ser red separativa) o a un sistema de absorción/infiltración para evitar encharcamientos.

La principal **ventaja** de los sistemas de suministro por gravedad es que no requieren de bombeo, por lo tanto, no hay riesgo de fallo por ausencia de suministro eléctrico.

La **desventaja** principal es que la presión del agua es probablemente menor que la del SDA centralizado, lo que puede dar lugar a llenado lento de las cisternas de WC, y problemas de llenado y funcionamiento de electrodomésticos en el caso de alimentar una instalación interior.

#### *5.1.2.2 Alimentación a partir de depósito superficial*

Es un depósito colocado en la superficie, en los alrededores de la vivienda, realizándose el abastecimiento a través de un grifo situado en el propio depósito, por no existir instalación interior en la vivienda (suele darse en contextos desfavorecidos) o tener el agua colectada usos no potables que no precisan de alimentar la instalación interior de la vivienda.

Si el tanque de almacenamiento llega a estar vacío (por debajo del nivel mínimo establecido), el agua es suministrada al depósito por el sistema centralizado de abastecimiento al tratarse de un sistema dual. Si el tanque de almacenamiento está lleno, cualquier aporte de agua adicional saldrá vía un desagüe que normalmente verterá al sistema de saneamiento (pluviales en caso de ser red separativa) o a un sistema de absorción/infiltración para evitar encharcamientos.

La principal **ventaja** de los sistemas de alimentación a partir de depósito superficial es que no requieren de bombeo, por lo tanto, no hay riesgo de fallo por ausencia de suministro eléctrico. La **desventaja** principal es la limitada presión de abastecimiento.

## **5.2 Modelización de Rainwater Harvesting como componente del sistema de abastecimiento.**

Los enfoques existentes para modelar la cosecha de agua varían en el nivel de detalle, algunos investigadores consideran solo uno o varios componentes del sistema **RWH**, tales como el área de captación y sus características, las cuales influyen en la escorrentía producida, otros investigadores el tanque de almacenamiento principal, mientras que otros incluyen un rango más amplio de componentes del sistema.

Por otro lado, hay numerosos métodos de modelización del comportamiento hidrológico que son utilizados para predecir el comportamiento de los sistemas de RWH, los cuales van desde los relativamente simples, tales como los enfoques de la regla práctica, hasta los más complejos, tales como los métodos estadísticos y programas informáticos sofisticados (**Roebuck, 2007**). El uso de unos u otros dependerá del objetivo de la modelización y el papel que ocupe dentro de ésta el sistema de RWH.

### 5.2.1 Análisis de la precipitación

La precipitación es el principal parámetro de entrada en el diseño de los sistemas de RWH, por lo tanto, un análisis de la precipitación es un prerrequisito en la determinación de los parámetros de diseño, principalmente en la capacidad de almacenamiento y el área de la captación que son necesarias para que el sistema cumpla con los requisitos esperados

En el diseño de un sistema de cosecha de agua a nivel domiciliar, el análisis detallado de la precipitación conlleva la integración y determinación de parámetros como cantidad, ocurrencia, fiabilidad y distribución. Todos los parámetros de la precipitación están interrelacionados, siendo igualmente importantes, ver Ngigi (1999). Por lo tanto, estos parámetros serían importantes en el caso de ser crítica la fiabilidad del sistema de RWH. El nivel de fiabilidad requerido dependerá ante todo de si dicho sistema es la única fuente de abastecimiento (teniendo un 100% de

dependencia de éste para el suministro de agua) o se trata de un una fuente de recurso hídrico complementaría, como se da en la presente tesina.

En este último caso, la tarificación del agua abastecida por el sistema centralizado vendrá determinada en gran medida por el coste de producción y transporte del agua, con el objetivo de lograr la recuperación de costes y la sostenibilidad del sistema de abastecimiento. Por lo tanto, en el diseño de un sistema de abastecimiento dual dicha tarificación será determinante en el nivel de fiabilidad (riesgo de fallo) del sistema de cosecha de agua. Siendo finalmente una valoración económica, en el proceso de optimización, la que determine dicha fiabilidad.

En los siguientes puntos se muestran diferentes posibles fuentes de datos de lluvia, dependiendo la disponibilidad y la calidad de dichos datos principalmente del contexto en el cuál será implementado el proyecto.

#### *5.2.1.1 Datos de lluvia históricos*

Una técnica aplicada comúnmente es el uso de series de datos históricos de lluvia, es decir, un conjunto de datos que han sido recogidos por el registro de la intensidad de lluvia caída en un lugar dado dentro de un periodo de tiempo específico. Los datos son presentados en forma de intensidad de lluvia por unidad de tiempo, por ejemplo en mm/horas o mm/día. Estos serían entonces cotejados, editados para estar en un formato apropiado y usados directamente en un modelo sin la generación de ninguna nueva información.

El problema es que dichos datos no están disponibles en todas las zonas, sobre todo en los países en vías de desarrollo dónde no existen estaciones pluviométricas.

#### *5.2.1.2 Datos de lluvia estocásticos*

Las series de datos de lluvia sintética pueden ser generadas del análisis estadístico de los registros de lluvia históricos. Los métodos estocásticos son usados para generar series de lluvia sintética para áreas que tienen datos históricos limitados a pocos años o más cortas de lo requeridas. La calibración y validación frente a los

datos observados es requerida para tener confianza en la exactitud de los perfiles de lluvia sintética generados para un lugar dado (**Lanza y col., 2001**).

Sin embargo, esto no será posible si de partida no están disponibles datos de lluvia históricos de la zona de trabajo.

#### *5.2.1.3 Uso del modelo de clasificación del clima de Köppen-Geiger.*

Cuándo no hay datos de precipitación disponibles es posible tomar los datos de precipitación de lugares cercanos con el mismo clima, siguiendo la caracterización realizada en el mapa de clasificación del clima de Köppen-Geiger.

**Rubel, y Kottek (2010)** presentan una serie de mapas digitales del mundo que describen las tendencias globales observadas en el clima y los escenarios proyectados de cambio climático para el periodo extendido 1901-2100. Estos mapas son una actualización del mapa de clasificación del clima de **Wladimir Köppen**, publicado por primera vez en 1900 y actualizado en su anterior versión por **Rudolf Geiger** en 1961.

Los mapas del mundo para el periodo de observación 1901-2002 están basados en series de datos recientes de la Unidad de investigación del clima de la Universidad de East Anglia y del Centro de Climatología de la Precipitación Global del servicio del tiempo Alemán. Los mapas del mundo para el periodo 2003-2100 están basados en un conjunto de proyecciones de modelos de clima global suministrados por el Centro Tyndall para la investigación del cambio climático. El resultado principal comprende una estimación del Centro de investigación para el cambio climático de los cambios de las zonas de clima en el siglo 21 considerando diferentes escenarios del Panel Intergubernamental de cambio climático.

Las principales clases de clima establecidas por Köppen-Geiger son: ecuatorial (A), árido (B), temperatura cálida (C), nieve (D) y clima polar (E).

#### *5.2.1.4 Cómo de apropiado es el intervalo de tiempo.*

Cualquier dato que sea empleado debe ser lo suficientemente preciso para los propósitos del diseño del depósito (**Heggen, 1993**). Es decir, si el agua que va a ser colectada va a ser la única fuente de alimentación de agua disponible para la vivienda, la fiabilidad deberá ser mayor que si es un recurso complementario, requiriéndose intervalos de tiempo más pequeños.

En el caso de la presente tesina, como ya se ha citado, el agua cosechada será un suministro complementario de agua (no potable) a la abastecida por la red principal (agua potable), con el objetivo de conseguir una disminución en la demanda de agua potable abastecida por la red. Por lo tanto no se requerirá la misma fiabilidad que en el caso de ser la única fuente de suministro.

#### 5.2.2 Depósito de almacenamiento para RWH.

La capacidad de almacenamiento de agua es necesaria para compensar las diferencias entre el suministro de agua de lluvia y la demanda de agua no potable en el hogar. Si el suministro de agua de lluvia excede a la demanda de agua no potable en algún mes, es necesario el almacenamiento para permitir que esta agua sea abastecida y usada en un mes posterior, cuándo la demanda exceda al suministro.

Para que un sistema de cosecha de agua abastezca la necesidad de agua no potable a una vivienda a lo largo de todo el año debe cumplir dos condiciones:

- El total de agua de lluvia debe exceder al total de la demanda de agua no potable
- Debe haber suficiente capacidad de almacenamiento para permitir almacenar suficiente agua en los períodos más húmedos para que esta satisfaga la demanda en los periodos más secos.

Hay varias técnicas disponibles para calcular el volumen de depósito de almacenamiento apropiado que permiten maximizar el suministro de una captación dada, o alcanzar un requisito de demanda de agua, **Gould y Nissen-Petersen**

(1999), en la presenta tesina, como ya se ha citado, se trata de recurso complementario de agua no potable:

■ **Demanda de la estación seca frente al suministro de agua no potable.**

Es pertinente solo en áreas dónde existen estaciones secas, **el depósito es diseñado para almacenar la demanda de agua necesaria durante toda la estación seca.** La estación seca es tomada como el periodo durante el cual no hay lluvia significativa, y por lo tanto ninguna entrada al tanque es esperada.

No toma en cuenta variaciones entre diferentes años, tales como episodios de sequia. El método también ignora completamente la entrada de agua de lluvia y la capacidad de la captación para suministrar la escorrentía necesaria para llenar el depósito de almacenamiento. Esta técnica tiene sin embargo algunas **ventajas**, entre ellas está que puede ser usada en ausencia de datos de lluvia, aspecto especialmente relevante cuándo los sistemas se diseñan en áreas remotas de países en vías de desarrollo, dónde obtener datos de lluvia fiable puede ser difícil.

Este método puede ser útil para dar una idea aproximada de la capacidad de depósito mínimo requerido para satisfacer la demanda de la estación seca, siendo aconsejados otros métodos si los datos de agua de lluvia están disponibles.

■ **Métodos gráficos**

Puede ser usado para estimar la capacidad de almacenamiento más apropiada para el depósito, representando gráficamente la escorrentía del tejado y el consumo diario de agua no potable. Este método dará una estimación razonable de los requisitos mínimos para cubrir la demanda de

agua. En la presente tesina el volumen determinado será utilizado como restricción de rango en la optimización del SDA.

Al tratarse en este estudio de un sistema de cosecha de agua dual, en el cual se analizará dicho sistema de cosecha de agua dentro de un SDA, no se cree necesaria la utilización de datos de precipitación diaria o semanal, siendo suficiente el uso de datos mensuales para usar el volumen de almacenamiento calculado en las restricciones de rango a establecer para la función objetivo que será optimizada.

Los pasos básicos del método gráfico son:

- Hacer un diagrama de barras con las escorrentías medias mensuales generadas por el tejado, por lo tanto, es necesario disponer de los valores medios de precipitación mensual.
- Hacer un gráfico de las escorrentías acumuladas, sumando las escorrentías totales mensuales.
- Añadir una recta que represente el consumo de agua no potable acumulada, luego la mayor diferencia existente entre el aporte de agua de lluvia y el consumo de agua de lluvia nos dará el volumen de depósito aproximado que es necesario para satisfacer la demanda de agua no potable.

En los gráficos siguientes, Figuras 4, 5 y 6, se muestra el método gráfico para determinar el requisito de almacenamiento aproximado, paso por paso, para tratar de maximizar el suministro de agua de lluvia **Gould y Nissen-Petersen (1999)**:

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

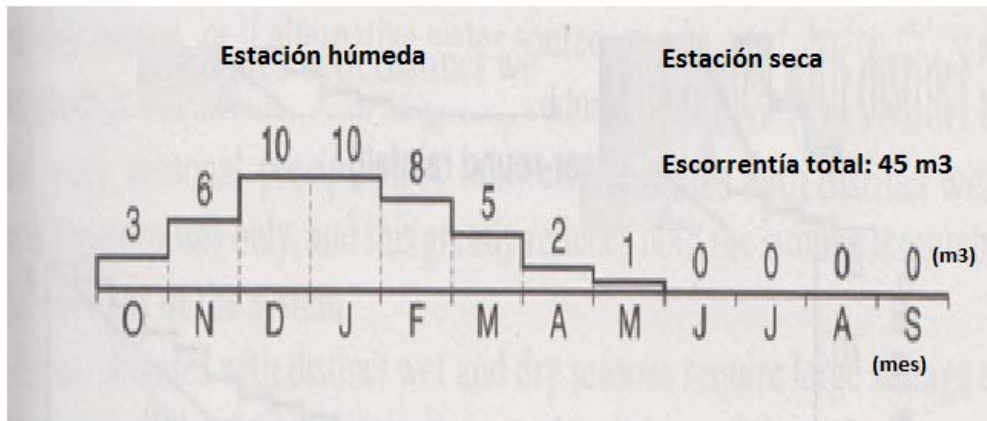


Figura 4 Escorrentía de tejado mensual media (m<sup>3</sup>).

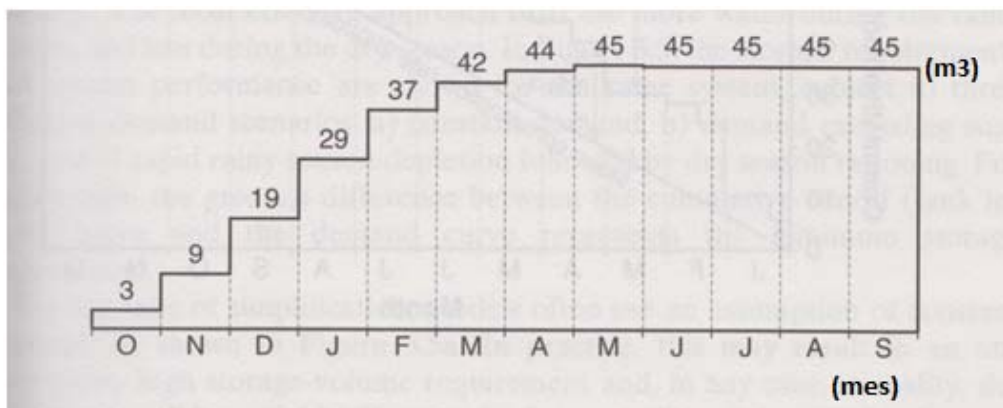


Figura 5 Escorrentía de tejado mensual acumulada

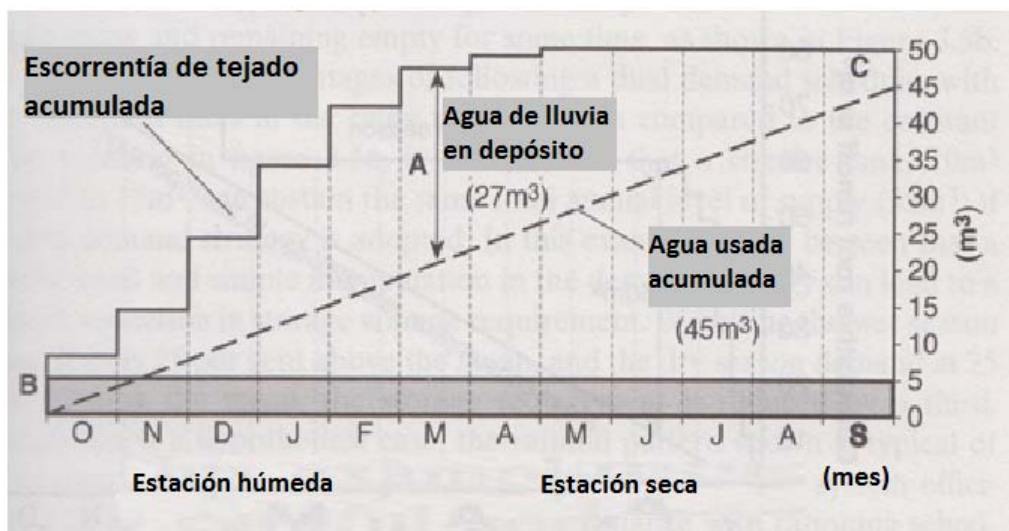


Figura 6 Estimación de los requisitos de almacenamiento.

En la Figura 6, A se refiere al requisito de almacenamiento, el volumen mínimo de depósito necesario para satisfacer la demanda de agua no potable durante toda la estación seca, teniendo en cuenta una pequeña



cantidad en reserva (B) en caso de que las lluvias empiecen tarde. Siendo C el almacenamiento residual de agua de lluvia que permanece en el tanque al final de la estación seca.

En este estudio estos pasos serán adaptados, ya que no se trata de maximizar el suministro de agua de lluvia, sino de tener en cuenta la demanda de agua no potable que deberá ser satisfecha (establecida como un porcentaje de la demanda de agua total) y las características de pluviometría de la zona (intensidades mensuales). Siendo necesario adaptar las dimensiones del depósito de cosecha de agua de lluvia a un contexto urbano (dimensiones realistas en dicho contexto), y por lo tanto, también las áreas de captación requeridas, de tal manera que sean cumplidos los requisitos de colecta de agua de lluvia para satisfacer la demanda de ANP.

#### ■ **Métodos estadísticos.**

Diversos métodos estadísticos han sido desarrollados, los cuales pueden ser usados en combinación con otros métodos, tales como el análisis de la curva de masa, para determinar la fiabilidad del suministro, es decir, la probabilidad de fallo del sistema. Un enfoque basado en el análisis de la frecuencia de ocurrencia de cantidades mínimas de lluvia para periodos entre dos y 84 meses en un registro de 75 años, fue usado por **Ree y col (1971)** apud **Gould y Nissen-Petersen (1999)**. Los extensos cálculos involucrados en todo enfoque estadístico hacen que el uso de ordenadores sea esencial.

#### ■ **Métodos computacionales.**

El uso de modelos computacionales para el diseño de sistemas de cosecha de agua nivel domiciliario permite gran flexibilidad, ya que el modelo puede ser adaptado a cualquier sistema particular bajo las condiciones de lluvia dadas. El formato de la salida puede ser adaptado a los requisitos, y el comportamiento de diseños específicos puede ser simulado bajo varios escenarios de demanda.

---

Autores como Roebuck y Ashley (2006) han desarrollado una herramienta de modelación, RainCycle®, que tiene la capacidad de analizar en detalle el comportamiento del sistema de cosecha de agua de lluvia. El programa incluye un modelo hidráulico detallado de un sistema de cosecha de agua típico y también tiene la capacidad de considerar la mayor cantidad de los costes asociados al sistema. Llegando a analizar el coste del ciclo de vida de dicho sistema.

### 5.2.3 Coeficiente de escorrentía.

El coeficiente de escorrentía,  $C_R$ , para cualquier captación de agua de lluvia es el cociente entre el volumen de agua que escurre una superficie y el volumen de agua que cae sobre la superficie, en un tiempo  $t$ , **Gould y Nissen-Petersen, 1999**.

$$C_R = \frac{\text{Volumen de escorrentía}}{\text{Volumen de lluvia}}$$

Todos los cálculos relacionados con el comportamiento de los sistemas de captación de agua de lluvia conllevan el uso de un coeficiente de escorrentía para tener en cuenta las pérdidas debidas al vertido, infiltraciones, mojado de la superficie de captación y evaporación, lo cual contribuirá a reducir la cantidad de agua de lluvia que entra en el depósito de almacenamiento.

**Zhu y Liu (1998)** hicieron un estudio en la provincia China de Gansu para determinar los coeficientes de escorrentía de diferentes captaciones de tejado y de superficie en áreas con media anual de lluvia variando desde 200 a 500 mm obteniendo las siguientes estimaciones para tejados:

Material	Coeficiente de escorrentía estimado
Lámina de metal	0.8-0.85
Teja de cemento	0.62-0.69
Teja de barro (hecho a máquina)	0.30-0.39
Teja de barro (hecha a mano)	0.24-0.31

**Tabla 1 Valores de Coeficientes de escorrentía de tejados de diferente material.**

#### 5.2.4 Potencial de suministro por cosecha de agua

La cantidad de agua cosechada depende de la cantidad de precipitación, del área de la captación y de su coeficiente de escorrentía. Hay que tener en cuenta que la precipitación es la variable más impredecible en el cálculo del potencial de suministro de una captación de agua de lluvia, ya que en muchas áreas hay una considerable variación de un año al siguiente.

La estimación de la escorrentía media anual de una captación dada puede ser obtenida con la siguiente ecuación, **Gould y Nissen-Petersen, 1999:**

$$S = R \cdot A \cdot C_r$$

Siendo:

S; Suministro (escorrentía producida) medio anual de agua de lluvia en metros cúbicos (m<sup>3</sup>)

R; Precipitación de lluvia anual media en milímetros (mm)

A; Área de captación en metros cuadrados (m<sup>2</sup>)

C<sub>r</sub>; Coeficiente de escorrentía

Por lo tanto, la cantidad de agua de lluvia que puede ser suministrada puede variar considerablemente de un año a otro por razones de precipitación, dependiendo directamente del volumen del tanque de almacenamiento disponible.

#### 5.2.5 Demanda de agua

En la demanda de agua potable doméstica se incluirá, en el caso de la presente tesina (ya que los usos dependerán del contexto de ejecución del proyecto), el agua de consumo humano (bebida y preparación de alimentos), así como para la higiene personal (ducha y lavabo) y preparación de alimentos. Por otro lado, en la demanda de agua de cosecha de lluvia se incluirá, en el caso de la presente tesina (ya que los usos dependerán del contexto de ejecución del proyecto), el agua para cisternas de WC, lavado de ropa y limpieza de hogar, así como el riego de plantas y limpieza de vehículos. Como se ha mencionado, esta asignación podrá variar según cada

contexto, dependiendo dicha asignación tanto de la realidad socioeconómica y cultural, como de la disponibilidad de recurso hídrico.

Cuándo la demanda de cosecha de agua de lluvia estimada es usada como la base para el diseño de sistemas de cosecha de agua, ésta debe ser tratada con gran precaución si el sistema de cosecha de agua de lluvia es la principal o única fuente de suministro. En el caso de la presente tesina dicho aspecto “no es tan relevante”, ya que la cosecha de agua es un recurso complementario para evitar el consumo de agua potable para usos en los que dicha calidad no es necesaria.

En la presente tesina será asumido un patrón de demanda constante a través del periodo de análisis, tanto a nivel de consumo de agua potable como de no potable (uso del agua cosechada), siendo dicho patrón de demanda variable según el contexto de ejecución del proyecto, pudiendo variar de manera estacional.

Para el análisis del modelo será tomado un periodo de 1 año (12 meses), conteniendo dicho modelo los depósitos de cosecha de agua de lluvia. El volumen aproximado de depósito requerido para alimentar la demanda de cosecha de agua de lluvia será calculado por el método gráfico citado en el apartado 6.2.2., siendo dicho volumen utilizado en las restricciones de la función objetivo para acotar la optimización.

## **6 LA OPTIMIZACIÓN Y EL DISEÑO MULTI OBJETIVO**

La optimización de un proceso trata de obtener el mejor resultado posible dadas ciertas variables y restricciones. La búsqueda de la mejor opción es muy útil en los distintos campos de la ciencia, siendo de gran importancia en el campo de la ingeniería debido a las elevadas inversiones que suelen conllevar la implementación de grandes proyectos.

En la resolución de un problema de optimización se buscará un vector de variables que minimice una cierta función sujeta a restricciones. En la mayoría de los problemas de ingeniería dichas restricciones son de diseño, pudiendo ser restricciones al comportamiento del sistema o funcionales, así como restricciones físicas o geométricas.

En lo que respecta al diseño óptimo multiobjetivo, es un área de investigación muy importante dentro de la ingeniería ya que la mayoría de los problemas que se plantean en el mundo real, entre ellos los diseños de los SDA, entran dentro de esta categoría.

Dentro del diseño óptimo multiobjetivo no hay una definición de “óptimo” que sea aceptada universalmente, como en el caso de la optimización con un solo objetivo, lo cual hace difícil poder comparar los resultados de una técnica con los de otra. Por otro lado, normalmente la decisión acerca de cuál es la mejor solución corresponde realmente a una persona o grupo de personas decisoras del proyecto, los cuáles aplicarán sus propios criterios, que suelen depender del contexto de ejecución del proyecto y tener una alta “dosis” de subjetividad.

El problema de optimización multiobjetivo (POM), también llamado multicriterio o vectorial, puede definirse (según **Coello, 2005**) como un vector de variables de decisión que satisfagan un cierto conjunto de restricciones y optimicen un conjunto de funciones objetivo. Estas funciones objetivo son una descripción matemática de los criterios de diseño que se quieren optimizar, los cuales suelen estar en conflicto unos con otros y se suelen medir en unidades diferentes. En consecuencia, el término optimizar en este caso toma un significado diferente al que toma en el caso de los problemas mono-objetivo, ver figura 7.

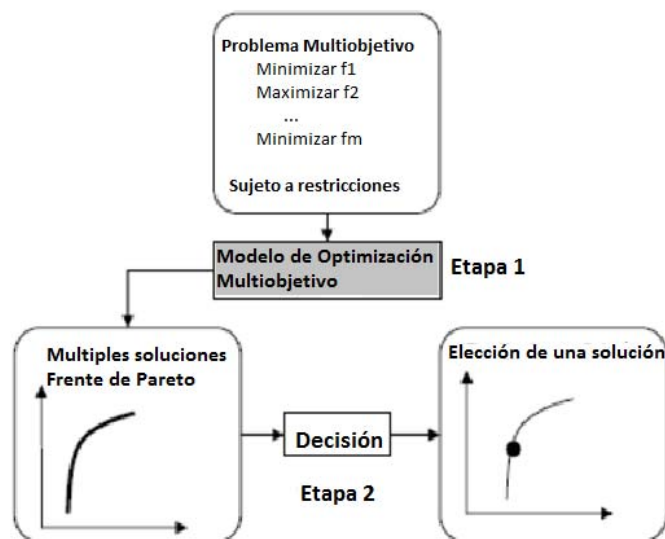


Figura 7 Adaptada de Coello A. (2005).

---

Al tener varias funciones objetivo, la noción de “óptimo” cambia, porque en un POM realmente se está tratando de obtener “buenos compromisos” en vez de una solución única como ocurre en el caso de la optimización global.

La noción de “óptimo” que suele adoptarse más comúnmente es aquella propuesta originalmente por Francis Ysudro Edgeworth en 1881, esta noción fue luego generalizada por Vilfredo Pareto en 1896. Aunque algunos autores llaman a dicha noción “óptimo” de Edgeworth-Pareto, el término más aceptado es el de óptimo de Pareto, ver **Coello y Landa (2009)**.

Según **Zitzler (1999)** el problema de optimización multiobjetivo puede estar formulado de manera general según la siguiente definición, ver **Tebcharani (2007)**:

Un problema de optimización multiobjetivo incluye un conjunto de **n parámetros** (variables de decisión), un conjunto de **K funciones objetivo** y **m restricciones**, funciones de las variables de decisión. El objetivo de la optimización es:

Minimizar (o Maximizar)  $y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$

Sujeto a:  $g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x)) \leq 0$

Siendo:  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$

$y = (y_1, y_2, \dots, y_k) \in Y$

Siendo:

$x$ ; vector de decisión

$y$ ; vector objetivo

$X$ ; espacio de decisión

$Y$ ; espacio objetivo.

Las restricciones  $g(x) \leq 0$  determinan el conjunto de soluciones factibles. Una solución  $x$  que no satisfaga todas esas restricciones ( $m$ ) y todos los límites del espacio de decisión es denominada solución no factible. Por otro lado, si alguna solución  $x$  satisface todas las restricciones y todos los límites del espacio de

decisión, es denominada solución factible. El conjunto de todas las soluciones factibles es denominada región factible o  $Y$ .

- Conjunto factible y frente de Pareto.

El **conjunto factible**  $X_f$  es definido como el conjunto de vectores de decisión  $x$  que satisfacen las restricciones  $g(x)$ :

$$X_f = \{x \in X | g(x) \leq 0\}$$

La solución óptima global para un problema de objetivo único representa el valor mínimo o máximo de determinada función que cumple todas las restricciones. Sin embargo, en los problemas multiobjetivo se puede decir que los óptimos globales son diferentes. Lo ideal sería que el valor óptimo de una función (mínimo o máximo) fuese óptimo para las otras funciones también. Particularmente eso puede ocurrir, pero no siempre sucede.

En los POM, generalmente, los objetivos son conflictivos, y en consecuencia, una solución que es óptima para una función dada no es óptima para las otras funciones. Por lo tanto, los objetivos no pueden ser optimizados simultáneamente, al contrario, lo que se pretende es buscar una relación satisfactoria, también denominada como solución de compromiso, entre las funciones.

En la optimización del objetivo único, el conjunto factible es completamente ordenado de acuerdo con su función objetivo ( $f$ ). Por ejemplo, para dos soluciones  $a$  y  $b$  pertenecientes al conjunto  $X_f$ , lo que puede ocurrir es  $f(a) \geq f(b)$  o  $f(b) \geq f(a)$ . El objetivo entonces es encontrar una solución que suministre un valor máximo o mínimo de  $f$ .

Cuando hay varios objetivos implicados la situación cambia. Por ejemplo,  $X_f$  es en general no totalmente ordenado, pero sí parcialmente ordenado, ver la figura 8. En esta ilustración se considera que las funciones  $f_1$  y  $f_2$  deben ser maximizadas. La solución representada por el punto B es mejor que la solución representada por C, porque B presenta mayor valor que C para  $f_1$  y  $f_2$ . Comparando C y D, C es mejor que D porque el valor C para  $f_1$  es mayor y para  $f_2$  las soluciones se igualan. Para

expresar esa situación matemáticamente, las relaciones  $=$ ,  $\geq$  y  $>$  son extendidas a los vectores objetivo por analogía al caso de optimización de un único objetivo.

Teniendo en cuenta que considerando dos vectores,  $u$  y  $v$  (las relaciones  $\leq$  y  $<$  son definidas similarmente):

$u = v$  si y solamente si  $\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}: u_i = v_i$

$v \geq u$  si y solamente si  $\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}: u_i \geq v_i$

$u > v$  si y solamente si  $u \geq v \wedge u \neq v$

Utilizando la notación de la definición de arriba, se puede garantizar en la figura 8 que  $B > C$ ,  $C > D$  implica que  $B > D$ . Sin embargo, cuándo  $B$  y  $E$  son comparados entre sí no se puede identificar directamente qué solución es superior, si se da que  $B > E$  o que  $E > B$ .

En cualquier caso puede observarse que la solución  $E$  tiene mayor valor de  $f_2$  que el de la solución  $B$ . Respecto al valor de la función  $f_1$ , la solución  $E$  tiene menor valor que la solución  $B$ . Por lo tanto, dos variables de decisión cualesquiera  $a$  y  $b$  pueden tener 3 posibilidades en los problemas multiobjetivo considerando el símbolo  $\geq$  (en contraste a los problemas de objetivo único con dos soluciones siendo comparadas).

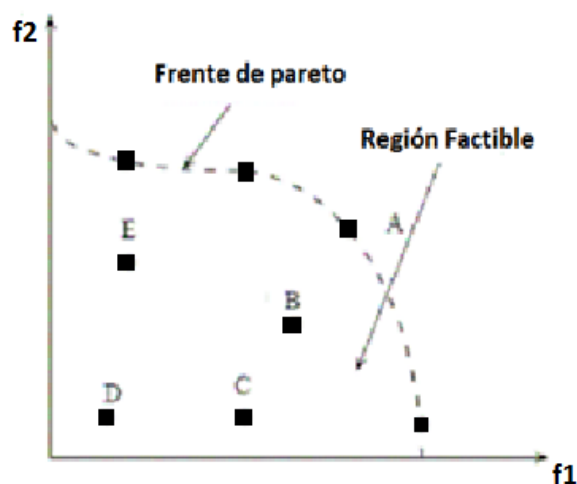


Figura 8 Adaptada de Coello (2005).

En la figura 9 en el rectángulo referenciado con el texto “Domina”, significa que el vector solución  $B$  domina todo el espacio objetivo que contiene las soluciones  $C$  y  $D$ .



El otro rectángulo referenciado con el texto “es dominado” significa que el vector solución A domina el vector solución B. Todas las otras soluciones que pertenecen al espacio objetivo son indiferentes en relación al vector solución B.

Así, se puede introducir el criterio de optimalidad basado en el concepto de dominancia de Pareto. El vector solución A (Figura 8) es el único de entre las otras soluciones (C, D y E) no dominado por ningún otro vector en el espacio objetivo. Tales soluciones son denominadas óptimas Pareto o no inferiores (Cohon, 1978).

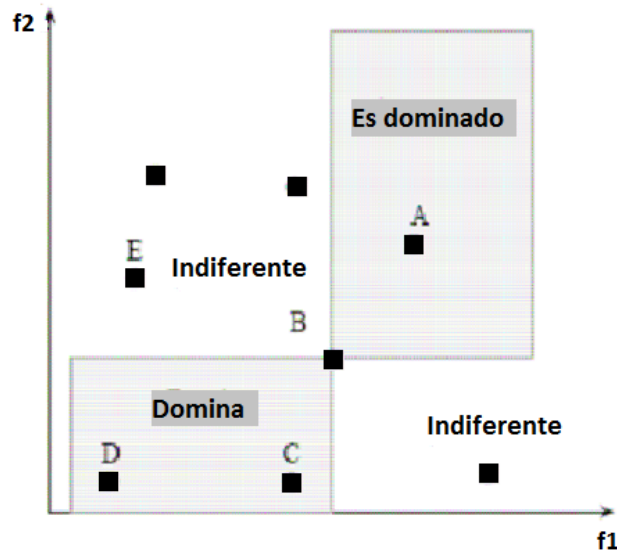


Figura 9 Adaptada de Coello A. (2005).

■ Optimalidad de Pareto.

Siendo  $X_f$  el conjunto factible y  $A \subseteq X_f$ , si y solamente si  $\nexists a \in A: a > x$ , se da que  $x$  es dicho ser óptimo de Pareto si y solamente si  $x$  es no dominado considerando  $x_f$ . Si estuviera claro cuál conjunto  $A$  es mencionado, esa relación simplemente es omitida.

En la figura 9, todos los otros puntos pertenecientes a la línea puntillada son soluciones óptimas de Pareto. Esas soluciones son indiferentes unas de las otras. Esa es la principal diferencia de los problemas de optimización de objetivo único, no existe una solución óptima, sino un conjunto de soluciones compatibilizadas. Ninguna de esas soluciones puede ser dicha mejor que las otras, a no ser que, alguna información de preferencia sea incluida. El conjunto de todas las soluciones

óptimas de Pareto es denominado conjunto de Pareto óptimo; los vectores (objetivo) correspondientes forman el frente o la superficie de Pareto óptima.

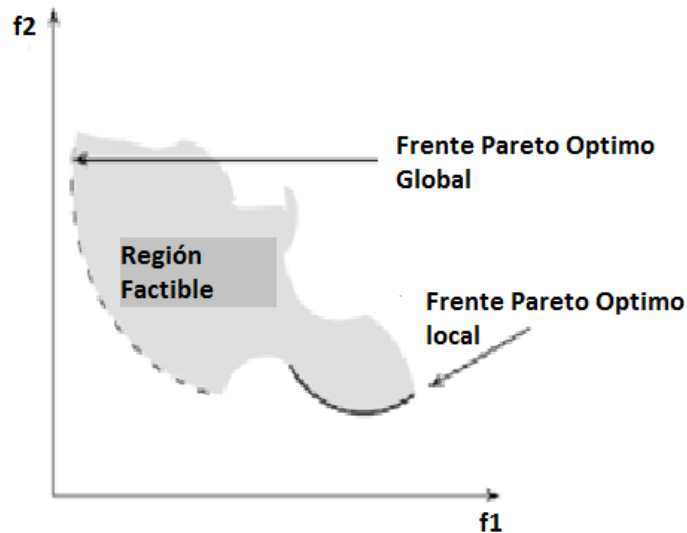


Figura 10 Adaptada de Coello (2005).

■ Optimo global y local

Siendo  $A \subseteq X_f$ . La función  $p(A)$  suministra el conjunto de vectores de decisión no dominado en A:

$$p(A) = \{a \in A \mid a \text{ es no dominado en } A\}$$

El conjunto  $p(A)$  es el conjunto no dominado en A, el conjunto correspondiente de vectores objetivo  $f(p(A))$  es el frente no dominado en A. Además de eso, el conjunto  $x_p = p(x_f)$  es denominado conjunto de Pareto óptimo y el conjunto  $Y_p = f(x_p)$  es denotado frente de Pareto óptimo. El conjunto de Pareto óptimo comprende las soluciones de mejor compromiso. Mientras, semejante a la optimización de objetivo único, en la optimización multiobjetivo también existen los óptimos locales que constituyen un conjunto no dominado dentro de una cierta vecindad (corresponde a los conceptos de conjunto óptimo local y global presentado por **Deb, 1999**).

La diferencia entre los óptimos globales y locales es ilustrada por la figura 10. La línea es un frente de Pareto óptimo local.

## 6.1 Algoritmos Genéticos y Evolver como herramienta para la resolución.

Los algoritmos genéticos se encuentran dentro de los denominados algoritmos evolutivos, los cuales incluyen estrategias de evolución, la programación evolutiva y la programación genética.

Los Algoritmos Genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de selección natural y de la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorizado, para constituir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas (**Goldberg, 1989, apud Gestal y col.**).

El desarrollo de los Algoritmos Genéticos se debe en gran medida a John Holland, investigador de la Universidad de Michigan. A finales de la década de los 60 desarrolló una técnica que imitaba en su funcionamiento a la selección natural. Aunque originalmente esta técnica recibió el nombre de “planes reproductivos”, a raíz de la publicación en 1975 de su libro “Adaptation in Natural and Artificial Systems” (**Holland, 1975, apud Gestal y col.**) se conoce principalmente con el nombre de Algoritmos Genéticos.

Un Algoritmo Genético es una población de soluciones que están codificadas en una forma similar a los cromosomas, cada uno de los cuales tendrá asociado un ajuste o valor de bondad que cuantifica su validez como solución al problema. Dependiendo de dicho valor serán dadas las oportunidades de reproducción, existiendo la probabilidad de que se realicen mutaciones de dichos cromosomas. Este proceso hará posible que los individuos genéticos tiendan hacia las soluciones a un problema dado, aunque las condiciones del espacio de búsqueda varíen con el transcurso del tiempo (**Grefenstette, 1992**).

Los algoritmos genéticos permiten resolver problemas con funciones discontinuas o no lineales, presentando una serie de ventajas, y/o características, respecto a otros tipos de algoritmos de optimización.

Entre esas ventajas y/o características cabe destacar las siguientes:

- **Algoritmos estocásticos.** Dos ejecuciones distintas pueden dar dos soluciones distintas (isómeros). Esto es útil por el hecho de que hay gran cantidad de isómeros que corresponden a soluciones válidas, por lo que es interesante que distintas ejecuciones nos puedan dar isómeros distintos.
- **Algoritmos de búsqueda múltiple.** Por lo tanto dan varias soluciones, aunque habitualmente la energía de los individuos de la población final es similar, los individuos suelen ser distintos entre sí. Por ello, será posible la elección de la solución que más convenga según la naturaleza del problema.
- **Hacen una barrida** mayor al subespacio de posibles soluciones válidas. Los algoritmos genéticos son de los más exploratorios disponibles. La convergencia del algoritmo es poco sensible a la población inicial si ésta se escoge de forma aleatoria y es lo suficientemente grande, salvo que la población inicial esté realmente degenerada. En ese caso, el operador de mutación tendrá mucho trabajo.
- **Convergencia excepcionalmente** rápida al principio, que casi enseguida se bloquea. Esto se debe a que el algoritmo genético es excelente descartando subespacios realmente malos. Cada cierto tiempo, la población vuelve a dar el salto evolutivo, y se produce un incremento en la velocidad de convergencia excepcional. La razón de esto es que algunas veces aparece una mutación altamente beneficiosa, o un individuo excepcional, que propaga algún conjunto de cromosomas excepcional al resto de la población. Todo esto es consecuencia del grado de penetración casi nulo que presentan los algoritmos genéticos.
- **La optimización es función** de la representación de los datos. Este es un concepto clave dentro de los algoritmos genéticos, ya que una buena codificación puede hacer la programación y la resolución muy sencillas, mientras que una codificación errónea obliga a estudiar que el nuevo

genoma cumpla las restricciones del problema, y en muchos problemas se tendrá que abortar los que no cumplan las restricciones, por ser éstas demasiado complejas. Además, la velocidad de convergencia va a estar fuertemente influenciada por la representación.

- **Es una búsqueda paraméricamente robusta.** Esto quiere decir que para que no converja la elección de los parámetros debería ser realmente mala. Con tasas razonables, va a converger -mejor o peor- en una solución razonablemente buena si la representación es la adecuada.
- **Los algoritmos genéticos son intrínsecamente paralelos.** Esto significa que, independientemente de que se haya implementado de forma paralela o no, buscan en distintos puntos del espacio de soluciones de forma paralela. Ese paralelismo intrínseco permite que sean fácilmente paralelizables, es decir, que sea fácil modificar el código para que se ejecute simultáneamente en varios procesadores.

Evolver® utiliza los Algoritmos genéticos en la búsqueda de la mejor solución a un problema que puede tener muchas soluciones posibles. La mayoría de los problemas, entre ellos los de diseño óptimo de sistemas de abastecimiento, tienen múltiples variables que interactúan según fórmulas y restricciones establecidas, por lo que el uso de algoritmos genéticos en la búsqueda de las mejores soluciones es muy útil.

En la presente tesina se hará uso de la aplicación Evolver® (dicho programa será presentado en el Anexo 2) a través de la programación con Visual Basic, completando dicha programación con las herramientas necesarias del Toolkit de Epanet.

## **7 LA FUNCIÓN OBJETIVO.**

### **7.1 Aspectos a tener en cuenta.**

Se puede definir la Función Objetivo como la función matemática que se optimiza cambiando los valores de las variables de diseño. Siendo dichas variables de diseño

aquellas variables que los diseñadores pueden cambiar. Por otro lado, al establecer un problema de optimización es preciso hacer uso de las restricciones. Las restricciones son funciones de las variables de diseño, las cuales establecen límites a variables individuales o combinaciones de las variables de diseño.

Si se pretende definir un sistema de distribución de agua desde un punto de vista global, teniendo en cuenta la sostenibilidad dentro del contexto en el que va a dar servicio, no sólo se podrá tener en cuenta el SDA a **nivel técnico-infraestructura**, sino que también a nivel **técnico-operacional**, así como la disponibilidad de recursos económicos por parte de la empresa encargada de operar el sistema, de la disponibilidad de pago por parte del usuario y de recurso hídrico suficiente para dar servicio.

La componente técnico-infraestructura está formada por los elementos de transmisión del agua, las tuberías (componente que será optimizado en la presente tesina); los elementos de almacenamiento, tanques de regulación y de distribución; los elementos que aportan energía al agua, estaciones de bombeo y de rebombeo; los elementos de control, válvulas y los elementos de medición, manómetros y caudalímetros.

La componente técnico-operacional y de mantenimiento son las reglas de operación que rigen el funcionamiento del sistema y cuál es el coste de mantenimiento estimado del SDA. En la presente tesina se hace una evaluación de la operación de las soluciones viables según las restricciones establecidas.

Por otro lado, la componente de disponibilidad de recursos económicos por parte de la institución que se encarga de la operación y el mantenimiento del sistema estará estrechamente ligada a la disponibilidad de pago de los usuarios por el servicio y la disponibilidad de recurso hídrico para ser suministrado. Factor a tomar en cuenta por los decisores del proyecto.

#### 7.1.1 Fiabilidad del sistema

La fiabilidad de las redes de distribución de agua conlleva una evaluación de la calidad del servicio de abastecimiento, la capacidad de atender a los caudales y

presiones requeridas, es decir, es una cuantificación de “la habilidad” de la red de distribución de agua para satisfacer las demandas en todos los nudos de consumo, con presiones aceptables. Así mismo, está relacionada con la posibilidad de ocurrencia de fallos en el sistema.

Las redes de distribución de agua son diseñadas para maximizar la continuidad del suministro. Esto quiere decir que no sólo en la situación en que todos los componentes del sistemas son operados el suministro está garantizado, sino también si un número previsible de elementos del sistema falla. Esto puede suceder por ejemplo por el fallo de una tubería a causa de un reventón, fallo en la alimentación eléctrica que causa el paro de las bombas, etc. Para asegurar la continuidad del suministro las empresas de abastecimiento de agua suelen “introducir” elementos redundantes en el sistema. Por ejemplo, con una selección cuidadosa de las fuentes (tan protegidas como sea posible), sistemas de almacenamiento, localización de las estaciones de bombeo y las plantas de tratamiento en lugares separados en el trazado de la red, sistemas de emergencia de generación eléctrica, sistemas de monitoreo de la calidad del agua, instalaciones de alarma, etc., según cada contexto de implementación del proyecto.

Las redes son diseñadas para funcionar tanto tiempo como sea posible, incluso durante eventos de fallos en ciertos componentes del sistema, para lograr este objetivo la principal característica (entre otros componentes) de las redes debe ser la estructura mallada.

**Xu y Goulter (1999)** definen la fiabilidad como la habilidad del sistema para fomentar el adecuado suministro de agua en condiciones normales y anormales. Estos autores presentaron un nuevo acercamiento capaz de aliar las incertidumbres en las demandas nodales y las capacidades hidráulicas de los tramos, así como los efectos de los fallos mecánicos de los componentes, en la optimización basada en la fiabilidad de la red. Los fallos son asociados con presiones insuficientes y la fiabilidad, definida como la probabilidad de que las demandas en los nudos sean atendidas bajo una presión mayor o igual a un valor mínimo para una configuración fija de red bajo demandas y rugosidades aleatorias.

**Tung (1985)** definió la fiabilidad de una red como la probabilidad de que un caudal pueda alcanzar todos los nudos de demanda de la red. Otra dificultad de incluir la fiabilidad en un proyecto u operación de una red de distribución de agua está en el hecho de no existir una definición o medición universalmente aceptada. Algunos factores que pueden afectar a la fiabilidad son los eventos de naturaleza “aleatoria”, como caídas de Energía, variación inesperada de la demanda, roturas, fallos de componentes y obstrucciones, que reducen la capacidad de transporte de la red. Pudiendo así ocasionar hasta la falta de abastecimiento al consumidor.

Por lo tanto, existen dos casos dónde los consumidores pueden experimentar interrupciones en el abastecimiento, afectando a la fiabilidad. Primero, cuando ocurre una rotura en un tubo, este es aislado por medio del cierre de las válvulas apropiadas para permitir la realización de la debida reparación. Esos consumidores, cuyo servicio está localizado entre esas válvulas, dejan de tener abastecimiento hasta que la rotura es reparada. El segundo caso ocurre cuándo las presiones de abastecimiento son reducidas, por debajo de niveles aceptables para algunos consumidores, lo que ocurre debido a incidencias de otro tipo en el sistema y factores de naturaleza aleatoria como cortes energía, variaciones inesperadas de la demanda, fallos de componentes y obstrucciones que reducen la capacidad de transporte de la red.

**Kansal y Kumar (1995)** resaltaron que el análisis de fiabilidad en países en desarrollo debe dar importancia a los aspectos de conexión de los consumidores y la garantía de suministro de agua, aunque en condiciones insatisfactorias, en detrimento de la calidad del servicio en términos de presión. En su trabajo propusieron un índice de conectividad global de la red que puede ser calculado sin evaluaciones a nivel de los nudos.

En cualquier caso, la optimización de las redes tiende a reducir costes por la reducción del diámetro o eliminación de algunas canalizaciones, volviendo al sistema con capacidad insuficiente para responder a las roturas de las canalizaciones o las demandas que exceden los valores del diseño sin incumplir los niveles de desempeño requeridos. Debido a la poca certeza en la previsión de la demanda y en



la estimación del coste, promover un servicio adecuado con una fiabilidad y un factor de seguridad adecuados se vuelve una condición importante en el diseño multiobjetivo de un SDA.

Las redes de distribución de agua son frecuentemente proyectadas para suministrar agua a cada nudo, satisfaciendo la demanda en términos de caudal y presión. Por tanto, en caso de cambio de demanda o fallo de tuberías el caudal cambiará y la red original será transformada en una nueva, con mayor pérdida de energía interna. Lo que puede volver imposible el abastecimiento a la tasa de caudal deseado y a una mínima presión aceptable.

En el caso de la presente tesina, la fiabilidad de la red será aumentada a través de un diseño de red mallado que proporcione un camino alternativo para el flujo en el caso de que ocurran fallos y/o reparaciones en la red. Siendo ésta la medida más básica a tomar para lograr un aumento en la fiabilidad del sistema.

## **7.2 El modelo hidráulico.**

La modelación del funcionamiento de la red trata de describir el comportamiento hidráulico de los diferentes componentes de la red, es decir, trata de reproducir lo que sucede en la realidad en la red con la ayuda de un modelo matemático-hidráulico.

El modelo realizado para el diseño del sistema de abastecimiento de agua permite verificar, para una configuración de la red que contiene la cosecha de agua de lluvia, la satisfacción de exigencias de los usuarios en términos de presión y de demanda. El interés es dimensionar los diámetros de las tuberías, habiendo sido establecidos los consumos previstos tanto para el agua potable como el agua no potable y las  $P_{min}$  de servicio admisibles.

### 7.2.1 Información necesaria para definir el modelo

Como en todo modelo, la calidad y la cantidad de datos es fundamental para poder representar la realidad, por ello el proceso de selección y definición de las

características de la red son importantes. Sobre todo al tratarse del diseño de una nueva red.

Entre la información que se requiere está la de de la topología de la red:

- Longitudes de las tuberías. Qué vendrán dadas por el trazado definido para la red sobre la ortofoto.
- Diámetros de partida para alimentar el modelo. Serán alimentados de manera que facilite el uso de Evolver, presentando todos los posibles diámetros comerciales del tipo de tubería seleccionada para el diseño.
- Material de las tuberías. En la presente tesina se utilizará PEHD.
- Fuente de alimentación.
- Diferentes componentes. Bombas, válvulas imprescindibles para el diseño, etc.

Además, será necesario contar con la información relativa a los futuros usuarios, tanto en el aspecto espacial como de consumo, pudiendo ser este último aspecto una información estadística, si existen tales datos, o un valor establecido siguiendo los lineamientos a nivel país o, en ausencia de éstos, por comparación con contextos similares.

Otro dato a asignar es la tasa de fuga que se tendrá en cuenta para el cálculo de los requisitos de alimentación en agua al sistema, ya incluso a corto plazo (5 años después de la puesta en marcha del sistema) es previsible la existencia de fugas aún realizando un mantenimiento preventivo y correctivo.

### **7.3 Definición de la Función objetivo**

Para el diseño del sistema de abastecimiento será utilizado el software de modelación hidráulica EPANET, tanto Visual como las herramientas de Toolkit haciendo uso de Visual Basic, que no será utilizado propiamente para la optimización sino para realizar las diferentes simulaciones hidráulicas.

Una vez definida la función objetivo y las restricciones del diseño, así como desarrollado el programa para explotar el modelo generado en EPANET Visual haciendo uso de las herramientas de Toolkit de EPANET en Visual Basic, se utilizarán los algoritmos genéticos para optimizar dicha función haciendo uso de la aplicación Evolver® para Excel.

En el modelo utilizado se tiene en cada nudo de consumo de agua potable un “bloque de cosecha de agua de lluvia”, que tratará de alimentar la mayor cantidad de agua de lluvia posible (mediante un sistema dual) para usos complementarios a los usos de agua potable, a los mismos usuarios que alimenta dicho nudo de consumo de agua potable.

El modelo propuesto se introduce dentro del concepto de optimización por los beneficios económicos obtenidos al reducir los diámetros necesarios de las tuberías de abastecimiento de agua potable al introducir los depósitos de almacenamiento de agua de lluvia, así como por la disminución de la producción de agua potable. Por otro lado, habrá un ahorro en la operación del sistema debido al menor caudal de agua bombeada, en caso de no tratarse de un sistema de abastecimiento por gravedad.

Por lo tanto, se diseñarán diferentes alternativas óptimas para el sistema de abastecimiento cumpliendo cada uno de ellas con una presión mínima de servicio, estando dicha presión dentro de un intervalo de “presión de servicio aceptable” que será definido. En consecuencia, podremos hablar de una optimización multiojetivo en la cual se obtendrá un frente de Pareto que represente el coste de cada alternativa para el sistema de abastecimiento de agua versus  $P_{min}$  de abastecimiento de dicha alternativa.

Dicho frente de Pareto permitirá al tomador de decisiones seleccionar la solución más apropiada según los recursos económicos disponibles y las exigencias de presión requeridas, pudiendo “sacrificar” la presión mínima de abastecimiento existente en el sistema a favor de minimizar los costes de inversión del sistema.

### 7.3.1 Variables de decisión

Las variables de diseño son aquellas variables que los diseñadores pueden variar para optimizar el diseño del sistema, forman parte de la función objetivo y son las variables a determinar en el proceso de optimización. En este caso dichas variables son los diámetros de las tuberías de la red de abastecimiento de agua potable, siendo dichos diámetros valores de diámetros comerciales. Las presiones mínimas admitidas en los nudos de consumo, que serán fijadas, influirán directamente en las alternativas de diseño del sistema.

### 7.3.2 Algunas restricciones de la función objetivo.

Como previamente se ha mencionado, las restricciones son funciones de las variables de diseño que establecen límites a las variables individuales o a combinaciones de las variables de diseño.

A **nivel técnico-infraestructura y técnico-operacional-mantenimiento** se tendrán en cuenta las siguientes restricciones:

- Restricciones geométricas y topológicas impuestas por la zona de proyecto. La topografía, la dificultad de acceso a la zona y la existencia de cualquier tipo de restricción va a limitar la libertad de localización de los elementos del SDA.
- Restricción de presión máxima y mínima en los nodos.

$$H_j^{m\acute{a}x} \geq H_j \geq H_j^{m\acute{i}n}; j=1, \dots, N$$

Siendo: N; número de nodos de la red,  $H_j$ ; presión en el nodo j,  $H_j^{m\acute{i}n}$ ; presión mínima en el nodo j y  $H_j^{m\acute{a}x}$ ; presión máxima en el nodo j.

- Restricciones de velocidad máxima y mínima en las tuberías

$$V_i^{m\acute{a}x} \geq V_i \geq V_i^{m\acute{i}n}; i = 1, \dots, L$$

Siendo:  $L$ ; número de tuberías en la red,  $V_j$ ; velocidad de circulación del flujo por la tubería  $j$ ,  $V_j^{min}$ ; velocidad mínima de circulación del flujo por la tubería  $j$  y  $V_j^{max}$ ; velocidad máxima de circulación del flujo por la tubería  $j$ .

- La ecuación de continuidad se cumple.

$$\sum Q_{en} - \sum Q_{sal} = Q_{nodo}$$

Siendo:  $Q_{en}$ ; caudal que entra a un nodo por alguna de las tuberías conectadas a él,  $Q_{sal}$ ; flujo que sale de un nodo por alguna de las tuberías conectadas a él y  $Q_{nodo}$ ; aporte externo de agua al nodo, o la demanda existente en dicho nodo

- La ecuación de conservación de la energía se cumple en cada malla.

$$\sum_{t \in M} h_f - \sum_{b \in E} E_b = 0$$

Siendo:  $t$ ; las tuberías que forman parte de una malla,  $M$ ; cada una de las mallas que forman parte del sistema,  $h_t$ ; pérdida de carga en una tubería,  $b$ ; bomba que forma parte del conjunto de bombas del sistema,  $E$ ; conjunto de bombas y  $E_b$ ; Energía suministrada por la bomba.

- Volumen "límite" de depósito de cosecha propuesto por nudo de consumo.

Al tratarse de zona urbana, por razones de espacio, se propone un depósito en torno a 2.5mx2.5mx2.3m, es decir, 14.5 m<sup>3</sup>/vivienda. Por lo tanto, el valor del volumen para el modelo de partida será calculado con este coeficiente.

- Valor de la  $P_{min}$  establecida, estará entre 60 mca y 10 mca, siendo este último el caso más desfavorable.

### 7.3.3 Función objetivo propuesta.

La función objetivo propuesta tiene una componente económica que será minimizada según unas condiciones de operación, siendo ésta última la restricción de las presiones mínimas de servicio admitidas. Dicha componente económica hace referencia al coste de las tuberías de la red, la cual será minimizada para cada una

---

de las Pmin de servicio propuestas. Las diferentes soluciones obtenidas, coste de la red frente a las Pmin de servicio, constituirán el frente de Pareto.

$$\text{minimizar } F = \text{minimizar } [a_t * (F_1)]$$

$$\text{minimizar } F = \text{minimizar } \left[ a_t * \left( \sum_{i=1}^{NL} C(D_i) * L_i \right) \right]$$

Siendo:

**a<sub>t</sub>**; Factor anual de amortización de las tuberías.

$$a_t = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1}$$

**r**; Tasa de amortización. Se tomará del 2%

**T**; Periodo de amortización. Se tomará de 25 años.

**NL**; nº de tuberías de la red de abastecimiento de agua potable

**D= (D<sub>i</sub>)**; vector de diámetros de las tuberías del sistema de alimentación de agua potable. Sus componentes pertenecen a un conjunto discreto de diámetros disponibles comercialmente.

**C(D<sub>i</sub>)**; coste unitario por unidad de longitud de la tubería de diámetro D<sub>i</sub> (€/m)

**L<sub>i</sub>**; longitud de la tubería i-ésima (m).

#### 7.4 Evaluación del coste de operación.

Esta evaluación del coste de operación permitirá conocer la variación del coste de operación a lo largo del año en función de la pluviometría. Siendo previsiblemente más elevado dicho coste, bombeo de agua al depósito y tratamiento cuanto menor es la pluviometría.

La suma del coste de capital obtenido con la función objetivo del apartado anterior para una Pmin de servicio, haciendo uso de evolver, más este coste de operación permitirá tener una valoración “más realista” de cada una de las soluciones propuestas en el frente de Pareto.

#### 7.4.1 Coste energético

Hidráulicamente una bomba puede ser modelada en un modo simple considerando la cantidad de agua que se requiere bombear por unidad de tiempo. Los datos del comportamiento de la bomba son normalmente dados por los fabricantes en forma de relación altura de bombeo frente al caudal para un tipo de bomba dado y un índice de potencia dado.

En el presente trabajo se ha utilizado para modelar el sistema en EPANET una bomba de velocidad constante que bombea a un depósito de regulación, el cuál ha sido dimensionado por el método de Balance de masas.

La evaluación de estos costes será realizada haciendo uso de Epanet, con los datos obtenidos de simular el modelo completo (con los modulos de cosecha de agua de lluvia) con la precipitación media mensual más desfavorable de los datos de pluviometría disponibles.

##### ■ Costo energético de bombeo ( $F'_4$ )

$$F'_4 = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B W_{b,t} * C(h_b) * t = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B \frac{9,81}{\eta} * Q_{b,t} * H_{b,t} * C(h_b) * t$$

**T**; periodo de tiempo de modelización (horas)

**t**; unidad de tiempo (hora)

**$W_{b,t}$** ; Potencia suministrada por la bomba b en el tiempo t (kw)

**$\eta$**  ; se toma como 0.75 (rendimiento constante)

**$\gamma$**  ; peso específico del agua. Se toma como  $\gamma = 9810 \text{ Newton/m}^3$

**$Q_{b,t}$** ; Caudal bombeado por la bomba b en el tiempo t en  $\text{m}^3/\text{sg}$

**$H_{b,t}$** ; la altura de bombeo, m.c.a. aportados al agua que trasiega por la bomba

**$C(h_b)$** ; coste de la energía en  $\text{€}/\text{kw}\cdot\text{h}$

Con los datos obtenidos de Epanet para este año, coste, bombeo de AP y colecta de ANP, se puede tener el porcentaje de AP para consumo potable que será bombeada a lo largo del año (valor que no cambiará según el modelo), porcentaje de AP para uso como ANP (variará según la precipitación). Por lo tanto, existe una relación directa entre la precipitación y el aporte de AP para uso no potable al depósito de cosecha de agua de lluvia, la cual se determina por la diferencia entre consumo de ANP y agua cosechada (cuyas única variable para cada modulo de cosecha de agua de lluvia es la pluviometría). De esta manera con una única simulación determinaremos el coste energético para cada uno de los meses y por lo tanto el coste anual.

#### 7.4.2 Coste de la producción de agua potable.

La producción de agua potable conlleva un consumo energético y de materias primas, siendo el cloro tomado en la presente tesina como un elemento de referencia para valorar dicho tratamiento.

##### ■ Costo del tratamiento de agua (F'5).

$$F'_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N (D_{j,t} * t) * C(V)$$

**Siendo;**

**D<sub>j,t</sub>**; demanda de agua en el nodo j de la red principal en t en m<sup>3</sup>/hora

**t** ; intervalo de tiempo asignado al modelo (hora)

**C (V)**; Coste por unidad de volumen tratado (€/m<sup>3</sup>)



Con los datos de consumo de AP del apartado anterior se calcula directamente el coste de producción de agua potable por mes, habiendo “reducido” dicho tratamiento a la cloración con el objetivo de contextualizar la solución a la realidad Haitiana.

## **8 CASO DE APLICACIÓN.**

### **8.1 Contexto y datos de partida.**

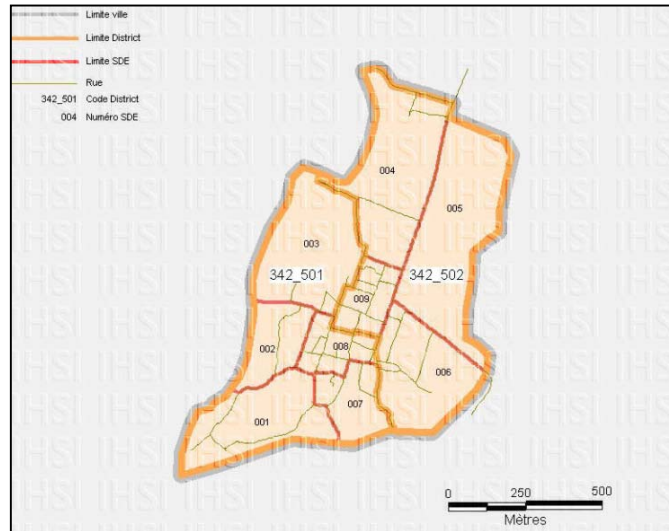
El diseño del caso de aplicación será la red de la ciudad de Dondon, Haití. La información usada a nivel de población, topografía y otra información de base para completar el modelo a nivel de Epanet visual ha sido facilitada por la empresa Wasser S.A. Dicha información de base ha sido utilizada para desarrollar este caso práctico.

La ciudad de Dondon está situada en el departamento Norte de Haití, está limitada por Acul du Nord, Pleine du Nord y Milot al norte, y Saint-Raphaël al sur. Al este se encuentra Grande Rivière du Nord y al Oeste el departamento de la Artibonite. El mapa siguiente permite situar la ciudad de Dondon.

En la siguiente Figura se muestra un plano de la ciudad de Dondon y en la Figura 13 el trazado propuesto por la empresa Wasser S.A. (con los módulos de cosecha de agua introducidos en esta tesina), el cuál será tomado como base para desarrollar el caso práctico de la solución propuesta en la presente tesina.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---



**Figura 11 Plano de la ciudad de Dondon**

*Fuente: IHS*

La tasa de crecimiento tomada es de 1,7%. Las estimaciones de población para los diferentes horizontes de proyecto, siendo el horizonte de interés el año 2038 (horizonte a 25 años), será calculado a partir de la tasa de crecimiento y la fórmula de crecimiento geométrico.

$$P = P_0(1 + r/100)^n$$

P : población prevista para el año horizonte

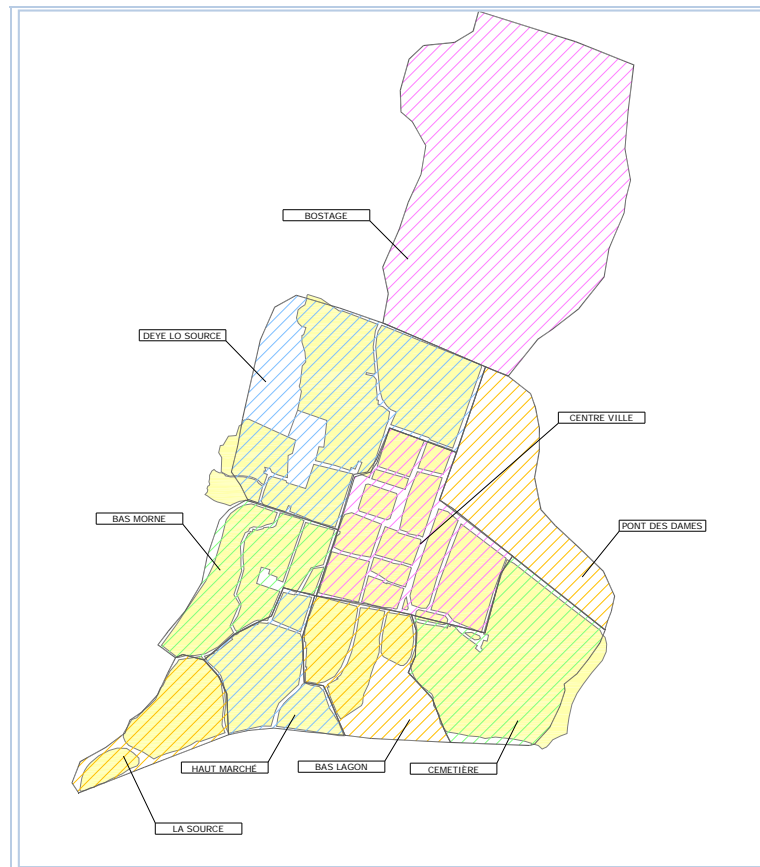
P<sub>0</sub> : población actual

r : tasa de crecimiento en porcentaje

n : número de años hasta el año horizonte

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---



**Figura 12 Barrios de Dondon**

*Fuente: Wasser*

En lo que se refiere a la dotación, en esta tesina se tomará de 50 l/hab\*día (referencia tomada de la ciudad de Saint Marc en Haití), siendo tenido en cuenta un porcentaje de fugas del 20 % para el horizonte 2028 y un porcentaje del 15 % para las necesidades institucionales.

Los criterios seguidos y los parámetros introducidos en el modelo de Epanet son mostrados en el Anexo1.

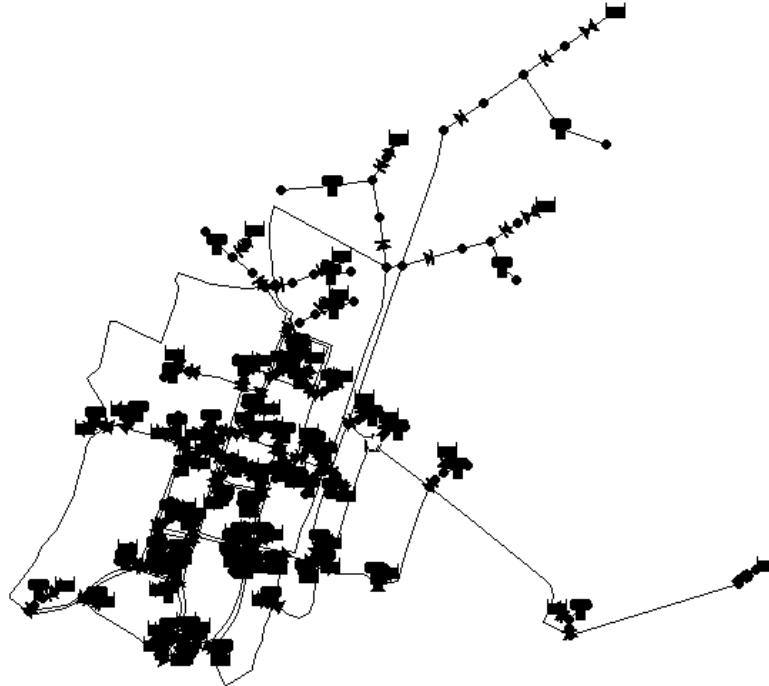


Figura 13 Red con los módulos de cosecha de agua de lluvia

## 8.2 Adaptación del layout para los sistemas de cosecha de agua de lluvia.

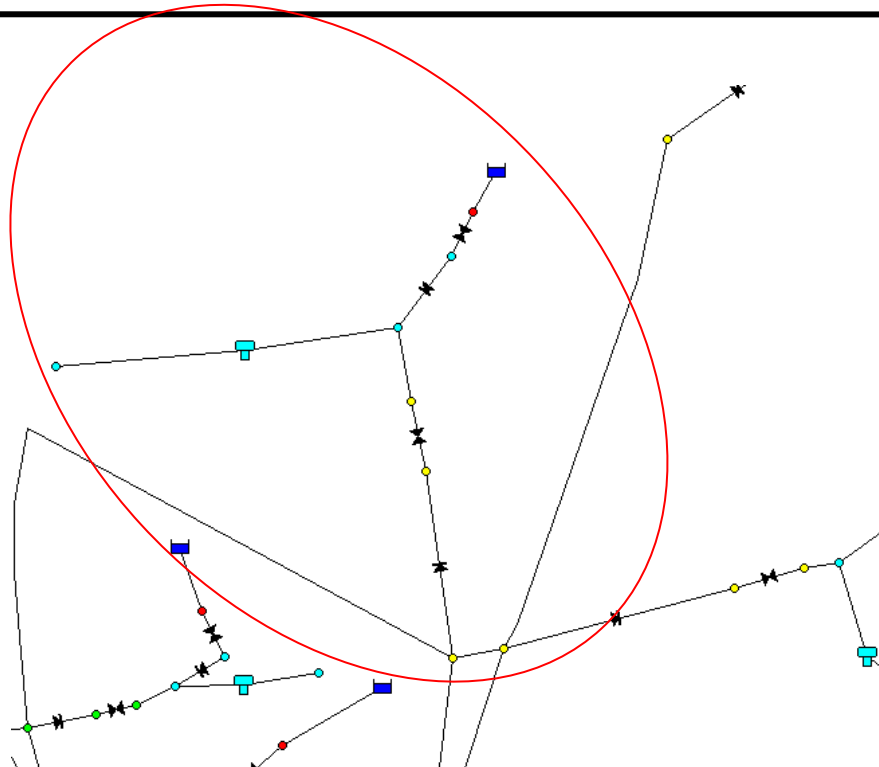
Como se ha citado en los puntos anteriores, la introducción de la cosecha de agua consiste en introducir en cada nudo de consumo de agua potable un modulo de cosecha de agua de lluvia como el mostrado en la Figura 14.

Para el bombeo se ha optado por un grupo de bombeo que bombeará 24 horas (2 bombas que bombearan de forma alterna en ciclos de 12 horas), siendo representada en el modelo una única bomba para simplificar el problema. Este bombeo de 24 horas hará que el depósito de regulación sea menor y que el consumo energético sea también el menor posible.

Debido a la ausencia de red eléctrica en la zona de proyecto el bombeo dependerá de la alimentación eléctrica a través de grupos electrógenos, por lo que el ahorro energético es esencial.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---



**Figura 14 Módulo de cosecha de agua**

### **8.3 Datos introducidos en el modelo.**

La demanda de AP asignada a los nodos de consumo de AP es el 60% de la demanda total de agua, siendo la demanda de ANP el 40% de dicha demanda total.

El porcentaje asignado a “cada tipo” de consumo de agua debe ser tomado según el contexto del proyecto, estando la pluviometría, la disponibilidad de recurso y el contexto socioeconómico entre las características a analizar para la toma de esta decisión, así como los hábitos de consumo y uso.

En el presente caso práctico ha sido tomado el porcentaje 60% versus 40% de AP versus ANP debido a la costumbre de utilizar agua para usos no potables en los patios y a que la mayoría de la población es muy desfavorecida, por lo tanto se puede “predecir” que se dará el mayor consumo de agua de lluvia posible debido a su gratuidad.

Por otro lado, para lograr la sostenibilidad del sistema de abastecimiento el AP consumida deberá ser pagada por los consumidores, algo que parece obvio pero que no es lo habitual en dicho contexto. Por lo tanto, será necesaria la medición del consumo de agua a nivel domiciliar e institucional por medio de micromedición. La

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

macromedición también deberá ser implementada para poder realizar el balance hídrico del sistema. Aunque dichos aspectos no son el objeto de la presente tesina son básicos para la sostenibilidad del sistema tanto a nivel económico como técnico-operacional. Por lo tanto, son dignos de mención al prestarse un especial interés a la sostenibilidad del sistema de abastecimiento en el presente trabajo.

Además, es necesario tener en cuenta que las dimensiones de los depósitos de cosecha de agua de lluvia deben estar adaptados a un contexto urbano, y por lo tanto también las áreas de captación de agua de lluvia requeridas (tejados), de tal manera que sean cumplidos los requisitos de colecta de agua para satisfacer en la medida de lo posible la demanda asignada de ANP. Ver el Anexo 1, dónde se muestra el proceso de cálculo y los datos utilizados para determinar los depósitos de cosecha de agua, que van asociados a cada uno de los módulos de cosecha de agua, y que están conectados a los nudos de consumo de ANP.

En la siguiente tabla pueden verse los datos de los “volúmenes ficticios” de los depósitos de cosecha de agua de lluvia asignados a cada uno de los módulos de cosecha de agua de lluvia, vinculado (alimentado en caso de fallo) a cada uno de los nodos de consumo de AP, según el barrio.

Barrio	Volumen dep. cosecha (m3)	Diámetro virtual (m)	h depósito virtual (m)	NIVEL INICIAL	NIVEL MÍNIMO
Centre ville	456.4	10.0	5.8	0.4	0.3
Deye lo Source	1091.6	16.0	5.4	0.4	0.3
Bas Borne	1175.3	16.0	5.8	0.4	0.3
La Source	1690.1	20.0	5.4	0.4	0.3
Haut Marché	557.4	11.0	5.9	0.4	0.3
Bas Lagon	662.8	12.0	5.9	0.4	0.3
Cemetiére	3539.2	28.0	5.7	0.4	0.3
Pont des Dames	5447.9	35.0	5.7	0.4	0.3
Bostage	12532.8	52.0	5.9	0.4	0.3

**Tabla 2 Valores de los parámetros de depósitos de cosecha de agua de lluvia según el barrio.**

Los valores mínimos e iniciales introducidos en el modelo son debidos a la idea de simular la situación más desfavorable desde el punto de vista de “fallo” de los sistemas de cosecha de agua de lluvia en la comprobación de las redes calculadas a

caudal pico. Todos estos depósitos serán llenados al mismo tiempo, siendo esta la situación más desfavorable a la que se puede enfrentar la red.

#### 8.4 Simulaciones y proceso de optimización para el diseño.

El modelo del sistema ha sido desarrollado en EPANET visual, siendo dicho modelo explotado con la ayuda de una macro que utilizan Toolkit de Epanet sobre Visual Basic de excel para obtener las presiones al alimentar en el modelo de Epanet (mediante Toolkit) los diámetros propuestos. Estos diámetros son propuestos por las sucesivas iteraciones que hace Evolver de los diámetros. Información sobre Evolver y sobre la macro que se ha utilizado es presentada en el anexo 2 y 3, respectivamente, de la presente tesina.

La figura siguiente muestra el esqueleto del sistema, el cual será utilizado para el diseño óptimo de la red, sin los módulos de cosecha de agua (al tratarse de un enfoque de resolución de problemas “desconectado”).

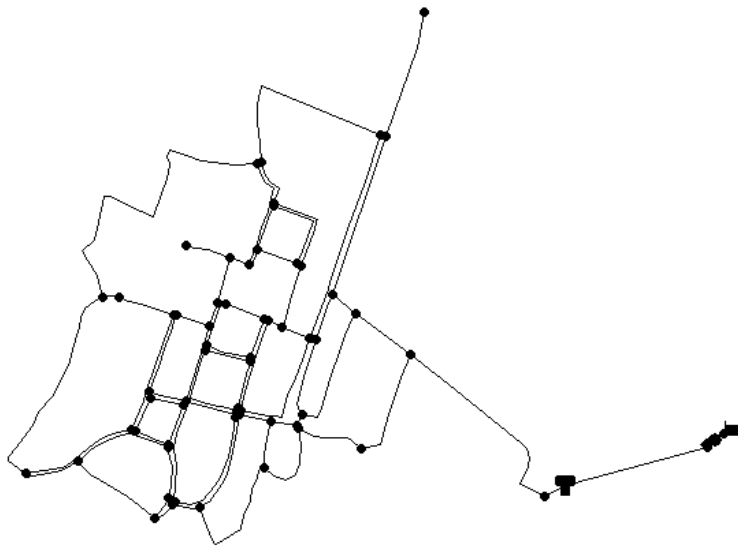


Figura 15 Trazado de la red de Dondon sin modulo de cosecha de agua.

Como se ha citado, el diseño de la red se hará para caudal pico de consumo de agua potable, tomando en este caso como coeficiente punta el valor máximo de los coeficientes de modulación tomados, es decir  $C_{punta} = 2$ , ver tabla 7 del Anexo 1.

#### 8.4.1 Sistemas propuestos.

Las redes obtenidas con el uso de Evolver sobre Excel y la Macro que usa Toolkit de Epanet para diferentes  $P_{min}$  se presentan en el Anexo 4. En dicho Anexo 4 se presentan también las desviaciones de las presiones en los nudos respecto a la  $P_{min}$  obtenidas con los diámetros propuestos para la red. Se ha obtenido el frente de Pareto de la figura siguiente teniendo en cuenta el coste de la red (sin incluir los costes de amortización citados en el apartado 7.3.3.) frente a la presión mínima de servicio.

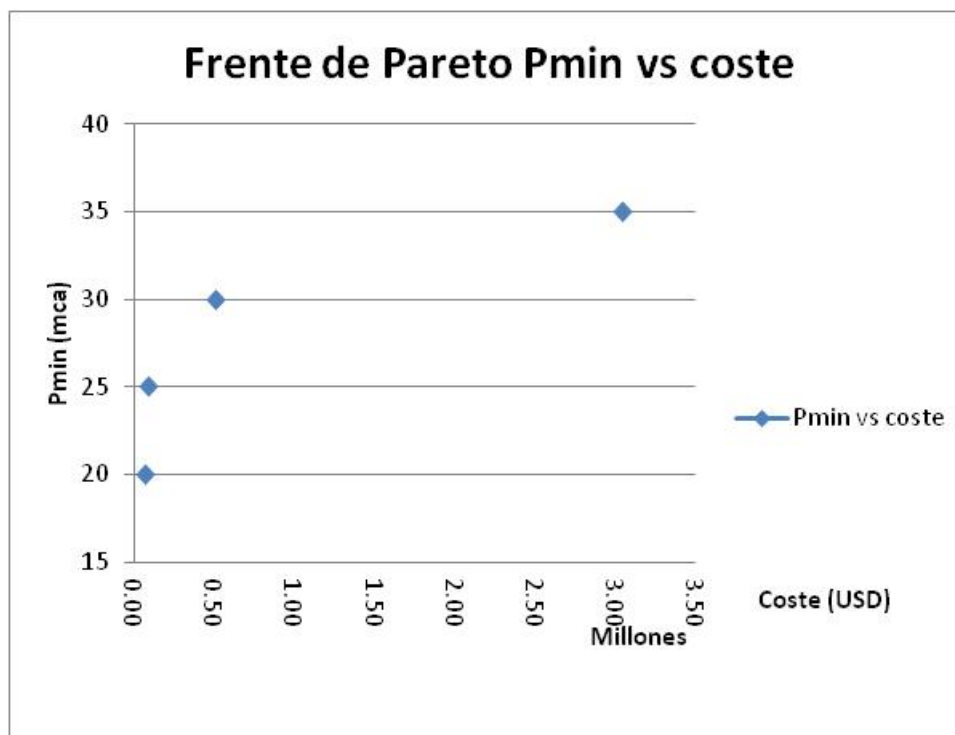


Figura 16 Frente de Pareto del coste del sistema frente a la  $P_{min}$  de servicio ( sin incluir la amortización).



**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

Para la  $P_{min} = 20$  mca los diámetros obtenidos para las tuberías, con un coste de 3300,12 US\$ teniendo en cuenta la amortización (siendo sin amortización de 64429,80 US\$), son los mostrados en la siguiente tabla.

<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>
1	353,1	141,0	45	243,8	55,4
2	48,1	123,4	46	4,9	55,4
3	209,6	55,4	47	160,6	55,4
4	9,6	55,4	48	2,2	55,4
5	7,2	55,4	49	9,4	55,4
6	6,1	55,4	50	40,4	55,4
7	73,5	55,4	51	94,1	55,4
8	74,1	55,4	52	45,5	55,4
9	32,4	55,4	53	50,2	55,4
10	180,2	55,4	54	154,4	55,4
11	78,8	55,4	55	43,0	55,4
12	74,5	55,4	56	194,4	55,4
13	143,0	55,4	57	6,5	55,4
14	31,5	55,4	58	43,6	55,4
15	6,4	79,2	59	77,4	55,4
16	67,2	66,0	60	20,0	55,4
17	65,4	55,4	61	269,0	66,0
18	7,2	55,4	62	76,7	123,4
19	75,0	55,4	63	202,7	55,4
20	3,1	55,4	64	77,1	55,4
21	74,8	55,4	65	5,5	55,4
22	13,2	79,2	66	103,9	66,0
23	40,8	66,0	67	25,9	79,2
24	74,1	55,4	68	150,4	55,4
25	8,1	55,4	69	203,9	55,4
26	125,5	55,4	70	129,7	55,4
27	56,1	55,4	71	47,2	110,2
28	90,5	55,4	72	8,3	123,4
29	196,5	55,4	73	2,1	110,2
30	4,9	55,4	74	346,5	55,4
31	7,4	55,4	75	329,3	55,4
32	188,7	55,4	76	65,9	55,4

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>
33	82,7	55,4	77	152,2	55,4
34	161,8	55,4	78	8,8	55,4
35	68,4	55,4	79	350,1	55,4
36	55,7	55,4	80	167,2	55,4
37	57,5	55,4	81	222,0	55,4
38	7,4	55,4	82	134,2	55,4
39	60,6	55,4	83	108,5	141,0
40	5,7	55,4	84	4,3	55,4
41	131,2	55,4	85	185,6	55,4
42	57,5	55,4	86	27,7	55,4
43	9,7	55,4	87	528,5	55,4
44	4,3	55,4	88	6,4	55,4
			89	110,9	55,4

**Tabla 3 Diámetros de la red para Pmin =20 m.c.a.**

Para la Pmin= 25 mca los diámetros obtenidos para las tuberías, con un coste de 4146,37 US\$ teniendo en cuenta la amortización (siendo sin amortización de 80951,54 US\$), son los mostrados en al siguiente tabla.

<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>
1	353,1	176,2	45	243,8	55,4
2	48,1	176,2	46	4,9	55,4
3	209,6	66,0	47	160,6	55,4
4	9,6	55,4	48	2,2	55,4
5	7,2	55,4	49	9,4	55,4
6	6,1	55,4	50	40,4	55,4
7	73,5	55,4	51	94,1	55,4
8	74,1	55,4	52	45,5	55,4
9	32,4	55,4	53	50,2	55,4
10	180,2	55,4	54	154,4	55,4
11	78,8	66,0	55	43,0	55,4
12	74,5	55,4	56	194,4	55,4
13	143,0	55,4	57	6,5	55,4
14	31,5	55,4	58	43,6	55,4
15	6,4	123,4	59	77,4	55,4

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>
16	67,2	110,2	60	20,0	55,4
17	65,4	55,4	61	269,0	55,4
18	7,2	55,4	62	76,7	55,4
19	75,0	55,4	63	202,7	55,4
20	3,1	55,4	64	77,1	66,0
21	74,8	55,4	65	5,5	158,6
22	13,2	110,2	66	103,9	55,4
23	40,8	96,8	67	25,9	55,4
24	74,1	55,4	68	150,4	55,4
25	8,1	55,4	69	203,9	96,8
26	125,5	55,4	70	129,7	123,4
27	56,1	79,2	71	47,2	55,4
28	90,5	55,4	72	8,3	55,4
29	196,5	55,4	73	2,1	55,4
30	4,9	55,4	74	346,5	141,0
31	7,4	55,4	75	329,3	158,6
32	188,7	55,4	76	65,9	158,6
33	82,7	55,4	77	152,2	55,4
34	161,8	55,4	78	8,8	55,4
35	68,4	55,4	79	350,1	66,0
36	55,7	55,4	80	167,2	55,4
37	57,5	55,4	81	222,0	79,2
38	7,4	55,4	82	134,2	55,4
39	60,6	55,4	83	108,5	55,4
40	5,7	55,4	84	4,3	55,4
41	131,2	55,4	85	185,6	55,4
42	57,5	176,2	86	27,7	176,2
43	9,7	176,2	87	528,5	55,4
44	4,3	66,0	88	6,4	55,4
			89	110,9	55,4

**Tabla 4 Diámetros de la red para Pmin =25 m.c.a.**

Para la Pmin= 30 mca los diámetros obtenidos para las tuberías, con un coste de 26000,01 US\$ teniendo en cuenta la amortización (siendo sin amortización de 507610,14 US\$), son los mostrados en al siguiente tabla.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>
1	353,1	555,2	45	243,8	66,0
2	48,1	555,2	46	4,9	110,2
3	209,6	79,2	47	160,6	123,4
4	9,6	55,4	48	2,2	55,4
5	7,2	110,2	49	9,4	55,4
6	6,1	66,0	50	40,4	55,4
7	73,5	158,6	51	94,1	55,4
8	74,1	110,2	52	45,5	55,4
9	32,4	96,8	53	50,2	55,4
10	180,2	55,4	54	154,4	55,4
11	78,8	176,2	55	43,0	55,4
12	74,5	79,2	56	194,4	55,4
13	143,0	55,4	57	6,5	55,4
14	31,5	55,4	58	43,6	55,4
15	6,4	396,6	59	77,4	55,4
16	67,2	396,6	60	20,0	96,8
17	65,4	158,6	61	269,0	55,4
18	7,2	123,4	62	76,7	55,4
19	75,0	55,4	63	202,7	123,4
20	3,1	110,2	64	77,1	141,0
21	74,8	110,2	65	5,5	493,6
22	13,2	352,6	66	103,9	96,8
23	40,8	312,8	67	25,9	55,4
24	74,1	66,0	68	150,4	123,4
25	8,1	79,2	69	203,9	246,8
26	125,5	277,6	70	129,7	396,6
27	56,1	220,4	71	47,2	55,4
28	90,5	158,6	72	8,3	110,2
29	196,5	55,4	73	2,1	55,4
30	4,9	158,6	74	346,5	440,6
31	7,4	176,2	75	329,3	493,6
32	188,7	123,4	76	65,9	493,6
33	82,7	55,4	77	152,2	55,4
34	161,8	123,4	78	8,8	55,4
35	68,4	220,4	79	350,1	123,4
36	55,7	55,4	80	167,2	198,2

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>
37	57,5	158,6	81	222,0	158,6
38	7,4	198,2	82	134,2	55,4
39	60,6	141,0	83	108,5	55,4
40	5,7	158,6	84	4,3	55,4
41	131,2	55,4	85	185,6	55,4
42	57,5	555,2	86	27,7	555,2
43	9,7	555,2	87	528,5	55,4
44	4,3	79,2	88	6,4	55,4
			89	110,9	123,4

**Tabla 5 Diámetros de la red para Pmin =30 m.c.a.**

Para la Pmin= 35 mca los diámetros obtenidos para las tuberías, con un coste de 155681.96 US\$ teniendo en cuenta la amortización (siendo sin amortización de 3039450,00 US\$), son los mostrados en al siguiente tabla.

<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>
1	353,1	705,2	45	243,8	96,8
2	48,1	705,2	46	4,9	312,8
3	209,6	625,8	47	160,6	246,8
4	9,6	396,6	48	2,2	246,8
5	7,2	555,2	49	9,4	493,6
6	6,1	493,6	50	40,4	176,2
7	73,5	440,6	51	94,1	555,2
8	74,1	246,8	52	45,5	625,8
9	32,4	555,2	53	50,2	625,8
10	180,2	220,4	54	154,4	493,6
11	78,8	312,8	55	43,0	625,8
12	74,5	96,8	56	194,4	705,2
13	143,0	493,6	57	6,5	440,6
14	31,5	277,6	58	43,6	705,2
15	6,4	493,6	59	77,4	141,0
16	67,2	705,2	60	20,0	555,2
17	65,4	555,2	61	269,0	705,2
18	7,2	493,6	62	76,7	79,2
19	75,0	176,2	63	202,7	79,2

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)
20	3,1	396,6	64	77,1	705,2
21	74,8	396,6	65	5,5	705,2
22	13,2	625,8	66	103,9	705,2
23	40,8	625,8	67	25,9	705,2
24	74,1	123,4	68	150,4	198,2
25	8,1	66,0	69	203,9	705,2
26	125,5	493,6	70	129,7	705,2
27	56,1	625,8	71	47,2	110,2
28	90,5	352,6	72	8,3	123,4
29	196,5	220,4	73	2,1	705,2
30	4,9	493,6	74	346,5	705,2
31	7,4	158,6	75	329,3	625,8
32	188,7	705,2	76	65,9	625,8
33	82,7	705,2	77	152,2	66,0
34	161,8	625,8	78	8,8	141,0
35	68,4	396,6	79	350,1	312,8
36	55,7	555,2	80	167,2	158,6
37	57,5	493,6	81	222,0	625,8
38	7,4	440,6	82	134,2	277,6
39	60,6	246,8	83	108,5	79,2
40	5,7	555,2	84	4,3	705,2
41	131,2	220,4	85	185,6	705,2
42	57,5	312,8	86	27,7	705,2
43	9,7	96,8	87	528,5	555,2
44	4,3	493,6	88	6,4	705,2
			89	110,9	141,0

**Tabla 6 Diámetros de la red para Pmin =35 m.c.a.**

Como se puede observar el coste que supone en la inversión de la red el aumentar la presión de abastecimiento no es proporcional al aumento de dicha presión. En la siguiente tabla se muestra el incremento del coste de la red al aumentar 5 m.c.a. la condición de cálculo de la red (no siendo esto equivalente a un aumento de 5 m.c.a. en cada nudo de la red).

Pmin (mca)	Coste (USD)	Incremento coste (USD)al aumentar 5 m.c.a en cálculo
20	64429.80	

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

<b>Pmin (mca)</b>	<b>Coste (USD)</b>	<b>Incremento coste (USD)al aumentar 5 m.c.a en cálculo</b>
		16521.74
25	80951.54	
		426658.60
30	507610.14	
		2531839.86
35	3039450.00	

**Tabla 7 Incremento del coste de la red con la Pmin de cálculo establecida.**

Las presiones obtenidas en los nudos de la red para cada alternativa se muestran en el Anexo 4, siendo la solución en la que la P en los nudos se aproxima más a la Pmin de cálculo la de Pmin=20 m.c.a. (la opción más económica).

### **8.5 Coste energético.**

En lo que respecta a determinar el coste del consumo energético debido a los bombeos y de la producción de agua potable, hay que tener en cuenta que son directamente proporcionales al consumo de agua potable. Por lo tanto, para determinar dichos consumos se ha simulado en Epanet el mes más desfavorable de los valores disponibles de precipitación (diciembre de precipitación ficticia para diseño y noviembre) estando los resultados en el anexo1.

Como la captación de agua, el bombeo y el depósito son los mismos para las diferentes alternativas y el consumo es el mismo en los modelo (tanto de AP como de ANP), el consumo energía no diferenciará entre una alternativa y otra, la única diferencia será la presión mínima de servicio para cada uno de los diseños propuestos.

Para simplificar el cálculo a nivel anual se ha tenido en cuenta que el consumo de AP se debe al consumo de AP para uso potable, el cuál según los criterios de diseño no cambia a lo largo del año, y el consumo de AP para uso no potable que dependerá directamente de la precipitación, ya que los depósitos están

dimensionados para aprovechar al máximo la precipitación al haber sido diseñados para la situación más desfavorable con la “lluvia ficticia” creada para ello como se ha citado en apartados anteriores.

La evaluación de estos costes ha sido realizada haciendo uso de Epanet, con los datos obtenidos de simular el modelo completo (con los modulos de cosecha de agua de lluvia) con la precipitación media mensual más desfavorable (mes de diciembre) de los datos de pluviometría disponibles.

Obteniéndose que el volumen de AP consumido al mes es de 18059 m<sup>3</sup>, y es constante.

$$\text{Coste anual op.} = \text{Coste fijo cons. AP} * 12 \text{ meses} + \sum \text{Coste mensual cons. ANP}$$

El coste anual tomando el precio de 2 USD/m<sup>3</sup>.

$$\text{Coste anual} = 433416.096 \text{ USD}$$

Para el caso más desfavorable de precipitación, la de diseño de los depósitos, el agua consumida de AP para uso no potable es mostrada en la siguiente tabla.

Por lo tanto se deduce que para las precipitaciones medias, no será necesario aporte de agua potable en situaciones “normales” que no se pueden predecir con este modelo pero que debido al diseño aseguramos que la red podrá responder a dicha demanda.

En el anexo 1 se muestran los datos obtenidos a partir de EPANET del aporte de AP a los sistemas de cosecha de Agua de lluvia para estas situaciones más desfavorables mencionadas.

### **8.6 Alternativas para la toma de decisión.**

Teniendo en cuenta el coste energético, el coste de inversión y operación frente a la Pmin de servicio obtenida se presenta en la siguiente grafica.



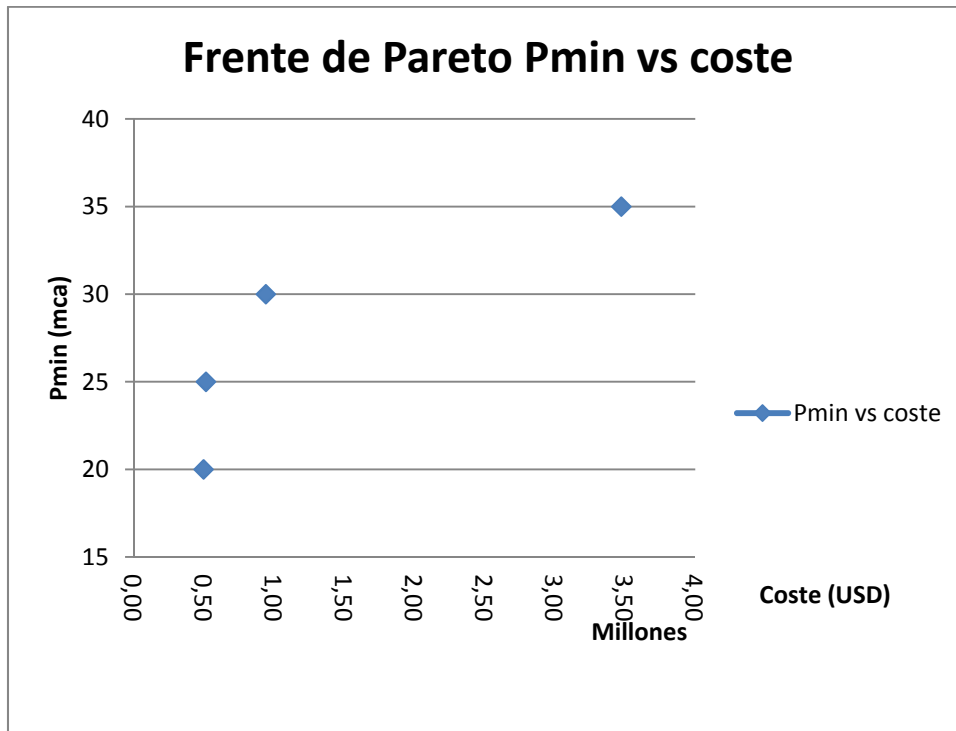


Figura 17 Coste incluyendo el bombeo frente a la Pmin (mca)

Para tener una visión global de los costes del sistema, como ya se ha citado, es necesario tener el coste global a nivel de costes de capital y costes de operación. En la Figura 17 solo se ha añadido el coste de bombeo en una situación “media” según los datos disponibles de pluviometría.

## 9 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.

### 9.1 Conclusiones

Las conclusiones acerca de las propuestas presentadas son diversas. Respecto a los costes de capital en relación a la Pmin puede concluirse que pasar de una Pmin de servicio (en el cálculo) de 30 m.c.a a una de 35 m.c.a. la inversión es considerable (2531839.86 USD), no siendo proporcional el incremento de presión respecto al incremento de coste, como se muestra en la tabla 7.

En lo que concierne al coste en bombeos, se ha podido comprobar que al diseñar los depósitos para una situación de pluviometría la más desfavorable posible, estos dan respuesta óptima con pluviometrías medias. Una posible restricción a la hora de ejecutar el proyecto es la zona para ubicar los depósitos de cosecha de agua de lluvia, por lo que puede ser que el volumen sea menor y se requiera un aporte de AP al depósito de cosecha de agua. En cualquier caso la red podrá dar respuesta.

Por lo tanto, estas gráficas y alternativas podrán dar a los tomadores de decisiones un visión de la conveniencia de elegir unos diseños u otros, así como la importancia de tener en cuenta la cosecha de agua de lluvia en los diseños y políticas a implementar.

## **9.2 Desarrollos futuros**

En desarrollos futuros podrían ser estudiadas otras alternativas en la asignación de la pluviometría para el llenado de los depósitos de cosecha de agua. Las cuales podrían acercarse más a la realidad el modelo de simulación cuándo se trata de sistemas existentes y los diseños de nuevos sistemas.

Por otro lado, podrían desarrollarse funciones objetivo más complejas, pudiendo hacer uso para la resolución del problema de Developer Kit de Evolver sobre visual Basic de excel.

En todo caso, en esta tesina se trata de mostrar como los sistemas de cosecha de agua pueden influir tanto en el diseño de nuevos sistemas de abastecimiento, caso que se muestra en la presente tesina, como en las “transformaciones” que están ocurriendo en muchos sistemas de abastecimiento con la introducción de sistemas de cosecha de agua de lluvia. Estos sistemas de cosecha de lluvia dual influyen en la respuesta del sistema existente, por lo cual no pueden ser ignorados cuándo su instalación es a “gran escala”, es decir, no son sistemas aislados sino que se “democratizan” en zonas localizadas o a lo largo de toda la ciudad.

## 10 ANEXOS

### 10.1 Anexo 1. Definición del modelo.

#### 1. RESUMEN DE LA METODOLOGÍA PARA LA RESOLUCIÓN.

La red de base de la ciudad de Dondon, sin la cosecha de agua de lluvia, ha sido aportada por la empresa Wasser S.A. En cada uno de los nodos de consumo definidos se ha introducido un modulo de cosecha de agua dual que está formado por un embalse de cota suficiente (450 m) para abastecer por medio de una válvula reguladora de caudal, a la cual se le ha asignado un caudal de tarado según el barrio, el agua de lluvia (caudal constante) que abastecería la precipitación mensual a un depósito de cosecha de agua de lluvia. Dicho depósito de cosecha de agua estaría igualmente alimentado por la red de alimentación de agua potable en caso de “fallo”, es decir, cuándo el nivel de agua baje de un valor mínimo fijado.

Para diseñar los depósitos de cosecha de agua de lluvia se ha utilizado el método gráfico o de balance de masas. Para dicho diseño se considera el año de máxima pluviometría disponible, es decir, la pluviometría total máxima mensual será la de la “lluvia ficticia más desfavorable”. Además, como modulación de dicha pluviometría máxima mensual se ha tomado la del año que ha dado mayor volumen de depósito de cosecha de agua de lluvia para una vivienda (se ha tomado uno de los barrios para hacer dicha comprobación. La cual se muestra en los siguientes apartados), lo cual querrá decir que tiene mayor irregularidad. Con todo lo cual estaremos del lado de la seguridad.

Para modelar el sistema de cosecha de agua de lluvia dentro del modelo hidráulico del sistema de abastecimiento de agua en EPANET (para hacer la comprobación del diseño de la red y el cálculo del consumo de energía) se han utilizado las precipitaciones medias mensuales de las series disponibles, tratando de esta manera simular el funcionamiento hidráulico del conjunto del sistema.

Por lo tanto, el diseño de la red ha sido optimizado como un problema desconectado con la restricción de alimentar a los depósitos de cosecha de agua de lluvia en caso

de “fallo” (se ha tomado para ello el caudal punta, siendo el coeficiente punta igual al coeficiente máximo de modulación).

De esta manera se ha obtenido un frente de Pareto en el que se representa el coste de la red, obtenido del coste de las tuberías de la red con diámetros optimizados, frente a las Pmin de servicio en los nodos de consumo de agua potable (que se han establecido dentro de un rango viable) “permitidas”.

Una vez definidas cada una de las alternativas de diseño para el sistema (según las Pmin) se han determinado los costes de operación anuales, centrados en los costes energéticos, para tener la valoración del coste de capital (coste de inversión) así como del coste de operación. Con esta “valoración conjunta” se puede tener una visión a largo plazo y más realista de cada una de las alternativas propuestas en el frente de Pareto, lo cual contribuirá al proceso de toma de decisiones adaptado al contexto.

## **1.2. Crecimiento de población.**

El horizonte temporal de diseño para el cual se definirá la demanda, y por lo tanto la red de abastecimiento, es el año 2038. En este horizonte temporal se tiene en cuenta la vida útil de la red, que se estima entre 20 y 25 años.

Para calcular el crecimiento de población se ha utilizado la fórmula geométrica, como se ha citado en la memoria:

$$P = P_0(1 + r/100)^n$$

P : población prevista para el año horizonte

P<sub>0</sub> : población actual

r : tasa de crecimiento en porcentaje

n : número de años hasta el año horizonte

En la siguiente tabla se pueden ver los datos de la población por barrio para el año 2038, habiendo sido hecho el reparto de población por barrio según el porcentaje de área que representa cada uno de los barrios respecto al total. Por otro lado, se ha

---

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

tenido en cuenta cómo desarrollo lógico de la ciudad una población de saturación de 210 hab/ha (dato usado por arquitecto sin fronteras) y que el 80% del aumento de la población se dará en los barrios más poblados (más de 20 hab/ha) hasta alcanzar la saturación y el 20% del aumento de la población va para los barrios menos poblados (menos de 20 hab/ha).

<b>BARRIO</b>	<b>Habitantes 2.018</b>	<b>Habitantes 2.023</b>	<b>Habitantes 2.028</b>	<b>Habitantes 2.033</b>	<b>Habitantes 2.038</b>
<b>Centre ville</b>	1.227	1.290	1.358	1.434	<b>1.515</b>
<b>Deye lo Source</b>	1.194	1.294	1.402	1.519	<b>1.647</b>
<b>Bas Morne</b>	880	920	964	1.012	<b>1.064</b>
<b>La Source</b>	135	161	190	221	<b>255</b>
<b>Haut Marché</b>	699	730	764	801	<b>841</b>
<b>Bas Lagon</b>	720	760	803	849	<b>900</b>
<b>Cemetière</b>	265	324	388	458	<b>534</b>
<b>Pont des Dames</b>	599	648	701	759	<b>822</b>
<b>Bostage</b>	1.040	1.227	1.430	1.651	<b>1.891</b>
<b>TOTAL</b>	<b>6.759</b>	<b>7.354</b>	<b>8.000</b>	<b>8.704</b>	<b>9.469</b>

**Tabla 8 Número de habitantes por barrio en diferentes horizontes.**

### *1.2.1. Demanda base por barrio en el horizonte 2038.*

Para el cálculo de la demanda base para cada uno de los nudos de AP y los nudos de ANP se ha asignado una dotación de 50 l/hab\*día, la cual puede parecer muy baja para un contexto desarrollado, pero en un contexto en desarrollo cómo el de la ciudad de Dondon se estima adecuado. Para asignar dicha dotación se ha tomado como referencia en esta tesina el consumo en otra ciudad Haitiana, Saint Marc, dónde se dan estos consumos (en dicha ciudad existe medición, micro y macro) por habitante y día.

Se ha supuesto una tasa de conexión a nivel domiciliario del 100% en el horizonte 2038. Por otro lado, se ha tomado una tasa de pérdidas del 20% que se ha asignado al abastecimiento de AP, es decir, a la red. El porcentaje de la demanda de AP se ha considerado como el 60% de la demanda total y la demanda de ANP como el 40% de dicha demanda. Por otro lado, se ha considerado un 15% de porcentaje extra a la demanda que es asignado a la demanda institucional como medida de seguridad, este porcentaje ha sido repartido entre la demanda de AP y la de ANP.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Parámetro	Unidad	Valor para 2038
Tasa de conexión	%	100%
Tasa de pérdidas	%	20%
Población	hab	9,47
Necesidad AP	m3/j	284
Necesidad ANP	m3/j	189
Necesidades agua institucional (15%)	m3/j	71
Necesidad de ANP	m3/j	192
Necesidad de ANP	l/s	2,22
Necesidad de AP sin pérdidas	m3/j	327
Pérdidas en la red de AP	m3/j	65
Necesidad de AP total (pérdidas incluidas)	m3/j	392
Necesidad de AP total (pérdidas incluidas)	l/s	4,54
Caudal punta	l/s	12
Coficiente punta		2,65

Tabla 9 Parámetros utilizados y necesidades de agua.

Se ha hecho el recuento del número de los nudos por barrio, siendo la demanda por barrio distribuida de manera uniforme entre los nudos de cada uno de los barrios. En la siguiente tabla se presenta la demanda asignada por nudo para cada uno de los barrios para la demanda de AP.

DEMANDA DE AP				
BARRIO	Habitantes 2.038	Demanda (l/s)	Número de nudos	Demanda por nudo (l/s)
Centre ville	1.516	0,73	22	0,03
Deye lo Source	1.647	0,79	10	0,08
Bas Morne	1.064	0,51	6	0,09
La Source	255	0,12	1	0,12
Haut Marché	841	0,40	10	0,04
Bas Lagon	900	0,43	9	0,05
Cemetière	534	0,26	1	0,26
Pont des Dames	822	0,39	1	0,39
Bostage	1.891	0,91	1	0,90
<b>TOTAL</b>	<b>9.469</b>	<b>4,54</b>		

Tabla 10 Demanda de agua potable.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

En la siguiente tabla se presenta la demanda asignada por nudo para cada uno de los barrios para la demanda de ANP.

<b>DEMANDA DE ANP</b>				
<b>BARRIO</b>	<b>Habitantes 2038</b>	<b>Demanda (l/s)</b>	<b>Número de nudos</b>	<b>Demanda por nudo (l/s)</b>
Centre ville	1515	0,36	22	0,02
Deye lo Source	1647	0,39	10	0,04
Bas Morne	1064	0,25	6	0,04
La Source	255	0,06	1	0,06
Haut Marché	841	0,20	10	0,02
Bas Lagon	900	0,21	9	0,02
Cemetière	534	0,13	1	0,13
Pont des Dames	822	0,19	1	0,19
Bostage	1891	0,44	1	0,44
<b>TOTAL</b>	9469	2,22		

**Tabla 11 Demanda de agua no potable.**

*1.2.2. Patrón de demanda asignado.*

En la siguiente tabla se presenta la curva de modulación propuesta tanto para el consumo de agua potable como para el de agua no potable. Siendo dicha curva de modulación la misma para todos los nudos de la red, es decir, todos los consumos.

<b>Hora (h)</b>	<b>Consumo c (h)</b>
0-1	0,2
1-2	0,2
2-3	0,2
3-4	0,2
4-5	0,2
5-6	1,4
6-7	2
7-8	2
8-9	2
9-10	2
10-11	2
11-12	1,3
12-13	1,3
13-14	1,3
14-15	1,7

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

Hora (h)	Consumo c (h)
15-16	1,7
16-17	1,7
17-18	0,5
18-19	0,5
19-20	0,5
20-21	0,5
21-22	0,2
22-23	0,2
23-24	0,2

**Tabla 12 Patrón de demanda.**

Como se ha mencionado, el porcentaje de demanda asignado al AP y al ANP ha sido seleccionado según el contexto, haciendo hincapié en que será favorecido el consumo de ANP al ser este servicio gratuito (a excepción del acceso a la infraestructura). Dicho porcentaje es del 60% para el AP y del 40% para el ANP.

### **1.3. Determinación del volumen de los depósitos de cosecha de agua de lluvia.**

Para la determinación del volumen de los depósitos de cosecha de agua de lluvia se ha utilizado el método gráfico presentado en el punto 6.2.2., Depósito de almacenamiento para RWH, de la memoria de esta tesina.

#### *1.3.1. Información disponible de la pluviometría.*

Los datos de precipitación disponible de los 3 pluviómetros que estaban operativos en la ciudad de Dondon se presentan en la siguiente tabla.

Año	Precipitación mensual (mm).											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1978	188,4	126,8	120,7	307,2	187,2	149	81,4	185,8	295,6	183,8	28,2	55
	65,2	50,4	31,8	65	54,6	29,2	19,6	64,6	49,2	37,2	11	20
	9	7	15	15	9	12	12	12	21	20	13	4
1979	27,2	67,4	585,6	224	208	260,8	193,2	374,6	255,2	239,8	84,2	87,6
	7,2	46,2	125,8	36,8	32,4	56	33,6	70,6	64,2	49	21	43,8
	8	7	13	15	14	18	15	25	16	23	26	14



**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Año	Precipitación mensual (mm).											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1980	183,2	124,2	96,6	327,2	385	220	115,8	328,2	270,2	323,6	76,4	215,2
	73,4	60	36,2	115	35,6	36,8	22,8	57,8	67,8	37,4	13	48
	8	11	11	18	26	20	13	17	15	24	10	11
1982	113,4	88,8	21	108,8	497,6	242,4	104,2	134,2	122,8	131,2	103	87,6
	34,8	16,8	10,4	36,8	42,8	24,2	16,8	26,4	23,8	18,6	16,2	18,6
	9	12	3	11	25	15	11	10	12	12	11	8
1983	94	108,4	94,2	361,8	741,6	147,8	139	342,2	109	79,6	69,4	61,8
	22,4	28,6	25,8	136,8	197,2	39,2	28,4	78,4	24,8	22,8	17,8	28,2
	7	5	8	7	13	8	9	9	7	6	6	5
1984	242,6	124,6	161,8	594,8	296,6	129,8	75,6	137,2	121,6	119,8	83	107
	78,6	32,4	32,4	298,4	78,6	28,4	18,6	34,8	26,4	42,8	18,2	24,2
	12	7	9	16	9	6	5	8	8	7	9	8
1985	82	85	211,2	508,4	269	341,8	256,8	210	163,2	600,4	323,8	9,6
	16,2	22,8	56,4	258,2	73,4	124,2	63,4	48,4	29,2	179,8	37,8	6,2
	7	7	6	6	8	8	10	11	10	16	20	2
1986	152,8	39,4	239,2	277,4	391	116,4	169,2	233,6	227,6	241,8	57,2	34,4
	98,6	12,2	41,8	118	65,8	26,4	24,4	50,2	45,8	78,2	16,2	13,4
	7	5	12	13	17	8	12	13	15	20	8	4
1987	113,2	40,4	124,2	492	526,4	414	103,8	183,8	193,6	412,6	241,8	184,8
	43,6	13,2	33,6	97,4	42,4	80,6	18,2	38,2	43,2	73,8	57,8	15,2
	6	6	12	16	29	23	11	15	13	21	17	12
1988	403,4	89,8	75,2	64	211,8	354,2	190,6	186,8	244,6	345,8	78,8	99,2
	278,6	32,4	65,8	44	49	70,2	43,4	18,4	77,8	56,6	23,6	41,2
	8	8	8	4	16	15	13	18	15	20	9	9
1996	54	216,2	138,4	168	191,6	335,2	156,2	107,6	277,2	157,8	150,8	53,2
	13,4	64	27,2	85	59,4	107,4	41,6	35,6	37,2	50,4	48,4	20,4
	11	16	16	13	15	10	9	13	16	13	17	10

**Tabla 13 Precipitación mensual disponible de 3 pluviómetros de la ciudad de Dondon.**

*1.3.2. Determinación de los volúmenes más apropiados para los depósitos de cosecha de agua.*

Para determinar el volumen más apropiado de depósito de cosecha de agua de lluvia desde el punto de vista de la seguridad, caso más desfavorable según la información pluviométrica disponible, se propone utilizar la máxima pluviometría anual de los datos disponibles y la modulación del año más desfavorable (mayor volumen de depósito para uno de los barrios) como se ha comentado. En la siguiente tabla se tienen los datos medios de pluviometría mensual por año.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

<b>AÑO</b>	<b>ENERO</b>	<b>FEBRERO</b>	<b>MARZO</b>	<b>ABRIL</b>	<b>MAYO</b>	<b>JUNIO</b>	<b>JULIO</b>	<b>AGOSTO</b>	<b>SEPTIEMBRE</b>	<b>OCTUBRE</b>	<b>NOVIEMBRE</b>	<b>DICIEMBRE</b>
<b>1978</b>	88	61	56	129	84	63	38	87	122	80	17	26
<b>1979</b>	14.13	40	241	92	85	112	81	157	112	104	44	48
<b>1980</b>	88	65	48	153	149	92	51	134	118	128	33	91
<b>1982</b>	52	39	11	52	188	94	44	57	53	54	43	38
<b>1983</b>	41	47	43	169	317	65	59	143	47	36	31	32
<b>1984</b>	111	55	68	303	128	55	33	60	52	57	37	46
<b>1985</b>	35	38	91	258	117	158	110	90	67	265	127	6
<b>1986</b>	86	19	98	136	158	50	69	99	96	113	27	17
<b>1987</b>	54	20	57	202	199	173	44	79	83	169	106	71
<b>1988</b>	230	43	50	37	92	146	82	74	112	141	37	50
<b>1996</b>	26	99	61	89	89	151	69	52	110	74	72	28

**Tabla 14 Valores medios de precipitación mensual por mes.**

Como puede observarse en la Tabla 8 el año de mayor pluviometría anual es 1985.

<b>Total pluviometría anual (mm)</b>	<b>Año</b>
2.555,9	1.978
3.388,2	1.979
3.453,4	1.980
2.180,2	1.982
3.089,2	1.983
3.012,2	1.984
<b>4.088,2</b>	<b>1.985</b>
2.905,0	1.986
3.768,8	1.987
3.288,2	1.988
2.755,2	1.996

**Tabla 15 Precipitación total anual.**

La demanda de ANP para una vivienda del barrio Centre Ville se presenta en la Tabla 9.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Barrio	Nº viviendas por barrio	Nº viviendas por nudo	Demanda AP por vivienda (l/s)	Demanda ANP por vivienda (l/s)
Centre ville	303	14	0,0024	0,0012

**Tabla 16 Demanda de ANP en las viviendas.**

Los volúmenes de depósito para satisfacer la demanda en una vivienda del barrio de Centre Ville pueden observarse en la Tabla 10 para los diferentes años de pluviometría disponible. El mayor volumen de depósito obtenido es el del año 1982. Por lo tanto, dicho año es el que presenta mayor irregularidad o dispersión en la pluviometría.

Año	Cosecha (m3)	Volumen de Depósito (m3)
1978	17	18,2
1979	22,6	11,2
1980	23	12,2
1982	14,5	20
1983	20,6	13,7
1984	20,1	15,6
1985	27,3	6,9
1986	19,4	15,8
1987	25,1	9,4
1988	21,9	16,2
1996	18,4	9,4

**Tabla 17 Volumen de depósito para una vivienda de Centre Ville.**

Para definir una “lluvia ficticia” para dimensionar los depósitos de cosecha de agua de lluvia que esté del lado de la seguridad, como se ha comentado, se ha utilizado la pluviometría total del año 1985 y la distribución de pluviometría o modulación que presenta el año 1982. Dicha “lluvia ficticia” se muestra en la tabla siguiente.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1,39	1,04	0,30	1,38	4,99	2,48	1,16	1,51	1,40	1,43	1,15	1,01

**Tabla 18 “Lluvia ficticia” para el dimensionamiento de los depósitos de cosecha de agua por nudo de consumo.**

En la Tabla 12 se presentan los volúmenes de los depósitos de cosecha de agua de lluvia por nudo de consumo para cada uno de los barrios. Hemos supuesto que cada

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

uno de los depósitos tiene un volumen de reserva de 5m<sup>3</sup>, por lo tanto, suponiendo un diámetro “virtual” de tal manera que la altura del depósito “virtual” esté en torno a 6 m, se ha calculado el nivel inicial de reserva para cada uno de los depósitos, suponiendo un nivel mínimo de 0.4 m.

Barrio	Volumen dep. cosecha (m <sup>3</sup> )	Diámetro virtual (m)	h depósito virtual (m)	NIVEL INICIAL (m)	NIVEL MÍNIMO (m)
Centre ville	456,4	10	5,8	0,88	0,4
Deye lo Source	1091,6	16	5,4	0,82	0,4
Bas Borne	1175,3	16	5,8	0,88	0,4
La Source	1690,1	20	5,4	0,81	0,4
Haut Marché	557,4	11	5,9	0,88	0,4
Bas Lagon	662,8	12	5,9	0,88	0,4
Cemetière	3539,2	28	5,7	0,87	0,4
Pont des Dames	5447,9	35	5,7	0,85	0,4
Bostage	12532,8	52	5,9	0,89	0,4

**Tabla 19 Valores de parámetros de los depósitos de cosecha de agua de lluvia para cada nudo por barrio**

Las dimensiones presentadas en la Tabla 12 han sido introducidas en el modelo de EPANET para cada uno de los nudos de cada barrio.

## **2. DISEÑO.**

### **2.1. La simulación.**

El diseño se plantea para la situación más desfavorable a la que se puede enfrentar la red, es decir, que todos los depósitos de cosecha de agua de lluvia estén vacíos. Por lo tanto, se hace el diseño para caudal punta según la curva de modulación de consumo que se ha establecido. El coeficiente de punta tomado es  $C_p=2$ .

Se ha eliminado en el modelo de Epanet los módulos de cosecha de agua de lluvia para que no interfieran en la optimización. Una vez calculada la red para las diferentes  $P_{min}$  de servicio serán comprobadas con los módulos de cosecha de agua de lluvia para conocer la respuesta de la red.

## 2.2. Diámetros comerciales utilizados.

Para el diseño de la red se ha utilizado tubería de PEHD PE10 (PN 10). Los diámetros “candidatos” y los precios mayorados para tener en cuenta los costes de transporte e instalación se muestran en la siguiente tabla.

D. Nominal (mm)	Espesor (mm)	D. Interior (mm)	Coste (US\$/m)
63	3,8	55,4	5,49
75	4,5	66	7,73
90	5,4	79,2	11,19
110	6,6	96,8	16,59
125	7,4	110,2	21,26
140	8,3	123,4	26,64
160	9,5	141	34,86
180	10,7	158,6	44,19
200	11,9	176,2	54,41
225	13,4	198,2	69,09
250	14,8	220,4	84,77
280	16,6	246,8	108,48
315	18,7	277,6	137,40
355	21,1	312,8	174,78
400	23,7	352,6	221,18
450	26,7	396,6	280,34
500	29,7	440,6	346,46
560	33,2	493,6	433,83
630	37,4	555,2	549,56
710	42,1	625,8	697,71
800	47,4	705,2	884,70

Tabla 20 Diámetros comerciales utilizados como candidatos para el diseño.

## 2.3. Curva de modulación de la bomba y dimensionamiento del depósito de regulación.

Se ha introducido un punto de funcionamiento estimado teniendo en cuenta el aporte de AP al modulo de ANP por causa de “fallo” de éste.

El depósito de regulación ha sido determinado por balance de masas, teniendo en cuenta el consumo de agua potable, un 25 % de averías y un 15 % de incendios, lo

cual sobredimensiona el depósito y la regulación, lo que permite responder al aporte de AP para usos no potables en caso de fallo del sistema de cosecha de agua de lluvia, es decir, que el depósito de cosecha de agua de lluvia llegue al nivel mínimo establecido y sea llenado por la red de abastecimiento de AP. El depósito de regulación es de  $1.882 \text{ m}^3$ .

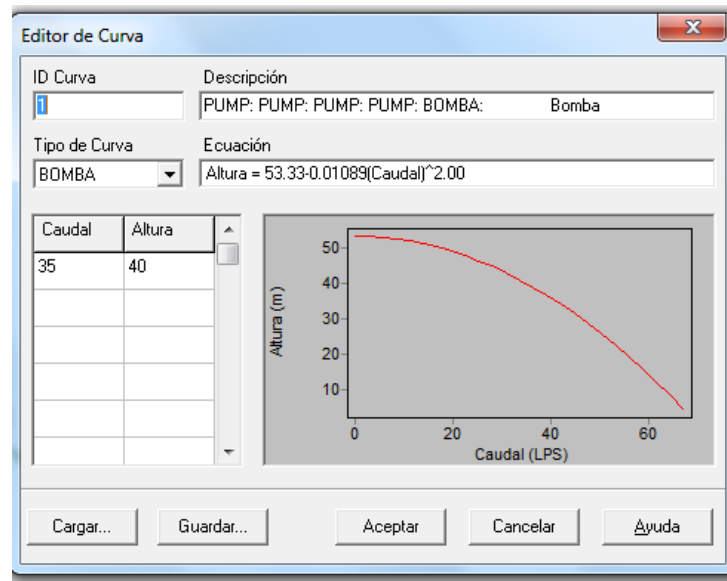


Figura 18 Punto de funcionamiento de la bomba.

### 3. COSTES DE OPERACIÓN

#### 3.1. Pluviometría para la determinación de los costes de energético.

Para determinar los costes de operación la precipitación deberá representar el comportamiento “medio” previsto, por lo que se ha visto más adecuado utilizar la precipitación mensual obtenida con la media de las precipitaciones mensuales medias de todas y cada una de las series disponibles.

Dicha serie pluviométrica “ficticia” se presenta en la siguiente tabla.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Precipitación media (mm)											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
75.10	47.91	74.80	147.24	146.00	105.36	61.72	93.89	88.42	111.05	52.23	<u>41.26</u>

**Tabla 21 Pluviometría para la determinación de los costes de operación del sistema.**

Barrio	Pp l/s modelo Diciembre	Pp l/s modelo Noviembre
Centre ville	0.02	0.04
Deye lo Source	0.04	0.11
Bas Morne	0.04	0.11
La Source	0.06	0.16
Haut Marché	0.02	0.05
Bas Lagon	0.02	0.06
Cemetière	0.12	0.34
Pont des Dames	0.18	0.53
Bostage	0.42	1.22

**Tabla 22 Aporte de la precipitación por nudo en diciembre de pluviometría ficticia.**

Barrio	Reserva inicial en el nudo (m3)	Diámetro virtual (m)	Nivel inicial (m)
Centre ville	68.89	10	0.88
Deye lo Source	164.68	16	0.82
Bas Morne	177.38	16	0.88
La Source	254.56	20	0.81
Haut Marché	84.09	11	0.88
Bas Lagon	100.02	12	0.88
Cemetière	533.89	28	0.87
Pont des Dames	821.77	35	0.85
Bostage	1891.47	52	0.89

**Tabla 23 Reserva inicial utilizada para diseñar el volumen de los depósitos.**

### **3.2. Control de llenado de los depósitos de cosecha de agua de lluvia.**

Los controles simples introducidos en EPANET controlan el llenado del depósito de cosecha de agua de lluvia, el cuál simula el conjunto de depósitos de cosecha de agua de lluvia de las viviendas que son alimentadas por el nudo de consumo de AP al que va vinculado, como ya se ha citado en la memoria de esta tesina. Estos controles tratan de simular la situación más desfavorable, el llenado de todos los depósitos a la vez. Esta es la razón por la cual los niveles iniciales en los depósitos son bajos. Este llenado se da a  $t=0$  h según la simulación de EPANET.

LINK L1\_1 OPEN IF NODE DALN1 BELOW 0.41; LINK L1\_1 CLOSED IF NODE DALN1 ABOVE 0.46;  
LINK L2\_1 OPEN IF NODE DALN2 BELOW 0.41; LINK L2\_1 CLOSED IF NODE DALN2 ABOVE 0.46;  
LINK L3\_1 OPEN IF NODE DALN3 BELOW 0.41; LINK L3\_1 CLOSED IF NODE DALN3 ABOVE 0.46;  
LINK L5\_1 OPEN IF NODE DALN5 BELOW 0.41; LINK L5\_1 CLOSED IF NODE DALN5 ABOVE 0.46;  
LINK L4\_1 OPEN IF NODE DALN4 BELOW 0.41; LINK L4\_1 CLOSED IF NODE DALN4 ABOVE 0.46;  
LINK L57\_1 OPEN IF NODE DALN57 BELOW 0.41; LINK L57\_1 CLOSED IF NODE DALN57 ABOVE 0.46;  
LINK L16\_1 OPEN IF NODE DALN16 BELOW 0.41; LINK L16\_1 CLOSED IF NODE DALN16 ABOVE 0.46;  
LINK L15\_1 OPEN IF NODE DALN15 BELOW 0.41; LINK L15\_1 CLOSED IF NODE DALN15 ABOVE 0.46;  
LINK L17\_1 OPEN IF NODE DALN17 BELOW 0.41; LINK L17\_1 CLOSED IF NODE DALN17 ABOVE 0.46;  
LINK L18\_1 OPEN IF NODE DALN18 BELOW 0.41; LINK L18\_1 CLOSED IF NODE DALN18 ABOVE 0.46;  
LINK L13\_1 OPEN IF NODE DALN13 BELOW 0.41; LINK L13\_1 CLOSED IF NODE DALN13 ABOVE 0.46;  
LINK L12\_1 OPEN IF NODE DALN12 BELOW 0.41; LINK L12\_1 CLOSED IF NODE DALN12 ABOVE 0.46;  
LINK L14\_1 OPEN IF NODE DALN14 BELOW 0.41; LINK L14\_1 CLOSED IF NODE DALN14 ABOVE 0.46;  
LINK L11\_1 OPEN IF NODE DALN11 BELOW 0.41; LINK L11\_1 CLOSED IF NODE DALN11 ABOVE 0.46;  
LINK L8\_1 OPEN IF NODE DALN8 BELOW 0.41; LINK L8\_1 CLOSED IF NODE DALN8 ABOVE 0.46;  
LINK L9\_1 OPEN IF NODE DALN9 BELOW 0.41; LINK L9\_1 CLOSED IF NODE DALN9 ABOVE 0.46;  
LINK L10\_1 OPEN IF NODE DALN10 BELOW 0.41; LINK L10\_1 CLOSED IF NODE DALN10 ABOVE 0.46;  
LINK L22\_1 OPEN IF NODE DALN22 BELOW 0.41; LINK L22\_1 CLOSED IF NODE DALN22 ABOVE 0.46;  
LINK L21\_1 OPEN IF NODE DALN21 BELOW 0.41; LINK L21\_1 CLOSED IF NODE DALN21 ABOVE 0.46;  
LINK L19\_1 OPEN IF NODE DALN19 BELOW 0.41; LINK L19\_1 CLOSED IF NODE DALN19 ABOVE 0.46;  
LINK L55\_1 OPEN IF NODE DALN55 BELOW 0.41; LINK L55\_1 CLOSED IF NODE DALN55 ABOVE 0.46;  
LINK L54\_1 OPEN IF NODE DALN54 BELOW 0.41; LINK L54\_1 CLOSED IF NODE DALN54 ABOVE 0.46;  
LINK L61\_1 OPEN IF NODE DALN61 BELOW 0.41; LINK L61\_1 CLOSED IF NODE DALN61 ABOVE 0.46;  
LINK L56\_1 OPEN IF NODE DALN56 BELOW 0.41; LINK L56\_1 CLOSED IF NODE DALN56 ABOVE 0.46;



**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

LINK L59\_1 OPEN IF NODE DALN59 BELOW 0.41; LINK L59\_1 CLOSED IF NODE DALN59 ABOVE 0.46;  
LINK L23\_1 OPEN IF NODE DALN23 BELOW 0.41; LINK L23\_1 CLOSED IF NODE DALN23 ABOVE 0.46;  
LINK L24\_1 OPEN IF NODE DALN24 BELOW 0.41; LINK L24\_1 CLOSED IF NODE DALN24 ABOVE 0.46;  
LINK L26\_1 OPEN IF NODE DALN26 BELOW 0.41; LINK L26\_1 CLOSED IF NODE DALN26 ABOVE 0.46;  
LINK L25\_1 OPEN IF NODE DALN25 BELOW 0.41; LINK L25\_1 CLOSED IF NODE DALN25 ABOVE 0.46;  
LINK L7\_1 OPEN IF NODE DALN7 BELOW 0.41; LINK L7\_1 CLOSED IF NODE DALN7 ABOVE 0.46;  
LINK L6\_1 OPEN IF NODE DALN6 BELOW 0.41; LINK L6\_1 CLOSED IF NODE DALN6 ABOVE 0.46;  
LINK L46\_1 OPEN IF NODE DALN46 BELOW 0.41; LINK L46\_1 CLOSED IF NODE DALN46 ABOVE 0.46;  
LINK L45\_1 OPEN IF NODE DALN45 BELOW 0.41; LINK L45\_1 CLOSED IF NODE DALN45 ABOVE 0.46;  
LINK L41\_1 OPEN IF NODE DALN41 BELOW 0.41; LINK L41\_1 CLOSED IF NODE DALN41 ABOVE 0.46;  
LINK L42\_1 OPEN IF NODE DALN42 BELOW 0.41; LINK L42\_1 CLOSED IF NODE DALN42 ABOVE 0.46;  
LINK L39\_1 OPEN IF NODE DALN39 BELOW 0.41; LINK L39\_1 CLOSED IF NODE DALN39 ABOVE 0.46;  
LINK L43\_1 OPEN IF NODE DALN43 BELOW 0.41; LINK L43\_1 CLOSED IF NODE DALN43 ABOVE 0.46;  
LINK L40\_1 OPEN IF NODE DALN40 BELOW 0.41; LINK L40\_1 CLOSED IF NODE DALN40 ABOVE 0.46;  
LINK L37\_1 OPEN IF NODE DALN37 BELOW 0.41; LINK L37\_1 CLOSED IF NODE DALN37 ABOVE 0.46;  
LINK L44\_1 OPEN IF NODE DALN44 BELOW 0.41; LINK L44\_1 CLOSED IF NODE DALN44 ABOVE 0.46;  
LINK L28\_1 OPEN IF NODE DALN28 BELOW 0.41; LINK L28\_1 CLOSED IF NODE DALN28 ABOVE 0.46;  
LINK L27\_1 OPEN IF NODE DALN27 BELOW 0.41; LINK L27\_1 CLOSED IF NODE DALN27 ABOVE 0.46;  
LINK L47\_1 OPEN IF NODE DALN47 BELOW 0.41; LINK L47\_1 CLOSED IF NODE DALN47 ABOVE 0.46;  
LINK L30\_1 OPEN IF NODE DALN30 BELOW 0.41; LINK L30\_1 CLOSED IF NODE DALN30 ABOVE 0.46;  
LINK L48\_1 OPEN IF NODE DALN48 BELOW 0.41; LINK L48\_1 CLOSED IF NODE DALN48 ABOVE 0.46;  
LINK L49\_1 OPEN IF NODE DALN49 BELOW 0.41; LINK L49\_1 CLOSED IF NODE DALN49 ABOVE 0.46;  
LINK L29\_1 OPEN IF NODE DALN29 BELOW 0.41; LINK L29\_1 CLOSED IF NODE DALN29 ABOVE 0.46;  
LINK L51\_1 OPEN IF NODE DALN51 BELOW 0.41; LINK L51\_1 CLOSED IF NODE DALN51 ABOVE 0.46;  
LINK L50\_1 OPEN IF NODE DALN50 BELOW 0.41; LINK L50\_1 CLOSED IF NODE DALN50 ABOVE 0.46;  
LINK L52\_1 OPEN IF NODE DALN52 BELOW 0.41; LINK L52\_1 CLOSED IF NODE DALN52 ABOVE 0.46;  
LINK L60\_1 OPEN IF NODE DALN60 BELOW 0.41; LINK L60\_1 CLOSED IF NODE DALN60 ABOVE 0.46;  
LINK L58\_1 OPEN IF NODE DALN58 BELOW 0.41; LINK L58\_1 CLOSED IF NODE DALN58 ABOVE 0.46;  
LINK L32\_1 OPEN IF NODE DALN32 BELOW 0.41; LINK L32\_1 CLOSED IF NODE DALN32 ABOVE 0.46;  
LINK L31\_1 OPEN IF NODE DALN31 BELOW 0.41; LINK L31\_1 CLOSED IF NODE DALN31 ABOVE 0.46;  
LINK L33\_1 OPEN IF NODE DALN33 BELOW 0.41; LINK L33\_1 CLOSED IF NODE DALN33 ABOVE 0.46;  
LINK L36\_1 OPEN IF NODE DALN36 BELOW 0.41; LINK L36\_1 CLOSED IF NODE DALN36 ABOVE 0.46;  
LINK L34\_1 OPEN IF NODE DALN34 BELOW 0.41; LINK L34\_1 CLOSED IF NODE DALN34 ABOVE 0.46;

---

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

LINK L35\_1 OPEN IF NODE DALN35 BELOW 0.41; LINK L35\_1 CLOSED IF NODE DALN35 ABOVE 0.46;

LINK L62\_1 OPEN IF NODE DALN62 BELOW 0.41; LINK L62\_1 CLOSED IF NODE DALN62 ABOVE 0.46;

LINK L38\_1 OPEN IF NODE DALN38 BELOW 0.41; LINK L38\_1 CLOSED IF NODE DALN38 ABOVE 0.46;

LINK L20\_1 OPEN IF NODE DALN20 BELOW 0.41; LINK L20\_1 CLOSED IF NODE DALN20 ABOVE 0.46;

LINK L53\_1 OPEN IF NODE DALN53 BELOW 0.41; LINK L53\_1 CLOSED IF NODE DALN53 ABOVE 0.46;

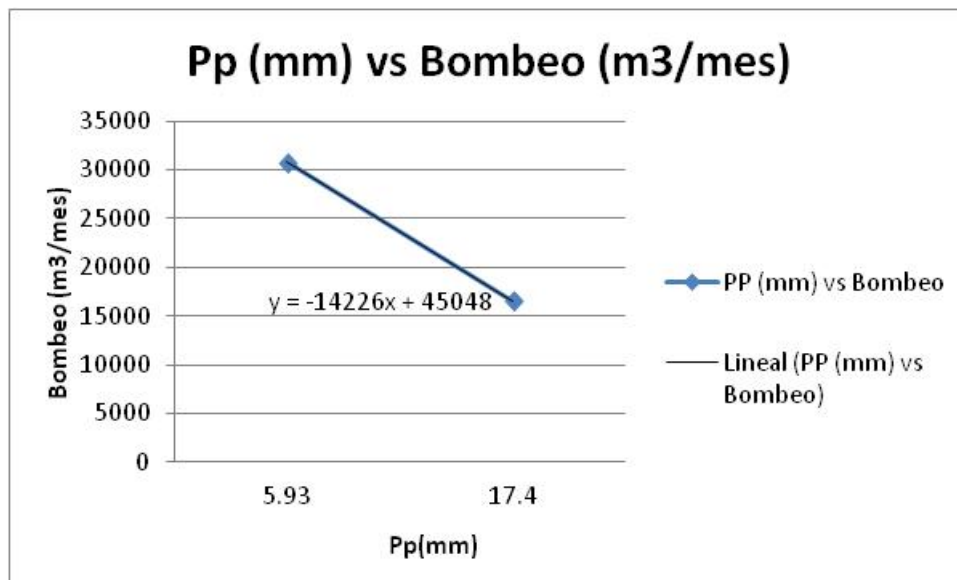
### **3.3. Control de la bomba**

El control introducido en el modelo para controlar el llenado del depósito viene dado por:

LINK Bomba OPEN IF NODE DP BELOW 5.45; LINK Bomba CLOSED IF NODE DP ABOVE 5.50

### **3.4. Consumo energético.**

Línea de tendencia con los datos obtenidos en al correr el modelo en Epanet para diciembre y noviembre más desfavorables, a partir de dicha recta se determina el consumo para las precipitaciones de los meses medios.



**Figura 19 Precipitación frente a Bombeo (m3 /mes)**

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de la simulación en Epanet para los meses de diciembre y noviembre de la pluviometría utilizada para dimensiona los depósitos, la más defavorable.

	Diciembre	Noviembre
Bombeo (m3/mes)	30822.48	16596.72
Consumo AP para usos ANP (m3/mes)	6468.624	106.272
PP (mm)	5.93	17.4

**Tabla 24 Datos obtenidos en Epanet, para Diciembre y noviembre de pluviometría más defavorable.**

## **10.2 Anexo 2. Uso de Evolver®. Solver de algoritmo genético para Microsoft Excel. Versión 5.7.**

### **1. INTRODUCCIÓN.**

El programa Evolver es una potente aplicación que se instala sobre Excel, es capaz de resolver los problemas de optimización que en éste no pueden ser resueltos, ya sea por su complejidad o por tratarse de problemas no lineales. Evolver optimiza empleando la técnica de los algoritmos genéticos.

### **2. CARACTERÍSTICA PRINCIPAL DE EVOLVER**

Una de las características principales de Evolver es la sencillez de uso, ya que se instala sobre Excel como una herramienta más, en la hoja Excel se especifica la celda a maximizar o minimizar, se introducen las celdas que deben ser ajustadas y se selecciona uno de los seis métodos de optimización con algoritmos genéticos de los que dispone Evolver. Estos métodos de optimización son receta, orden, agrupación, calendarización, proyecto y presupuesto (Guía para el uso de Evolver®. Versión 5.7. Septiembre 2010.)

- El método de optimización receta trata a cada variable seleccionada como “un ingrediente en una receta”, cada valor de la variable puede ser cambiado independientemente de las otras variables. Por lo tanto, trata de averiguar la “mejor mezcla” cambiando cada uno de los valores de las variables independientemente.
- El método de optimización orden cambia valores entre las celdas ajustables, reordenando los valores que originalmente estaban. Es decir, intercambia valores entre variables, barajando los valores originales para encontrar el “mejor orden” posible.
- El método de optimización agrupación debe ser usado siempre que el problema implique múltiples variables a ser agrupadas en su conjunto. El número de grupos diferentes que Evolver crea será igual al número presente de valores en las celdas ajustables en el inicio de la optimización. Por lo tanto, cuando se construye un modelo, hay que estar

seguro de que cada grupo es representado al menos una vez. El agrupamiento se centra más en los valores de todas las variables, porque puede permutar una serie de variables de un grupo con una serie de variables de otro.

Por otro lado, los métodos de optimización calendarización, proyecto y presupuesto son “descendientes” de los tres citados anteriormente (receta, orden y agrupación), a los que se le ha añadido restricciones adicionales.

## **2.2. Uso en ciencia e ingeniería**

Las áreas de aplicación en ciencia e ingeniería son muy diversas, problemas de física, química, electrónica y genética, entre otros. Algunos ejemplos de las áreas de aplicación en la que se utiliza evolver para la optimización son:

- Optimización de las políticas de pedidos de multi-productos para ventas minoristas.
- Programación coordinada de la producción y de los recursos humanos para la minimización de los costes ante una demanda incierta y con presiones temporales.
- Decisiones sobre los productos en los que la demanda y los requerimientos de cada producto son inciertos.
- Gestión de la rentabilidad en almacenes.
- Planificación de la capacidad óptima de varios centros de producción ante la incertidumbre en las demandas.
- Planificación de tareas en proyectos y organización industrial para maximizar el rendimiento general.
- Decisiones de inversión y selección de proyectos cuando los recursos requeridos para los proyectos disponibles son inciertos
- Políticas óptimas de gestión de tesorería ante flujos de caja con incertidumbre.

- Asignación del presupuesto anual de una empresa entre departamentos para maximizar los beneficios del año próximo.
- Minimización de los costos iniciales y de operación de un transformador.
- Planificación de la capacidad de las empresas de servicios ante la incertidumbre tanto la demanda como los precios.
- Decisiones de lanzamiento de productos y servicios al mercado cuando la tasa de crecimiento del mismo es desconocida.
- Decisiones financieras en combinación de carteras de diferente composición y riesgo
- Agrupar rutinas de programación en segmentos de código diferentes de forma que el programa se ejecute lo más rápidamente posible.
- Encontrar las mejores coordenadas x, y para torres de radio de forma que el alcance de emisión cubra la mayor población de potenciales oyentes.

### **3. EVOLVER EN VISUAL BASIC.**

La potencia de optimización de Evolver puede ser usada en programas personalizados usando Visual Basic. Al usar funciones de macro en VBA, se puede hacer que Evolver evalúe modelos que sean más complejos.

Los macros VBA se pueden ejecutar en diferentes momentos de la optimización y de la ejecución de la simulación de cada solución de prueba, lo que permite introducir cálculos personalizados que se realizarán durante una optimización. La introducción de estos cálculos personalizados con macros, permiten en la presente tesina el cálculo de las presiones en la red para cada iteración de los diámetros.

En Evolver las macros se pueden ejecutar en diferentes momentos de la optimización:

- **Al inicio de la optimización.** La macro se ejecuta después de hacer clic en el icono Ejecutar y antes de que se genere la primera solución de prueba. En la presente tesina se ejecuta una macro en este instante para
-

extraer del .inp de Epanet las presiones del modelo, para ello se hace uso de Toolkit de Epanet (ver anexo 3).

- **Antes del recálculo de cada prueba.** La macro se ejecuta antes de que se realice el recálculo de cada prueba.
- **Después del recálculo de cada prueba.** La macro se ejecuta después de que se realice el recálculo de cada prueba. En la presente tesina es también introducida la macro que usa Toolkit de Epanet en este momento (ver anexo 3) para hacer el cálculo de las presiones una vez hecha la primera iteración de los diámetros. En este instante Evolver propone una serie de diámetros para las tuberías entre los diámetros “elegibles”, pero aún no ha leído la celda objetivo, de modo que este es el momento de ejecutar la macro para obtener las presiones con el uso de Toolkit de Epanet, y con dichas presiones la penalización de la función objetivo.
- **Después de almacenar variable de salida.** La macro se ejecuta después de cada prueba ejecutada y después de que se almacene el valor de la celda objetivo.
- **Al final de la optimización.** La macro se ejecuta cuando se completa la optimización. En esta tesina es también introducida la macro que usa Toolkit de Epanet (ver anexo 3) en este momento de la optimización para hacer el cálculo de las presiones, con el objetivo de tener la certeza de la actualización de dichas presiones en el resultado final.

### 10.3 Anexo 3. Macro usada.

En las siguientes líneas se muestra la macro utilizada para introducir los diámetros en Epanet y para volcar las presiones en la hoja Excel, la cual se ha introducido en Al inicio de la optimización, Después del recálculo de cada prueba y Al final de la optimización.

Sub PRESIONES()

,

'DECLARACIÓN E INICIALIZACIÓN DE VARIABLES

,

Dim hora, nudo, tuberia As Integer

Dim num\_horas, num\_nudos, num\_tuberias, Presion, diametro, Longitud As Variant

Dim D(), P(), L() As Single

num\_horas = 1

num\_nudos = 62

num\_tuberias = 89

'-----

'DIMENSIONADO DE LAS MATRICES

'-----

ReDim D(1 To num\_tuberias)

ReDim L(1 To num\_tuberias)

ReDim P(1 To num\_horas, 1 To num\_nudos)

'-----

'CUERPO DEL PROGRAMA

'-----

F1 = "C:\EPANET\Tesina\Dondon\_SIN\_ALL.inp" 'Ruta del fichero INP

F2 = "C:\EPANET\Tesina\Dondon\_SIN\_ALL.rpt" 'Ruta del fichero RPT

F3 = "C:\EPANET\Tesina\Inter.inp"

ENopen F1, F2, "" ' Abre sistema Toolkit con el fichero indicado

ENopenH ' Abre sistema de análisis hidráulico

ENinitH 0 ' Inicializa niveles de tanque, estado de líneas, reloj, etc ... antes de rodar un análisis hidráulico



DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO

---

```
'-----  
' Cargar diámetros en EPANET  
'-----  
For tuberia = 1 To num_tuberias  
    D(tuberia) = Worksheets("PRECIO").Cells(tuberia + 3, 4)  
    ENsetlinkvalue tuberia, EN_DIAMETER, D(tuberia)  
Next  
  
'-----  
'PRESIONES EN LOS NUDOS  
'-----  
For hora = 1 To num_horas  
    ENrunH hora * 3600      ' Ejecuta un análisis hidráulico en la hora "hora"  
    For nudo = 1 To num_nudos  
        ENgetnodevalue nudo, EN_PRESSURE, P(hora, nudo)  
        Worksheets("PRECIO").Cells(3, nudo + 13) = P(hora, nudo)  
    Next  
    ENnextH 3600  
Next  
'--- Graba un fichero INP como prueba en los ensayos, para comprobar que EPANET lee  
correctamente los diámetros y coloca correctamente las presiones en Excel  
'  
'    ENsaveinpfile F3  
'  
ENcloseH  
  
ENclose ' Cierra el sistema Toolkit y los ficheros asociados  
  
End Sub
```

DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO

## 10.4 Anexo 4. Resultados de la optimización.

### 1. PMIN = 20 MCA

Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)	Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)
1	353,1	141,0	12307,64	45	243,8	55,4	1338,19
2	48,1	123,4	1280,74	46	4,9	55,4	26,93
3	209,6	55,4	1150,70	47	160,6	55,4	881,88
4	9,6	55,4	52,78	48	2,2	55,4	12,06
5	7,2	55,4	39,76	49	9,4	55,4	51,68
6	6,1	55,4	33,59	50	40,4	55,4	221,93
7	73,5	55,4	403,75	51	94,1	55,4	516,41
8	74,1	55,4	406,59	52	45,5	55,4	249,66
9	32,4	55,4	177,64	53	50,2	55,4	275,70
10	180,2	55,4	989,53	54	154,4	55,4	847,93
11	78,8	55,4	432,63	55	43,0	55,4	236,25
12	74,5	55,4	408,82	56	194,4	55,4	1067,00
13	143,0	55,4	785,15	57	6,5	55,4	35,54
14	31,5	55,4	172,86	58	43,6	55,4	239,41
15	6,4	79,2	71,72	59	77,4	55,4	424,77
16	67,2	66,0	519,24	60	20,0	55,4	110,01
17	65,4	55,4	359,08	61	269,0	66,0	2078,23
18	7,2	55,4	39,40	62	76,7	123,4	2042,70
19	75,0	55,4	411,57	63	202,7	55,4	1112,66
20	3,1	55,4	17,11	64	77,1	55,4	423,26
21	74,8	55,4	410,57	65	5,5	55,4	30,10
22	13,2	79,2	148,17	66	103,9	66,0	802,26
23	40,8	66,0	315,30	67	25,9	79,2	289,33
24	74,1	55,4	406,98	68	150,4	55,4	825,45
25	8,1	55,4	44,44	69	203,9	55,4	1119,28
26	125,5	55,4	688,89	70	129,7	55,4	711,98
27	56,1	55,4	308,09	71	47,2	110,2	1002,85
28	90,5	55,4	496,60	72	8,3	123,4	220,53
29	196,5	55,4	1078,79	73	2,1	110,2	44,02
30	4,9	55,4	26,64	74	346,5	55,4	1902,22
31	7,4	55,4	40,87	75	329,3	55,4	1807,88
32	188,7	55,4	1036,16	76	65,9	55,4	361,74

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)	Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)
33	82,7	55,4	453,81	77	152,2	55,4	835,69
34	161,8	55,4	888,18	78	8,8	55,4	48,08
35	68,4	55,4	375,43	79	350,1	55,4	1921,89
36	55,7	55,4	305,60	80	167,2	55,4	918,06
37	57,5	55,4	315,41	81	222,0	55,4	1218,53
38	7,4	55,4	40,42	82	134,2	55,4	736,75
39	60,6	55,4	332,85	83	108,5	141,0	3782,38
40	5,7	55,4	31,41	84	4,3	55,4	23,88
41	131,2	55,4	720,08	85	185,6	55,4	1019,06
42	57,5	55,4	315,65	86	27,7	55,4	152,31
43	9,7	55,4	53,45	87	528,5	55,4	2901,49
44	4,3	55,4	23,53	88	6,4	55,4	35,23
				89	110,9	55,4	609,03
<b>Coste total (USD)</b>							<b>64429,80</b>

**Tabla 25 Diámetros y presiones para Pmin=20 m.c. a.**

Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)
1	27,3	0	22	21,2	0	43	25,7	0
2	20,5	0	23	26,2	0	44	31,3	0
3	26,4	0	24	23,6	0	45	26,8	0
4	27,2	0	25	18,2	1,8	46	24,2	0
5	22,7	0	26	26,5	0	47	23,0	0
6	20,7	0	27	24,2	0	48	26,8	0
7	20,3	0	28	24,2	0	49	26,4	0
8	21,3	0	29	24,2	0	50	26,4	0
9	21,3	0	30	21,2	0	51	26,4	0
10	22,7	0	31	22,2	0	52	26,3	0
11	21,7	0	32	22,7	0	53	22,5	0
12	23	0	33	27,7	0	54	22,6	0,9
13	24,8	0	34	31,5	0	55	32,6	0
14	24,8	0	35	30,9	0	56	31,9	0
15	27	0	36	23,2	0	57	31,5	0
16	21,6	0	37	31,5	0	58	31,2	0

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)
17	21,2	0	38	27,8	0	59	19,1	0
18	22,7	0	39	32,4	0	60	21,1	0
19	22,7	0	40	31,5	0	61	31,6	0
20	21,4	0	41	29,9	0	62	18,8	1,2
21	20,1	0	42	31,2	0			

Tabla 26 Presiones en los nudos y diferencias de presiones con la Pmin=20 m.c.a. (P<Pmin).

**2.PMIN = 25 MCA**

Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)	Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)
1	353,1	176,2	19208,17	45	243,8	55,4	315,65
2	48,1	176,2	2615,57	46	4,9	55,4	53,45
3	209,6	66,0	1619,16	47	160,6	55,4	23,53
4	9,6	55,4	52,78	48	2,2	55,4	1338,19
5	7,2	55,4	39,76	49	9,4	55,4	26,93
6	6,1	55,4	33,59	50	40,4	55,4	881,88
7	73,5	55,4	403,75	51	94,1	55,4	12,06
8	74,1	55,4	406,59	52	45,5	55,4	51,68
9	32,4	55,4	177,64	53	50,2	55,4	221,93
10	180,2	55,4	989,53	54	154,4	55,4	516,41
11	78,8	66,0	608,75	55	43,0	55,4	249,66
12	74,5	55,4	408,82	56	194,4	55,4	275,70
13	143,0	55,4	785,15	57	6,5	55,4	847,93
14	31,5	55,4	172,86	58	43,6	55,4	236,25
15	6,4	123,4	170,74	59	77,4	55,4	1067,00
16	67,2	110,2	1428,68	60	20,0	55,4	35,54
17	65,4	55,4	359,08	61	269,0	55,4	239,41
18	7,2	55,4	39,40	62	76,7	55,4	424,77
19	75,0	55,4	411,57	63	202,7	55,4	110,01
20	3,1	55,4	17,11	64	77,1	66,0	2078,23
21	74,8	55,4	410,57	65	5,5	158,6	3388,40
22	13,2	110,2	281,44	66	103,9	55,4	1112,66
23	40,8	96,8	677,12	67	25,9	55,4	423,26
24	74,1	55,4	406,98	68	150,4	55,4	30,10

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)	Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)
25	8,1	55,4	44,44	69	203,9	96,8	1722,92
26	125,5	55,4	688,89	70	129,7	123,4	688,80
27	56,1	79,2	627,96	71	47,2	55,4	825,45
28	90,5	55,4	496,60	72	8,3	55,4	1119,28
29	196,5	55,4	1078,79	73	2,1	55,4	711,98
30	4,9	55,4	26,64	74	346,5	141,0	1644,76
31	7,4	55,4	40,87	75	329,3	158,6	365,80
32	188,7	55,4	1036,16	76	65,9	158,6	91,52
33	82,7	55,4	453,81	77	152,2	55,4	1902,22
34	161,8	55,4	888,18	78	8,8	55,4	1807,88
35	68,4	55,4	375,43	79	350,1	66,0	509,00
36	55,7	55,4	305,60	80	167,2	55,4	835,69
37	57,5	55,4	315,41	81	222,0	79,2	98,00
38	7,4	55,4	40,42	82	134,2	55,4	1921,89
39	60,6	55,4	332,85	83	108,5	55,4	918,06
40	5,7	55,4	31,41	84	4,3	55,4	1218,53
41	131,2	55,4	720,08	85	185,6	55,4	736,75
42	57,5	176,2	19208,17	86	27,7	176,2	5903,05
43	9,7	176,2	2615,57	87	528,5	55,4	23,88
44	4,3	66,0	1619,16	88	6,4	55,4	1019,06
				89	110,9	55,4	152,31
<b>Coste total (USD)</b>							<b>80951,54</b>

Tabla 27 Diámetros y presiones para Pmin=25 m.c. a.

Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)
1	28.8	0	22	23.9	1.1	43	27.4	0
2	26.3	0	23	28.9	0	44	33.2	0
3	28.5	0	24	26.3	0	45	29.1	0
4	29.6	0	25	20.8	4.2	46	26.2	0
5	25.3	0	26	29.2	0	47	25.2	0
6	23.3	1.7	27	26.9	0	48	29.1	0
7	23	2.0	28	26.9	0	49	28.3	0
8	24	1.0	29	26.9	0	50	28.3	0

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)
9	24	1.0	30	23.9	1.1	51	28.3	0
10	25.2	0	31	24.9	0.1	52	28.4	0
11	24.3	0.7	32	25.4	0	53	25.1	0
12	25.2	0	33	30	0	54	25.1	0
13	27.1	0	34	33.9	0	55	35	0
14	27.1	0	35	33.4	0	56	34.1	0
15	29.3	0	36	25.9	0	57	32.7	0
16	24.1	0.9	37	33.9	0	58	33.2	0
17	23.8	1.2	38	30.1	0	59	21.8	3.2
18	25.1	0	39	34.9	0	60	23.8	1.2
19	25.1	0	40	33.9	0	61	33.3	0
20	24.0	1.0	41	32.1	0	62	18.8	6.2
21	22.8	2.2	42	33.2	0			

Tabla 28 Presiones en los nudos y diferencias de presiones con la Pmin=25 m.c.a. (P<Pmin).

### **3.PMIN =30 MCA**

Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)	Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)
1	353,1	555,2	194025,33	45	243,8	66,0	444,15
2	48,1	555,2	26420,41	46	4,9	110,2	206,94
3	209,6	79,2	2345,42	47	160,6	123,4	114,18
4	9,6	55,4	52,78	48	2,2	55,4	1338,19
5	7,2	110,2	153,93	49	9,4	55,4	26,93
6	6,1	66,0	47,27	50	40,4	55,4	881,88
7	73,5	158,6	3249,82	51	94,1	55,4	12,06
8	74,1	110,2	1574,15	52	45,5	55,4	51,68
9	32,4	96,8	536,80	53	50,2	55,4	221,93
10	180,2	55,4	989,53	54	154,4	55,4	516,41
11	78,8	176,2	4287,28	55	43,0	55,4	249,66
12	74,5	79,2	833,29	56	194,4	55,4	275,70
13	143,0	55,4	785,15	57	6,5	55,4	847,93
14	31,5	55,4	172,86	58	43,6	55,4	236,25
15	6,4	396,6	1796,67	59	77,4	55,4	1067,00

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>COSTE TUBERIA (US\$)</b>	<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>COSTE TUBERIA (US\$)</b>	
16	67,2	396,6	18843,00	60	20,0	96,8	107,39	
17	65,4	158,6	2890,34	61	269,0	55,4	239,41	
18	7,2	123,4	191,17	62	76,7	55,4	424,77	
19	75,0	55,4	411,57	63	202,7	123,4	533,81	
20	3,1	110,2	66,25	64	77,1	141,0	9378,25	
21	74,8	110,2	1589,56	65	5,5	493,6	33265,22	
22	13,2	352,6	2928,58	66	103,9	96,8	3362,30	
23	40,8	312,8	7133,65	67	25,9	55,4	423,26	
24	74,1	66,0	572,67	68	150,4	123,4	146,04	
25	8,1	79,2	90,57	69	203,9	246,8	11265,97	
26	125,5	277,6	17241,09	70	129,7	396,6	7248,34	
27	56,1	220,4	4756,84	71	47,2	55,4	825,45	
28	90,5	158,6	3997,21	72	8,3	110,2	4333,38	
29	196,5	55,4	1078,79	73	2,1	55,4	711,98	
30	4,9	158,6	214,45	74	346,5	440,6	16346,44	
31	7,4	176,2	404,99	75	329,3	493,6	3591,24	
32	188,7	123,4	5027,90	76	65,9	493,6	898,46	
33	82,7	55,4	453,81	77	152,2	55,4	1902,22	
34	161,8	123,4	4309,87	78	8,8	55,4	1807,88	
35	68,4	220,4	5796,57	79	350,1	123,4	1755,31	
36	55,7	55,4	305,60	80	167,2	198,2	10516,88	
37	57,5	158,6	2538,76	81	222,0	158,6	387,02	
38	7,4	198,2	508,64	82	134,2	55,4	1921,89	
39	60,6	141,0	2113,49	83	108,5	55,4	918,06	
40	5,7	158,6	252,81	84	4,3	55,4	1218,53	
41	131,2	55,4	720,08	85	185,6	55,4	736,75	
42	57,5	555,2	194025,33	86	27,7	555,2	59627,82	
43	9,7	555,2	26420,41	87	528,5	55,4	23,88	
44	4,3	79,2	2345,42	88	6,4	55,4	1019,06	
				89	110,9	123,4	739,07	
							<b>Coste total (USD)</b>	<b>507610,14</b>

Tabla 29 Diámetros y presiones para Pmin=30 m.c. a.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Nudo	Presión (m.c.a.)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a.)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a.)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)
1	29.6	0.4	22	25.3	4.8	43	28.3	1.7
2	30.8	0	23	30.3	0	44	34.3	0
3	31.3	0	24	27.7	2.3	45	30.3	0
4	30.8	0	25	22.3	7.7	46	27.3	2.7
5	26.7	3.3	26	30.6	0	47	26.3	3.7
6	24.6	5.4	27	28.3	1.7	48	30.3	0
7	24.3	5.7	28	28.3	1.7	49	29.3	0.7
8	25.3	4.7	29	28.3	1.7	50	29.3	0.7
9	25.5	4.5	30	25.3	4.7	51	29.3	0.7
10	26.6	3.4	31	26.3	3.7	52	31.2	0
11	25.6	4.4	32	26.8	3.2	53	26.3	3.7
12	26.3	3.7	33	31.3	0	54	26.3	3.7
13	28.3	1.7	34	35.3	0	55	36.3	0
14	28.3	1.7	35	34.8	0	56	35.3	0
15	30.5	0	36	27.3	2.7	57	33.3	0
16	25.3	4.7	37	35.3	0	58	34.3	0
17	25	5.0	38	31.3	0	59	23.3	6.7
18	26.3	3.7	39	36.3	0	60	25.3	4.7
19	26.3	3.7	40	35.3	0	61	34.3	0
20	25.3	4.7	41	33.3	0	62	18.8	11.2
21	24.2	5.8	42	34.3	0			

Tabla 30 Presiones en los nudos y diferencias de presiones con la Pmin=30 m.c.a. (P<Pmin).

#### **4. P<sub>MIN</sub> =35 MCA**

Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)	Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)
1	353,1	705,2	312351,29	45	243,8	96,8	953,84
2	48,1	705,2	42532,84	46	4,9	312,8	1701,66
3	209,6	625,8	146240,02	47	160,6	246,8	464,95
4	9,6	396,6	2695,14	48	2,2	246,8	26442,00
5	7,2	555,2	3979,88	49	9,4	493,6	2128,37
6	6,1	493,6	2654,61	50	40,4	176,2	8739,24
7	73,5	440,6	25478,99	51	94,1	555,2	1206,82
8	74,1	246,8	8034,03	52	45,5	625,8	6567,54



**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>COSTE TUBERIA (US\$)</b>	<b>Tubería Id</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Diámetro tubería (mm)</b>	<b>COSTE TUBERIA (US\$)</b>
9	32,4	555,2	17781,95	53	50,2	625,8	28204,23
10	180,2	220,4	15278,30	54	154,4	493,6	40807,35
11	78,8	312,8	13773,19	55	43,0	625,8	31729,06
12	74,5	96,8	1235,41	56	194,4	705,2	44428,75
13	143,0	493,6	62043,77	57	6,5	440,6	53509,63
14	31,5	277,6	4326,31	58	43,6	705,2	38070,41
15	6,4	493,6	2780,42	59	77,4	141,0	6775,15
16	67,2	705,2	59466,00	60	20,0	555,2	3557,27
17	65,4	555,2	35944,74	61	269,0	705,2	38580,00
18	7,2	493,6	3113,16	62	76,7	79,2	865,78
19	75,0	176,2	4078,58	63	202,7	79,2	224,23
20	3,1	396,6	873,80	64	77,1	705,2	238007,30
21	74,8	396,6	20964,85	65	5,5	705,2	67837,03
22	13,2	625,8	9238,38	66	103,9	705,2	179302,15
23	40,8	625,8	28477,03	67	25,9	705,2	68,207.72
24	74,1	123,4	1974,88	68	150,4	198,2	378.75
25	8,1	66,0	62,53	69	203,9	705,2	91878,75
26	125,5	493,6	54437,42	70	129,7	705,2	22874,80
27	56,1	625,8	39154,09	71	47,2	110,2	3195,82
28	90,5	352,6	20006,39	72	8,3	123,4	5431,26
29	196,5	220,4	16656,32	73	2,1	705,2	114734,09
30	4,9	493,6	2105,38	74	346,5	705,2	41741,91
31	7,4	158,6	328,95	75	329,3	6258	5775,64
32	188,7	705,2	10268,13	76	65,9	625,8	1444,96
33	82,7	705,2	45426,77	77	152,2	66,0	2676,63
34	161,8	625,8	17550,11	78	8,8	141,0	11479,57
35	68,4	396,6	765,22	79	350,1	312,8	11516,25
36	55,7	555,2	3845,83	80	167,2	158,6	6726,60
37	57,5	493,6	10041,29	81	222,0	625,8	6110,54
38	7,4	440,6	1628,29	82	134,2	277,6	48099,76
39	60,6	246,8	26302,24	83	108,5	79,2	1871,24
40	5,7	555,2	2481,94	84	4,3	705,2	196363,59
41	131,2	220,4	3494,18	85	185,6	705,2	118724,97
42	57,5	312,8	312351,29	86	27,7	705,2	95991,72
43	9,7	96,8	42532,84	87	528,5	555,2	2390,56
44	4,3	493,6	146240,02	88	6,4	705,2	164218,90
				89	110,9	141,0	967,12
						<b>Coste</b>	

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)	Tubería Id	Longitud (m)	Diámetro tubería (mm)	COSTE TUBERIA (US\$)	
							<b>total (USD)</b>	<b>3039450,00</b>

**Tabla 31 Diámetros y presiones para Pmin=35 m.c. a.**

Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)	Nudo	Presión (m.c.a)	Diferencia con Pmin (m.c.a.)
1	29,6	5,4	22	25,3	9,7	43	28,3	6,7
2	32,1	2,9	23	30,3	4,7	44	34,3	0,7
3	31,5	3,5	24	27,7	7,3	45	30,3	4,7
4	30,8	4,2	25	22,3	12,7	46	27,3	7,7
5	26,7	8,3	26	30,6	4,4	47	26,3	8,7
6	24,6	10,4	27	28,3	6,7	48	30,3	4,7
7	24,3	10,7	28	28,3	6,7	49	29,3	5,7
8	25,3	9,7	29	28,3	6,7	50	29,3	5,7
9	25,5	9,5	30	25,3	9,7	51	29,3	5,7
10	26,6	8,4	31	26,3	8,7	52	31,3	3,7
11	25,6	9,4	32	26,8	8,2	53	26,3	8,7
12	26,3	8,7	33	31,3	3,7	54	26,3	8,7
13	28,3	6,7	34	35,3	0	55	36,3	0
14	28,3	6,7	35	34,8	0,2	56	35,3	0
15	30,5	4,5	36	27,3	7,7	57	33,3	1,7
16	25,3	9,7	37	35,3	0	58	34,3	0,7
17	25	10	38	31,3	3,7	59	23,3	11,7
18	26,3	8,7	39	36,3	0	60	25,3	9,7
19	26,3	8,7	40	35,3	0	61	34,3	0,7
20	25,3	9,7	41	33,3	1,7	62	18,8	16,2
21	24,3	10,7	42	34,3	0,7			

**Tabla 32 Presiones en los nudos y diferencias de presiones con la Pmin=35 m.c.a. (P<Pmin).**

## 11 REFERENCIAS

1. Aladenola, O. O. y Adeboye, O. B. (2009). Assessing the potential for Rainwater Harvesting. *Water Resources Manage* 2010.
2. Allen, J.E. y Haarhoff, J. (2006). Probabilistic rainwater tank sizing in South Africa. Department of Civil Engineering Science, APK Campus, University of Johannesburg, P. O. Box 524, Auckland Park, 2006, Johannesburg.
3. Alonso, C.D. (2010). Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación a la ciudad de Celaya, Gto. (México). Tesis doctoral. UPV.
4. Alperovitz, E. y U. Shamir (1977). Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research* 13 (6): 885-900.
5. Appan A (2000) A dual-mode system for harnessing roof water for non-potable uses. *Urban Water* 1(4):317–321
6. Campisano A. y Modica C. (2012). Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resource, Conservation and Recycling*. 63 (2012) 9-16.
7. Chandapillai J., Sudheer K. P. y Saseendran S. (2011). Design of Water Distribution Network for Equitable Supply. *Water Resour Manage* (2012) 26:391–406
8. Che, W. y col. (2008). Study on the economical volume for rainwater harvesting. *Low impact development*. ASCE.
9. Coello A. (2005). Introducción a la Optimización Multiobjetivo usando Metaheurísticas. Sección de Computación. CINVESTAV-IPN
10. Coello A. y Landa R. (2009). Evolutionary Multi-Objective Optimization in Materials Science and Engineering. CINVESTAV-IPN.
11. Coombes P., Argue J., Kuczera G. (2000). Figtree Place: a case study in water sensitive urban development (WSUD) *Urban Water* 335-343
12. Coombes, P.J., Kuczera, G. y Kalma, J.D. (2002). Economic, water quantity and quality results from a house with a rainwater tank in the inner city. Proc. of 27th Hydrology and Water Resources Conference, Melbourne, Australia.
13. Coombes, P.J. y Kuczera, G. (2003a). A sensitivity analysis of an investment model used to determine the economic benefits of rainwater tanks. 28th International Hydrology and Water Resources symposium, 10th-14th November 2003, Wollongong, NSW.
14. Coombes, P.J. y Kuczera, G., (2003b). Analysis of the Performance of Rainwater Tanks in Australian Capital Cities. 28th International Hydrology and Water Resources Symposium, Wollongong.

15. Cordova M. y Ghisi E. (2011). Analysis of Potable water savings using behavioural models. Water conservation. Dr Manoj Jha (Ed.)
16. Devi, B.L., Maheshwari, B. y Simmons, B. (2005). Rainwater harvesting for residential irrigation: how sustainable is it in an urban context? Proc. of 12th International Conference on Rainwater Catchment Systems, New Delhi, India.
17. Fewkes, A. (1999). The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. Building and Environment, volume 34, pp765-772.
18. Fewkes, A., (2007). The verification of a behavioral model for simulating the hydraulic performance of a rainwater harvesting system. In: Rainwater and Urban Design Conference 2007, Sydney, Australia, 21-23 August 2007
19. Fewkes, A. y Butler, D. (1999). The sizing of rainwater stores using behavioral models. Proc. of 9th International Rainwater Catchment Systems Conference, Petrolina, Brazil, July 1999.
20. Fewkes, A. y Butler, D. (2000). Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioral models. Building Services Engineering Research and Technology, volume 21, pp99-106.
21. Gestal M., Riviero D, Rabuñal J.R., Dorado J. y Pazos A. (2010). Introducción a los Algoritmos Genéticos y la programación Genética. Universidad de la Coruña.
22. Gould, J. y Nissen-Petersen, E. (1999). Rainwater catchment systems for domestic supply: design, construction and implementation. Intermediate Technology Publications, London.
23. Grefenstette, J. J. (1992). Genetic algorithms for changing environments. Paper presented at the Parallel Problem Solving from Nature, Bruselas, Bélgica.
24. Hiessl, H., Wals, R. y Toussaint, D. (2001). Design and sustainability assessment of scenarios of urban water infrastructure systems. Proc. of 5th International Conference on Technology and Innovation.
25. Hedi Louati M., Benabdallah S, Lebdi F y Milutin D. (2011). Application of a Genetic Algorithm for the Optimization of a Complex Reservoir System in Tunisia. Water Resour Manage 25:2387–2404
26. Kurek W. y Ostfeld A. (2012). Multi-objective optimization of water quality, pumps operation and storage sizing of water distribution systems. Journal of environmental management.
27. Lanza, L.G., Ramirez, J.A. y Todini, E. (2001). Stochastic rainfall interpolation and downscaling. Hydrology and Earth System Sciences, volume 5, no. 2, pp139-143.
28. Leggett, D.J., Brown, R., Stanfield, G., Brewer, D. y Holliday, E. (2001). Rainwater and greywater use in buildings: decision-making for water conservation. CIRIA report PR80, London.

29. Liaw, C. y Tsai, Y. (2004). Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use. *Journal of the American Water Resources Association*, August 2004, volume 40, no. 4, pp901-912.
30. MJA (2007). The cost-effectiveness of rainwater tanks in urban Australia. Report prepared by Marsden Jacob Associates for the National Water Commission, 22nd. February 2007.
31. Moharram S. H. , Gad M. I., Saafan T. A. y Khalaf Allah S. (2011). Optimal Groundwater Management Using Genetic Algorithm in El-Farafra Oasis, Western Desert, Egypt. *Water Resour Manage* 26:927–948
32. Morgan, D. R. y Goulter, I.C (1985). "Optimal urban water distribution design". *Water Resources Research*, 21(5), p.642-652.
33. Nazif S. , Karamouz M., Yousefi M. y Zahmatkesh Z. (2013). Increasing Water Security: An Algorithm to Improve Water Distribution Performance. *Water Resour Manage* 27:2903–2921
34. Ngigi, S.N. (1999). Optimisation of rainwater catchment system design parameters in the arid and semi-arid lands of Kenya. Proc. of 9th International Rainwater Catchment Systems Conference, Petrolina, Brazil, July 1999.
35. Palisade Corporation (2007). Guía para el uso de Evolver. Solver de algoritmo genético para Microsoft Excel. Versión 5.7.
36. Roebuck, R. M. (2007). A whole life costing approach for rainwater harvesting systems. Thesis.
37. Roebuck, R.M. y Ashley, R.M. (2006). Predicting the hydraulic and life-cycle cost performance of rainwater harvesting systems using a computer based modelling tool. 7th International Conference on Urban Drainage Modelling 4th-6th April 2006 Melbourne, Australia.
38. Rossman, L.A. (2000). *Epanet2 User Manual*. Water Supply and Water Resource. Division of the U.S. Environmental Protection Agency, EPA. USA.
39. Rubel, F., y M. Kottek, (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Z.*, 19, 135-141. <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm>
40. Sakellari, I., Makropoulos, C., Butler, D. & Memon, F.A. (2005). Modelling sustainable urban water management options. Proc. of the Institution of Civil Engineers. *Engineering Sustainability* 158, September 2005, Issue ES3, pp143-153.
41. Savic, D. and Walters, G. (1997). Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol.123, n°2. pp 67-77.

42. Shaaban, A.J.B. y Appan, A. (2003). Utilizing rainwater for non-potable domestic uses and reducing peak urban runoff in Malaysia. Proc. of 11th International Rainwater Catchment Systems Conference, Texcoco, Mexico, August 2003.
43. Shaffer, P., Elliott, C., Reed, J., Holmes, J. y Ward, M. (2004). Model agreements for sustainable water management systems: model agreements for rainwater and greywater use systems. CIRIA report C626, London.
44. Thomas, T. (1998). Domestic water supply using rainwater harvesting. Building Research & Information, volume 26, no.2, pp94-101.
45. Thomas, T. (2002). RWH performance predictor for use with coarse (i.e. monthly) rainfall data. Domestic Roofwater Harvesting Research Programme Report RN-RWH04, Development Technology Unit, University of Warwick.
46. Thomas TH, Martinson DB (2007). Roofwater harvesting: a handbook for practitioners. Technical paper series, nº 49. IRC International Water and Sanitation Center Delft. The Netherlands, 160 pp.
47. TODINI, E (2000). Looped Water Distribution Networks Design using a Resilience Index based Heuristic Approach. Urban Water. P. 115-122.
48. Tung, Y. K. (1985). Evaluation of water distribution network reliability. Hydraulics and hydrology in the small computer age, Lake Buena Vista, Florida, USA.
49. Vaes, G. y Berlamont, J. (2001). The effect of rainwater storage tanks on design storms. Urban Water, volume 3, pp303-307.
50. Villarreal, E.L. y Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. Building and Environment, volume 40, pp1174-1184.
51. Vleuten-Balkema, A.J. (2003). Sustainable wastewater treatment: developing a methodology and selecting promising systems. PhD thesis, Eindhoven Technical University.
52. Wainwright, J. y Mulligan, M. (2004). Environmental modelling: finding simplicity in complexity. John Wiley & Sons, West Sussex, UK.
53. Wang L., Zhang H. y Jia H. (2012). A Leak Detection Method Based on EPANET and Genetic Algorithm in Water Distribution Systems. Software Engineering and Knowledge Engineering, AISC 114, pp. 459-465.
54. Wilson, S., Bray, R. y Cooper, P. (2004). Sustainable drainage systems: hydraulic, structural and water quality advice. CIRIA report C609, London.
55. Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. y Shaffer, P. (2007). The SUDS manual. CIRIA Report C697. London.
56. Xu, C. y I. C. Goulter (1998). "Probabilistic Model for Water Distribution Reliability." Journal of Water Resources Planning and Management 124(4): 218-228.

**DISEÑO MULTIOBJETIVO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA INCLUYENDO LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA COMO  
RECURSO COMPLEMENTARIO**

---

57. Zhu, Q. y Liu, C. (1998). Rainwater utilization for sustainable development of water resources in China. The Stockholm Water International Symposium, 1998, Stockholm, Sweden.