

**01162
16
2 EJM.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**ANALISIS DE RIESGO Y CONFIABILIDAD EN
SISTEMAS DE TRISTRIBUCION DE AGUA.**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA (HIDRAULICA)**

PRESENTA:

RAMIREZ VARGAS, VICTOR HUGO

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1997



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

DEDICO ESTA TESIS

A DIOS

A MIS PADRES, POR SU CARIÑO Y AMOR INCONDICIONAL

A MI NOVIA, POR SU APOYO Y CONSIDERACIÓN

A MIS DEMÁS FAMILIARES, AMIGOS Y COMPAÑEROS

**AGRADEZCO A MI DIRECTOR DE TESIS,
M.I VÍCTOR JAVIER BOURGUETT ORTÍZ
POR SUS VALIOSOS CONSEJOS EN LA ELABORACIÓN DE ESTA TESIS**

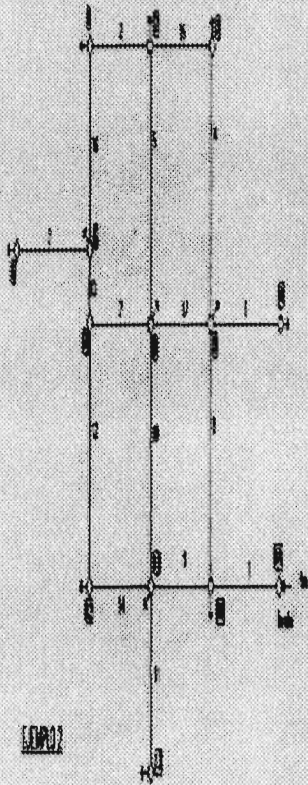
A MIS SINODALES

**DR. POLIOPTRO MARTÍNEZ AUSTRIA
DR. FELIPE ARREGUÍN CORTES
M EN C. JORGE HIDALGO TOLEDO
M EN I. JOSÉ A. GONZÁLEZ VERDUGO**

POR SUS SUGERENCIAS Y COMENTARIOS

**A LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA Y EL INSTITUTO MEXICANO DE
TECNOLOGÍA DEL AGUA**

ANÁLISIS DE
RIESGO Y CONFIABILIDAD EN SISTEMAS
DE DISTRIBUCIÓN



ÍNDICE

pag.

CAP.	TEMA	pag.
	Marco de referencia	1
	Objetivo	3
	Prefacio	4
I.	Introducción	5
II.	Antecedentes	8
III.	Definiciones	11
	Conceptos fundamentales	11
	Probabilidad de falla	11
	Riesgo	12
	Confiabilidad	13
	Tipos de confiabilidad	13
	Confiabilidad hidráulica	14
	Confiabilidad mecánica	15
IV.	Modelos de Evaluación de la Confiabilidad	17
	Modelos de simulación	17
	Aproximaciones analíticas	18
	Medidas basadas en redundancia	19
	Eventos de árbol	20
	Aproximación a la probabilidad condicional	21
	Método del cut-set mínimo	24
	Distribución exponencial	28
	Valor esperado y desviación estándar	31
V.	Evaluación de la Confiabilidad	31
	Evaluación hidráulica	33
	Modelo probabilístico	33
	Demanda aleatoria	34
	Coef. de rugosidad aleatorio	35
	Simulación hidráulica	35
	Modelo de confiabilidad	35
	Confiabilidad nodal	35
	Confiabilidad del sistema	36
	Evaluación mecánica	37
	Impacto de la falla de la red	38
	Modelo probabilístico	39
	Frecuencia de fallas	39
	Método del cut-set mínimo	42
	Modelo de simulación	43
	Modelo de confiabilidad	43
	Confiabilidad nodal	44
	Confiabilidad mecánica	45
VI.	Índices de evaluación	47
	Incertidumbre	47
	Índices	47
	Número esperado de fallos de tubería por año	47
	Tiempo medio de fallas	48
	Tiempo medio de reparación de fallas	49

Tiempo medio entre fallos	49
Tiempo total de fallos probables	50
Peligro o probabilidad de falla	50
Peligro por falla mecánica	51
Riesgo por falla mecánica e hidráulica	51
Valor esperado de déficit de presión	52
Valor esperado de déficit de gasto	53
Valor esperado de déficit de volumen producido por el fallo de un tramo	54
Valor esperado de déficit de volumen en el sistema por falla en los nodos	54
Número esperado de usuarios sin servicio en el sistema	55
Riesgo como valor esperado de daños	55
VII. Aplicaciones	56
VIII. Conclusiones	91
IX. Anexo A	93
Bibliografía	99

ÍNDICE DE FIGURAS

No.	DESCRIPCIÓN	pág.
4.1	Ejemplo de red	17
4.2	Identificación de cut-set	24
4.3	Tasa de falla	25
4.4	Funciones de la distribución exponencial	26
4.5	Función de la densidad exponencial de falla	27
4.6	Probabilidad posterior a la falla	27
5.1	Algoritmo de solución	32
7.1	Red abierta (sistema 1)	56
7.2	Red cerrada (sistema 2)	57
7.3	Confiabilidad nodal (sistema 1)	60
7.4	Confiabilidad nodal (sistema 2)	60
7.5	Confiabilidad del sistema por promedio pesado ante demanda variable (sistema 1)	62
7.6	Confiabilidad del sistema por promedio pesado ante demanda variable (sistema 2)	62
7.7	Confiabilidad del sistema ante coeficiente de rugosidad variable (sistema 1)	64
7.8	Confiabilidad del sistema ante coeficiente de rugosidad variable (sistema 2)	64
7.9	Representación de la falla del tramo 9 (sistema 2)	69
	Mapa de riesgo alternativa "A"	70
	Mapa de riesgo alternativa "B"	71
	Mapa de riesgo alternativa "C"	72

CUADROS

No.	DESCRIPCIÓN	pág.
5.1	Datos de falla/Km/año en tuberías	40
5.2	Datos de tiempos de reparación de tuberías	41

TABLAS

TABLA No.	DESCRIPCIÓN	pág.
7.1	Características de demanda en los nodos	57
7.2	Características de la red	57
7.3	Características de demanda en los nodos (sistema 2)	58
7.4	Características de la red (sistema2)	58
7.5	Confiabilidad nodal para demanda aleatoria utilizando C.V de 1.4, (sistema 1)	59
7.6	Confiabilidad nodal para demanda aleatoria utilizando un C.V de 1.4, (sistema 2)	59
7.7	Confiabilidad del sistema por promedio pesado para demanda variable (sistema 1)	61
7.8	Confiabilidad del sistema por promedio pesado para demanda variable (sistema 2)	61
7.9	Confiabilidad del sistema ante rugosidad variable (sistema 1)	63
7.10	Confiabilidad del sistema ante rugosidad variable (sistema 2)	63
7.11	Grupos de corte mínimo del sistema 1 y nodos respectivos	67
7.12	Grupos de corte mínimo del sistema 2 y nodos respectivos	68
7.13	Índices de riesgo	68
	1. SISTEMA 1.	
1	Red abierta	73
	2. Presiones resultantes de la simulación de falla de los tramos.	
1-A	Alternativa "A".	74
1-B	Alternativa "B".	75
1-C	Alternativa "C".	76
	3. Tramos cut-set.	
1-D	Alternativa "A".	77
1-E	Alternativa "B".	78
1-F	Alternativa "C".	79
1-G	4. Confiabilidad nodal.	80
	5. Déficit de gasto esperado por nodo	
1-H	Alternativa "A".	81

1-H	Alternativa "B".	81
1-H	Alternativa "C".	81
2	6. SISTEMA 2. Red cerrada	82
	7. Presiones resultantes de la simulación de falla de los tramos.	
2-A	Alternativa "A".	83
2-B	Alternativa "B".	84
2-C	Alternativa "C".	85
	8. Tramos cut-set.	
2-D	Alternativa "A".	86
2-E	Alternativa "B".	87
2-F	Alternativa "C".	88
2-G	9. Confiabilidad del sistema	89
	10. Déficit de gasto esperado por nodo	
2-H	Alternativa "A".	90
2-H	Alternativa "B".	90
2-H	Alternativa "C".	90

ANÁLISIS DE RIESGO Y CONFIABILIDAD EN

SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

ANÁLISIS DE RIESGO Y CONFIABILIDAD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

MARCO DE REFERENCIA

Uno de los servicios de mayor importancia en el desarrollo de las ciudades son sin duda los Sistemas de Distribución de Agua (*SDA*), sin los cuales, la gran mayoría de las actividades humanas, comerciales e industriales no sobrevivirían, dichos sectores son susceptibles de sufrir graves daños debido a las fallas en el sistema. Las fallas en el suministro pueden deberse a la deterioración del *SDA* en viejas áreas urbanizadas y a la no existencia del suministro en áreas conocidas como de rápida urbanización, de tal forma que es necesario no sólo métodos para diseñar los futuros sistemas de distribución sino también para evaluar los ya existentes y lograr una adecuada rehabilitación. Las funciones básicas en un sistema de distribución son: obtener el agua de una fuente, tratar el agua para darle una calidad aceptable y liberar la cantidad necesaria de agua en el tiempo deseado. El análisis de un sistema de suministro de agua es después realizado mediante la evaluación de uno o más de los cinco componentes más grandes del sistema: la fuente, la conducción, el sistema de tratamiento, el sistema de almacenamiento y el sistema de distribución.

La American Works Association (1974)⁵ define un sistema de distribución de agua como. *“La inclusión de todos los componentes para la finalización de la distribución del suministro de agua potable por medio de almacenamientos con sistemas por gravedad o bombeo, a través de redes de distribución a los usuarios, incluyendo distribución-almacenamiento”*. El diseño o ampliación de un sistema de distribución de agua generalmente implica salidas de grandes capitales, para la continua operación, mantenimiento, y costos de reparación. De la complejidad del problema presentado, se originan un gran número de diseños de entre las componentes y su interacción. Las aproximaciones a diseños convencionales consisten de la selección de una configuración de la red, tamaños de tubería, tamaño y dimensiones del almacenamiento y elevaciones y diseño de la capacidad de bombeo. Este proceso es usualmente un procedimiento de ensayo y error que basado en un procedimiento de optimización atiende a conocer un diseño a costo mínimo, sin embargo, de este proceso no puede afirmarse que el sistema de distribución resultante, garantice el suministro en todo momento, resultando con ello un diseño poco confiable ante eventos de emergencia.

Para asegurar confiabilidad en el punto final, del sistema al usuario en la entrega del agua, el sistema de distribución puede ser diseñado para atender un rango de condiciones esperadas de emergencia. Estas condiciones de emergencia pueden ser generalmente clasificadas en tres grupos: fallas en tuberías, demandas contra fuego, y equipos de bombeo. Cada una de estas condiciones pueden ser examinadas con énfasis o describiendo su impacto en el sistema, desarrollando medidas relevantes del funcionamiento del sistema y diseñando dentro del

sistema, la capacidad requerida para atender condiciones de emergencia con una aceptable medida de confiabilidad.

El llamado diseño a costo óptimo o mínimo costo de sistemas de distribución de agua ha sido analizado por diversas técnicas de optimización, ninguno de estas aproximaciones son completamente satisfactorias porque presentan algunas limitaciones. Muchas de las aproximaciones en el diseño de los sistemas de distribución de agua funcionan bajo condiciones normales, usando demandas horaria típica, máximas demandas diarias, etc. Muy pocos trabajos han sido hechos considerando condiciones anormales o de emergencia tales como, fallas en el equipo de bombeo, en válvulas de control, salidas de poder y fallas en tramos.

Muchos investigadores, ingenieros, urbanistas, institutos, etc., han discutido la necesidad de desarrollar explícitamente medidas y metodologías para evaluar que tan confiable es un sistema de distribución y su funcionamiento bajo condiciones de emergencia. Algunos investigadores han propuesto aproximaciones usando conceptos de factores de confiabilidad en función de pérdidas económicas, redundancia forzada en el diseño, etc. Todas estas aproximaciones tienen limitaciones en la formulación del problema y/o la técnica de solución. Algunos discuten la necesidad para incorporar explícitamente medidas de confiabilidad dentro de modelos de optimización para predecir en el sistema la operación bajo condiciones de emergencia.

La confiabilidad que se desea en el suministro del agua a los usuarios, requiere que el sistema de distribución de agua se diseñe para atender un rango de condiciones esperadas de emergencia, tales como: a) fallas en tramos; b) fallas en bombas; c) salidas de potencia; d) fallas en válvulas de control; e) insuficiencia en el sistema de almacenamiento y f) demandas y coeficientes de rugosidad aleatorios. Una aplicación metodológica que considera el costo mínimo y aspectos de confiabilidad pueden considerar cada una de estas condiciones de emergencia. Estas condiciones podrían ser examinadas dentro de las metodologías para: a) describir su importancia para el sistema; b) desarrollar relevantes medidas del funcionamiento del sistema; y c) diseñar dentro del sistema la capacidad para la condiciones de emergencia con una aceptable medida de confiabilidad.

Una vista a la literatura revela que hay corrientes no universalmente aceptadas de definición o medidas de la confiabilidad de un *SDA*. Para un sistema grande, con muchos subsistemas interactuando (tal como un sistema de distribución de agua), es extremadamente difícil calcular analíticamente la confiabilidad matemática. Cálculos aproximados de la confiabilidad matemática requieren conocer de la confiabilidad de los subsistemas básicos y el impacto en el funcionamiento causado por el escenario de todos los posibles subsistemas de falla.

Por lo tanto el objetivo de este trabajo, es establecer una metodología para efectuar el análisis y medición del riesgo que se produce en un *SDA* al considerar la presencia de condiciones de emergencia (condiciones de falla en sus componentes y eventos aleatorios de demanda y rugosidad).

OBJETIVOS :

Elaborar una herramienta que evalúe el riesgo y confiabilidad, bajo condiciones de emergencia hidráulica y mecánica en un sistema de distribución de agua.

Describir la importancia para el sistema durante el período de vida útil

Desarrollar medidas relevantes y parámetros del funcionamiento del sistema de confiabilidad que permitan una medida realística del funcionamiento de un sistema de distribución.

Diseño del sistema dentro de límites capaces para funcionar adecuadamente ante la presencia de condiciones de emergencia

PREFACIO

La construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de distribución de agua, día con día cobra una mayor importancia, esto es, por una parte debido a la mayor escasez del vital líquido, otra por una ineficiente operación de los sistemas y además por la gran cantidad de recursos económicos que se destinan a este servicio. De tal forma que, debido a los grandes capitales que continuamente son invertidos para atender estos proyectos, es necesaria la aplicación de innovaciones en el diseño y adecuación de los sistemas de distribución de agua, es por ello que se propone un análisis de riesgo y confiabilidad para el diseño de los sistemas de distribución de agua.

La "Confiabilidad en el manejo del agua" constituye un importante escenario en los cuales, las fallas son el tema general del riesgo y confiabilidad.

El *riesgo* ha sido definido como la probabilidad de exceder un criterio de diseño o parámetro de funcionamiento. En este sentido, el ingeniero de los recursos hidráulicos ha considerado de alguna manera el riesgo en el diseño de acueductos al considerar en ellos los fenómenos transitorios; en sistemas de distribución de agua potable, se propone analizarlo considerando eventos de naturaleza aleatoria. Dadas las incertidumbres en los datos de entrada y características aleatorias de los eventos que intervienen en determinar el funcionamiento de los sistemas de suministro, las investigaciones del problema de riesgo llegan a ser complejos en el análisis de detalle para cada subcomponente del problema total.

La *Confiabilidad* de un sistema es la probabilidad total de ocurrencia de eventos de falla dentro del diseño o criterio de funcionamiento. De tal forma que, no hay duplicación en el uso de las palabras riesgo y confiabilidad. Es de esperar que hay sistemas para los cuales el análisis de riesgo es de importancia primaria y hay otros sistemas para los cuales las consideraciones de confiabilidad son importantes.

CAPITULO I.

INTRODUCCIÓN

El término *confiabilidad* en sistemas de distribución de agua potable, si bien es cierto que en México su uso es poco frecuente, también es cierto que en Estados Unidos es muy bien conocido. El campo de la confiabilidad es amplio y de una aplicación permanente en todos los campos de la ingeniería. Todos los sistemas de ingeniería desde el más simple hasta el más complejo pueden beneficiarse si integramos a ellos una evaluación de *riesgo*^a y *confiabilidad* en sus distintas etapas de planeación, diseño, operación y mantenimiento; como un avance tecnológico, se producen cada vez más y más complejos mecanismos y sistemas, que resultan con un mayor costo para construir, y el valor del daño llega a ser más alto si llegan a fallar en el diseño u operación. En el *capítulo II* de este documento se pretende abarcar un panorama general de los antecedentes históricos del término *riesgo* y *confiabilidad*, así como los relacionados al diseño de los sistemas de distribución.

Existen muchas nociones del término "*confiabilidad*", este término es aplicable tanto a las actividades de la vida humana como también al funcionamiento de sistemas, en sistemas tenemos algo más complejo, las consecuencias de un "*riesgo*" mayor (o poca fiabilidad) de su comportamiento llegan a ser muy severas en cuanto a los costos, esfuerzo, vida útil, etc., y el interés en asegurar la confiabilidad del funcionamiento del sistema y la necesidad de proveerla ha tomado gran importancia.

En el *capítulo III* serán tratadas con mayor detalle, definiciones de *riesgo* y *confiabilidad*, podemos decir que esto es lo que respecta solo a la definición del término, pero, porque es importante la confiabilidad en los sistemas de distribución de agua?. Sin duda, esto tiene que ver con diferentes puntos de vista, observaremos en este caso el del diseñador y el que corresponde al de los administradores de los *SDA*. El primero, está interesado en lograr un diseño óptimo de la red de distribución bajo criterios de confiabilidad que permitan hacer cumplir en cantidad y calidad el servicio demandado por los usuarios pese a las variables aleatorias que puedan presentarse en el proceso; el segundo punto de vista, quizá le interese mantener ganancias en su *SDA* que le permitan lograr una autosuficiencia, lo cual se presentaría si sus costos por operación y mantenimiento de los componentes de la red se minimizan a largo plazo, lo cual se liga íntimamente a la confiabilidad del sistema.

De ahí la importancia de dar cumplimiento a todos los objetivos, se ha observado que en la medida en que se utilizan criterios de confiabilidad en el diseño de las redes de distribución de agua, en esa medida se tiende a disminuir el *riesgo* de falla de sus componentes, con lo cual se reduce en gran medida el servicio discontinuo y el porcentaje de pérdidas por fugas, redundando ello en una mejor operación del sistema, una reducción de gastos de operación

^a Confiabilidad y riesgo son funciones complementarias, es decir, que la suma de ambas es igual siempre a la unidad, de tal forma que Confiabilidad es igual a 1 menos el Riesgo.

y mantenimiento, se reduce también el riesgo de provocar déficits de presión y/o gasto en el suministro del agua a los usuarios y por consecuencia, pueden incrementarse los beneficios económicos en la administración del sistema.

El grado de interés que ha tenido la *confiabilidad* en un sistema y las medidas para alcanzar dicha confiabilidad, esta muy ligada a las consecuencias del comportamiento del *riesgo*. El proveer de confiabilidad al sistema, por lo general produce un mayor costo, pero también el lograrla, usualmente a largo plazo ahorra dinero y malestares sociales.

De lo anterior, la necesidad de mantener un "*balance económico*" determina el nivel de confiabilidad que uno podría aspirar para el diseño de los componentes y sistemas. Para ello, son necesarias herramientas para lograr una evaluación del riesgo y confiabilidad, existe un cierto número de técnicas aplicables a ello, de las cuales mostraremos las más importantes en el *capítulo IV*. Primeramente un sistema necesita no fallar completamente, en consecuencia es necesario definir claramente los rangos de riesgo que se esperan y los tiempos medios de falla. En segundo, especificar un intervalo de tiempo necesario, el cual no siempre será en horas o años, sino que dependerá de las condiciones bajo estudio. Su significado indica medidas de seguridad que disminuyen el *riesgo* de falla de un sistema, aplicado a los sistemas de distribución de agua, estas serán medidas para proporcionar a los usuarios del sistema de *SDA* un servicio continuo, que cumpla con el gasto demandado a una presión mayor o igual a la presión mínima requerida, durante un lapso de servicio determinado. Esta definición implica satisfacer la demanda a pesar de las incertidumbres que integran este proceso, entre las que podemos mencionar:

- Demandas variables a lo largo de un día o mes del año.
- Incrementos extraordinarios en las demandas, puede ser debido a usuarios nuevos, ampliaciones y modificaciones el uso.
- Coeficiente de rugosidad variable en el tiempo
- Fallas en los componentes de la red (equipo de bombeo, tuberías, válvulas etc.).

En el *capítulo V* se propone una metodología para realizar el análisis de la confiabilidad y el riesgo, considerando las condiciones anormales de operación anteriormente señalados.

En lugar de preguntar de un sistema: ¿Es confiable? uno podría responder, ¿que tan confiable es?, responder a esta pregunta requiere la cuantificación de la confiabilidad usando la teoría de probabilidad y estadística; existen numerosos estudios acerca de las medidas adoptadas para cuantificar la confiabilidad, en el *capítulo V* daremos algunos índices de *riesgo y confiabilidad* que nos presentan un panorama más realístico del comportamiento del sistema ante situaciones de emergencia.

En el *capítulo VII* se presentará como ejemplo práctico, el análisis de *riesgo y confiabilidad* para dos redes de distribución aplicando la metodología presentada en este documento. Así mismo se presentará el análisis de los resultados mediante la aplicación de los índices de confiabilidad obtenidos. Por último en el *capítulo VIII* se presentarán las conclusiones generales del trabajo.

CAPITULO II.

ANTECEDENTES

Confiabilidad es un término que puede aplicarse a diferentes actividades humanas, como también a el funcionamiento de sistemas físicos u objetos funcionales. De tal forma que existen innumerables términos que denoten la entidad bajo estudio. Ahora bien, si consideramos que el problema de diseñar las redes de distribución bajo criterios de confiabilidad ha tomado en los últimos 20 años un considerable énfasis en técnicas de optimización, también es necesario reconocer que desde hace muchos años, se observaban ciertas reglas que llevaban implícito dicho criterio, como es el de preferir los diseños de una red cerrada (malla) a una red abierta, proviendo de esta manera, que un nodo de demanda cualquiera, estuviera ligado a dos o más alternativas de suministro, lo cual permite un camino alterno en caso de que alguno fallara.

Podemos decir que la confiabilidad del sistema queda definida, como: *la probabilidad de que el sistema pueda funcionar para un intervalo especificado de tiempo bajo ciertas condiciones establecidas*. La confiabilidad aplicada a los sistemas de distribución de agua, podemos considerarla como un nivel de garantía o probabilidad de que el sistema proporcione servicio continuo del gasto demandado por los usuarios en cantidad y calidad deseadas y, a la presión mínima requerida durante un lapso de tiempo determinado.

La confiabilidad del sistema esta sujeta a innumerables incertidumbres y riesgos, las cuales hacen más vulnerable al sistema para fallar en determinados lapsos de tiempo, entre los primeros podemos mencionar : la naturaleza aleatoria de las demandas futuras de agua, los requerimientos de presión y de gasto en los nodos, la rugosidad de las tuberías, fallas en los componentes del sistema (bombas, válvulas, tuberías, suministro de energía , etc.) y entre los segundos encontramos déficits de presión, de volumen, costos de reparación y mantenimiento y de usuarios probables sin servicio.

De lo anterior, entonces podemos observar que es posible identificar dos tipos principales de confiabilidad, una que se refiere a incertidumbres netamente hidráulicas (demandas aleatorias, requerimientos de presión, gasto y coeficiente de rugosidad) y otra debida a factores mecánicos (fallas físicas en las componentes).

De tal forma que el objetivo principal en el diseño y operación de una red de distribución de agua es el de minimizar los costos y maximizar la confiabilidad^b en el suministro de agua. Aunque podemos decir que existe una idea encontrada en ambas situaciones si pensamos que una mayor confiabilidad trae como consecuencia una mayor erogación inicial en la construcción del sistema en virtud de utilizar componentes más fiables (diámetros mayores, en algunos casos quizá mayor longitud de tubería, equipos de reserva), también debemos

^bConfiabilidad que se toma en mayor o menor grado, para incrementar el nivel de confianza adecuado para satisfacer el servicio demandado en gasto a la presión requerida.

entender que los costos por reparación y mantenimiento de la red serán menores, garantizando un servicio de distribución de agua más eficiente a los usuarios, de tal forma que esto nos indica que el problema de la confiabilidad sea analizado desde un punto de vista de multiobjetivos y entonces la tarea del ingeniero será determinar los niveles de confiabilidad y costo óptimos.

Por tanto, ahora es necesario identificar claramente el problema de diseño por confiabilidad, esto quiere decir, que habrá innumerables opciones de dar confiabilidad al sistema, lo importante será determinar cuál o cuales serán las medidas y que nivel de confiabilidad es el adecuado para lograr un servicio eficiente y a costo mínimo.

Entre los estudios relacionados a las medidas que se pueden implementar en los sistemas de distribución, con las cuales sea posible brindar o incrementar la fiabilidad en un sistema de distribución, de manera que el diseño y/o adecuación de la red se haga con criterios de confiabilidad. Muchos autores han dado su punto de vista, entre ellos:

- *Goulter (1987)*, quién indica que asegurando cierta redundancia (componentes extras) o aumentando el diámetro de la tubería se incrementa la confiabilidad del sistema.
- *Rowell y Barnes (1982)*, indican que cada nodo puede tener caminos diferentes capaces de conducir el gasto.
- *Goulter y Morgan (1985)*, cada nodo puede conectarse a tramos menores.
- *Goulter y Coals (1986)*, usan como medida de confiabilidad el complemento de la probabilidad del aislamiento de un nodo (probabilidad de falla) de los tramos conectados a un nodo.
- *Culliname (1986)* Introduce el concepto de confiabilidad nodal, la cual es la porción del tiempo cuando la presión residual en un nodo es mayor que el valor requerido bajo un número de patrones de demanda y la probabilidad mecánica, es la probabilidad que ocurre cuando el sistema opera a flujo permanente. Define la confiabilidad nodal esperada, la cual considera la probabilidad de falla de los tramos con la disponibilidad nodal con o sin las fallas en los tramos que conecta. Este procedimiento toma la probabilidad de los datos de demanda.
- *Tung (1986)*, propone cambios de constantes de flujo neto y altura de presión excedidos con respecto a la demanda real y presión requerida respectivamente.
- *Goulter y Bouchart (1987)*, proponen un cambio nuevo de constantes, la cual toma en cuenta, las probabilidades de que el número de fracturas exceda un nivel considerado aceptable.

- *Shamir y Howard (1979) y Mays (1986)*, considera un grupo de corte mínimo, el cual es el mínimo de los componentes de una red, donde las fallas simultáneas pueden causar falla en el sistema. El complemento de la suma de las probabilidades de falla de todos los cut-set mínimos darán una pequeña certeza de la confiabilidad del sistema. La falla se verifica por medio de una simulación hidráulica.
- *Wagner (1989)*, considera de que todos los nodos de demanda están conectados al menos a un nodo fuente cuando alguno de los tramos falla. Calcula la probabilidad para cada tramo que falla, la confiabilidad del sistema es la suma de todas las probabilidades.
- *Carey y Hendrickson (1984)*, presentan un método para evaluar el flujo máximo esperado en una red, con la cantidad total de agua usada como medida de confiabilidad, definen la confiabilidad R, como sigue:

$$R=1-\frac{\text{Gasto total mínimo de déficit esperado}}{\text{Demanda total}}$$

- El modelo de diseño óptimo de *Alperovitz y Shamir (1977)*, el cual considera la confiabilidad para determinar el diámetro óptimo de la tubería y tramos de flujo.
- *Goulter y Coals (1986)*, usan un modelo de programación lineal de *Alperovitz y Shamir (1977)*, el cual indica reparación de tramos e introduce restricciones adicionales como el número de fallas por año en cada tramo.

De ahí, que entonces será necesario establecer una metodología formal para la realización de dicho análisis, una metodología que aproveche toda la información estadística de monitoreo en la operación de los sistemas de distribución.

- *Shamir y Howard (1979) y Mays (1986)*, considera un grupo de corte mínimo, el cual es el mínimo de los componentes de una red, donde las fallas simultáneas pueden causar falla en el sistema. El complemento de la suma de las probabilidades de falla de todos los cut-set mínimos darán una pequeña certeza de la confiabilidad del sistema. La falla se verifica por medio de una simulación hidráulica.
- *Wagner (1989)*, considera de que todos los nodos de demanda están conectados al menos a un nodo fuente cuando alguno de los tramos falla. Calcula la probabilidad para cada tramo que falla, la confiabilidad del sistema es la suma de todas las probabilidades.
- *Carey y Hendrickson (1984)*, presentan un método para evaluar el flujo máximo esperado en una red, con la cantidad total de agua usada como medida de confiabilidad, definen la confiabilidad R, como sigue:

$$R = 1 - \frac{\text{Gasto total mínimo de déficit esperado}}{\text{Demanda total}}$$

- El modelo de diseño óptimo de *Alperovits y Shamir (1977)*, el cual considera la confiabilidad para determinar el diámetro óptimo de la tubería y tramos de flujo.
- *Goulter y Coals (1986)*, usan un modelo de programación lineal de *Alperovitz y Shamir (1977)*, el cual indica reparación de tramos e introduce restricciones adicionales como el número de fallas por año en cada tramo.

De ahí, que entonces será necesario establecer una metodología formal para la realización de dicho análisis, una metodología que aproveche toda la información estadística de monitoreo en la operación de los sistemas de distribución.

CAPITULO III.

DEFINICIONES

III.1 Conceptos fundamentales

Probabilidad: provee datos numéricos para evaluar la confiabilidad y también el primer índice de funcionamiento del sistema.

Variable aleatoria: es una función definida en el conjunto de elementos de un espacio muestral, es descrita por una función de distribución especificada.

Función de distribución de probabilidad: es aquella que asocia a cada valor de la variable aleatoria la probabilidad de que dicha variable tome ese valor.

Incertidumbre: se refiere a condiciones en las cuales no se tiene una disponibilidad de datos, realmente incertidumbre no implica ignorancia completa del problema, pero sí es posible asignar cierta probabilidad de ocurrencia a una variable, las decisiones se consideran con incertidumbre.

Funcionamiento adecuado, tiempo y condiciones de operación: estos son parámetros ingenieriles y únicamente los ingenieros encargados del sistema pueden proveer la información relativa a ellos. El tiempo puede ser continuo o muy esporádico y las condiciones de operación pueden ser perfectamente uniformes o extremadamente variables. El criterio de funcionamiento adecuado es un problema ingenieril y directivo, la falla de un sistema puede ser una catástrofe o una falla completa para operar, o bien puede ser causada por una violación de la función del sistema.

Disponibilidad $A(t)$: es la probabilidad de que el sistema este operando satisfactoriamente en el tiempo t .

III.2 Probabilidad de falla

Si durante el proceso N de un experimento, ocurren fallas n veces, entonces la probabilidad de ocurrencia de una falla (P_f) puede ser estimada como:

$$P_f = \left(\frac{n}{N} \right) \quad \dots\dots (1)$$

Donde P es un valor estimado y no un valor verdadero. La probabilidad exacta de una falla es definida en el límite conforme el número de procesos llega a ser más grande: entonces,

$$P_f = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{N} \right) \quad \dots\dots (2)$$

Obviamente, en la vida real, no es posible algún evento un número infinito de veces. Entonces, es posible asumir que cuando el número de procesos es suficiente para aceptar que el valor estimado es un valor verdadero, entonces la confiabilidad del sistema (C_s) será la probabilidad del suceso, y se tiene, entonces que:

$$C_s = 1 - P_f \quad \dots\dots (3)$$

De tal forma que nosotros podemos estimar el valor de la confiabilidad en un rango de 0 a 1.

III.3 Riesgo

El riesgo es el valor esperado de una pérdida o daño para los usuarios y el sistema, tal que nos permita expresarlo en forma general como:

$$\text{Riesgo} \left[\frac{\text{Consecuencia}}{\text{Tiempo}} \right] = \text{Frecuencia} \left[\frac{\text{eventos}}{\text{unidad de tiempo}} \right] \times \text{Magnitud} \left[\frac{\text{Consecuencia}}{\text{Evento}} \right] \quad \dots(4)$$

Existe el problema de definición de *riesgo* de un sistema. Una de las definiciones más aceptadas del riesgo, R_s , se expresa como el producto de tres factores: el *valor o cantidad* de los bienes expuestos, C , la *vulnerabilidad*, V , y la *probabilidad* P de que ocurra un hecho potencialmente dañino para lo expuesto, cantidad que mide el llamado *peligro*. Es común, pues, encontrar la siguiente relación⁶:

⁶ Puede observarse que con esta definición, el riesgo es la esperanza estadística de las pérdidas. ¿Por qué se utiliza esta cantidad para medir el riesgo y no otras como la mediana, el percentil 90, etc.? La razón es que implícitamente existe la intención de tomar decisiones de suerte que a largo plazo la política adoptada conduzca a ganancias máximas (o pérdidas mínimas) en algún sentido.

$$R = CVP \quad \dots(5)$$

Como veremos más adelante, la vulnerabilidad, al igual que la probabilidad P, son cantidades adimensionales. Por ello, el riesgo R tiene las mismas unidades que C.

Por otra parte, en diseño de redes de distribución es común encontrar que el riesgo se defina como la probabilidad de que el sistema no cumpla con el gasto y presión de diseño en alguno de los nodos de la red durante cierto lapso de tiempo, ecuación 6. Definición que en términos de la ecuación 5, se entendería solamente como peligro. Al medirse en porcentaje es adimensional, cuestión que resulta poco práctica para la toma de decisiones, en donde evidentemente es más útil utilizar algún tipo de unidad, por ejemplo: S, o déficit de caudal de agua, usuarios, etc.

$$R(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - C(t) \quad \dots (6)$$

III.3 Confiabilidad

Se puede decir que la confiabilidad del sistema queda definida, como: **la probabilidad de que el sistema pueda funcionar para un intervalo especificado de tiempo bajo ciertas condiciones establecidas**. La confiabilidad aplicada a los sistemas de distribución de agua, podemos considerarla como un nivel de garantía o probabilidad de que el sistema proporcione servicio continuo del gasto demandado por los usuarios en cantidad y calidad deseadas y, a la presión mínima requerida durante un lapso de tiempo determinado.

III.3.1 Tipos de confiabilidad

Los sistemas de distribución de agua desde el punto de vista de confiabilidad comprenden amplias etapas y complicados esquemas de funcionamiento en donde intervienen un gran número de componentes, entre estas etapas podríamos mencionar: el análisis de la fuente de abastecimiento, el de la línea de conducción, el de suministro en bloque, el de los tanques de regularización, de las plantas de bombeo y de los sistemas de distribución. Culliname (1989).

Nótese, por otra parte, que para algunas aplicaciones la esperanza de las pérdidas es una medida completamente inadecuada del riesgo.

Tomando en cuenta la última etapa, tal como lo habíamos mencionado anteriormente, de acuerdo a la naturaleza de la falla en el sistema, existen dos tipos de confiabilidades a distinguir, *la hidráulica y la mecánica*.

III.3.1.1 Confiabilidad hidráulica:

Este tipo de confiabilidad se asocia a las fallas que ocurren en un sistema de distribución de agua provocadas por la presencia de demandas aleatorias, inadecuado tamaño de tuberías, cambios en el uso del agua, en la demanda, en carga requerida, coeficiente de rugosidad aleatorio^d o en una combinación de ellas. Entendiéndose por falla del sistema a aquel evento en el cual el suministro de agua es inferior a la demanda en un nodo o cuando la presión presentada es menor a la mínima requerida. De tal forma que una definición sería ***“la probabilidad de que el sistema funcione dentro de límites especificados de gasto y presión, durante la presencia de incertidumbres de tipo hidráulico”***.

La confiabilidad del sistema de distribución es una medida del funcionamiento hidráulico del sistema, el cual depende de los siguientes factores (Bao y Mays)⁵:

- Interacción entre tuberías, almacenamiento, bombeo y control (válvulas reductoras, check, etc.)
- Confiabilidad individual de cada componente del sistema
- Variación espacial en el tiempo de la demanda
- Variación temporal de la demanda del sistema

En resumen, ya que la demanda está distribuida en el espacio y el tiempo, el funcionamiento hidráulico en puntos críticos del sistema puede ser más importante que la confiabilidad media del sistema (Culliname, 1989).

Es necesario determinar esta confiabilidad para que en el diseño y/o adecuación de las componentes de una red de distribución se consideren las incertidumbres de tipo hidráulico, de tal manera que cuando estas se presenten, el sistema sea poco vulnerable a fallar, disminuyendo el riesgo de suministros inferiores en presión y gasto en algún nodo de demanda. Para poder realizar la simulación se requiere disponer de la siguiente información :

- **De la red:** a) catastro de la red, b) longitud, diámetro y coeficiente de rugosidad para cada tubo, c) edad de las tuberías, d) las curvas características del equipo de bombeo, e) capacidad de tanques de regularización.

^d Se dice que el coeficiente de rugosidad varía con la edad de la tubería y calidad del agua, de ahí que produzca gran incertidumbre al efectuar el análisis hidráulico del sistema.

- **De las condiciones de demanda:** a) uso del agua. b) coeficientes de uso diario y horario. c) definir el gasto demandado en cada nodo. d) conocer las alturas de carga en tanques y fuentes de abastecimiento.

III.3.1.2 Confiabilidad mecánica

Este otro tipo de confiabilidad se relaciona a la falla que puede producirse en los distintos componentes del sistema, sean tuberías, válvulas, tanques, equipos de bombeo etc. en este caso, la falla de algún componente provoca que se suspenda el servicio durante un lapso determinado, en el cuál se lleva a efecto la reparación y/o reemplazo de la componente, en el sistema de distribución este tipo de falla puede presentarse con mayor frecuencia debido a la utilización de diámetros menores a los generados por un análisis de confiabilidad, de manera que este criterio nos ayudaría a disminuir la probabilidad de falla de cada componente o en su caso, que la ocurrencia de dicha falla provocara el menor daño posible.

El problema de asegurar una confiabilidad aceptable a las componentes del sistema, esta rodeada de múltiples facetas, por ejemplo, para calcular la confiabilidad en una tubería, se involucran diversas consideraciones de ingeniería como: tipo de tubería, tipo de terreno, diámetro del tubo, profundidad, y facilidad de mantenimiento, todas ellas aleatorias y que hacen más complicado determinarla, sin embargo, es posible dar una definición matemática relativamente simple de confiabilidad mecánica como ***“la probabilidad de que el sistema funcione correctamente dentro de límites especificados, al menos durante un cierto periodo de tiempo especificado, y en condiciones mecánicas externas especificadas”***.

Luego el propósito de este análisis, es determinar la probabilidad de que se encuentre en funcionamiento cada componente del sistema, a medida que esta probabilidad sea mayor se incrementa la confiabilidad de la componente y con ello la del sistema. Debemos distinguir, que si bien existe una probabilidad de falla en la componente y que la multiplicación de todas las probabilidades de las componentes nos da como resultado la confiabilidad total del sistema, también es muy cierto que relacionándolas con las características hidráulicas no todas las fallas llegan a producir fallos en el funcionamiento hidráulico del sistema, es decir, que cuando se produce la falla de un componente, el aislarlo del sistema para su reparación, no implica necesariamente que se provoquen disminuciones de gasto y presión por abajo de los límites mínimos permitidos. De ahí la importancia de realizar una simulación hidráulica considerando la falla de una componente para evaluar de forma más objetiva el riesgo.

Para ello se requiere disponer de registros estadísticos de:

- **Probabilidad de falla y tiempos de reparación:** a) forma y parámetros de funciones de distribución del tiempo de fallas de para cada componente que es sujeto de falla. b) forma y parámetros de las funciones de distribución de probabilidad de reparación para cada componente.

En ellas se considerarán tipo de material y diámetro de la tubería y establecer coeficientes de correlación, para posteriormente aplicarlos a la evaluación del sistema.

CAPITULO IV.

MODELOS DE EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

Hay un gran número de técnicas disponibles para resolver el tipo de redes como la mostrada en la *figura 4.1*, entre las que se encuentran la aproximación a la probabilidad condicional, análisis cut -set, diagramas de árbol, diagramas lógicos y técnicas de matriz. Existen otros métodos, pero son de uso menos frecuente. Muchas de estas técnicas más avanzadas son métodos formalizados para la transformación de la operación lógica del sistema, o de la topología, en una estructura que consiste únicamente de componentes en serie y en paralelo, trayectoria o ramales.

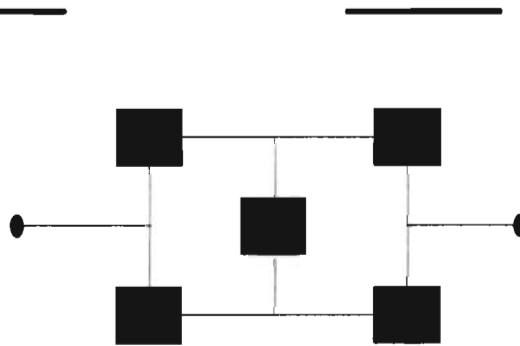


Figura 4.1. Ejemplo de red

IV.1 Modelos de simulación

En estos modelos, la confiabilidad así como los impactos de los fallos en componentes son siempre evaluados sobre la base de un estudio caso por caso. Este tipo de evaluación requiere para completarse que se considere el impacto de falla que produce la variación de la demanda, coeficiente de rugosidad y de las componentes del sistema. Si la confiabilidad se va a evaluar en términos de déficit de volumen esperado, se determinará analíticamente, el uso de otras medidas como la disponibilidad requieren análisis de escenarios para fallos de variación de la demanda o de componentes.

En estos modelos se definen grupos de demandas y distintas configuraciones de la red, se simula el funcionamiento hidráulico para cada uno de los casos para determinar las presiones y gastos que el sistema presenta como resultado. Puede entonces evaluarse el funcionamiento de la red en términos de su capacidad para cubrir las demandas sobre un completo grupo de casos.

Los aspectos de funcionamiento de la red en caso de falla de un componente se producen en la simulación mediante modificaciones en la configuración de la red, eliminando el elemento antes de la simulación, normalmente se analiza la falla de un componente ya que se sabe que la probabilidad de fallos simultáneos es sumamente baja.

Otro punto a considerar es la especificación de la confiabilidad cuando ocurre un déficit. Si la red es satisfactoria en todos los casos, es decir cumple con gasto y presión, bajo las condiciones analizadas entonces la red es confiable. En este caso no es necesario calcular los déficits esperados. Sin embargo, si existen casos no cubiertos a cabalidad la red puede ser considerada adecuada, es decir los déficits y sus probabilidades de ocurrencia podrían ser aceptables y no requerir mayor evaluación. Por otra parte, conocer hasta que punto la demanda no es cubierta y su probabilidad, puede no ser suficiente, en ocasiones es necesario evaluar el déficit esperado o al menos su distribución. Si alguna de las combinaciones que no han sido consideradas produzcan déficits, pueden no ser tan graves pero sin duda se presentarán. De esta forma no conoceremos más que el déficit asociado al subconjunto de eventos analizados y no se estima el déficit real. Sin embargo, analizar todo el conjunto requiere un número muy grande de combinaciones y un esfuerzo computacional asociado igualmente grande. Este problema se presenta tanto en simulaciones como para las aproximaciones analíticas.

IV.2 Aproximaciones analíticas

Son técnicas que intentan integrar todos los parámetros relacionados con la red y sus cargas, por ejemplo, estructura de la red y características de las cargas, en medidas simples o múltiples de la confiabilidad sin la necesidad de tener que afrontar la simulación hidráulica completa de la red. Una característica importante de las técnicas analíticas es un uso creciente de la teoría de "grafos" para describir el funcionamiento subyacente de la red en términos de su forma y la conectividad entre los nodos, particularmente nodos de inyección y nodos de consumo. Este uso creciente de la teoría de grafos se debe a las siguientes características:

- **Accesibilidad** : la conexión de un determinado nodo de consumo a un nodo fuente.
- **Conectividad**: cada nodo de consumo está conectado al menos a un nodo fuente.

- **Conjunto de corte:** es un grupo de tramos, los cuales, cuando se eliminan de la red, desconectan completamente uno o más nodos del resto de la red.

Debe observarse que la conexión de un nodo de consumo a un nodo fuente es una condición necesaria pero no suficiente para que un nodo cubra sus demandas. Si la conexión con la fuente la constituye una tubería que es muy pequeña o la presión del sistema en su conjunto es muy baja, este nodo no puede recibir ninguna cantidad de agua aunque este conectado a la fuente. El desarrollo de medios efectivos de integración de estos aspectos de funcionamiento hidráulico con características de la teoría de grafos asociadas con el trazo de la red es el mayor problema para encarar las técnicas analíticas es evaluar a partir de un análisis de los parámetros de la red, con número de líneas conectadas a cada nodo, tamaño de las tuberías, localización de los nodos, demandas, etc., mejor que a través de un análisis basado en investigaciones sobre un rango de escenarios.

Mientras que los principios de la teoría de grafos se han aplicado extensivamente al análisis de redes de distribución eléctrica, redes de comunicación, etc., algunas de las primeras consideraciones formales sobre su uso para la valoración de la confiabilidad fueron propuestos por *Goulter (1988)* y *Jacobs y Goulter (1988,1989)*. A partir de ellos se ha ido incrementando el uso de aproximaciones mediante la teoría de grafos en las técnicas analíticas para evaluación de la confiabilidad.

Wagner et. al (1988) efectuaron un análisis de una serie de técnicas basadas en los conceptos de accesibilidad y conectividad. Una observación importante deducida de este estudio es que mientras las técnicas particulares propuestas para la valoración de la probabilidad de accesibilidad y conectividad fueron efectivas para algunas redes, también aparecieron problemas de cálculo cuando se aplicaron dichas técnicas a otras redes generalmente aceptadas por la literatura como marco de trabajo para el análisis. *Goulter y Jacobs (1989)* también notaron problemas similares para extensiones muy simples de las redes para las cuales los métodos de *Wagner (1988)* funcionaron adecuadamente. Las dificultades de cálculo encontradas en la aplicación de estas y otras técnicas analíticas para la evaluación de la confiabilidad son sintomáticas del hecho de que el problema es de una dificultad *NP*, es decir, que el esfuerzo de cálculo crece exponencialmente con el aumento del tamaño de la red (*Jacobs y Goulter, 1989*). Además, las suposiciones que se imponen en las redes para que sean evaluadas por técnicas analíticas son generalmente muy rigurosas. Los resultados tienden por tanto a proporcionar interpretaciones más globales que exactas.

IV.3 Medidas basadas en la redundancia

Otro desarrollo es la consideración de la redundancia como medida de confiabilidad. La redundancia se define como la existencia de recorridos alternos o el exceso de capacidad con respecto a la requerida en condiciones normales de operación, que puede utilizarse cuando

unos de los componentes falla. Este concepto de redundancia es antiguo, el interés subyace en que la confiabilidad de una red viene determinado en gran parte por el trazo o forma de la red y la redundancia inherente a dicho trazo. Existen trabajos desde 1982 de *Rowell y Barnes y Morgan y Goulter (1985)* dirigidos a proporcionar recorridos alternativos con suficiente capacidad hidráulica en la red en el caso de que una tubería fallara. Los trabajos de *Awumah y Awmah y Goulter* ya citados son ejemplos de la consideración explícita de la redundancia. *Ormsbee y Kessler (1990)* y *Kessler et. al. (1990)* utilizaron la teoría de grafos directamente considerando la redundancia por identificación de árboles de distribución independientes que estarían disponibles para suministrar a un nodo en el caso de fallo de la línea de otro árbol. Una característica importante de esta aproximación es el reconocimiento de un nivel de servicio menor, por ejemplo se suministra el 80% o menos de la demanda, podría ser aceptable mientras se está reparando la línea que ha fallado.

IV.4 Eventos de árbol

Es una representación de todos los eventos que pueden ocurrir en el sistema. Se define como árbol, porque la representación gradualmente crece con los tramos en forma de ramas con el incremento de los eventos considerados.

El método puede ser usado en sistemas en los cuales todas las componentes están operando continuamente o donde todas las componentes se encuentran en modo de espera que supone una operación lógica secuencial. En la práctica, los eventos de árbol se usan con mayor frecuencia orientados para la seguridad misma del sistema, así como otras técnicas proveen ser más viables para la operación continua de los mismos. La aplicación de la técnica para ambos tipos de sistemas se atiende de una manera similar, pero con dos diferencias particulares entre ellas.

La primera es que, considerando una operación continua de los sistemas, los eventos que pueden ocurrir, los componentes que pueden fallar, pueden ser considerados en algún orden arbitrario. Con sistemas en los cuales la operación particular de un componente es dependiente del suceso o falla de algún otro componente, la secuencia de eventos debe ser considerada en orden cronológico en el cual pueden ocurrir.

La segunda diferencia es el punto de partida del evento del árbol. En el caso de operación continua, el punto de partida es el de operación normal del sistema y el evento de árbol es deducido como una secuencia de eventos y fallas de las componentes del sistema. En el caso de sistemas en situación de espera y una operación particular, los eventos de árbol son utilizados para identificar varias salidas posibles del sistema siguiendo un evento inicial dado el cual es generalmente un evento o situación de operación insatisfactoria.

IV.5 Aproximación a la probabilidad condicional

Una aproximación que puede ser usada para evaluar la confiabilidad de un sistema complejo, es reducir secuencialmente la estructura del sistema en subsistemas que estén conectados en serie/paralelo y entonces, combinarlos usando el método de probabilidad condicional.

P(suceso en el sistema o falla) = $P(\text{suceso en el sistema o falla si el componente X esta bien})$
* $P(X \text{ esta bien}) + P(\text{suceso en el sistema o falla si el componente X falla}) * P(X \text{ falla})$

La aproximación a la probabilidad condicional es una útil herramienta para la evaluación de la confiabilidad y es frecuentemente usada en algunas aplicaciones. Aunque esto puede causar dificultades para programarla en una computadora digital para la solución de la configuración modificada general de la red. Otros métodos han tenido desarrollo, los cuales proveen más conveniencia al respecto.

IV.6 Método del cut-set mínimo

Esta es una herramienta muy provechosa, que forma las bases para algunos de los métodos de evaluación en la confiabilidad de redes.

Un cut set puede ser definido como: “ ***un escenario de las componentes del sistema, las cuales, cuando fallan, producen falla en el sistema***”. Este método es muy útil para determinar la confiabilidad de un sistema de redes, por dos básicas razones.

1. Puede ser fácilmente programado en una computadora para una rápida y solución eficiente de alguna red en general.
2. Los cut set son directamente relacionados a los modos de falla del sistema y permiten entonces identificar los distintos caminos en los cuales el sistema puede fallar.
3. Permiten identificar en la red, el impacto de la falla en la zona de riesgo.

El mínimo subset de algún escenario dado de componentes, los cuales causan falla en el sistema, es conocida como un cut set mínimo. El cual puede ser definido como: “***un escenario de las componentes del sistema las cuales, cuando fallan, causan falla del sistema pero cuando alguna otra componente del escenario no ha fallado, no causa falla en el sistema***”

Esta definición indica que todas las componentes de un cut set mínimo, deben, en un estado de falla, causar falla en el sistema.

El cut set del sistema se denota por S_1, S_2, \dots, S_n y permite $P(S_i)$ ser la probabilidad de todos los componentes de C_i fallando. Entonces, la infiabilidad del sistema es:

$$R_s = P(S_1 + S_2 + \dots + S_n) \quad \text{..... (7)}$$

donde "+" denota la suma lógica de los operandos. La confiabilidad del sistema, por lo tanto es:

$$C_s = 1 - R_s \quad \text{..... (8)}$$

La expansión de la probabilidad de la unión de n eventos inconexos contienen $(2^n - 1)$ términos.

$$\begin{aligned} P(S_1 + S_2 + \dots + S_n) = & P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) \dots + P(S_n) - P(S_1 \cap S_2) - P(S_1 \cap S_3) - \\ & P(S_1 \cap S_n) - P(S_2 \cap S_3) - P(S_2 \cap S_n) - P(S_3 \cap S_n) + \\ & P(S_1 \cap S_2 \cap S_3) - P(S_1 \cap S_2 \cap S_n) + P(S_1 \cap S_3 \cap S_n) + \\ & P(S_2 \cap S_3 \cap S_n) - P(S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap S_n) \quad \text{..... (9)} \end{aligned}$$

Esta evaluación es siempre teóricamente posible, pero en sistemas grandes y complejos puede tomar demasiado tiempo de análisis, lo cual es prohibitivo, de tal forma que para sobrellevar este problema, pueden realizarse aproximaciones en la evaluación, las cuales pueden reducir precisión, pero permiten una evaluación más rápida. El grado de imprecisión introducido es usualmente despreciable y con frecuencia dentro de la tolerancia asociada con los datos de las confiabilidades de las componentes para el sistema, el cual tiene valores altos de confiabilidad. Las dos aproximaciones básicas requeridas son

- La primer aproximación asume que la ecuación (9) puede ser reducida a una sumatoria de las infiabilidades (*riesgo*) de las componentes.

$$R_s = P(S_1) + P(S_2) + \dots + P(S_i) + \dots + P(S_n)$$

$$= \sum_{i=1}^n P(S_i) \quad \dots\dots (10)$$

La segunda aproximación es despreciar los cuts sets de un mayor orden a aquellos de valor seguro^c. Esta aproximación asume que un orden alto del *cut set* es menos probable que ordenes bajos del *cut set*. Esto es válido si todos los componentes tienen confiabilidades de similar valor, pero puede no serlo si un orden más bajo del *cut set* implica componentes con muy baja confiabilidad. Es evidente entonces que esta aproximación debe tratarse con cuidado pero, si se conoce la validez, puede de nuevo reducir grandemente la cantidad de análisis que se requiere.

De tal forma que la función de **confiabilidad** queda:

$$C_s \geq 1 - [P(S_1) + P(S_2) + \dots + P(S_n)] \quad \dots\dots (11)$$

esta evaluación aproximada en la región de alta-confiabilidad de las componentes, la región con componentes confiables se cierra a la unidad.

De la red mostrada en la *figura 4.1*, suponiendo que se desea como punto final de suministro al nodo 8, el *cut set* mínimo puede ser identificado por una inspección visual del sistema. En sistemas simples, la identificación visual puede normalmente ser realizada con pequeña dificultad, de tal forma que, considerando *cut set* de primer orden, los tramos que producen falla en el sistema son: 1-2, 2-3 y 7-8. Considerando *cut set* de segundo orden que producen falla en el sistema tenemos a los tramos: 3-4 y 3-5, 3-4 y 5-7, 3-5 y 6-7, 5-7 y 6-7.

^c El orden de un *cut set* llega a ser igual al número de los componentes que comprende el *cut set*, por ejemplo, un *cut set* creado por dos componentes, es conocido como *cut set* de orden dos o *cut set* de segundo orden.

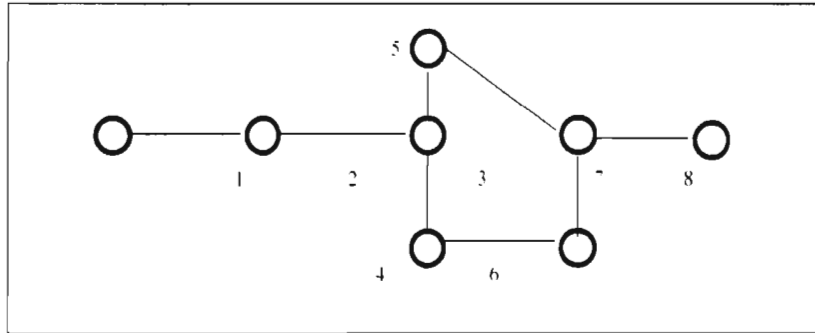


Figura 4.2 Identificación de cut-set

El problema de identificación llega a ser más difícil para sistemas más largos y complejos y para ello nos se debe apoyar en un modelo de simulación que permita determinar para cada escenario de la red, que tramos al fallar causan falla en el sistema.

IV.7 Distribución exponencial

Durante el tiempo de su vida útil algunos componentes exhiben una constante de tasa de riesgo. Tal tasa implica que la ocurrencia de fallas es puramente aleatoria y que no hay deterioro de la resistencia de los componentes con el tiempo. En tal caso, el rango instantáneo de falla es el mismo en **100** horas como en **1000** horas. Aunque este análisis no es realístico para todo el tiempo, esta es una buena aproximación durante el tiempo de vida útil (la región II horizontal superior de la curva de la "bañera") del componente. De acuerdo a la *figura 4.3* La región I corresponde a fallas durante la "fase temprana". Como la "fase temprana" es un proceso continuo, el rango de riesgo tiende hacia abajo. La región II corresponde a el tiempo de vida útil de la componente. Durante este período, las fallas son aleatorias y el rango de riesgo es constante, correspondiente a un decrecimiento exponencial de la función de distribución. La región III corresponde al desgaste o fase de fatiga, durante la cual el rango de riesgo incrementa rápidamente con el tiempo. Estas tres regiones son fácilmente distinguibles en la gráfica de la función de riesgo.

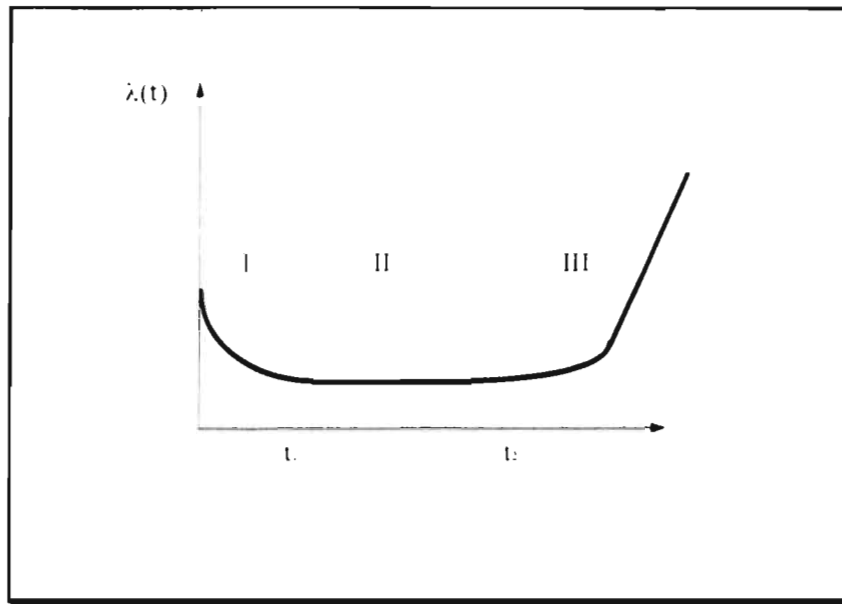


Figura 4.3 Tasa de falla

Una tasa constante de riesgo conduce a la función de distribución exponencial. a un modelo simple, se requiere únicamente un parámetro para ser definido, y es probablemente la distribución más usada en análisis de confiabilidad.

$$\lambda(t) = \lambda, \text{ constante}$$

$$f(t) = \lambda \exp\left[-\int_0^t \lambda d\xi\right] = \lambda e^{-\lambda t}, t > 0 \quad \dots (12)$$

$$C(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda d\xi\right] = e^{-\lambda t} \quad \dots (13)$$

$$R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \dots (14)$$

$f(t)$ es la función de distribución decreciente

$\lambda_d(t)$ es la tasa de falla, decrece inicialmente y mas tarde incrementa rápidamente con el tiempo.

$C(t)$ es la función de confiabilidad que decrece en forma monótona

$R(t)$ es la función de riesgo que se incrementa en forma monótona

Estas cuatro funciones representan la distribución exponencial como se muestra en la *figura 4.4*. Las expresiones para $R(t)$ y $C(t)$ pueden derivarse usando el tasa de falla λ como sigue:

$$R(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda z} dz = \left[\frac{\lambda e^{-\lambda z}}{(-\lambda)} \right]_0^t = (1 - e^{-\lambda t}) \quad \dots (15)$$

$$C(t) = \int_t^\infty \lambda e^{-\lambda z} dz = \left[\frac{\lambda e^{-\lambda z}}{(-\lambda)} \right]_t^\infty = (e^{-\lambda t}) \quad \dots (16)$$

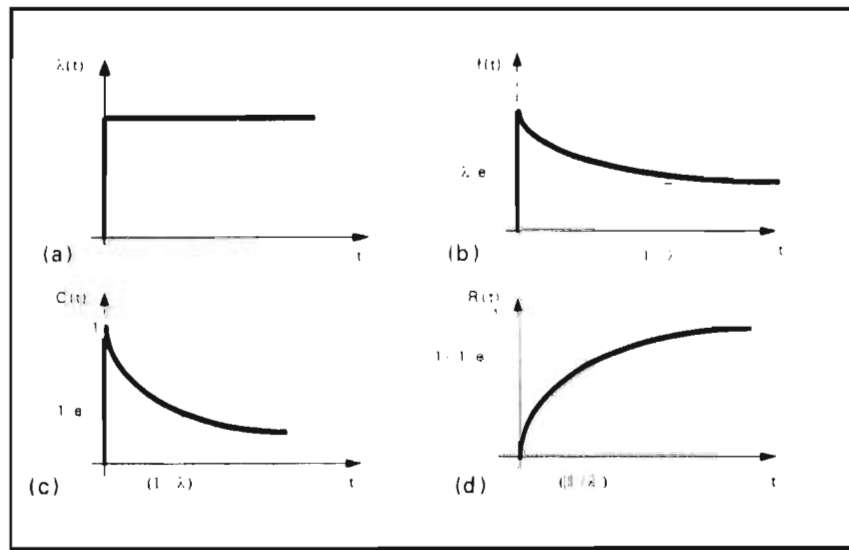


figura 4.4 Funciones de la distribución exponencial

La suma de las dos ecuaciones anteriores es siempre igual a uno, como se ilustra en la *figura 4.5* y *4.6*. El parámetro λ es llamado *tasa de falla*, y es equivalente a el *número de fallas por unidad de tiempo*. De esto, podemos derivar la siguiente expresión para *confiabilidad e infiabilidad*, respectivamente.

$$P(\text{no falla en el intervalo de tiempo de } 0 \text{ a } T) = C(T) = e^{-\lambda T}$$

$$P(\text{falla en el intervalo de tiempo } 0 \text{ a } T) = R(T) = 1 - e^{-\lambda T}$$

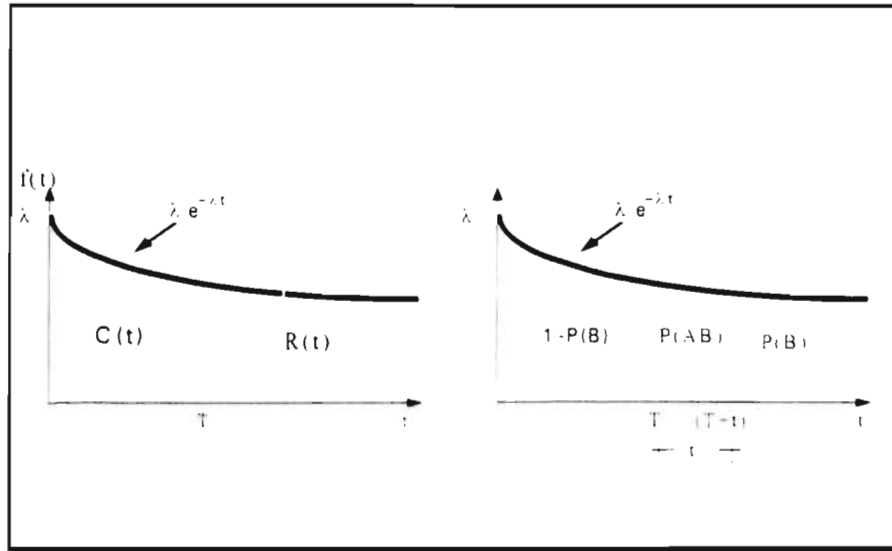


Figura 4.5 Funcion de densidad exponencial de falla

Figura 4.6 Probabilidad posterior de falla

Despues consideramos un intervalo de tiempo $(T; T + t)$ como se ilustra en la figura 4.6

evento A = falla durante el tiempo t

evento B = sobrevivencia despues del tiempo T
= no falla en el intervalo $(0, T)$

Entonces

$A \cap B$ = sobrevivencia arriba de T y falla durante $(T, T + t)$

$$P(A \cap B) = \int_T^{T+t} \lambda e^{-\lambda \xi} d\xi = \left(\frac{\lambda e^{-\lambda \xi}}{-\lambda} \right)_T^{T+t} = e^{-\lambda T} - e^{-\lambda(T+t)} \quad \dots (17)$$

También

$$P(B) = \int_T^{\infty} \lambda e^{-\lambda z} dz = e^{-\lambda T} \quad \dots (18)$$

IV.7.1 Valor esperado y desviación estándar

Para una distribución exponencial de una variable aleatoria continua, el valor esperado de μ puede ser obtenido de la ecuación:

$$\mu = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \int_0^{\infty} t d(-e^{-\lambda t}) \quad \dots (19)$$

Integrando por partes, obtenemos:

$$\begin{aligned} \mu &= \left[-te^{-\lambda t} \right]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} (-e^{-\lambda t}) dt \\ &= 0 - \left[\frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} \right]_0^{\infty} \\ &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \quad \dots (19a)$$

Para el caso de una función de densidad de falla, μ es llamada el *tiempo medio de falla (MTTF)*. La varianza es

$$\text{var } t = \sigma^2 = E[t^2] - (E[t])^2$$

$$E[t^2] = \int_0^{\infty} t^2 \lambda e^{-\lambda t} dt$$

$$= \int_0^{\infty} t^2 d(-e^{-\lambda t})$$

$$= \left(-t^2 e^{-\lambda t} \right)_0^{\infty} - \int_0^{\infty} -e^{-\lambda t} 2t dt$$

$$= 0 + \frac{2}{\lambda} \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{2}{\lambda} \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\lambda^2} \quad \dots (20)$$

Obtenemos

$$\sigma^2 = \frac{2}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}$$

Y obteniendo la desviación estándar, tenemos:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \quad \dots (21)$$

Para las componentes con distribución exponencial del tiempo de falla, el **MTTF** es igual al recíproco del rango de falla, *ecuación (21)*. Esto es posible para los **MTTF** más grande que el tiempo de vida útil del componente. Esto solamente mientras que si la porción constante λ , de la curva continua del rango de riesgo sea válida, entonces es posible calcular el **MTTF**. De otra forma, se indica simplemente que el rango de falla es igual al recíproco del **MTTF**.

En el caso de componentes reparables, el término **MTBF** se usa para indicar el tiempo medio entre fallas:

$$\begin{aligned} \mathbf{MTBF} &= \text{tiempo de ciclo entre fallas} \\ &= \text{tiempo medio de falla} + \text{tiempo medio de reparación} \\ &= \mathbf{MTTF} + \mathbf{MTTR} \end{aligned}$$

Si $\mathbf{MTTR} \ll \mathbf{MTTF}$, entonces $\mathbf{MTBF} \cong \mathbf{MTTF}$

Cuando una componente ha fallado esta es reemplazada por otro nuevo componente

$$\begin{aligned} \mathbf{MTBF} &= \mathbf{MTTF} + \text{tiempo medio para instalar un reemplazo} \\ &= \mathbf{MTTF} + \mathbf{MTTI} \end{aligned} \quad \dots (22)$$

De la misma manera, si $\mathbf{MTTI} \ll \mathbf{MTTF}$, $\mathbf{MTBF} \cong \mathbf{MTTF}$.

CAPITULO V

EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

La confiabilidad de un **SDA** esta comprendida por dos tipos de falla, conocidas como falla mecánica y falla hidráulica. La falla mecánica considera desajustes en el sistema producidas por falla en tuberías, en bombas, salidas de potencia, válvulas de control, etc. Las fallas hidráulicas consideran dificultades en el sistema debidas a inadecuadas cargas y gastos de demanda en uno o más nodos del sistema. Estas fallas son debidas a cambios en la demanda y altura de presión requerida, tamaño inadecuado de tuberías, coeficiente de rugosidad que varía con la edad de las tuberías, capacidad insuficiente de almacenamiento o a una combinación de estas. Ambas medidas por separado dan una medida parcial de la confiabilidad, es necesario conjuntarlas para especificar la confiabilidad como la probabilidad de que en los nodos de demanda reciban suficiente gasto a la presión requerida. En otras palabras, la falla ocurre cuando la demanda en el nodo recibe menor gasto y/o inadecuada presión.

V.1 EVALUACIÓN HIDRÁULICA

La confiabilidad hidráulica es una medida del funcionamiento del **SDA**, dicho funcionamiento depende de factores tales como: (1) Interacción entre las tuberías del sistema, distribución-almacenamiento, distribución-bombeo, y eventos como reducción de presión por válvulas; (2) la confiabilidad de las componentes del sistema; (3) variación espacial de la demanda en el sistema; y (4) variación temporal en la demanda del sistema.

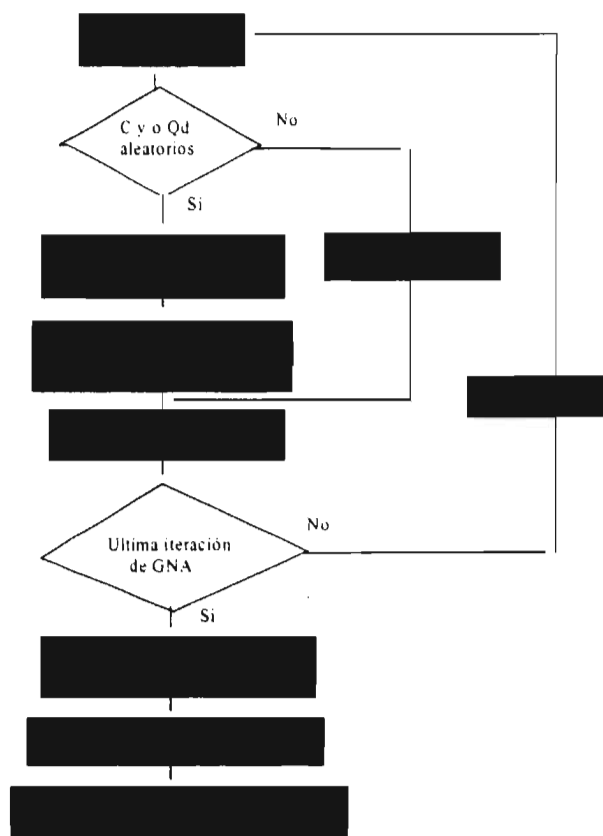
Durante el diseño de sistemas de distribución de agua, es muy difícil predecir las demandas futuras de cada nodo, aún en redes existentes, la demanda nodal cambia debido a múltiples factores tales como nuevos usuarios o incremento de los mismos. Así mismo, la incertidumbre crece cuando deseamos conocer el valor del coeficiente de rugosidad en tuberías con cierto tiempo de uso, debido a que este varía de acuerdo a factores como calidad del agua, tipo de tubería, edad de la tubería, etc..

Por lo tanto, debido a la incertidumbre y aleatoriedad hidráulica de los valores de la demanda y coeficiente de rugosidad es imprescindible usar un **modelo probabilístico** que nos permita determinar a partir de datos estadísticos una apropiada distribución de probabilidad y determinar parámetros de proporción de demanda y coeficientes de rugosidad, que posteriormente nos servirán para crear diferentes escenarios de valores, con los cuales podamos aplicar el **modelo de simulación de hidráulica** y una vez obtenidos los valores de presión y gasto en la red, establecer decisiones en función del **riesgo**.

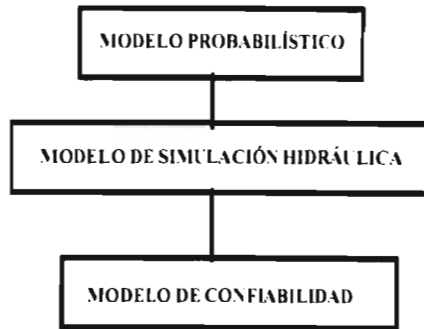
El objetivo de la metodología presentada para cuantificar la confiabilidad hidráulica de un sistema es la siguiente:

1. Utilización de distribuciones de probabilidad para la generación de números aleatorios basado en una simulación de Monte Carlo para evaluar la confiabilidad nodal y del sistema asociado a una falla hidráulica.
2. Crear diversos escenarios de simulación por la incorporación de incertidumbres en la demanda en nodos, e incertidumbre en el coeficiente de rugosidad en tramos de la tubería.
3. Cuantificar el impacto de las incertidumbres en la demanda y coeficiente de rugosidad de la tubería en los nodos y el sistema.

Fig 5.1 Algoritmo de solución



METODOLOGÍA



V.1.1 Modelo probabilístico

La incertidumbre hidráulica se considera por variables aleatorias en la demanda y rugosidad de tuberías. Asumiendo que la aleatoriedad en los nodos de demanda de agua y la rugosidad de los tramos de tubería, siguen cierta probabilidad de distribución, se generan números aleatorios para dar valores de Q_d para cada nodo y C (coeficiente de Hazen-Williams) para cada tramo.

V.1.1.1 Demanda aleatoria

La variación espacial en la demanda puede ser simulada por la incorporación de una demanda base en los nodos apropiados del sistema. La variación temporal de la demanda se puede simular por la variación en el uso de agua de acuerdo a la curva de variación de la demanda en los nodos del sistema. En caso de considerarse uso de agua para combatir los incendios esta debe incluirse en el tiempo de máxima demanda diaria para simular las condiciones críticas del sistema.

En el diseño de los sistemas es muy difícil predecir las demandas futuras para cada nodo. La demanda cambia por muchos factores: nuevos usuarios o incremento en el número de los existentes. Debido a las aleatoriedades o incertidumbres, las demandas es considerada como variables aleatorias. La incertidumbre hidráulica puede ser incorporada por una

función de distribución de probabilidad para un período de tiempo. Cada escenario de valores en los nodos del sistema representan la demanda de agua para diferentes periodos, cada cuál teniendo un diferente nivel de demanda.

De acuerdo al estudio realizado por el IMTA⁸ (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) en 22 ciudades de la República Mexicana, se observó un comportamiento diario en el uso del agua, tal que es posible adoptar una distribución normal para la generación de los valores aleatorios de gasto, de esta forma se propone dar diversos escenarios de demanda que comprendan el intervalo de tiempo de 24 horas y realizar de acuerdo a ellos un número suficiente de corridas.

V.1.1.2 Coeficiente de rugosidad aleatorio

Los sistemas de distribución en años de uso disminuyen su capacidad de transporte debido a la corrosión, haciéndose más susceptible el sistema a fallas, resultando en consecuencia pérdidas de agua, tiempo y dinero. De tal forma que en la rehabilitación o expansión del sistema toma gran importancia la evaluación del coeficiente de rugosidad para su estudio.

En el diseño de una red nueva, quizá la incertidumbre en el valor del coeficiente de rugosidad de la tubería no exista, sin embargo, cuando se desea simular el funcionamiento de la red para cierto tiempo de vida útil o cuando se trata de evaluar el funcionamiento de redes existentes con cierto tiempo de uso, es necesario considerar los riesgos que se producen por la variación en el coeficiente de rugosidad

La incertidumbre del valor C , llega a ser parte de la calidad del agua fluyendo en la red, edad de la tubería y tipo de la tubería, y hace que los valores de C sean dependientes. Pero si el valor de C se asume estáticamente dependiente esto da origen a problemas como los siguientes :

- **Primero** : porque es al menos imposible obtener los valores de las correlaciones del coeficiente de los valores de C a lo largo de las tuberías enterradas, lo cual puede implicar un alto costo para recolectar los datos.
- **Segundo** : si se contara con los datos de correlación, el problema se debe ahora a que no hay ecuaciones que relacionen todos los valores de C juntos.

Considerando a los valores de C como variables aleatorias, es necesario considerar los riesgos que se producen por su variación, lo que nos obliga a tomar en cuenta una simulación con datos aportados por la incorporación de una función de distribución de probabilidad, la cual nos permitirá dar un valor a cada tramo de la red de tal forma que sea posible crear diferentes

escenarios que conjuntamente con los valores aleatorios de la demanda nos permitan determinar la variación de presión y gasto en los nodos de la red.

Se ha considerado en este escrito tomar los valores del coeficiente de rugosidad de la *C de Hazen-Williams*, por ser el más utilizado por los ingenieros prácticos en el diseño, pero igual puede utilizarse Darcy-Weisbach o Manning.

V.1.2 Simulación Hidráulica

A partir de los datos generados para los valores de demanda en los nodos Q_d y coeficiente de rugosidad C en los tramos, se formaran numerosos escenarios que serán tratados mediante el simulador hidráulico *AH206 (Tzachkov 1993)* para determinar los gastos en los tramos y altura de presión en los nodos. Dado que el modelo de simulación implícitamente satisface las ecuaciones de continuidad y conservación de energía, siempre cumple con el gasto demandado en los nodos, por lo tanto, únicamente se revisa la presión de entrega requerida, si la carga de presión en cualquiera de los nodos es menor a la presión mínima requerida se considera que el sistema falla al dejar de cumplir la función para la cual fue diseñado.

Buscando que la demanda sea satisfecha. La carga de presión requerida H_d en el nodo puede ser tratada como constante, con valores máximo H_{dl} y mínimo H_{du} o como variable aleatoria.

V.1.3 Modelo de confiabilidad

Con los datos generados por cada iteración del modelo hidráulico se calcularán las confiabilidades nodales y del sistema, y los riesgos provocados por las variables aleatorias.

V.1.3.1 Confiabilidad nodal

La confiabilidad hidráulica nodal C_n , se puede definir como la probabilidad de que cierto nodo reciba cierto gasto demandado a la presión mínima requerida durante un tiempo determinado. Teóricamente, la confiabilidad nodal es la unión de la probabilidad de que tanto el gasto como la presión sean satisfechos en un cierto nodo, es decir, que se considerará falla del nodo cuando una o las dos situaciones no se cumplan, a este tipo de probabilidad se le conoce como condicional. Para lograr una aproximación a su cálculo, calcularemos la probabilidad condicional en términos de la carga de presión, previendo que el gasto requerido sea satisfecho. Debido a que el simulador hidráulico *AH206* siempre satisface gasto pero no necesariamente presión, esta hipótesis automáticamente supone que el gasto es satisfecho $Q_s = Q_d$.

La confiabilidad nodal definida como la probabilidad de que se suministre la carga de presión H en un nodo dado sea mayor o igual que la presión mínima requerida H_d' puede expresarse matemáticamente como:

$$C_n = P(H_s > H_d' | Q_s = Q_d) = \int_0^{\infty} f_s(H_s) \left[\int_0^{H_s} f_d(H_d') dH_d' \right] dH_s \quad \dots\dots (23)$$

$f_s(H_s)$ = función de densidad de probabilidad del suministro de carga de presión.

$f_d(H_d')$ = función de densidad de probabilidad de la carga de presión mínima.

Utilizando la carga de presión mínima requerida H_d' como límite inferior, la confiabilidad nodal está dada por

$$C_n = P(H_s > H_d') = \int_{H_d'}^{\infty} f_s(H_s) dH_s \quad \dots\dots (24)$$

Si se considera el límite superior, H_d'' la confiabilidad nodal es:

$$C_n = P(H_d'' \geq H_s \geq H_d') = \int_{H_d'}^{H_d''} f_s(H_s) dH_s \quad \dots\dots (25)$$

V.1.3.2 Confiabilidad del sistema

Aunque la confiabilidad nodal representa una medida más o menos completa del sistema de distribución, es también conveniente utilizar un índice simple de la confiabilidad del sistema tal que considere el efecto de la confiabilidad nodal. Dicho índice es difícil de definir debido a la dependencia de los cálculos de la confiabilidad nodal. Se proponen dos definiciones

heurísticas de confiabilidad del sistema; la media aritmética y un promedio pesado, la media aritmética C_{sm} , la cual es la media de todas las confiabilidades nodales C_{ni} :

$$C_{sm} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ni}}{N} \quad \dots\dots (26)$$

C_{sm} = confiabilidad hidráulica del sistema.

C_{ni} = confiabilidad nodal para el nodo i.

N = número total de nodos.

La correspondiente al promedio pesado, la cual es un promedio de C_{sp} de las confiabilidades nodales por el gasto suministrado en el nodo:

$$C_{sp} = \frac{\sum_{i=1}^I C_{ni} Q_{si}}{\sum_{i=1}^I Q_{si}} \quad \dots\dots (27)$$

C_{sw} = confiabilidad hidráulica del sistema.

C_{ni} = confiabilidad nodal para el nodo i.

Q_{si} = gasto suministrado al nodo i.

N = número total de nodos.

V.2 EVALUACIÓN MECÁNICA

La confiabilidad mecánica es la habilidad del **SDA** para proveer continua y larga operación sin la necesidad de frecuentes reparaciones, modificaciones, o reemplazos de componentes.. dicha confiabilidad es usualmente definida como la probabilidad de que un componente o subcomponente cumpla con su misión dentro los límites especificados para un tiempo dado en un ambiente dado. El modelo de análisis se basa en consideraciones de fallas mecánicas.

V.2.1 Impacto de la falla en la red

Entendemos por falla de una componente, a aquel evento en el cual una componente en funcionamiento del sistema deja de brindar servicio, y se entenderá como falla del sistema, a aquel evento producido por una falla de los componentes que evita el funcionamiento óptimo del sistema; en nuestro caso, la falla del sistema de distribución ocurre cuando la falla de un componente provoca una incapacidad del sistema para proporcionar el suministro del gasto demandado a la presión mínima requerida en algún lapso de tiempo determinado.

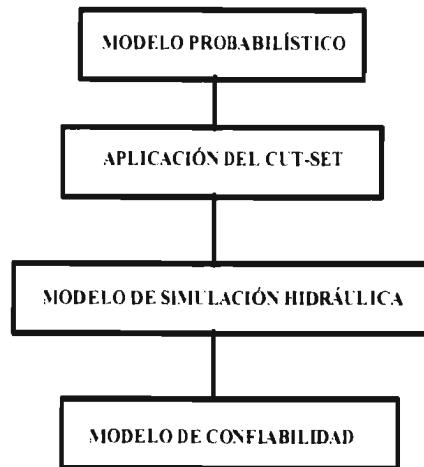
Cuando ocurre la falla en un tramo de tubería, la falla en el sistema puede reflejarse en un fallo en la demanda por una distribución de gastos demandados a todas o algunas partes de la red a presiones por debajo del mínimo aceptable o en el peor de los casos puede ocurrir que no se suministre ningún gasto. El aislamiento del tramo fallado puede provocar por lo tanto déficits de presión y de gasto (de volumen cuando multiplicamos el gasto por el tiempo de duración de la falla).

Es necesario definir los modelos y técnicas a emplear en la evaluación de la confiabilidad, ya que se requiere un análisis más realístico del impacto de una falla de los componentes en la red de distribución. Como se ha mencionado en párrafos anteriores, no todas las fallas de los componentes provocan una falla en el sistema, por lo que es necesario relacionar las fallas mecánicas con una simulación hidráulica que nos permita identificar cuales son las que afectan el funcionamiento de trabajo hidráulico por abajo de los límites mínimos permitidos, es decir, relacionaremos gasto, presión y falla del componente.

Para evaluar la confiabilidad mecánica en una red de distribución, aplicaremos técnicas basadas en la teoría de grafos (método del cut-set) los cuales son de gran aplicación en la evaluación de la confiabilidad, modelos probabilísticos y modelos de simulación hidráulica. Se presenta la siguiente metodología de análisis:

1. Determinar los parámetros de las funciones de distribución del tiempo de falla y reparación de los tramos del sistema.
2. Efectuar la simulación de falla de cada tramo de la red, generando diferentes escenarios de simulación.
3. Efectuar la simulación hidráulica para cada escenario y determinar los tramos cut set del sistema.
4. Determinar el impacto de la falla en el sistema

METODOLOGÍA



V.2.2 Modelo probabilístico

Este consiste en determinar la probabilidad de falla de los componentes (tuberías) de la red: las fallas en las tuberías obedecen a innumerables factores que van desde el procedimiento de construcción empleado, calidad de los materiales, tipo de suelo, corrosión y presiones excesivas *O'Day (1982)*. *Kettler y Goulter (1983)* indican que la tasa de fallas son función del tamaño del tubo, localización geográfica, método de fabricación, etc.

Como observamos, son diversos los factores a considerar para predecir la falla de una componente, sin embargo, es posible formar bancos de información asociados a la frecuencia de fallas de las tuberías, y aplicar posteriormente la función de distribución de probabilidad adecuada y establecer coeficientes de correlación que nos permitan predecir la misma.

V.2.2.1 Frecuencia de fallas

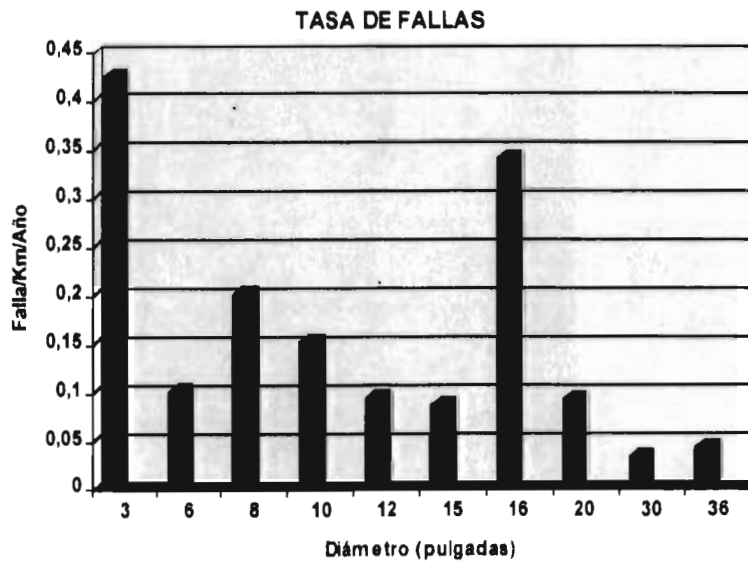
Uno de los aspectos básicos para el análisis de confiabilidad, desde un punto de vista mecánico es la frecuencia de falla en las tuberías, esta frecuencia se debe obtener en cada sistema para cada particular tipo y diámetro de la tubería. Desafortunadamente, en México esto se encuentra en vías de formación, pero es posible utilizar como una idea preliminar los datos existentes de otros sistemas, cuidando una semejanza en las condiciones de operación.

De los pocos datos existentes, se encuentra el de la cd. de San Luis Missouri, con frecuencia de fallas para diferentes diámetros durante los años 1980-1985 (cuadro 5.1)

Diámetro en pulg.	Long. de tubería (km)	1980	1981	1982	1983	1984	1985
3	9.02	5	3	4	4	3	4
6	1117.76	101	101	108	130	122	123
8	185.78	35	33	34	39	30	54
10	18.50	2	4	2	2	4	3
12	404.21	49	35	23	41	39	42
15	15.41	0	0	2	5	1	0
16	7.79	5	3	2	2	1	3
20	182.24	16	20	23	19	7	17
30	49.87	0	2	3	4	0	1
36	85.90	6	3	8	0	2	3
42	20.94	0	0	0	0	0	0
48	6.59	0	0	0	0	0	0
54	10.69	0	0	0	0	0	0
60	37.57	0	0	0	1	0	0
62	24.54	0	1	0	0	0	0
78	37.50	0	0	0	0	0	1

Cuadro 5.1

A partir de este tipo de banco de datos hemos obtenido la siguiente gráfica



De tal forma que, aplicando los coeficientes de correlación adecuados, se ha obtenido la siguiente ecuación que permite calcular la tasa de fallas en función del diámetro (falla/km/año).

$$r_j = 0.0381933 + \frac{15.54834}{D} + \frac{1011.714}{D^2} \quad \dots (28)$$

Donde :

r_j = Tasa de falla/Km/Año

D = Diámetro de la tubería en milímetros

Así mismo, es posible realizar diferentes tipos de registros relacionados a las fallas de los componentes, como pueden ser, tipos de falla, tipo de material, edad de la tubería, tiempos de reparación, etc., que nos permitan establecer una mejor base de información. De la misma ciudad, tenemos la siguiente información relacionada al tiempo medio en horas entre el reporte de falla y su reparación (cuadro 5.2).

<i>Años</i>	<i>3"-6"</i>	<i>8"-16"</i>	<i>20"-78"</i>	<i>Promedio</i>
1982	16.87	18.38	40.32	21.14
1983	29.90	27.60	29.80	29.10
1984	27.58	65.80	36.80	41.69
1985	22.14	27.42	24.64	24.47

Cuadro 5.2

A partir de la cual hemos obtenido una ecuación que nos permite estimar el tiempo empleado para la reparación de una componente, en función del diámetro del tubo.

$$MITR = \frac{D}{0.023525D + 1.376477} \quad \dots (29)$$

donde:

MTTR = Tiempo medio de reparación de una componente en horas

D = Diámetro del tubo en mm.

Si se considera ahora, que la confiabilidad de una componente dependerá del tiempo en que haya estado en servicio, la distribución del fallo en el tiempo se hace sumamente importante y haciendo la hipótesis de que la tasa de fallos es constante, observaremos que la distribución del tiempo de fallo es exponencial. Interpretando el tiempo oraste que se produce el fallo como un tiempo de espera, podemos concluir de que la presencia de fallos es un proceso de Poisson. De tal forma que valiéndonos de esta distribución, podremos obtener el cálculo de la probabilidad de falla para cada componente, tiempo medio de fallo, confiabilidad e infiabilidad.

V.2.3 Método del cut set mínimo

Se aplicará la técnica del cut set para determinar los tramos que son *grupos de corte mínimo*, que como se dijo anteriormente consiste en detectar los tramos de la red, que al fallar, provocan falla en el sistema, entendiéndose por falla, el evento que provoca que el **SDA** no cumpla con suministrar el gasto y/o presión mínima requerida en algún nodo de demanda.

Se considerará únicamente la falla de un tramo simple, en virtud que el considerar falla de dos o más tramos en un mismo tiempo, es considerado de muy baja probabilidad, además de que la aproximación realizada es aceptable y evitamos con ello exagerado tiempo de computo consumido en la realización de las combinaciones.

Primeramente, para el arreglo inicial de tuberías, se simula la falla de un tramo, con lo que se prohíbe el paso del gasto en él, cuando se presenta el aislamiento del tramo se produce con ello una variación en la presión suministrada a los nodos de demanda, consideraremos que se cumple con el gasto en cada nodo, hipótesis que satisface el programa de simulación exceptuando los casos en que la presión suministrada sea menor o igual a cero; de tal forma que, los *grupos de corte* serán aquellos tramos que provoquen en los nodos una presión inferior a la mínima requerida.

Cualquier otro tramo que no produzca falla en el sistema no se considera un *grupo de corte mínimo*.

V.2.4. Modelo de simulación

Se usará de igual forma el programa AH206 (Tzatchkov 1993) para efectuar la simulación hidráulica, en esta ocasión se realizarán tantas corridas del programa como tramos haya en la red^f, de tal forma que en cada iteración se considere el aislamiento de un tramo de la red. Dado que el modelo de simulación implícitamente satisface continuidad y siempre cumple con el gasto demandado, se revisa la presión de entrega requerida, la simulación hidráulica nos permitirá determinar cuáles son los grupos de corte mínimo de la red.

V.2.5. Modelo de confiabilidad

La primera aproximación de la confiabilidad mecánica, suponiendo que hay n-componentes en el i-ésimo grupo de corte mínimo del sistema de distribución, entonces la probabilidad de falla del *j-ésimo* componente es *P_j*. El *riesgo* o la *probabilidad de falla* del i-ésimo grupo de corte es

$$P(MC_i) = \prod_{j=1}^n P_j = P_1 * P_2 * P_3 \dots * P_n \quad \dots (30)$$

Y la *confiabilidad mecánica* en consecuencia es:

$$C_S = 1 - \sum_{j=1}^K p(MC_j) \quad \dots (31)$$

donde: *j* = 1,2,3 ... *K* = número de grupos de corte

^f Se considera que la probabilidad de que fallen dos tramos al mismo tiempo es muy pequeña, por lo tanto no se considero en este escrito.

V.2.5.1 Confiabilidad nodal

Para estimar la confiabilidad nodal por falla mecánica, analizaremos las situaciones de presión y gasto por separado. Considerando primeramente las fallas del sistema por disminución de presión en los nodos por abajo de la mínima requerida dado que ocurren fallos en los tramos de tubería j, es posible analizarla de dos formas diferentes:

Primero: considerando falla total, es decir, consideramos que la probabilidad para cualquier disminución de la presión nodal por abajo de la presión mínima requerida es igual a uno, en caso contrario tendrá un valor de cero. De tal forma que la confiabilidad nodal por presión es igual a uno menos el riesgo o probabilidad de falla.

$$C_{np} = 1 - \sum_{j=1}^M \left(\begin{array}{l} 1 \mid h_{si} < h_{di} \\ 0 \mid h_{si} \geq h_{di} \end{array} \right) * P_j \mid P_j \quad \dots\dots (32)$$

Segundo: en esta ocasión consideramos la probabilidad como el porcentaje de déficit de presión, es decir, que se toma en cuenta el hecho de que no es de igual impacto dañino una disminución de presión de 1 mca a una disminución de 19 mca por abajo de la presión mínima requerida. De tal forma que la ecuación queda.

$$C_{np} = 1 - \sum_{j=1}^M \left(\begin{array}{l} \frac{h_{min} - h_{si}}{h_{min}} \mid 0 < h_{si} < h_{di} \\ 0 \mid h_{si} \geq h_{di} \end{array} \right) * P_j \mid P_j \quad \dots\dots (33)$$

para j = 1,2,3,...M = número de tramos

donde:

- C_{npi} = confiabilidad nodal de presión para el nodo i.
- $P(\dots)$ = probabilidad de falla por presión en el nodo i.
- P_j = probabilidad de falla mecánica del tramo j.

Para la determinación de la confiabilidad nodal por gasto, consideraremos la probabilidad de que no se cumpla con el gasto de diseño en el nodo i, dado que ocurre una falla en el tramo j, de tal forma que la confiabilidad del nodo considerando el gasto suministrado, es igual a:

$$C_{ngj} = 1 - \sum_{j=1}^M P \left(\begin{array}{l} 1 \mid Q_{si} < Q_d \\ 0 \mid Q_{si} \geq Q_d \end{array} \right) * P_j \mid P_j \quad \dots (34)$$

donde:

C_{ngi} = confiabilidad nodal por gasto en el nodo i.
 $\Sigma P()$ = probabilidad de falla en gasto en el nodo i.
 P_j = probabilidad de falla del tramo j.
para j = 1, 2, 3, ..., M = número de tramos

De tal forma que considerando las dos confiabilidades (para gasto y presión), tenemos que la confiabilidad total en el nodo i considerando falla mecánica es:

$$C_{ni} = C_{tpi} * C_{ng} \quad \dots (35)$$

V.2.5.2 Confiabilidad mecánica del sistema

Al igual que en la evaluación hidráulica, es necesario considerar un índice simple del sistema que considere la confiabilidad o capacidad de respuesta de todo el sistema ante fallas mecánicas. se propone el valor de la media aritmética de las confiabilidades nodales totales.

$$C_{ms} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ni}}{N} \quad \dots (36)$$

donde:

C_{ms} = confiabilidad mecánica del sistema.
 C_{ni} = confiabilidad nodal total del nodo i.
 N = número total de nodos.

CAPITULO VI

ÍNDICES DE EVALUACIÓN

En capítulos anteriores se ha evaluado la confiabilidad como un porcentaje de confianza del sistema ante situaciones extraordinarias o de emergencia. sin embargo, es posible estimar a través de este tipo de análisis, nuevas medidas que consideren el **RIESGO** provocado por los eventos de falla, de tal forma que dichas aproximaciones, nos permitan realizar comparaciones o evaluaciones más objetivas de distintas redes de distribución, además de brindarnos una idea más realista de los eventos de falla y sus consecuencias. Considerando que el problema de disponibilidad de información nos conduce a tomar decisiones con riesgo, es necesario expresar el grado de ignorancia como una función de densidad de probabilidad que representan los datos.

Las decisiones con riesgo implican uno de los siguientes criterios:

- Valor esperado (de beneficio o pérdida)
- Valor esperado y varianza combinados
- Nivel de aceptación conocido
- Ocurrencia más probable de un estado futuro

El análisis de riesgo es un área de estudio que ha cobrado particular auge en el área ingenieril en los últimos años. Para realizar el análisis de riesgo en sistemas de distribución de agua, existen diversos procedimientos que de alguna manera, permiten la estimación de riesgo durante la operación del sistema.

Persiste, sin embargo, la incógnita de cómo conviene expresar los riesgos y cómo deben ser estos parte del proceso de diseño y toma de decisiones de factibilidad de obras civiles. Si se entiende como riesgo operacional al análisis de probabilidad de presencia de fallas y su efecto en la operación de sistemas de distribución de agua potable, se entenderá que es importante no sólo prever la probabilidad de falla sino su impacto en el funcionamiento del sistema.

Este capítulo presenta una discusión acerca de diversos indicadores del riesgo de falla y de su impacto en la red, desde distintos puntos de vista, por ejemplo: déficits, costos, valor esperado de tiempos de reparación, entre otros.

VI.1 Incertidumbres

¿Por qué es interesante medir el riesgo de falla de estos sistemas?. Durante el diseño de sistemas de distribución de agua, es muy difícil predecir las demandas futuras de cada nodo, aún en redes existentes, la demanda nodal a menudo cambia debido a múltiples factores tales como un nuevo usuario o el incremento de usuarios existentes. Debido a la incertidumbre y aleatoriedad de los valores de la demanda es que se les considera como variables aleatorias. La incertidumbre hidráulica debido a la aleatoriedad de la demanda puede ser incorporada mediante la asignación de una apropiada distribución de probabilidad y sus parámetros de proporción de demanda en un cierto período. La demanda de agua realmente varía a lo largo del día y puede dividirse en diferentes periodos, cada uno de ellos tendrá diferente nivel de demanda. Asimismo la incertidumbre en la determinación de la rugosidad en tuberías con cierta edad puede medirse por medio de una distribución de probabilidad del coeficiente de rugosidad, en este escrito se toma la C de Hazen-Williams.

Ya que los datos de confiabilidad para sistemas de distribución son normalmente mínimos, es difícil seleccionar la distribución de probabilidad que debe usarse para la generación Q_d y/o C , es muy difícil en muchos casos, establecer los parámetros de las distribuciones. Este es un problema que existe independientemente del tipo de distribución seleccionada. Los valores de Q_d , Gasto y coeficiente de rugosidad C , pueden ser considerados como valores fijos o valores aleatorios a elección del diseñador.

VI.2 Índices

Los índices clásicos, usados para denotar la probabilidad de la confiabilidad fueron definidos anteriormente, los que enseguida se presentan son el resultado de evaluaciones usando la teoría de la confiabilidad, se han propuesto con la finalidad de que sean representativos para las condiciones de operación y asegurar un adecuado funcionamiento.

VI.2.1 Número esperado de fallos de tubería por año.

Este es un indicador de los eventos de falla que se espera atender durante un lapso determinado, por ejemplo un año. Si bien la probabilidad de que falle un tramo⁹ de tubería es función principalmente de las cargas de presión excesivas, temperatura o corrosión **O'Day(1982)**¹. Conforme a estudios realizados por **Goulter y Coals (1983)**² la tasa de fallas puede simplificarse y suponer que sólo es función del diámetro del tubo, D . De esta manera, el número de fallas de tubería debe obtenerse a partir datos históricos del

⁹ Se considera al tramo de tubería a la longitud de tubería entre dos nodos adyacentes de la red esquematizada, de tal forma que su valor sea desde unos cuantos metros hasta probablemente de miles.

Organismo, sabiendo que debe tener una forma como la de la ecuación siguiente. (obtenida de datos de la cd. de San Luis M.)³.

$$\beta_j = r_j L_j \quad \dots\dots (37)$$

$$r_j = 0.0381933 + \frac{1554834}{D_j} + \frac{1011.714}{D_j^2} \quad \dots\dots (38)$$

donde:

β_j = es el número de fallas esperado por año en la tubería j.

L_j = es la longitud de la tubería j en Km.

r_j = es el número de fallas esperado por año por unidad de longitud de la tubería j.

D_j = es el diámetro del tramo j en milímetros.

VI.2.2 Tiempo medio de fallas

El tiempo medio de falla **MTTF** es el valor esperado del tiempo de falla, matemáticamente expresado como

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad \dots\dots (39)$$

Si como se ha supuesto la función de densidad de probabilidad de fallas sigue un proceso de Poisson se tiene que

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \beta e^{-\beta t} dt = \frac{1}{\beta} \quad \dots\dots (40)$$

donde:

MTTF y **t** se expresan en horas.

VI.2.3 Tiempo medio de reparación de fallas

Otro indicador que puede manejarse, es el tiempo medio de reparación de fallas, en principio puede suponerse que será función del diámetro y pueden obtenerse expresiones del tipo:

$$MTTR = \frac{D}{(0.023525D + 1376477)} \quad \dots\dots (41)$$

donde:

MTTR está en horas y el diámetro **D** en mm.

VI.2.4 Tiempo medio entre fallos

Este indicador nos determina el valor esperado del tiempo entre dos fallas consecutivas, para un componente reparable se puede expresar como:

$$MTBF = MTTF + MTTI \quad \dots\dots (42)$$

Así mismo, el tiempo medio entre reparaciones (**MTBR**) es el valor esperado de tiempo entre dos reparaciones consecutivas y es igual a **MTDF**.

VI.2.5 Tiempo total de fallos probables

Al determinar conjuntamente el número medio de fallas y el tiempo medio de reparación por falla puede determinarse un valor esperado del tiempo total que deberá estimarse para reparación de fallas

$$Tf = \sum_{j=1}^N P_j MTTR \quad \dots (43)$$

VI.2.6 Peligro o probabilidad de falla

Una de las medidas más comunes de riesgo, es el peligro o probabilidad de que el sistema falle, en este sentido la hipótesis de partida es que se tiene una función de distribución de probabilidad de tipo proceso de Poisson, (ec. 14). Si tenemos que, la función de distribución de probabilidad de falla es igual a $f(t)$ de forma de Poisson y que la confiabilidad del componente es $C(t)$, entonces la probabilidad de falla P_j es igual a $1-C(t)$.

$$f(t) = \beta e^{-\beta t} \quad \dots (12)$$

$$C(t) = \int_0^{\infty} \beta e^{-\beta t} = e^{-\beta t} \quad \dots (13)$$

$$P_j = R(t) = 1 - e^{-\beta t} \quad \dots (14)$$

Esta ecuación define la probabilidad de que se presente un fallo en la tubería, en un lapso determinado. A diferencia del valor β de la ec. 37, que nos da la tasa de falla, con la ec. 14 obtenemos la probabilidad de que se tengan β fallos en la red.

VI.2.7 Peligro por falla mecánica

Si se supone que las probabilidades de falla son estadísticamente independientes, y que no se analiza el impacto del fallo en los nodos^h, el peligro de la red en el año será:

$$R = \sum_{j=1}^{NT} P_j \quad \dots\dots (39)$$

donde:

NT es el número de tramos que integran la red.

VI.2.8 Riesgo por falla mecánica e Hidráulica

Esta es una medida más elaborada y más realista, ya que se considera la falla de tramos que ocasionan el fallo del sistema, esto es que no se satisfaga el gasto o presión o ambos en algún nodo. En este caso es preciso determinar que tramos ocasionan fallos en nodosⁱ

$$R_s = \sum_{i=1}^M P(GC_i) \quad \dots\dots (44)$$

donde:

M es el número de grupos de corte en la red.

P(GC_i) es la probabilidad de falla de los grupos de corte

^h En este caso no es trascendente el análisis del impacto en el funcionamiento hidráulico que pueda tener el fallo en el sistema, por ejemplo un tramo puede ser redundante y no ocasionar que se deje de suministrar agua a un cierto sector de la red.

ⁱ Para determinar cuales tramos son grupos de corte se debe utilizar un método de simulación del funcionamiento hidráulico, es muy probable de que la falla de algunos tramos no tengan un impacto fuerte, ya que por lo general al existir cierta redundancia en la red, el agua puede llegar por otra trayectoria a los nodos.

VI.2.9 Valor esperado de Déficit de presión

Este índice estima la probabilidad de que se presente una caída de presión en el nodo i , dado que falló el tramo j . Introduciendo el concepto de riesgo nodal o déficit de presión en el nodo i D_{pi} .

El procedimiento puede realizarse de dos formas, considerando como falla total cualquier presión inferior a la presión mínima requerida, para lo cual, la probabilidad de déficit de presión toma el valor de 1 en la siguiente ecuación:

$$D_{P_i} = \sum_{j=1}^M P \left[\begin{array}{l} 1 | h_{si} < h_{\min} \\ 0 | h_{si} \geq h_{\min} \end{array} \right] * P_j | P_j \quad \dots (45)$$

donde:

M es el número de grupos de corte.
 h_{si} es la presión suministrada al nodo y
 h_{\min} es la presión mínima aceptada en la red

El segundo criterio, considera el porcentaje de déficit de presión ocurrido en el nodo, esto quiere decir, que se toma en cuenta el hecho de que no es de igual impacto dañino una presión de 1 mca a una presión de 19 mca cuando la presión mínima requerida es de 20 mca. De tal forma que la ecuación queda:

$$D_{pi} = \sum_{j=1}^M P \left(\begin{array}{l} \frac{h_{\min} - h_{si}}{h_{\min}} | 0 < h_{si} < h_{\min} \\ 0 | h_{si} \geq h_{\min} \end{array} \right) * P_j | P_j \quad \dots (46)$$

Para la red, el déficit de presión D_{ps} está dado por las siguientes expresiones

$$D_{P_s} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P \left[\begin{array}{l} 1 | h_{si} < h_{min} \\ 0 | h_{si} \geq h_{min} \end{array} \right] * P_j | P_j \quad \text{..... (47)}$$

$$D_{ps} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P \left[\begin{array}{l} \frac{h_{mn} - h_s}{h_{mn}} | 0 < h_{si} < h_{min} \\ 0 | h_{si} \geq h_{min} \end{array} \right] * P_j | P_j \quad \text{..... (48)}$$

VI.2.10 Valor esperado de Déficit de gasto

Este índice estima la probabilidad de que se satisfaga con el gasto requerido en el nodo i, dado que falló el tramo j. Introduciendo el concepto de riesgo nodal o déficit de gasto en el nodo i D_{qi} .

$$D_{Q_i} = \sum_{j=1}^M P \left[\begin{array}{l} 1 | Q_{si} < Q_{di} \\ 0 | Q_{si} \geq Q_{di} \end{array} \right] * P_j | P_j \quad \text{..... (49)}$$

En forma similar puede obtenerse la probabilidad de que se presente un gasto menor al gasto de diseño en el nodo i, dado que falle el tramo de tubería j, de forma que el déficit en la red es:

$$D_{Q_s} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P \left[\begin{array}{l} 1 | Q_{si} < Q_{di} \\ 0 | Q_{si} \geq Q_{di} \end{array} \right] * P_j | P_j \quad \text{..... (50)}$$

donde:

Q_{di} es el gasto de diseño y Q_{si} el gasto suministrado

VI.2.11 Valor esperado de déficit de volumen producido por el fallo de un tramo

Es una medida que nos indica el volumen que deja de suministrarse al sistema, provocada por la falla de un tramo de la red en un lapso de tiempo de falla.

$$E(DVT) = \sum_{j=1}^M q_{dj} MTTR_j P_j \quad \dots\dots (51)$$

donde:

$E(DVT)$ = déficit de volumen esperado derivado del fallo en un tramo de tubería.

q_{dj} = gasto medio en la sección del tramo j .

$MTTR_j$ = Tiempo medio de reparación para el tramo j .

P_j = probabilidad de que se presente la falla del tramo j .

VI.2.12 Valor esperado de déficit de volumen en el sistema por falla en nodos.

El déficit esperado de volumen en nodos, representa el valor esperado de volumen de agua que no se suministra en él o los nodos i por causa de la falla en un tramo de la red, de tal forma que en el sistema será igual a la sumatoria de los déficits en cada nodo:

$$E(DV_s) = \sum_{j=1}^M (MTTR_j * P_j) * \sum_{i=1}^N (DQ_i * Q_{di}) \quad \dots\dots\dots (52)$$

donde:

$MTTR_j$ = tiempo medio de reparación en segundos

DQ_i = déficit de gasto en el nodo i en l/seg .

$i = 1 \dots N$ = número de nodos y $j = 1 \dots M$ = número de tramos.

VI.2.13 Número esperado de usuarios sin servicio en el sistema

Este indicador nos permite conocer el valor esperado del número de habitantes que pueden quedar sin servicio por las fallas de las componentes del sistema en un lapso de tiempo determinado. En el caso debido por la falla en un tramo de la red, la ecuación queda:

$$USS = \sum_{i=1}^N \left(DQ_i * Q_{di} * \frac{86400}{Dt} \right) \quad \dots\dots (53)$$

donde:

USS = Número de usuarios sin servicio.

Dt = dotación media (l/hab/día).

VI.2.14 Riesgo como Valor Esperado de daños

Uno de los indicadores que puede resultar más práctico para efectos de planeación es la estimación de los daños económicos de fallos.

El valor esperado de riesgo, como consecuencia del déficit de volumen que ocurre por el fallo en un tramo de la red, será igual al costo del m³ de agua que se deja de suministrar al sistema por el déficit de volumen presentado en un lapso determinado.

También deben añadirse el costo que se produce por la reparación de la falla en el tramo la cual variará en función del diámetro, material de la tubería y tipo de material del terreno, en el cual deberán considerarse los costos por insumos y de mano de obra.

El análisis de riesgo es de alguna forma, considerar la posibilidad de daño en el sistema y su estudio es realizado para determinar las consecuencias del impacto de las fallas en el sistema.

CAPITULO VII. APLICACIONES

VII.1 Evaluación hidráulica

La metodología descrita anteriormente se aplicó a la redes mostradas en las figuras 7.1 y 7.2. El primer sistema, corresponde al arreglo de una red abierta, formada por 14 nodos e igual número de tramos, el segundo sistema corresponde a una red cerrada formada por 14 nodos y 17 tramos.

SISTEMA I

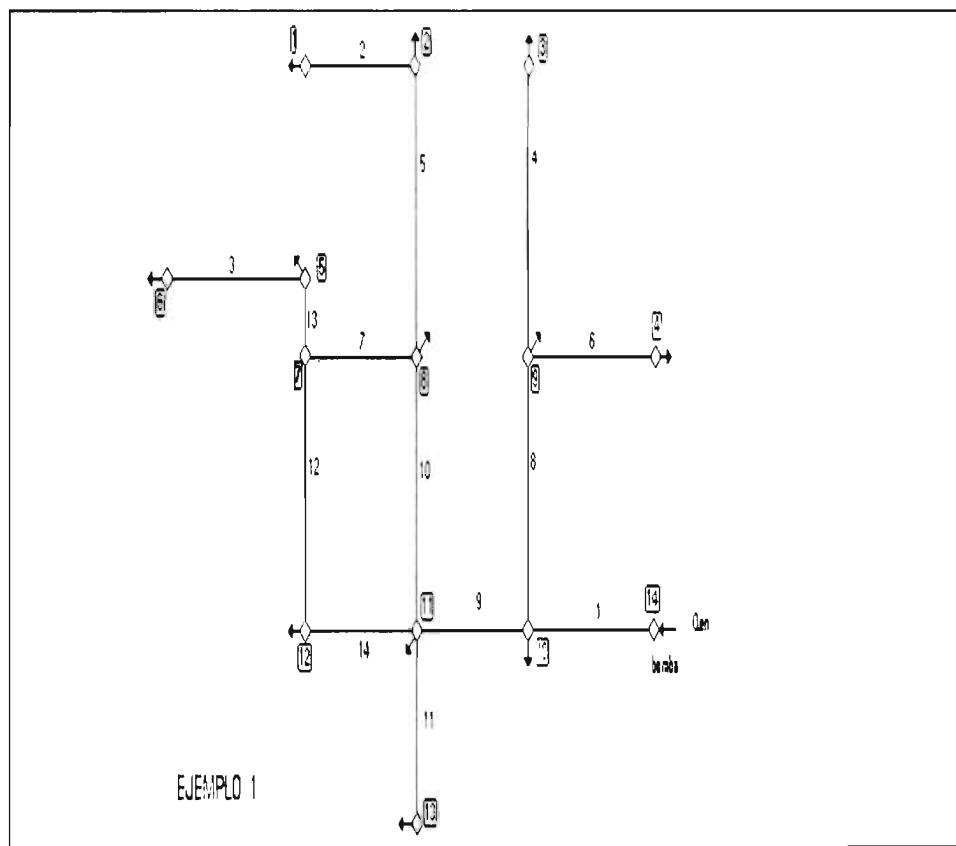


Fig. 7.1 Red abierta

Num. Nodo	Demanda l/s	Elevación m
1	21.24	767.49
2	21.24	767.18
3	21.24	761.39
4	42.48	759.56
5	21.24	764.44
6	84.95	769.01
7	0.00	765.96
8	42.48	771.75
9	42.48	765.66
10	21.24	768.10
11	21.24	774.19
12	21.24	771.14
13	42.48	777.85
Fuente	-403.52	809.70

Nº tram	Longitud mt
1	305
2	213
3	305
4	305
5	305
6	305
7	213
8	305
9	213
10	305
11	305
12	305
13	107
14	213

Tabla 7.1 Características de demanda en los nodos

Tabla 7.2 Características de la red

SISTEMA 2

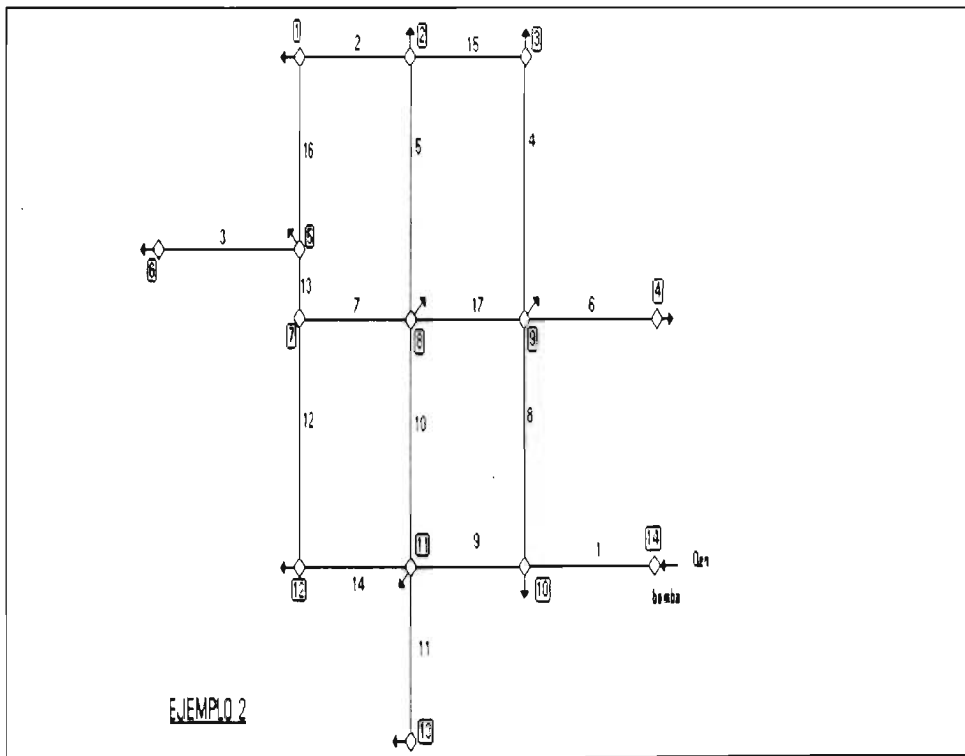


Fig. 7.2 Red cerrada

Num. Nodo	Demanda l/s	Elevación m
1	21.24	767.49
2	21.24	767.18
3	21.24	761.39
4	42.48	759.56
5	21.24	764.44
6	84.95	769.01
7	0.00	765.96
8	42.48	771.75
9	42.48	765.66
10	21.24	768.10
11	21.24	774.19
12	21.24	771.14
13	42.48	777.85
Fuente	-403.52	809.70

Tabla 7.3 Características de demanda en los nodos (sistema 2)

Nº tramo	Longitud mt
1	305
2	213
3	305
4	305
5	305
6	305
7	213
8	305
9	213
10	305
11	305
12	305
13	107
14	213
15	213
16	198
17	213

Tabla 7.4 características de la red (sistema 1)

Se considera un tanque de almacenamiento ubicado en la cota 809.7 y una carga de presión mínima requerida de 28 metros en cualquier nodo de demanda.

Para cada sistema se analizaron tres alternativas, la primera considerando un diseño “sobrado” (A1-B1); la segunda, consiste en un diseño basado en criterios de confiabilidad (A2-B2) y la tercera, se refiere a un diseño a costo mínimo (A3-B3).

Se obtuvieron valores aleatorios, tanto para el valor de la demanda en los nodos, como para los tramos en el coeficiente de rugosidad C en la ecuación de *Hazen Williams*; se observó que conforme el número de iteraciones crece, el valor de la confiabilidad presenta menos variaciones, es decir, que para un número grande de iteraciones el valor de la confiabilidad tiende a estabilizarse.

VII.1.1 Demanda aleatoria

Mediante la utilización del programa de Análisis de Riesgo y Confiabilidad *ARYC*(Ramírez, Bourguett), en cada caso se realizaron 300 iteraciones para obtener los valores de confiabilidad nodal y del sistema (mínima, media aritmética y promedio pesado); tal como lo muestran las *tablas 7.5 - 7.6* y *figuras 7.4 -7.5*, para un coeficiente de variación de 1.4, las

confiabilidades para las alternativas "sobrada" (A1-B1) y contable (A2-B2) son idénticas e igual al 100%, no así para el caso de la red diseñada a costo mínimo (A3-B3) que presenta una confiabilidad mínima de 84.88 % en el nodo cinco y una confiabilidad media del sistema obtenida por promedio pesado de 94.62 %.

Nº DE NODO	ALTERNATIVA		
	A-1	A-2	A-3
1	100.00	100.00	91.68
2	100.00	100.00	98.34
3	100.00	100.00	97.84
4	100.00	100.00	99.81
5	100.00	100.00	96.87
6	100.00	99.93	84.88
7	100.00	100.00	100.00
8	100.00	99.98	97.71
9	100.00	100.00	100.00
10	100.00	100.00	100.00
11	100.00	100.00	98.46
12	100.00	100.00	97.67
13	100.00	100.00	91.21
14	100.00	100.00	100.00
Cmln	100.00	100.00	84.88
Cma	100.00	100.00	96.75
Ccp	100.00	100.00	94.62

Tabla 7.5 Confiabilidad nodal para demanda aleatoria utilizando un C.V de 1.4 (sistema 1)

Nº DE NODO	ALTERNATIVA		
	B-1	B-2	B-3
1	100.00	99.72	88.56
2	100.00	99.95	90.97
3	100.00	100.00	96.94
4	100.00	99.68	78.01
5	100.00	99.78	94.91
6	100.00	98.58	84.92
7	100.00	100.00	100.00
8	100.00	100.00	97.52
9	100.00	100.00	99.86
10	100.00	100.00	100.00
11	100.00	100.00	99.52
12	100.00	100.00	98.82
13	100.00	99.70	93.85
14	100.00	100.00	100.00
Cmln	100.00	98.58	78.01
Cma	100.00	99.77	94.51
Ccp	100.00	99.55	91.95

Tabla 7.6 Confiabilidad nodal para demanda aleatoria utilizando un C.V de 1.4 (sistema 2)

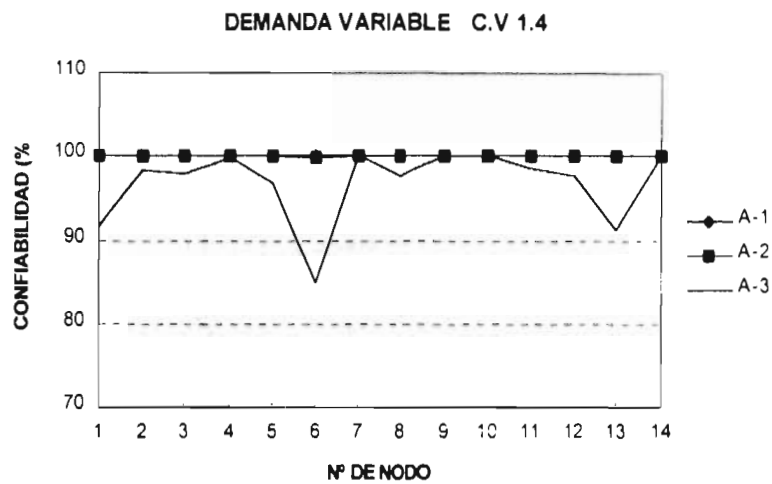


Figura 7.3 Confiabilidad nodal del sistema 1

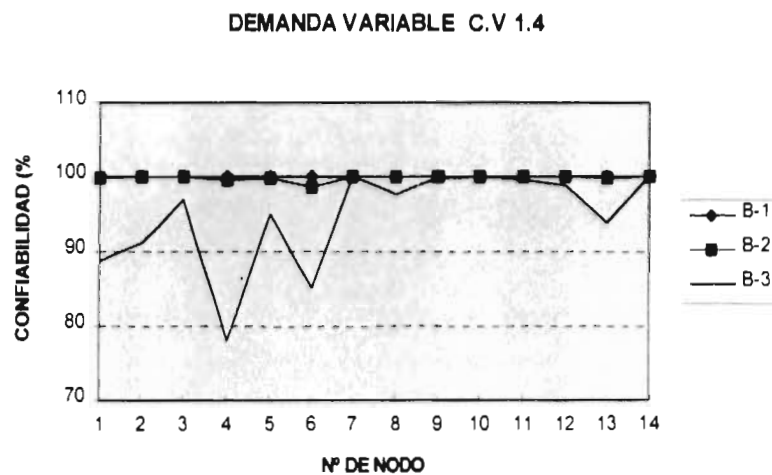


Figura 7.4 Confiabilidad nodal para el sistema 2

De la misma forma, generando valores aleatorios de demanda para diferentes coeficientes de variación **tabla 7.7**, se presenta en la **figura 7.5** los valores graficados para la confiabilidad del sistema obtenida por un promedio pesado, de ella se puede inferir que a medida que el

coeficiente de variación se incrementa, la confiabilidad del sistema se reduce, esto es lógico si se considera que un mayor coeficiente implica una mayor incertidumbre en los datos.

COEF. DE VAR.	ALTERNATIVA		
	A-1	A-2	A-3
0.6	100.000	100.000	99.485
0.8	100.000	100.000	99.240
1	100.000	100.000	98.182
1.2	100.000	99.999	97.346
1.4	100.000	99.977	94.622

Tabla 7.7 Confiabilidad del sistema por promedio para demanda variable (sistema 1)

COEF. DE VAR.	ALTERNATIVA		
	B-1	B-2	B-3
0.6	100.000	99.999	99.169
0.8	100.000	99.999	98.312
1	100.000	99.999	96.856
1.2	100.000	99.985	94.640
1.4	100.000	99.545	91.945

Tabla 7.8 Confiabilidad del sistema por pesado para demanda variable (sistema 2)

Realizando iteraciones para el sistema 2, las mismas características de confiabilidad, se presentan en la **tabla 7.8**, los valores de confiabilidad nodal y del sistema para un coeficiente de variación de 1.4, nuevamente se observa que la confiabilidad para las alternativas "sobrada" (B1) es del 100% en todos los nodos; en el diseño confiable (B2) se presenta una confiabilidad mínima en el nodo seis igual a 98.58 % y una confiabilidad del sistema por promedio pesado de 99.55 % la cual se considera aceptable; en el diseño a costo mínimo, se presenta en el nodo cuatro la menor confiabilidad con un valor del 78.01% y una confiabilidad del sistema por promedio pesado del 91%, como se puede apreciar en la **figura 7.6**, se presenta nuevamente una gran diferencia en la confiabilidad nodal y del sistema ante eventos de demanda aleatoria en los diseños a costo mínimo y los diseños sobrado y confiables, se podría decir que tanto el diseño sobrado como el diseño confiable proporcionan un valor aceptable de la confiabilidad ante eventos de demanda aleatoria, con la diferencia de que el diseño confiable la proporciona a un costo mucho menor. Otro de los puntos que se pueden notar, se refiere a las confiabilidades medias de las redes abiertas (Sistema 1) y cerradas (Sistema 2), de los cuales se observó que las confiabilidades nodales y del sistema son ligeramente menores en la red cerrada en relación a los resultados obtenidos en la red abierta, esto podría ser explicado por el hecho de que en una red abierta se presentan diámetros mayores debido a que se diseñan sin considerar trayectorias alternas de suministro, lo que trae como consecuencia que el tramo tenga una mayor capacidad de transporte, sin embargo, la red cerrada proporciona ventajas mucho mayores que se apreciarán con mejor claridad en la aplicación mecánica.

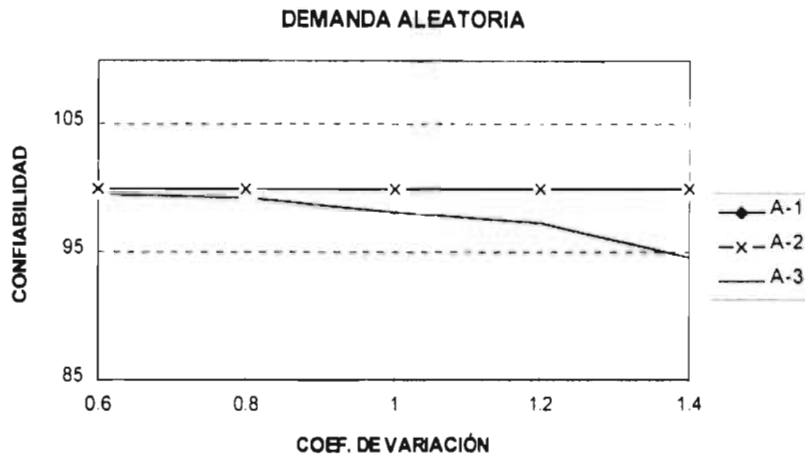


Figura 7.5 Confiabilidad del sistema por promedio pesado ante demanda variable (sistema 1)

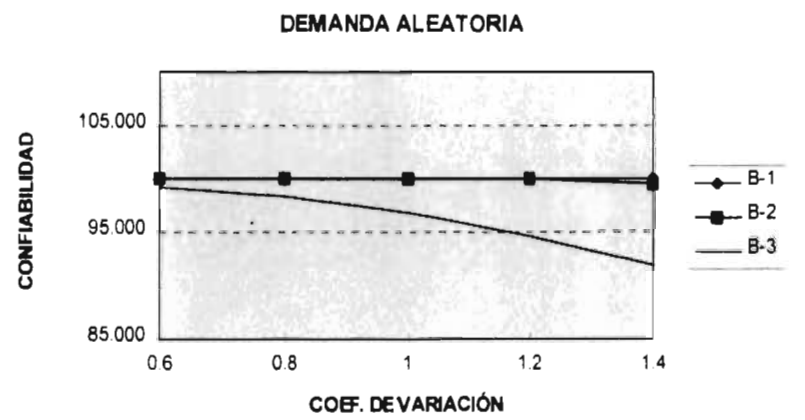


Figura 7.6 Confiabilidad del sistema por promedio pesado ante demanda variable (sistema 2)

VII.1.2 Rugosidad aleatoria

Al igual que para la demanda aleatoria, mediante el programa ARYC(Ramirez.Bourgett) se generaron 300 iteraciones o escenarios de simulación para valores aleatorios de cada tramo a partir del coeficiente de rugosidad medio, en este caso el valor de C en la ecuación de *Hazen Williams*, y observar el comportamiento de la confiabilidad del sistema a medida que el valor medio del coeficiente se reduce, con lo cual se pretende simular el envejecimiento del sistema.

En la **tabla 7.9**, se presentan los valores de la confiabilidad del sistema obtenida por promedio pesado, para las alternativas $A1$, $A2$ y $A3$ de la red abierta. Se observa como para las alternativas $A1$ y $A2$ aún en la situación más desfavorable (coeficiente de rugosidad igual a 70), la confiabilidad del sistema es del 100%, no así para la alternativa $A3$, que en las tres combinaciones presenta una confiabilidad del sistema menor al 100% **figura 7.7**, presentando en el caso del coeficiente de rugosidad igual a 70 un valor medio en la confiabilidad del sistema igual a 67.95 % y una confiabilidad mínima de 32.46 % en el nodo seis.

Nº DE ALTERNATIV A	VALOR MEDIO DEL COEF. DE RUGOSIDAD		
	CR-70	CR-100	CR-130
A-1	100.000	100.000	100.000
A-2	100.000	100.000	100.000
A-3	67.949	94.600	99.554

Tabla 7.9 Confiabilidad del sistema ante rugosidad variable (sistema 1)

De la misma forma se presentan en la **tabla 7.10** los resultados de la confiabilidad del sistema obtenida por promedio pesado, se analizaron las tres alternativas del sistema 2, $B1$, $B2$ y $B3$, y al igual que en el caso anterior las confiabilidades nodales y del sistema del diseño "sobrado" $B1$ resultaron del 100%; para el diseño confiable $B2$ resultaron con una confiabilidad media del sistema del 97.44 % resultando una confiabilidad mínima en el nodo 13 del 89.23 %, y en la alternativa a costo mínimo se presentó una confiabilidad media del sistema del 44.05% y una confiabilidad mínima del 5.70 % en el nodo cuatro **figura 7.8**.

Nº DE ALTERNATIV A	VALOR MEDIO DEL COEF. DE RUGOSIDAD		
	CR-70	CR-100	CR-130
B-1	100.000	100.000	100.000
B-2	97.439	99.955	100.000
B-3	44.046	87.420	99.280

Tabla 7.10 Confiabilidad del sistema ante rugosidad variable (sistema 2)

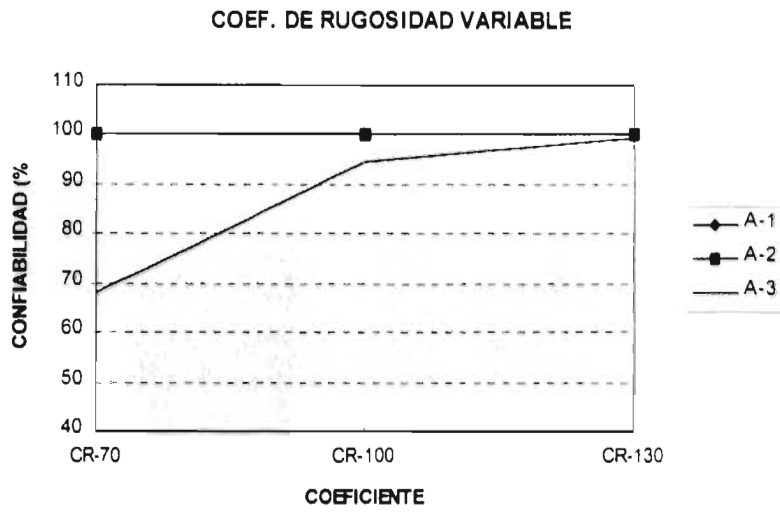


Figura 7.7 Confiabilidad del sistema ante coeficiente de rugosidad variable (sistema 1)

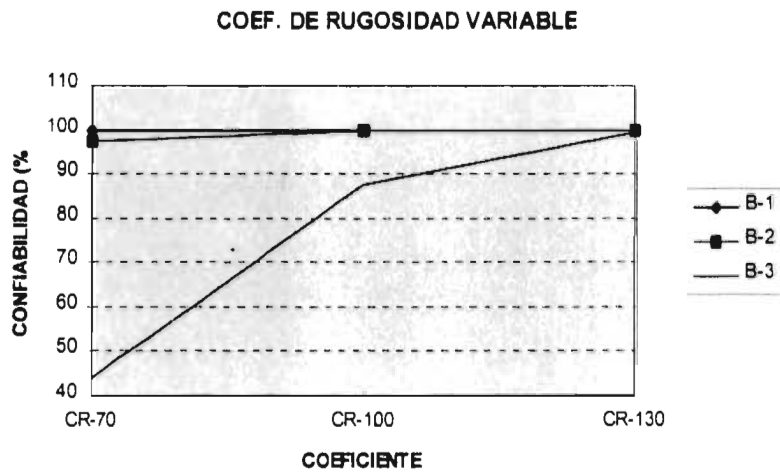


Figura 7.8 Confiabilidad del sistema ante coeficiente de rugosidad aleatorio (sistema 2)

VII.2 Aplicación mecánica.

Para los *sistemas 1 y 2*, se presenta el análisis mecánico de confiabilidad, el cual consiste en evaluar el sistema de distribución ante eventos de falla de sus componentes (tramos) y determinar el impacto que produce dicha falla.

En esta aplicación igualmente se consideran los dos sistemas mostrados en las *figuras 1 y 2*, de igual forma se analizarán tres alternativas, que en este caso distinguiremos como: diseño sobrado como alternativa "A", diseño sobrado como "B" y diseño a costo mínimo como "C".

VII.2.1 SISTEMA I

TABLA 1: utilizando la *ecuación 35* se calcularon para cada alternativa, el número de fallas al año que se producen en tramos de la red, en función del diámetro y longitud de los tramos de tubería.

TABLAS I-A, I-B Y I-C: en estas tablas se presentan los resultados de carga de presión, correspondientes a la simulación de falla de cada tramo. Del resultado de estas tablas obtenemos las presiones máximas, mínimas y medias que se presentarían para los casos en que se presentan fallas de los tramos. Así mismo, de estos resultados podemos identificar los tramos que son considerados grupos de corte (cut-set mínimo), es decir, por ejemplo en la tabla 2, el tramo 9 es considerado cut-set dado que al simular su falla se provocó falla de presión en algunos nodos del sistema.

TABLAS I-D, I-E Y I-F: en estas tablas únicamente se consideran los tramos cut-set, cabe hacer mención que se considera falla en el gasto cuando la presión suministrada es menor o igual a cero en el nodo de demanda, aplicando las ecuaciones 44 y 45 obtenemos el valor del riesgo ante fallas de presión y gasto, respectivamente las *confiabilidades* para cada caso se obtienen restando a la unidad el valor del riesgo, el valor considerado como *confiabilidad nodal total* se obtiene del producto de las confiabilidades nodales para presión y gasto.

El valor del riesgo por falla mecánica, se obtiene de la aplicación de la ecuación 40 representada en porcentaje y el valor correspondiente a la confiabilidad se obtiene de la resta al cien por ciento. La confiabilidad nodal media es igual a la sumatoria de las confiabilidades totales entre el número total de nodos, expresada en porcentaje.

En la *tabla 1-G* se presenta la comparación de las confiabilidades nodales para las tres alternativas, en la *figura 1-G* se puede apreciar como los diseños A y B tienen un comportamiento similar, no así el diseño C, que muestra una fuerte diferencia para los primeros seis nodos, resultando ser el nodo uno el de menor confiabilidad, con un valor de 77%.

El déficit de gasto por nodo (*DFG*) es igual al producto del *riesgo de gasto* y el *gasto de diseño* correspondiente al nodo en l/s. Considerando una dotación de 200 l/hab/día se obtiene el total de usuarios sin servicio que se presentarían anualmente debido al déficit provocado en cada nodo de demanda, el dato correspondiente al sistema aparece encerrada en el recuadro de la esquina inferior derecha.

En la **tabla y figura 1-H** se presenta una comparación en forma gráfica de los déficits de gasto esperado en cada nodo, presentando el diseño acosto mínimo diferencias de 9 y 8.5 l/s con respecto a los gastos del diseño sobrado y diseño confiable.

VII.2.2 SISTEMA II

De manera semejante al caso anterior, en la tabla 2-A se presentan el número de fallas al año que se producen en tramos de la red, en función del diámetro y longitud de los tramos de tubería, se puede observar que en terminos generales se presentan valores más altos a los registrados por el sistema 1, esto se debe a que la red abierta del sistema 1 contempla diámetros mayores, sin embargo, como se verá más adelante, a pesar de existir una probabilidad mayor de falla, el impacto de la misma en la red es de mucho menor riesgo.

TABLAS 2-A, 2-B Y 2-C: en estas tablas se presentan los resultados de carga de presión, correspondientes a la simulación de falla de cada tramo. Del resultado de estas tablas obtenemos las presiones máximas, mínimas y medias que se presentarían para los casos en que se presentan fallas de los tramos. Así mismo, de estos resultados se identifican los tramos que son considerados grupos de corte (cut-set mínimo).

TABLAS 2-D, 2-E Y 2-F: en estas tablas únicamente se consideran los tramos cut-set, como puede apreciarse existe un número menor de tramos cut-set en este sistema comparado con el sistema 1, esto se explica por establecer trayectorias alternas de suministro para un nodo dado, aplicando las ecuaciones 44 y 45 obtenemos el valor del *riesgo* ante fallas de presión y gasto, respectivamente las *confiabilidades* para cada caso se obtienen restando a la unidad el valor del riesgo, el valor considerado como *confiabilidad nodal total* se obtiene del producto de las confiabilidades nodales para presión y gasto. El valor del riesgo por falla mecánica, se obtiene de la aplicación de la ecuación 40 representada en porcentaje y el valor correspondiente a la confiabilidad se obtiene de la resta al cien por ciento. De la comparación de estos resultados con los del sistema 1, puede observarse como el valor de la confiabilidad nodal media se favorece por el diseño de sistemas cerradoses en lugar de los sistemas abiertos.

En la **tabla 2-G** se presenta la comparación de las confiabilidades nodales para las tres alternativas, en la **figura 2-G** es notable como se ha incrementado la confiabilidad en los nodos en comparación a la presentada en el sistema 1 (red abierta), en el sistema 2 la alternativa A presenta una confiabilidad nodal por arriba del 92% en todo su nodos, la alternativa B al canza de igual manera valores por enciam del 90% exceptuando el nodo 13 donde se presenta un valor del 89%; la alternativa C nuevamente es la que presenta mayor

fragilidad ante la presencia de fallas, presentando confiabilidad mínima en el nodo seis con un valor del 76%.

En la *tabla y figura 2-H* se presenta una comparación en forma gráfica de los déficits de gasto esperado en cada nodo, resultando el diseño a costo mínimo de casi el doble de del déficit ocurrido en la alternativa *B*, sin embargo, cabe hacer mención que el déficit de gasto esperado en este diseño es inferior inclusive al déficit de gasto esperado calculado para la alternativa *A* del sistema, lo que comprueba una vez más, que los sistemas cerrados presentan mejor confiabilidad en comparación con los sistemas abiertos.

De los resultados obtenidos, se comprueba que los sistemas cerrados proporcionan un servicio de suministro mucho más confiable en comparación a los sistemas abiertos, esto se debe a que el sistema cerrado cumple con condiciones de redundancia, es decir, que existen tramos que proporcionan una trayectoria alterna al flujo en caso de falla de algún otro tramo; también puede observarse en la *tabla 7.11 y 7.12*, que el número de grupos de corte es mayor en un sistema abierto que un cerrado, aconteciendo el mismo suceso en un diseño a costo mínimo que en uno basado en criterios de confiabilidad, esto trae como consecuencia, considerando los dos sistemas, que para las alternativas *A* (diseño "sobrado") y *B* (diseño basado en confiabilidad) presenten un menor riesgo de falla ya sea de presión y/o gasto en comparación con la alternativa *C* (diseño a costo mínimo), observándose que los diseños basados a costo mínimo son muy frágiles ante las condiciones de emergencia. *tabla 7.13*.

Tabla 7.11. Grupos de corte mínimo del sistema 1 y nodos respectivos.

Falla de tramo simple	Alternativa A1	Alternativa A2	Alternativa A3
Sistema 1	1,2,3,4,5,6,8,9,11 y 13	1,2,3,4,5,6,8,9,10,11 y 13	1,2,3,4,5,6,8,9,10,11,12,13 y 14
Nodo 1	1,2,5 y 9	1,2,5 y 9	1,2,5,9 y 10
Nodo 2	1,5 y 9	1,5 y 9	1,5,9 y 10
Nodo 3	1,5 y 9	1,4 y 8	1,4 y 8
Nodo 4	1,6 y 8	1,6 y 8	1,6 y 8
Nodo 5	1, 9 y 13	1,9 y 13	1,9,12,13 y 14
Nodo 6	1,3,9 y 13	1,3,9,10 y 13	1,3,9,10,12,13 y 14
Nodo 7	1 y 9	1 y 9	1,9,12 y 14
Nodo 8	1 y 9	1,9 y 10	1,9 y 10
Nodo 9	1 y 8	1 y 8	1 y 8
Nodo 10	1	1	1
Nodo 11	1 y 9	1 y 9	1 y 9
Nodo 12	1 y 9	1,9 y 10	1,9 y 14
Nodo 13	1,9 y 11	1,9 y 11	1,9 y 11
Nodo 14	1	1	1

Sistema 2	1,3,6 y 11	1,3,6,9 y 11	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11 ,12,13,14 y 16
Nodo 1	1	1	1,4,5,7,8,9,10,13 y 16
Nodo 2	1	1	1,4,5,7,8 y 9
Nodo 3	1	1	1,4,8,9 y 13
Nodo 4	1 y 6	1 y 6	1,6,8 y 9
Nodo 5	1	1	1,7,8,9,10 y 13
Nodo 6	1 y 3	1 y 3	1,3,7,8,9,10,12,13 y 14
Nodo 7	1	1	1,7,9 y 10
Nodo 8	1	1 y 9	1,8,9 y 10
Nodo 9	1	1	1,8 y 9
Nodo 10	1	1	1
Nodo 11	1	1 y 9	1 y 9
Nodo 12	1	1 y 9	1,7,9,11 y 14
Nodo 13	1	1,9 y 11	1,8 y 9
Nodo 14	1	1	1

Tabla 7.13. Índices de riesgo.

Riesgo Anual						
Falla mecánica del sistema	16.40 %	22.00 %	38.60 %	7.80 %	13.1 %	47.6 %
Déficit de gasto DFG l/s	17.95	18.40	26.94	10.36	12.42	23.86
Usuarios sin servicio USS	7751	7949	11636	4472	5366	10311

VII.2.3 Zonas de riesgo

A partir de la información obtenida anteriormente, es posible conocer el impacto que produciría la falla de un tramo de la red, además de la ubicación de las zonas afectadas; por ejemplo, considerando la alternativa más frágil del sistema 2 (*alternativa C*), ante el evento de falla de uno de sus tramos, se puede observar en la *figura 7.9* cuando de falla el tramo 9 (resaltado en negro) el impacto que produce la falla y las zonas o áreas de afectación del sistema, lo que permite un conocimiento específico de la operación del sistema.

de falla el tramo 9 (resaltado en negro) el impacto que produce la falla y las zonas o áreas de afectación del sistema, lo que permite un conocimiento específico de la operación del sistema.

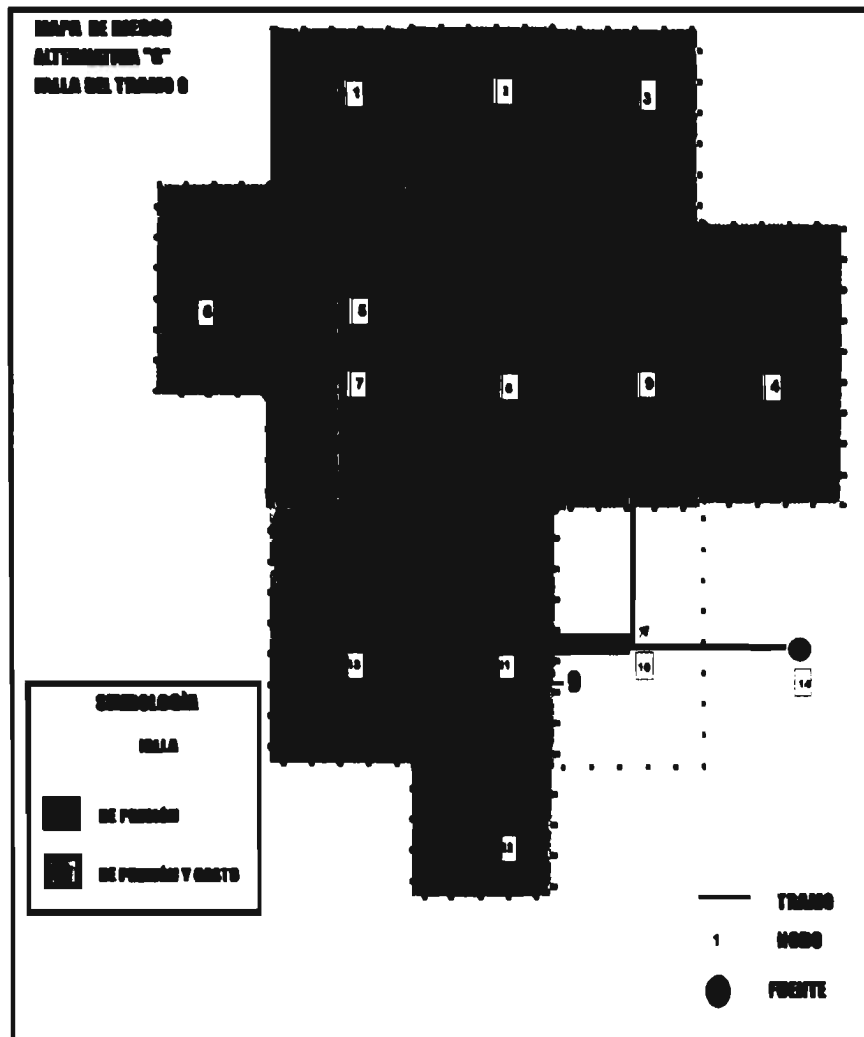
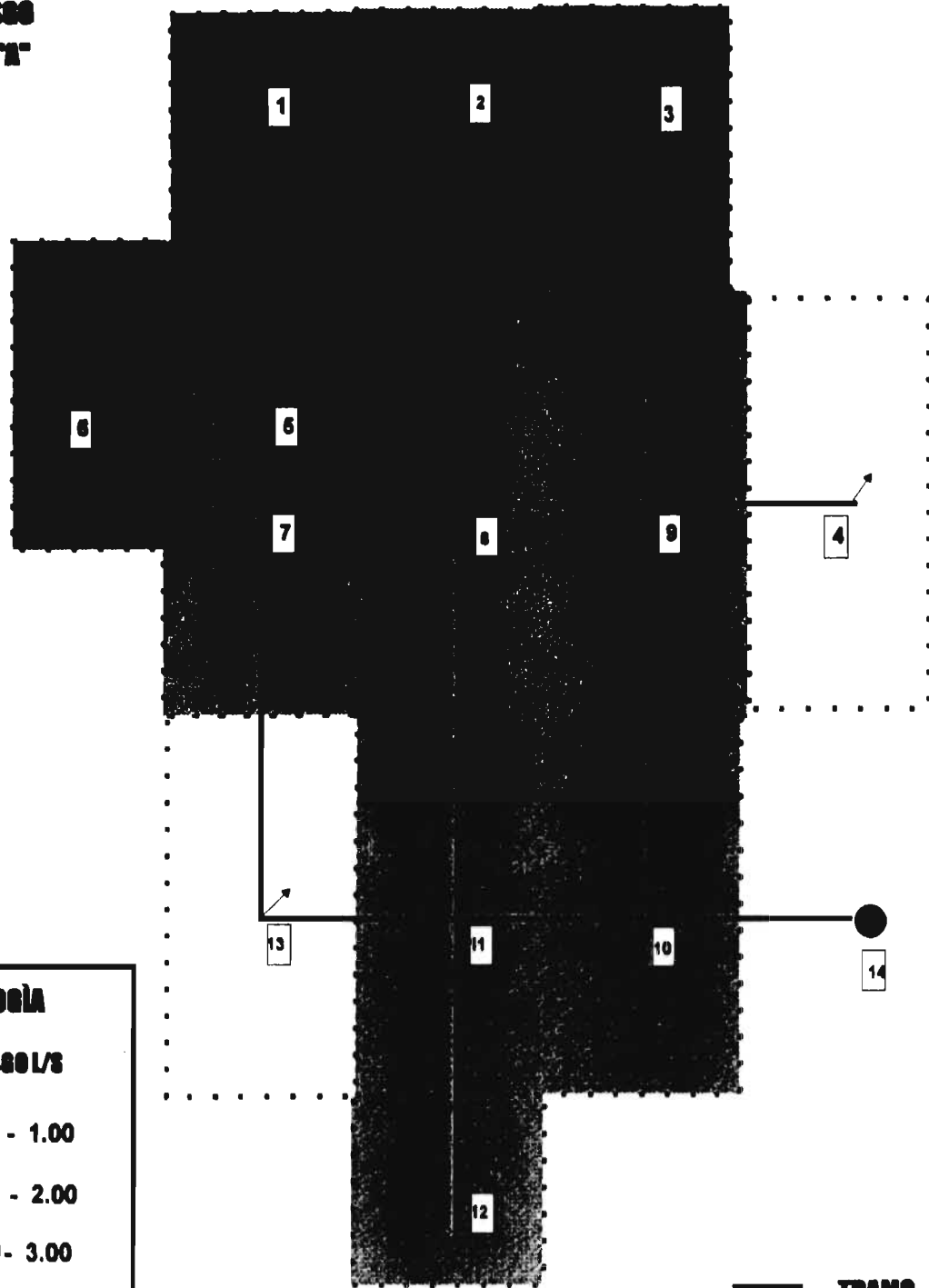










Fig. 7.9 Representación de la falla del tramo 9 de la red en el sistema 2

A manera de ejemplo, en las figuras siguientes presentaremos los mapas de riesgo correspondiente a los déficits de gasto esperado que se producen en el sistema 2, para las alternativas A, B y C, a partir de las cuales se puede observar como el diseño a costo mínimo (alternativa C) presenta un mayor "colorido" signo de un mayor riesgo.

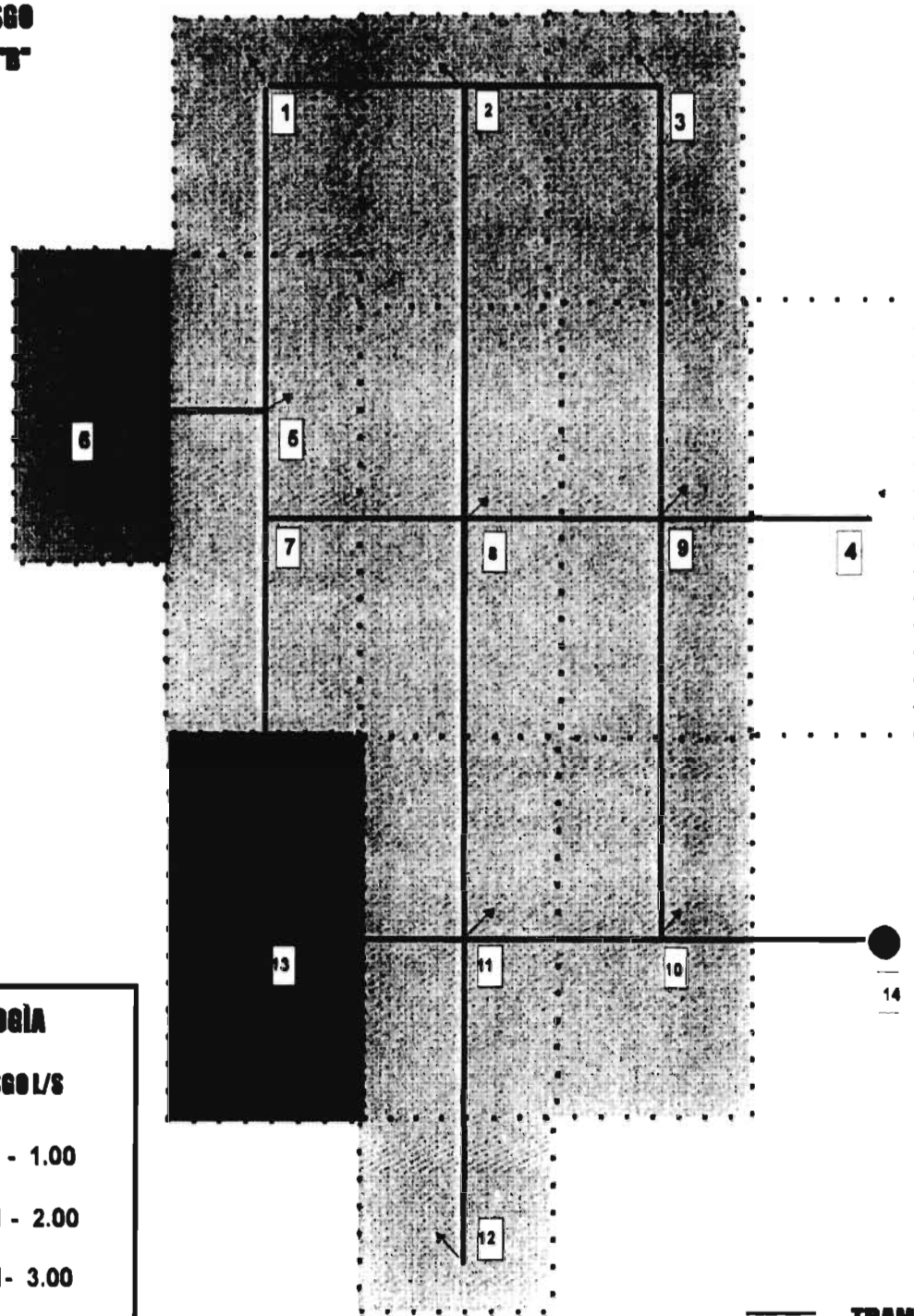
**MAPA DE RIESGO
ALTERNATIVA "A"**



SIMBOLOGÍA	
RIESGO L/S	
	0.00 - 1.00
	1.01 - 2.00
	2.01 - 3.00
	3.01 - 4.00
	4.01 - 5.00
	> 5.00







	TRAMO
1	NODO
	FUENTE

**MAPA DE RIESGO
ALTERNATIVA "B"**



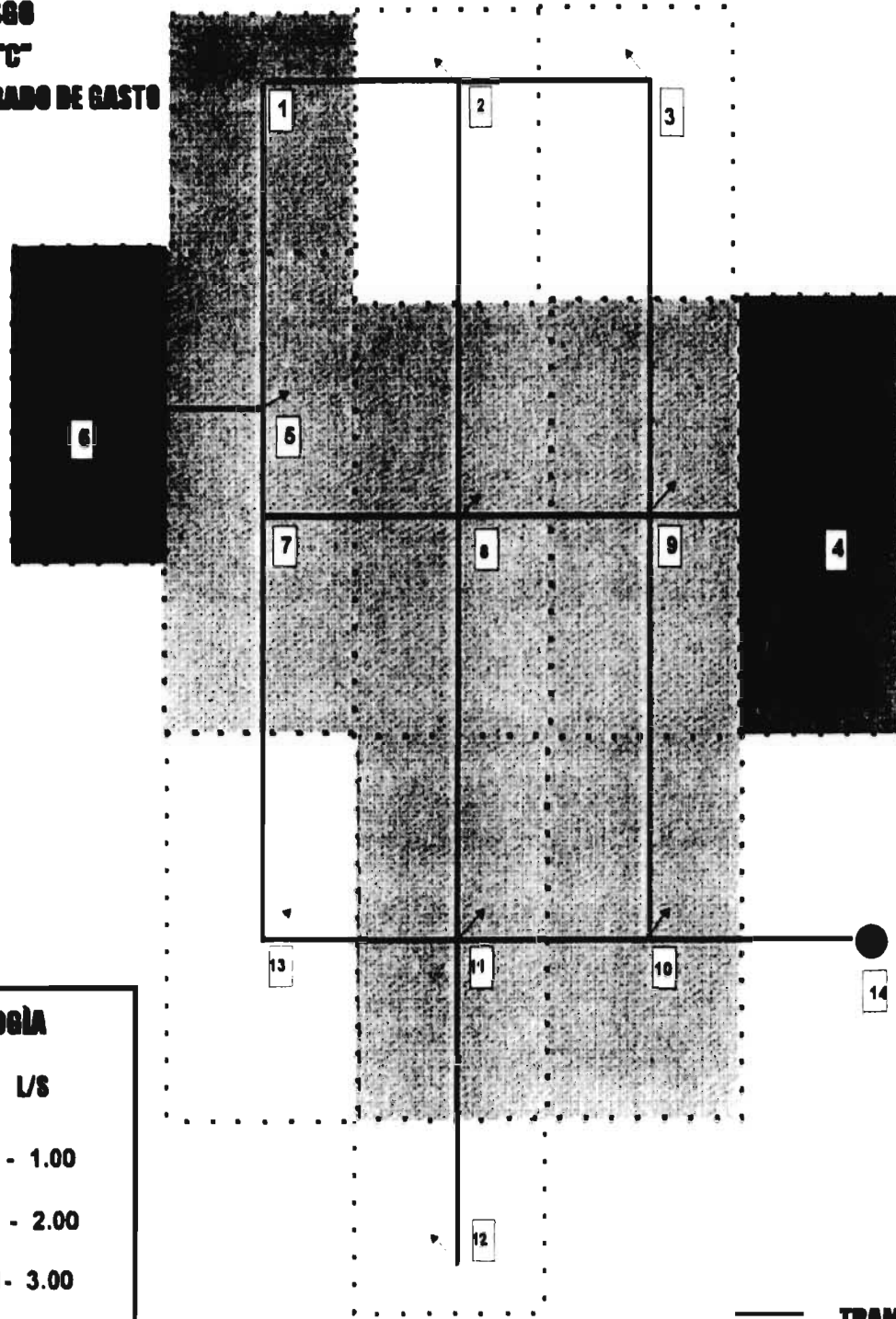
SIMBOLOGÍA

RIESGO L/S

	0.00 - 1.00
	1.01 - 2.00
	2.01 - 3.00
	3.01 - 4.00
	4.01 - 5.00
	> 5.00

	TRAMO
	NOBO
	FUENTE

**MAPA DE RIESGO
ALTERNATIVA "C"
DÉFICIT ESPERADO DE GASTO**



SIMBOLOGÍA

DÉF L/S	
	0.00 - 1.00
	1.01 - 2.00
	2.01 - 3.00
	3.01 - 4.00
	4.01 - 5.00
	> 5.00

	TRAMO
1	NODO
	FUENTE

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 1

CONFIABILIDAD MECÁNICA
SISTEMA 1. RED ABIERTA

N° DE TRAMO	Longitud mts	Diámetro de alternativas (mm)			Número de fallas al año		
		"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"
1	304.80	914	914	500	0.01719	0.01719	0.02235
2	213.36	688	576	152	0.01343	0.01455	0.03932
3	304.80	688	405	279	0.01919	0.02522	0.03259
4	304.80	688	451	152	0.01919	0.02365	0.05617
5	304.80	688	688	235	0.01919	0.01919	0.03739
6	304.80	688	535	235	0.01919	0.02157	0.03739
7	213.36	909	909	189	0.01206	0.01206	0.03174
8	304.80	688	515	329	0.01919	0.02200	0.02889
9	213.36	688	747	406	0.01343	0.01298	0.01763
10	304.80	688	355	329	0.01919	0.02743	0.02889
11	304.80	688	297	305	0.01919	0.03112	0.03049
12	304.80	910	892	305	0.01722	0.01734	0.03049
13	106.68	910	518	329	0.00603	0.00768	0.01011
14	213.36	910	248	305	0.01206	0.02502	0.02135

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 1-A

CONFIABILIDAD MECÁNICA

PRESIONES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE FALLA DE LOS TRAMOS

SISTEMA No. 1 ALTERNATIVA "A"

NÚMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0170	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00
2	0.0133	0.00	42.29	48.18	50.00	45.04	40.43	43.51	38.32	43.91	41.51	35.30	38.34	31.64	20.00
3	0.0190	42.06	42.38	48.20	50.03	45.13	0.00	40.60	38.41	43.94	41.54	35.88	38.43	31.72	20.00
4	0.0190	41.95	42.26	0.00	50.01	45.02	40.41	43.49	48.30	43.92	41.51	35.28	38.32	31.62	20.00
5	0.0190	0.00	0.00	48.19	50.01	45.07	40.47	43.55	38.36	43.92	41.52	35.33	38.37	31.67	20.00
6	0.0190	41.96	42.27	48.21	0.00	45.02	40.42	43.50	38.31	43.94	41.52	35.29	38.33	31.63	20.00
7	0.0120	41.94	42.25	48.17	49.99	45.01	40.40	43.48	38.28	43.90	41.50	35.27	38.31	31.61	20.00
8	0.0190	41.99	42.30	0.00	0.00	45.05	40.45	43.52	38.33	0.00	41.54	35.32	38.36	31.65	20.00
9	0.0133	0.00	0.00	48.26	50.08	0.00	0.00	0.00	0.00	43.99	41.59	0.00	0.00	0.00	20.00
10	0.0190	41.90	42.21	48.17	49.99	44.97	40.37	43.45	38.25	43.90	41.50	35.27	38.29	31.61	20.00
11	0.0190	41.97	42.28	48.18	50.00	45.04	40.43	43.51	38.32	43.91	41.51	35.30	38.34	0.00	20.00
12	0.0171	41.85	42.16	48.17	49.99	44.90	40.30	43.38	38.20	43.90	41.50	35.77	38.22	31.61	20.00
13	0.0060	42.01	42.40	48.21	50.54	0.00	0.00	43.63	38.44	43.94	41.54	35.40	38.45	31.74	20.00
14	0.0120	41.82	42.13	48.17	49.99	48.88	40.27	43.35	38.17	43.90	41.50	35.27	38.17	31.61	20.00
PRESIÓN DE DISEÑO		41.94	42.25	48.17	49.99	45.00	40.40	43.48	38.29	43.90	41.50	35.27	38.31	31.61	20.00
PRESIÓN MÍNIMA		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	41.50	0.00	0.00	0.00	20.00
PRESIÓN MEDIA		41.94	42.26	48.18	50.00	45.02	40.40	43.49	38.32	43.91	41.51	35.30	38.33	31.62	20.00
PRESIÓN MÁXIMA		42.06	42.40	48.26	50.54	48.88	40.47	43.63	48.30	43.99	41.59	35.88	38.45	31.74	20.00

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 1-B

CONFIABILIDAD MECÁNICA
PRESIONES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE FALLA DE LOS TRAMOS

SISTEMA No. 1 ALTERNATIVA "B"

NUMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0170	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00
2	0.0144	0.00	40.95	48.04	49.87	43.64	38.73	42.17	36.98	43.79	41.51	35.34	36.99	31.56	20.00
3	0.0249	41.43	41.74	48.07	49.89	44.50	0.00	42.97	37.78	43.82	41.54	35.40	37.79	31.62	20.00
4	0.0234	40.31	40.63	0.00	49.92	43.33	38.41	41.85	36.66	43.84	41.51	35.33	36.67	31.55	20.00
5	0.0190	0.00	0.00	48.05	49.88	43.94	39.02	42.46	37.28	43.80	41.52	35.36	37.28	31.58	20.00
6	0.0213	40.32	40.64	48.15	0.00	43.34	38.42	41.86	36.67	43.90	41.52	35.34	36.68	31.56	20.00
7	0.0120	41.37	41.64	48.03	49.86	39.59	34.67	38.11	37.72	43.78	41.50	35.32	32.94	31.54	20.00
8	0.0218	40.35	40.66	0.00	0.00	43.36	38.45	41.89	36.70	0.00	41.54	35.36	36.71	31.58	20.00
9	0.0129	0.00	0.00	48.12	49.95	0.00	0.00	0.00	0.00	43.87	41.59	0.00	0.00	0.00	20.00
10	0.0271	28.00	28.31	48.03	49.86	31.02	26.11	29.55	24.35	43.78	41.50	35.32	24.40	31.54	20.00
11	0.0306	40.33	40.64	48.04	49.87	43.34	38.43	41.87	36.68	43.79	41.51	35.34	36.69	0.00	20.00
12	0.0172	39.14	39.45	48.03	49.86	42.15	37.23	40.67	35.49	43.78	41.50	35.32	38.17	31.54	20.00
13	0.0077	41.64	41.95	48.08	49.90	0.00	0.00	43.18	37.99	43.83	41.54	35.42	38.00	31.64	20.00
14	0.0247	38.52	38.83	48.03	49.86	41.53	36.61	40.05	34.87	43.78	41.50	35.32	34.87	31.54	20.00
PRESIÓN DE DISEÑO		40.30	40.62	48.03	49.86	43.32	38.40	41.84	36.65	43.78	41.50	35.32	36.66	31.54	20.00
PRESIÓN MÍNIMA		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	41.50	0.00	0.00	0.00	20.00
PRESIÓN MEDIA		40.31	40.64	48.04	49.87	43.33	37.23	41.86	36.68	43.79	41.51	35.34	36.69	31.55	20.00
PRESIÓN MÁXIMA		41.64	41.95	48.15	49.95	44.50	39.02	43.18	37.99	43.90	41.59	35.42	38.17	31.64	20.00

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 1-C

CONFIABILIDAD MECÁNICA
PRESIONES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE FALLA DE LOS TRAMOS

SISTEMA No. 1 ALTERNATIVA "C"

NUMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0221	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00
2	0.0386	0.00	37.80	42.10	45.66	39.14	32.49	38.10	34.20	40.88	39.84	32.24	34.05	28.47	20.00
3	0.0321	35.94	38.39	42.63	46.19	42.60	0.00	41.09	35.74	41.41	40.37	33.44	36.12	29.68	20.00
4	0.0546	33.71	36.16	0.00	46.14	38.71	32.06	37.67	33.51	41.36	39.84	31.97	33.71	28.21	20.00
5	0.0367	0.00	0.00	42.28	45.85	39.70	33.06	38.66	34.99	41.07	40.03	32.67	34.54	28.91	20.00
6	0.0367	33.90	36.34	43.14	0.00	38.89	32.25	37.85	33.70	41.93	40.03	32.16	33.89	28.40	20.00
7	0.0312	34.09	36.54	41.90	45.47	37.04	30.39	36.00	33.89	40.69	39.65	31.78	32.84	28.01	20.00
8	0.0285	34.40	36.85	0.00	0.00	39.40	32.75	38.36	34.20	0.00	40.53	32.66	34.39	28.90	20.00
9	0.0175	0.00	0.00	43.60	47.16	0.00	0.00	0.00	0.00	42.38	41.34	0.00	0.00	0.00	20.00
10	0.0285	14.25	16.69	41.90	45.47	29.92	23.27	28.88	14.05	40.69	39.65	31.78	29.71	28.01	20.00
11	0.0300	33.97	36.42	42.10	45.66	38.97	32.33	37.93	33.77	40.88	39.84	32.24	33.97	0.00	20.00
12	0.0300	30.86	33.31	41.90	45.47	22.31	15.66	21.27	30.66	40.69	39.65	31.78	34.75	28.01	20.00
13	0.0101	36.38	38.83	42.79	46.35	0.00	0.00	41.76	36.18	41.57	40.53	33.78	36.64	30.02	20.00
14	0.0211	29.26	32.41	41.90	45.47	15.56	8.91	14.52	29.76	40.69	39.65	31.78	9.24	28.01	20.00
PRESIÓN DE DISEÑO		33.51	35.96	41.90	45.47	38.51	31.86	37.47	33.31	40.69	39.65	31.78	33.51	28.01	20.00
PRESIÓN MÍNIMA		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	39.65	0.00	0.00	0.00	20.00
PRESIÓN MEDIA		33.71	36.34	42.10	45.66	38.71	30.39	37.85	33.77	40.88	39.84	32.16	33.97	28.21	20.00
PRESIÓN MÁXIMA		36.38	38.83	43.60	47.16	42.60	33.06	41.76	36.18	42.38	41.34	33.78	36.64	30.02	20.00

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 1-D

CONFIABILIDAD MECÁNICA
TRAMOS CUT SET

SISTEMA No. 1 ALTERNATIVA "A"

NÚMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0170	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
2	0.0133	1.00													
3	0.0190						1.00								
4	0.0190			1.00											
5	0.0190	1.00	1.00												
6	0.0190				1.00										
8	0.0190			1.00	1.00					1.00					
9	0.0133	1.00	1.00			1.00	1.00	1.00	1.00			1.00	1.00	1.00	
11	0.0190													1.00	
13	0.0060					1.00	1.00								
FALLA DE PRESION		0.063	0.049	0.055	0.055	0.036	0.055	0.030	0.030	0.036	0.017	0.030	0.030	0.049	0.000
Conf. Nodal de Presion		0.937	0.951	0.945	0.945	0.964	0.945	0.970	0.970	0.964	0.983	0.970	0.970	0.951	1.000
FALLA DE GASTO		0.063	0.049	0.055	0.055	0.036	0.055	0.030	0.030	0.036	0.017	0.030	0.030	0.049	0.000
Conf. Nodal de Gasto		0.937	0.951	0.945	0.945	0.964	0.945	0.970	0.970	0.964	0.983	0.970	0.970	0.951	1.000
Conf. Nodal Total		0.878	0.904	0.893	0.893	0.929	0.892	0.940	0.940	0.929	0.966	0.940	0.940	0.904	1.000
riesgo por falla mecanica =						16.4									%
confiabilidad mecanica =						83.6									%
confiabilidad nodal media=						92.5									%
conf. global del sistema por falla mecanica =						77.3									%
DFG por Nodo		1.33	1.05	1.17	2.34	0.77	4.71	0.00	1.29	1.53	0.36	0.65	0.65	2.10	17.94
Usuarios s/serv		576	453	505	1010	334	2033	0	558	662	156	279	279	906	7751

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA I-E

CONFIABILIDAD MECÁNICA
TRAMOS CUT SET

SISTEMA No. 1 ALTERNATIVA "B"

NÚMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
	0.0170	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.0144	1.00													
	0.0249						1.00								
	0.0234			1.00											
	0.0190	1.00	1.00												
	0.0213				1.00										
	0.0218			1.00	1.00					1.00					
	0.0129	1.00	1.00			1.00	0.00	1.00	1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	
	0.0271						0.07		0.13				0.13		
	0.0306													1.00	
	0.0077					1.00	1.00								
AVANCE PRESIÓN		0.063	0.049	0.062	0.060	0.038	0.051	0.030	0.033	0.039	0.017	0.030	0.033	0.061	0.000
de Presión		0.937	0.951	0.938	0.940	0.962	0.949	0.970	0.967	0.961	0.983	0.970	0.967	0.939	1.000
DE GASTO		0.063	0.049	0.062	0.060	0.038	0.050	0.030	0.030	0.039	0.017	0.030	0.030	0.061	0.000
de Gasto		0.937	0.951	0.938	0.940	0.962	0.950	0.970	0.970	0.961	0.983	0.970	0.970	0.939	1.000
Conf. Global Total		0.877	0.905	0.880	0.883	0.926	0.902	0.941	0.938	0.924	0.966	0.941	0.938	0.883	1.000
riesgo por falla mecanica =						22.0	%								
confiabilidad mecanica =						78.0	%								
confiabilidad nodal media=						92.2	%								
conf. global del sistema por falla mecanica =						71.9	%								
DFG por Nodo		1.346	1.040	1.321	2.555	0.798	4.213	0.000	1.272	1.648	0.362	0.636	0.636	2.573	18.401
Usuarios a/serv		582	449	571	1104	345	1820	0	549	712	156	275	275	1112	7949

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA I-F

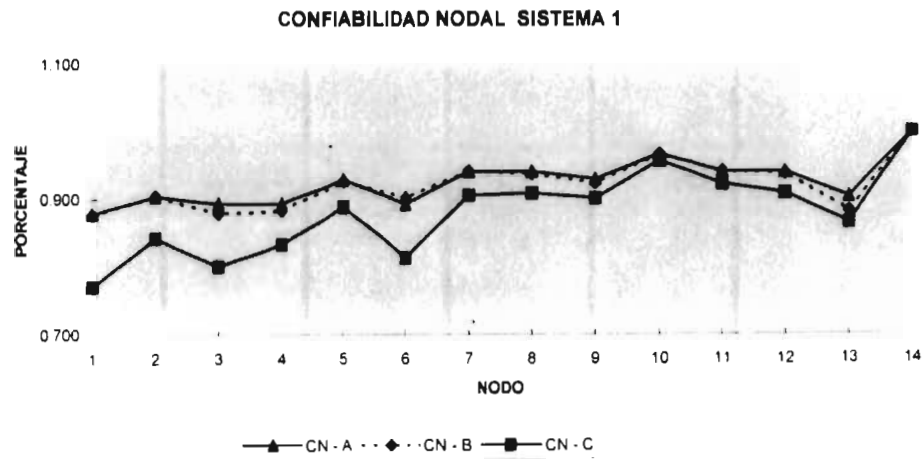
CONFIABILIDAD MECÁNICA
TRAMOS CUT SET

SISTEMA No. 1 ALTERNATIVA "C"

NÚMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0221	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.0386	1.00													
3	0.0321						1.00								
4	0.0546			1.00											
5	0.0367	1.00	1.00												
6	0.0367				1.00										
7	0.0285			1.00	1.00					1.00					
8	0.0175	1.00	1.00			1.00	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	
9	0.0285	0.49	0.40						0.50						
10	0.0300													1.00	
11	0.0300					0.20	0.44	0.24							
12	0.0101					1.00	1.00								
13	0.0211					0.44	0.68	0.48					0.67		
RIESGO DE PRESIÓN		0.129	0.088	0.105	0.087	0.065	0.114	0.057	0.054	0.051	0.022	0.040	0.054	0.070	0.000
RIESGO DE PREDIÓ		0.871	0.912	0.895	0.913	0.935	0.886	0.943	0.946	0.949	0.978	0.960	0.946	0.930	1.000
RIESGO DE GASTO		0.115	0.076	0.105	0.087	0.050	0.082	0.040	0.040	0.051	0.022	0.040	0.040	0.070	0.000
RIESGO TOTAL		0.885	0.924	0.895	0.913	0.950	0.918	0.960	0.960	0.949	0.978	0.960	0.960	0.930	1.000
Conf. Global		0.771	0.843	0.801	0.833	0.888	0.813	0.906	0.909	0.901	0.956	0.922	0.909	0.866	1.000
riesgo por falla mecanica =						38.6									
confiabilidad mecanica =						61.4									
confiabilidad nodal media=						88.0									
conf. global del sistema por falla mecanica =						54.0									
DFG por Nodo		2.439	1.620	2.235	3.708	1.054	6.941	0.000	1.681	2.149	0.470	0.841	0.841	2.957	26.936
Usuarios al/erv		1054	700	965	1602	456	2998	0	726	928	203	363	363	1278	11636

TABLA 1-G
'CONFIABILIDAD NODAL

NODO	CN - A	CN - B	CN - C
1	0.878	0.877	0.771
2	0.904	0.905	0.843
3	0.893	0.880	0.801
4	0.893	0.883	0.833
5	0.929	0.926	0.888
6	0.892	0.902	0.813
7	0.940	0.941	0.906
8	0.940	0.938	0.909
9	0.929	0.924	0.901
10	0.966	0.966	0.956
11	0.940	0.941	0.922
12	0.940	0.938	0.909
13	0.904	0.883	0.866
14	1.000	1.000	1.000

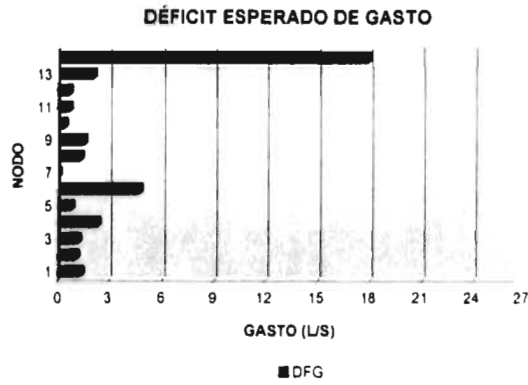


APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 1-H

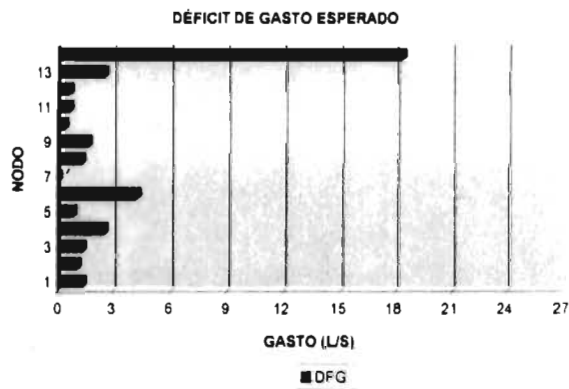
SISTEMA 1
ALTERNATIVA "A"

Nodo	DFG
1	1.330
2	1.050
3	1.170
4	2.340
5	0.770
6	4.710
7	0.000
8	1.290
9	1.530
10	0.360
11	0.650
12	0.650
13	2.100
TOTAL	17.950



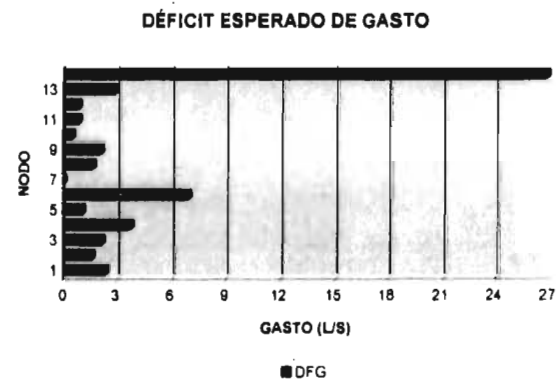
ALTERNATIVA "B"

Nodo	DFG
1	1.346
2	1.040
3	1.321
4	2.555
5	0.798
6	4.213
7	0.000
8	1.272
9	1.648
10	0.362
11	0.636
12	0.636
13	2.573
TOTAL	18.400



ALTERNATIVA "C"

Nodo	DFG
1	2.439
2	1.620
3	2.235
4	3.708
5	1.054
6	6.941
7	0.000
8	1.681
9	2.149
10	0.470
11	0.841
12	0.841
13	2.957
TOTAL	26.936



APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 2

**CONFIABILIDAD MECÁNICA
SISTEMA 2. RED CERRADA**

N° DE TRAMO	LONGITUD mts	Diámetro de alternativas (mm)			Número de fallas al año		
		"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"
1	305	914	600	500	0.0172	0.0204	0.0224
2	213	584	279	152	0.0145	0.0228	0.0393
3	305	584	406	305	0.0207	0.0252	0.0305
4	305	584	215	141	0.0207	0.0404	0.0608
5	305	584	279	152	0.0207	0.0326	0.0562
6	305	584	215	152	0.0207	0.0404	0.0562
7	214	832	279	279	0.0125	0.0229	0.0229
8	305	584	406	305	0.0207	0.0252	0.0305
9	213	832	455	406	0.0125	0.0165	0.0176
10	305	584	406	305	0.0207	0.0252	0.0305
11	305	584	305	279	0.0207	0.0305	0.0326
12	305	832	189	189	0.0178	0.0453	0.0453
13	107	584	254	254	0.0072	0.0123	0.0123
14	213	584	279	215	0.0145	0.0228	0.0282
15	213	584	152	102	0.0145	0.0393	0.0614
16	198	584	305	141	0.0134	0.0198	0.0395
17	213	584	355	254	0.0145	0.0192	0.0246

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 2-A

CONFIABILIDAD MECÁNICA
PRESIONES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE FALLA DE LOS TRAMOS

SISTEMA 2 ALTERNATIVA "A"

NÚMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0170	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00
2	0.0144	41.98	42.33	48.12	49.93	45.04	40.40	43.55	38.36	43.85	41.50	35.35	38.39	31.69	20.00
3	0.0204	42.09	42.40	48.19	50.01	45.15	0.00	43.63	38.93	43.92	41.34	35.41	38.46	31.71	20.00
4	0.0204	41.99	42.30	48.09	49.93	45.05	40.41	43.53	38.36	43.85	41.50	35.55	38.39	31.69	20.00
5	0.0204	41.99	42.30	48.09	49.93	45.05	40.41	43.53	38.36	43.85	41.50	35.39	38.39	31.69	20.00
6	0.0204	42.04	42.36	48.15	0.00	45.10	40.46	43.59	38.40	43.89	41.52	35.38	38.42	31.72	20.00
7	0.0124	42.00	42.31	48.10	49.92	45.06	40.42	43.56	38.35	43.84	41.50	35.36	30.40	31.69	20.00
8	0.0204	41.90	42.22	48.01	49.83	44.96	40.33	43.46	38.26	43.75	41.50	35.30	38.33	38.64	20.00
9	0.0124	41.23	41.56	47.35	49.20	44.29	39.66	42.78	37.60	43.11	41.50	34.55	37.60	30.88	20.00
10	0.0204	41.98	42.29	48.08	49.91	45.04	40.40	43.53	38.33	43.82	41.50	35.35	38.39	31.69	20.00
11	0.0204	42.01	42.33	48.12	49.95	45.07	40.44	43.57	38.38	43.86	41.50	35.37	38.41	0.00	20.00
12	0.0176	41.90	42.22	48.01	49.84	44.96	40.33	43.45	38.27	43.76	41.50	35.37	38.42	31.71	20.00
13	0.0072	41.87	42.27	48.06	49.93	44.93	40.29	43.56	38.35	43.84	41.50	35.35	38.39	31.69	20.00
14	0.0144	41.88	42.20	47.99	49.82	44.94	40.30	43.43	38.25	43.74	41.50	35.37	38.25	31.71	20.00
15	0.0144	42.00	42.31	48.12	49.93	45.05	40.42	43.55	38.36	43.85	41.50	35.35	38.39	31.69	20.00
16	0.0133	42.01	42.32	48.11	49.93	45.05	40.41	43.55	38.36	43.85	41.50	35.35	38.39	31.69	20.00
17	0.0144	42.00	42.31	48.10	49.93	45.06	40.42	43.55	38.17	43.90	41.50	35.35	38.17	31.61	20.00
PRESIÓN DE DISEÑO		42.00	42.32	48.11	49.93	45.06	40.42	43.55	38.36	43.85	41.50	35.35	38.39	31.69	20.00
PRESIÓN MÍNIMA		41.23	41.56	48.1	0.00	44.29	0.00	42.78	37.60	43.11	41.34	34.55	30.40	0.00	20.00
PRESIÓN MEDIA		41.99	42.31	48.10	49.93	45.05	40.41	43.54	38.36	43.85	41.50	35.36	38.39	31.69	20.00
PRESIÓN MÁXIMA		42.09	42.40	48.19	50.01	45.15	40.46	43.63	38.93	43.92	41.52	35.55	38.46	38.64	20.00

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 2-B

**CONFIABILIDAD MECÁNICA
PRESIONES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE FALLA DE LOS TRAMOS**

SISTEMA 2 ALTERNATIVA "B"

NUMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0202	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00
2	0.0226	39.11	39.56	45.36	47.25	42.19	36.68	40.77	35.59	41.22	41.50	35.33	35.59	31.55	20.00
3	0.0249	40.54	40.86	46.65	48.46	43.61	0.00	42.09	36.90	42.42	41.54	35.39	36.91	31.60	20.00
4	0.0396	39.08	39.40	45.17	47.33	42.13	36.62	40.66	35.48	41.29	41.50	35.33	35.49	31.55	20.00
5	0.0321	39.14	39.45	45.27	47.24	42.22	36.71	40.79	35.61	41.20	41.50	35.33	35.61	31.55	20.00
6	0.0396	39.85	40.18	45.99	42.89	37.38	41.41	36.22	41.90	41.52	35.36	36.23	36.23	31.59	20.00
7	0.0226	39.14	39.55	45.36	47.30	41.97	36.45	40.44	35.66	41.26	41.50	35.33	35.26	31.55	20.00
8	0.0249	28.57	28.89	34.61	36.33	31.63	26.11	30.17	24.98	30.30	41.50	35.12	25.00	31.35	20.00
9	0.0163	31.25	31.59	37.61	40.20	34.28	27.55	32.79	25.80	34.16	41.50	22.69	26.40	18.61	20.00
10	0.0249	36.66	36.99	42.85	44.96	39.70	34.18	38.21	33.03	38.92	41.50	35.38	33.04	31.60	20.00
11	0.0300	39.23	39.56	45.36	47.27	42.27	36.76	40.79	35.61	41.23	41.51	35.36	35.61	0.00	20.00
12	0.0443	38.69	39.02	44.83	46.78	41.73	36.21	40.25	35.06	40.74	41.50	35.34	37.74	31.57	20.00
13	0.0122	38.98	39.46	45.28	47.24	41.63	36.12	40.80	35.60	41.20	41.50	35.33	35.62	31.55	20.00
14	0.0226	38.22	38.55	44.37	46.35	41.26	35.74	39.77	34.59	41.32	41.50	35.35	34.59	31.58	20.00
15	0.0386	39.16	39.49	45.47	47.28	42.21	36.69	40.73	35.55	41.24	41.50	35.33	35.55	31.55	20.00
16	0.0196	39.23	39.55	45.35	47.25	42.23	36.71	40.77	35.59	41.21	41.50	35.33	35.59	31.55	20.00
17	0.0190	38.83	39.17	45.13	47.52	41.87	36.35	40.38	35.20	41.48	41.50	35.32	35.21	31.55	20.00
PRESIÓN DE DISEÑO		39.21	39.54	45.35	47.25	42.25	36.74	46.78	35.59	41.21	41.50	35.36	35.60	31.55	20.00
PRESIÓN MÍNIMA		28.57	28.89	34.61	36.33	31.63	0.00	30.17	24.98	30.30	35.36	22.69	25.00	0.00	20.00
PRESIÓN MEDIA		39.10	39.46	45.28	47.25	41.92	36.40	40.55	35.57	41.23	41.50	35.33	35.57	31.55	20.00
PRESIÓN MÁXIMA		40.54	40.86	46.65	48.46	43.61	41.41	42.09	41.90	42.42	41.54	36.23	37.74	31.60	20.00

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 2-C

CONFIABILIDAD MECÁNICA
PRESIONES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN DE FALLA DE LOS TRAMOS

SISTEMA 2 ALTERNATIVA "C"

NUMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0221	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00
2	0.0386	29.19	33.20	38.91	33.67	35.11	29.20	36.01	32.61	38.60	39.65	32.22	33.09	28.40	20.00
3	0.0300	35.30	35.61	41.22	35.70	41.33	0.00	40.13	35.12	40.63	40.37	33.38	35.48	29.66	20.00
4	0.0590	27.37	0.00	0.00	33.90	34.61	28.69	35.61	32.40	38.82	39.65	32.16	32.94	28.34	20.00
5	0.0546	25.01	24.63	33.94	33.60	34.45	28.53	35.76	32.74	38.52	39.65	32.23	33.02	28.42	20.00
6	0.0546	32.33	32.97	39.00	0.00	36.61	30.69	37.24	36.69	40.06	40.03	32.78	33.91	28.96	20.00
7	0.0226	16.49	23.41	33.86	34.38	17.48	11.56	17.18	33.78	39.31	39.65	32.02	26.82	28.21	20.00
8	0.0300	22.11	22.49	27.51	21.22	27.28	21.36	28.06	23.86	26.15	39.65	30.16	29.01	26.34	20.00
9	0.0175	7.60	2.18	15.30	17.63	4.12	0.00	4.51	1.38	22.56	39.65	0.00	0.00	0.00	20.00
10	0.0300	23.10	23.75	30.83	28.45	27.36	21.45	27.99	23.45	33.38	39.65	33.06	30.94	29.94	20.00
11	0.0321	31.56	32.17	38.88	33.92	35.93	30.01	36.57	32.95	38.83	39.84	32.63	0.00	33.56	20.00
12	0.0443	29.86	30.67	36.80	33.13	33.84	27.92	34.40	31.86	38.05	39.65	32.34	35.00	28.53	20.00
13	0.0122	0.00	31.55	14.85	33.26	0.00	0.00	37.69	32.96	38.18	39.65	32.33	33.90	28.50	20.00
14	0.0279	28.74	29.74	36.08	32.76	32.46	26.54	32.96	31.28	37.69	39.65	32.42	26.73	28.61	20.00
15	0.0596	31.01	31.56	38.44	33.65	35.52	29.60	36.19	32.60	38.57	39.65	32.22	33.17	28.40	20.00
16	0.0387	25.91	28.36	35.68	33.56	36.40	30.48	36.60	32.62	38.49	49.65	32.24	33.33	28.42	20.00
17	0.0243	30.12	30.84	37.65	34.96	34.24	28.32	34.83	31.02	39.88	39.65	31.84	32.43	28.02	20.00
PRESIÓN DE DISEÑO		33.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00
PRESIÓN MÍNIMA		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.51	1.38	22.56	39.65	0.00	0.00	0.00	20.00
PRESIÓN MEDIA		28.06	30.21	35.88	33.58	34.35	28.12	35.69	32.61	38.55	39.65	32.24	32.98	28.42	20.00
PRESIÓN MÁXIMA		35.30	35.61	41.22	35.70	41.33	30.69	40.13	36.69	40.63	49.65	33.38	35.48	33.56	20.00

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 2-D

CONFIABILIDAD MECÁNICA
TRAMOS CUT SET

SISTEMA 2 ALTERNATIVA "A"

NUMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0170	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
3	0.0204						1.00								
6	0.0204				1.00										
11	0.0204													1.00	
Riesgo de presión		0.017	0.017	0.017	0.037	0.017	0.037	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.037	0.000
Conf. Nodal de Presión		0.983	0.983	0.983	0.963	0.983	0.963	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.963	1.000
Riesgo de gusto		0.017	0.017	0.017	0.037	0.017	0.037	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.037	0.000
Conf. Nodal de Gusto		0.983	0.983	0.983	0.963	0.983	0.963	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.963	1.000
Conf. Nodal Total		0.966	0.966	0.966	0.926	0.966	0.926	0.966	0.966	0.966	0.966	0.966	0.966	0.926	1.000

riesgo por falla mecanica = 7.8 %

confiabilidad mecanica = 92.2 %

confiabilidad nodal media = 96.0 %

conf. global del sistema por falla mecanica= 88.5 %

DFG por Nodo	0.362056	0.362056	0.362056	1.592622	0.362056	3.184869	0	0.724112	0.724112	0.362056	0.362056	0.362056	1.592622	10.35273
Usuarios a/serv	156	156	156	688	156	1376	0	313	313	156	156	156	688	4472

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 2-E

CONFIABILIDAD MECÁNICA
TRAMOS CUT SET

SISTEMA 2 ALTERNATIVA "B"

NUMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0202	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
3	0.0249						1.00								
6	0.0396				1.00										
9	0.0163						0.02		0.08			0.19	0.06	0.34	
11	0.0301													1.00	
Riesgo de presión		0.020	0.020	0.020	0.060	0.020	0.045	0.020	0.021	0.020	0.020	0.023	0.021	0.056	0.000
Conf. Nodal de Presión		0.980	0.980	0.980	0.940	0.980	0.955	0.980	0.979	0.980	0.980	0.977	0.979	0.944	1.000
Riesgo de gaseo		0.020	0.020	0.020	0.041	0.020	0.045	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.050	0.000
Conf. Nodal de Gaseo		0.980	0.980	0.980	0.959	0.980	0.955	0.980	0.980	0.980	0.980	0.980	0.980	0.950	1.000
Conf. Nodal Total		0.960	0.960	0.960	0.902	0.960	0.912	0.960	0.959	0.960	0.960	0.957	0.959	0.897	1.000

riesgo por falla mecanica = 13.1 %

confiabilidad mecanica = 86.9 %

confiabilidad nodal media 95.0 %

conf. global del sistema por falla mecanica= 82.6 %

DFG por Nodo	0.429048	0.429048	0.429048	1.733184	0.429048	3.831245	0	0.858096	0.858096	0.429048	0.429048	0.429048	2.136744	12.4207
Usuarios s/serv	185	185	185	749	185	1655	0	371	371	185	185	185	923	5366

APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 2-F

CONFIABILIDAD MECÁNICA
TRAMOS CUT SET

SISTEMA ALTERNATIVA "C"

NUMERO DE TRAMO	PROB. DE FALLA	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14
1	0.0221	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
3	0.0300						1.00								
4	0.0590	0.02	1.00	1.00											
5	0.0546	0.11	0.12												
6	0.0546				1.00										
7	0.0226	0.41	0.16			0.38	0.59	0.39					0.04		
8	0.0300	0.21	0.20	0.02	0.24	0.03	0.24		0.15	0.07				0.06	
9	0.0175	0.73	0.92	0.45	0.37	0.85	1.00	0.84	0.95	0.19		1.00	1.00	1.00	
10	0.0300	0.18				0.02	0.23	0.00	0.16						
11	0.0321												1.00		
12	0.0443						0.00								
13	0.0122	1.00		0.47		1.00	1.00								
14	0.0279						1.00						0.05		
16	0.0387	0.07													
Riesgo de presión		0.078	0.113	0.095	0.090	0.059	0.137	0.046	0.048	0.027	0.022	0.040	0.074	0.041	0.000
Conf. Nodal de Presión		0.922	0.887	0.905	0.910	0.941	0.863	0.954	0.952	0.973	0.978	0.960	0.926	0.959	1.000
Riesgo de gasto		0.034	0.081	0.081	0.077	0.034	0.110	0.022	0.022	0.022	0.022	0.040	0.072	0.040	0.000
Conf. Nodal de Gasto		0.966	0.919	0.919	0.923	0.966	0.890	0.978	0.978	0.978	0.978	0.960	0.928	0.960	1.000
Conf. Nodal Total		0.890	0.815	0.831	0.840	0.909	0.768	0.933	0.931	0.951	0.956	0.922	0.860	0.921	1.000
riesgo por falla mecanica =							47.6 %								
confiabilidad mecanica =							52.4 %								
confiabilidad nodal media							89.5 %								
conf. global del sistema por falla mecanica=							46.9 %								
DFG por Nodo	0.728696	1.72169	1.72169	3.259224	0.728696	9.316456	0	0.939024	0.939024	0.469512	0.840679	1.521712	1.681358	23.86776	
Usuarios a/serv	315	744	744	1408	315	4025	0	406	406	203	363	657	726	10311	

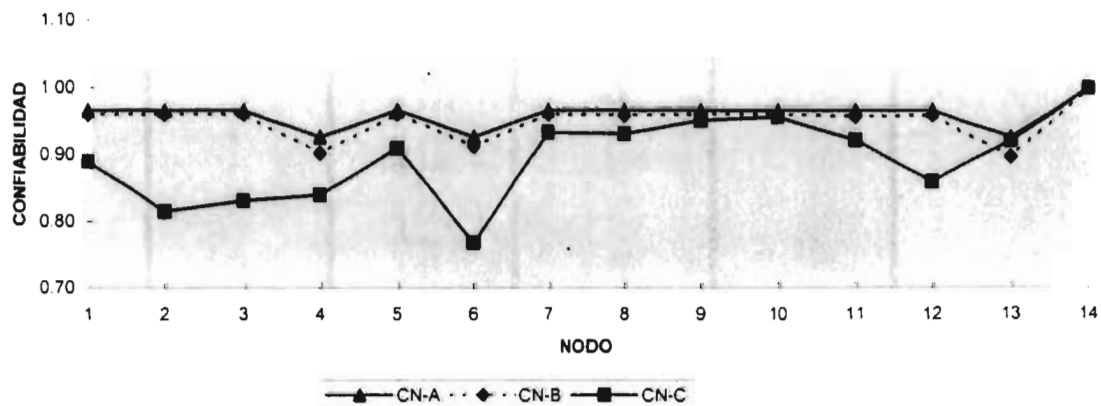
APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 2-G

CONFIABILIDAD NODAL

NODO	CN-A	CN-B	CN-C
1	0.966	0.960	0.890
2	0.966	0.960	0.815
3	0.966	0.960	0.831
4	0.926	0.902	0.840
5	0.966	0.960	0.909
6	0.926	0.912	0.768
7	0.966	0.960	0.933
8	0.966	0.959	0.931
9	0.966	0.960	0.951
10	0.966	0.960	0.956
11	0.966	0.957	0.922
12	0.966	0.959	0.860
13	0.926	0.897	0.921
14	1.000	1.000	1.000

CONFIABILIDAD NODAL SISTEMA 2

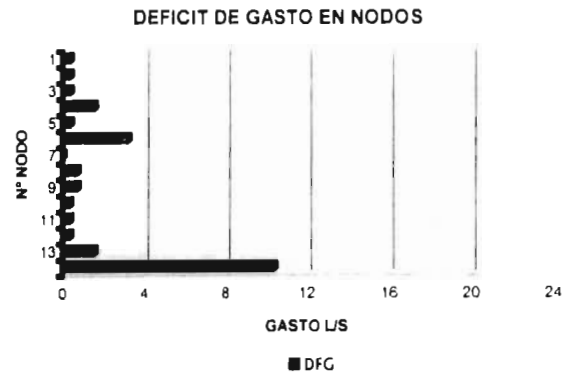


APLICACIONES
EVALUACIÓN MECÁNICA

TABLA 2-H

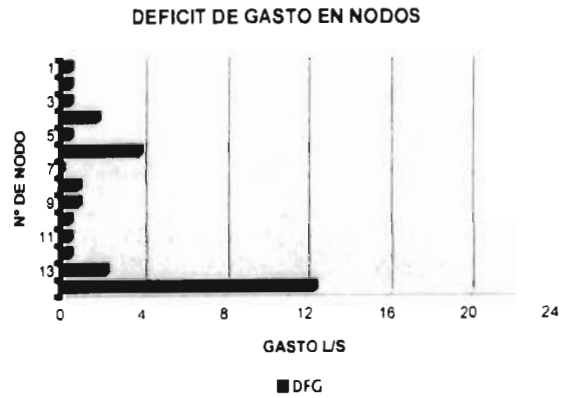
ALTERNATIVA "A"

Nodo	DFG
1	0.362
2	0.362
3	0.362
4	1.598
5	0.363
6	3.184
7	0.000
8	0.724
9	0.724
10	0.362
11	0.362
12	0.362
13	1.592
TOTAL	10.357



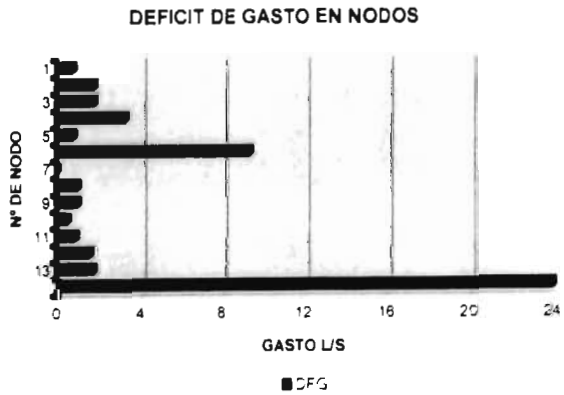
ALTERNATIVA "B"

Nodo	DFG
1	0.429
2	0.429
3	0.429
4	1.733
5	0.429
6	3.831
7	0.000
8	0.858
9	0.858
10	0.429
11	0.429
12	0.429
13	2.136
TOTAL	12.419



ALTERNATIVA "C"

Nodo	DFG
1	0.728
2	1.721
3	1.721
4	3.259
5	0.728
6	9.316
7	0.000
8	0.939
9	0.939
10	0.469
11	0.841
12	1.522
13	1.681
TOTAL	23.864



CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

En todas las obras de ingeniería siempre aceptamos un riesgo. en sistemas de distribución de agua *SDA*, mediante el análisis de riesgo y confiabilidad es posible elegir el valor aceptable de dicho riesgo.

La metodología aquí presentada para el diseño de redes de distribución, incorpora el análisis de riesgo y confiabilidad, lo cuál permite determinar la capacidad de respuesta del sistema ante situaciones variables de operación, lo cual en un sentido más estricto es mas realístico a los diseños convencionales.

El análisis es también de gran utilidad en la adecuación de sistemas existentes si consideramos que es posible incorporar las variaciones en las condiciones de operación de un *SDA* en su periodo de vida útil.

VIII.1 EVALUACIÓN HIDRÁULICA

La evaluación hidráulica presentada en este documento, es útil para el diseño y evaluación de las redes existentes, sin embargo, existe la limitante en México de poder lograr los valores de confiabilidad del 99 - 100% como se requiere para los países desarrollados, ya que esto implica fuertes erogaciones de dinero, por lo que se sugiere un análisis adicional que permita elegir la mejor opción costo-confiabilidad.

Es imprescindible al efectuar dicha evaluación, aceptar que existe incertidumbre en los datos que se asumen, por lo que para lograr un análisis real es necesario considerarlo en el análisis, lo cual quedará a juicio del evaluador.

Dependiendo del coeficiente de variación utilizado, se define el grado de incertidumbre de los datos, resultando inversamente proporcional a la confiabilidad, es decir, a medida que el coeficiente de variación crece, la confiabilidad del sistema disminuye.

Las diferencias entre las confiabilidades del sistema por media aritmética y promedio pesado se acentúan más en la medida en que los datos en los nodos de demanda sean mayores, se considera que el resultado de mayor conveniencia, deberá ser el obtenido por promedio pesado.

VIII.2 EVALUACIÓN MECÁNICA

La técnica del grupo de corte mínimo es una herramienta muy útil en la identificación de los puntos vulnerables del sistema.

La redundancia en un sistema infiere mayor seguridad en el suministro de gasto y/o presión en los nodos de demanda, lo que demuestra que un sistema cerrado es mucho más confiable a un sistema abierto.

El diseño bajo criterios de confiabilidad resulta con un costo inicial mayor al que pudiera presentarse en un diseño a costo mínimo.

En base al análisis de riesgo y confiabilidad en sistemas existentes es posible dar señales de alerta en posibles zonas afectadas y adelantarnos a los efectos de las fallas.

Los índices presentados para medir el riesgo representan parámetros útiles en el análisis y comparación de las alternativas.

El riesgo aceptable en el diseño de un *SDA*, será aquel resultado positivo al de una evaluación económica durante su período de vida útil, considerando los riesgos por déficit de volúmenes y de reparación, ¿Por qué? , por que a medida que el sistema crece y se vuelve más complejo el valor del riesgo se incrementa, por tal motivo, es posible que en sistemas pequeños de poca diferencia en los costos iniciales de las alternativas analizadas, el parámetro importante sea el impacto del costo por pérdida de volumen de agua y reparación.

Es importante resaltar para este tipo de análisis, que dicha evaluación se volverá mas eficiente, en la medida que en México se promueva la elaboración de bancos datos estadísticos referentes a fallas en tuberías, válvulas, bombas, tiempos de reparación, tiempos de espera hasta la reparación de la falla, etc., para cada organismo, de tal forma que se pueda existir una vasta información para hacer de cada sistema en particular una mejor evaluación.

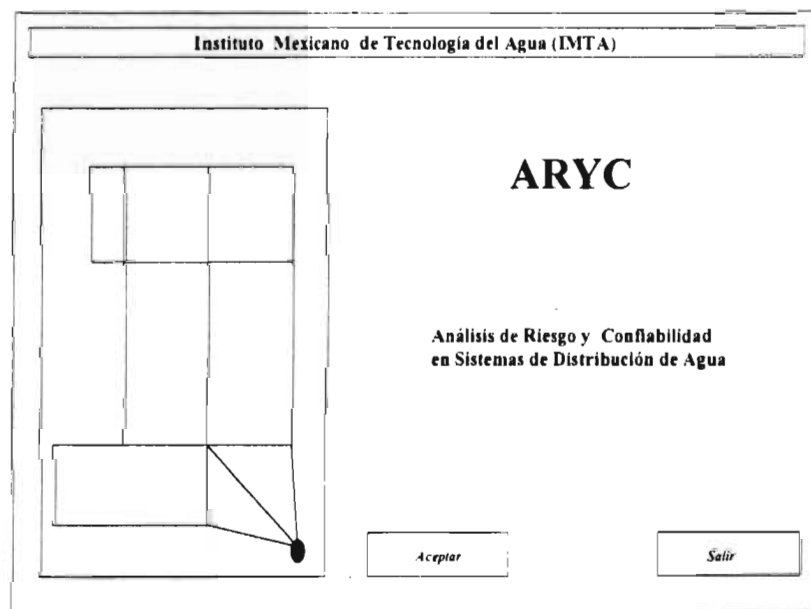
VIII.3 DEL PROGRAMA ARYC

El programa de Análisis de Riesgo y Confiabilidad (*ARYC*) para sistemas de distribución de agua, resulta ser una herramienta muy útil para la evaluación hidráulica y mecánica del sistema y cumple satisfactoriamente con el objetivo principal, planteado en este documento. En el anexo A se explica con mayor detalle su aplicación.

ANEXO A.

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE RIESGO Y CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

El programa de Análisis de Riesgo y Confiabilidad (*ARYC, Ramírez-Bourguett*) en sistemas de distribución se realizó en su primera versión, en programación Visual Basic 4. dicho programa ha sido elaborado para ser utilizado como una herramienta en la evaluación hidráulica y mecánica de los sistemas de distribución de agua ante eventos de emergencia como: demandas y coeficientes de rugosidad aleatorios y fallas en los componentes (tramos) de la red.



Pantalla de presentación

El programa básicamente está compuesto de dos algoritmos de solución:

- 1.- Evaluación Mecánica
- 2.- Evaluación Hidráulica

1. EVALUACIÓN MECÁNICA

Este algoritmo fue diseñado para simular la falla de un tramo de la red, creando con ello un nuevo escenario de simulación que permita resaltar el impacto de la falla en la red. Tiene como limitante en esta primera versión, que solo es aplicable a redes totalmente cerradas y con dos salidas como mínimo en la fuente.

The screenshot shows a software interface titled "Pantalla de presentación". It is divided into several sections:

- Datos:** A section on the left containing three input fields: "Presión mínima", "Dotacion", and "Año de analisis".
- Buttons:** A vertical column of four buttons on the right: "Inicio", "Editor", "Seleccionar archivo", and "Salir".
- Resultados:** A section on the bottom right containing four checkboxes with corresponding labels: "Resultados de presion", "De falla y confiabilidad de presion", "De falla y confiabilidad de gasto", and "Tabla de indices".
- Empty Box:** A large empty rectangular box is located in the bottom left area of the interface.

Pantalla de presentación

2.1 Introducción de datos

Presión mínima:

Es el dato que se utiliza como parámetro de comparación, entre las presiones registradas en cada nodo del sistema, una confiabilidad en el nodo del 100%, solo se logra con presiones iguales o superiores a la presión mínima.

Año de análisis

Pide se teclee el año en el que se quiere simular la probabilidad de falla de la componente. a mediar que el año de análisis se incrementa, la probabilidad de falla también se incrementa.

Dotación

Se introduce el valor de la dotación en lts/hab/día que se utilizó en el diseño de la red.

1.3 Opciones

Selección

Una vez introducidos todos los datos, esta tecla permitirá elegir el "*archivo.cod*" generado en el programa *AH206(tzanchkov)* que se utilizará para efectuar la evaluación.

Inicio

Una vez seleccionado el "*archivo.cod*" la tecla *inicio* permitirá dar comienzo a las iteraciones, mostrando en la pantalla de apoyo la finalización de las mismas.

Editar

Permite visualizar los resultados de las simulaciones únicamente para su revisión, el programa genera un "*archivo+ n° tramo.res*", es decir que existirán tantos archivos como tramos tenga la red, este tipo de archivo es útil para la revisión de resultados.

Salir

Esta tecla permite regresar a la pantalla anterior de presentación.

1.4 Resultados

Se presentan dos tablas de resultados, para poder visualizarlas es necesario haber seleccionado anteriormente el "*archivo+n° tramo.res*" creado por el sistema, por ejemplo si el "*archivo.cod*" es "*riesgo.cod*" y se desea la simulación del tramo 8 por ejemplo. el seleccionado será "*riesgo8.res*".

Tabla de presión

Presenta los resultados de presión nodal mínima, media y máxima; así mismo, presenta la confiabilidad mínima, media aritmética y máxima registradas en el sistema.

Tabla de falla de presión y confiabilidad

Presenta los resultados de falla y confiabilidad nodal considerando el parámetro de presión.

Tabla de falla de presión y confiabilidad

Presenta los resultados de falla y confiabilidad nodal considerando el parámetro de gasto. se presenta además el déficit esperado de gasto y el número de usuarios afectados por la falla.

Tabla de índices

Presenta para cada tramo. el diámetro, probailidad de falla, número de fallas al año. tiempo medio de reparación. tiempo medio de falla y año de análisis.

II.- EVALUACIÓN HIDRÁULICA

Este algoritmo esta diseñado para la generación de iteraciones a partir de la creación de valores aleatorios en los datos de demanda nodal y coeficiente de rugosidad en los tramos que conforman la red.

The screenshot shows a graphical user interface for hydraulic evaluation. It features a 'Datos' section with four input fields, an 'Ev. hidraulica' section with two sets of radio buttons for distribution type and parameter to vary, a 'Resultados' section with two checkboxes, and a control panel on the right with four buttons and a schematic diagram.

Pantalla: Evaluación Hidráulica

Dicho algoritmo es aplicable tanto a redes abiertas como redes cerradas.

2.1 Introducción de datos

N° de iteraciones:

Se refiere a la cantidad de simulaciones que el programa realizará para obtener los valores de confiabilidad, a medida que el número de iteraciones se incrementa, el valor de la confiabilidad se estabiliza; se recomienda efectuar análisis con un número igual o mayor de 300 iteraciones para reducir la incertidumbre en los datos.

Semilla:

Se introduce cualquier dígito positivo para dar inicio a la generación de los valores aleatorios

Coefficiente de variación:

El dato que se dé indicará el grado de incertidumbre en los datos de demanda y coeficiente de rugosidad, a mayor coeficiente de variación corresponderá una mayor incertidumbre.

Presión mínima:

Es el dato que se utiliza como parámetro de comparación, entre las presiones registradas en cada nodo del sistema, una confiabilidad en el nodo del 100%, solo se logra con presiones iguales o superiores a la presión mínima.

2.2 Parámetro a variar

Distribución

Se refiere al tipo de distribución con la cual se generarán los valores aleatorios, a partir de los datos de demanda o coeficiente de rugosidad establecidos en el "*archivo.cod*" del programa *AH206*. En la primera versión del *ARYC* únicamente se encuentra disponible la distribución tipo normal.

Variable

Da a elegir entre la demanda y coeficiente de rugosidad cual se generará como variable aleatoria en la simulación.

2.3 Opciones

Selección

Una vez introducidos todos los datos, esta tecla permitirá elegir el “*archivo.cod*” que se utilizará para efectuar la evaluación.

Inicio

Una vez seleccionado el “*archivo.cod*” la tecla *inicio* permitirá dar comienzo a las iteraciones, mostrando en la pantalla de apoyo la finalización de las mismas.

Editar

Permite visualizar los resultados de las simulaciones únicamente para su revisión, no se recomienda utilizarlo para un número superior a 10 iteraciones.

Salir

Esta tecla permite regresar a la pantalla anterior de presentación.

2.4 Resultados

Se presentan dos tablas de resultados, para poder visualizarlas es necesario haber seleccionado anteriormente el “*archivo*+*0.res*” creado por el sistema, por ejemplo si el *archivo.cod* es “*riesgo.cod*” el seleccionado será “*riesgo0.res*”.

Tabla de presión

Presenta los resultados de presión nodal mínima, media y máxima; así mismo, presenta la confiabilidad mínima, media aritmética y máxima registradas en el sistema.

Tabla de confiabilidades

Presenta los resultados de la confiabilidad nodales registradas en cada nodo, así como la confiabilidad mínima, media aritmética y por promedio pesado del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bao X. y Mays L. "Model for water distribution System Reliability", Journal of Hydraulic Engineering, vol 116, #9, Sept. 1990, pp. 1119-1137.
2. Benjamin J. R. and Cornell, C. A.; "Probability and Decision for Civil Engineers, MacGraw-Hill Book Co., N.Y, 1970
3. Bhawe P.; "Node flow analysis of water distribution system", Journal. of Transportation Engineering, vol 107, # TE4, July 1981, (pp. 457-467)
4. Bourguett V.; "Confiabilidad en sistemas de distribución de agua", Dcto. para ingreso al doctorado, informe interno IMTA, Jiutepec, Mor., Junio 1995.
5. Brun N. H. ; "Methods for analyzing pipe networks", J. of Hydraulic Eng., vol 115, #2, Feb. 1989, (pp.139-157) .
6. CNA, IMTA; "Redes de distribución", Manual de Diseño de Agua Potable, libro II, México 1994.
7. Culliname J.; "Hydraulic reliability of urban water distribution system", Proceedings water forum '86 vol. 2, California 1986, (pp 1264-1271)
8. Culliname John, Lansey K. y Mays L.; J. of Hydraulic Eng., vol 118, #3, March 1992, (pp.420-441)
9. Culliname John. ; "Determinig Availability and Reliability for water distribution systems"; cap. 7 in Reliability Analisis of W. D. S., ASCE, Task Committee Risk y Reliability, USA 1989.
10. Davis M. et. al; "Guidelines for mintenance of aging water pipes", Proceedings Water Forum '86 vol. 2, California 1986, (pp 158-169).
11. Duan N., Mays L. y K. Edmonton; "Optimal Reliability - Based design of pumpin and distribution system"; J. of Hydraulic, vol. 116, #2, Feb. 1990, (pp. 249-268)
12. Fujiwara Subu O. y Dasilva U. "Algorithm for reliability-based optimal design of water network", J. of Enviroment Eng., vol 116 #3, May-June 1990, (pp. 575-587)
13. Goodfrey A. y Knezevic J.; "Reliability-Based optimization model for water distribution system, discussion of paper 22040 Su, Mays y Duan", J. of Hydraulic Eng., 1988, (pp. 1157-1158)
14. Goulter Y.; "System analysis in water distribution, network design: from Theory to Practice", Journal of Water Resources Planning and Management. vol 118, #3, May-June 1992, (pp 238-2490)

15. Goulter I. y Boucher F.; "Reliability-Constrained Network Model", J. of Hydraulic Eng., Vol 116, #2, Feb. 1990, (pp. 211-229)
16. Goulter y Coals A. B.; "Cuantitativ approach to Reliability assement in pipe network", J of Transportation Enginnering, vol 112, # 3 may 1986, (pp. 287-301)
17. Henley Ernest J. y Kumamoto Hiromitsu; "Reliability Engineering and Risk Assessment", Prentice Hall ed., englewood Cliffs, Ny., 1981
18. Gupta Rajesh and Phamod R. Vhave, "Reability Analysis of Water Distribution System", J. of Enviroment Enginnering, vol. 120, #2, March-April 1994, (pp.447-460).
19. Henley Ernest J. y Kumamoto Hiromitsu; "Reliability Engineering and Risk Assessment", Prentice Hall de., Englenwood Cliffs, N. Y., 1981
20. Hobbs B. y G Bein; "Analitical Simulation of Water System Capacity Reliability, 2. Markov Chain approach and verification of the models"; Water Resources Research, Vol 24, #9, September 1988, (pp. 1445 - 1458)
21. Howitt P. y Xu Ch.; "Predicting pipe faillures effects in water distribution systems", J. of Water Resources and Management Planning, vol 119, # 1, Jan-Feb. 1993, (pp 18-31)
22. Kapur K. C. y Lamberson L. R. ; "Reliability in Engineering Design", john Wiley y Sons, NY., 1977.
23. Lansey K. y Mays M.; "Optimaton model for water distribution system design", J. of Hydraulic Eng. vol 115 , #10, Oct. 1989, (pp1401-1419)
24. Lansey K y Duan N., Mays L. y Tung Y;"Water distribution system design, founded uncertintes", J of Water Resources of Mannegement, vol 115, # 53, Sept. 1989, (pp. 630-645)
25. Mays L.;"Water distribution systems, reliability Analysis of"ASCE, Task.Committe on Risk and y Reliability Analysis of water systems distribution, 1989.
26. Mays L., Duang N. y Su Ch.; "Modelin reliability in water distribution network design", Proceddings water forum '86 vol. 2, California 1986, (pp 1272-1279)
27. O'Day, D. K.; "Organizing and analyzing leak and break dat for making main replacement decisions", J. Amer. Water works Assoc., Nov. 1982 (pp 589-596)
28. Quimpo R y Shamci S.; "Reliability-Constrained distribution system maintenance", Journal Water Resources and Mannegement, vol 117, #3, May-Jun199, (pp 321-339)Network Model", Journal of Hydraulic Eng

29. Su Xu, Mays L. et al; "reliability-Based optimitation model for water distribution system", J.of Hydraulic Eng., vol 114, # 12, Dec. 1987, (pp. 1539-1557)
30. Tarkin A y Dowdy J.; "Optimal pump Operation in water distribution", Journal of Hydraulic Eng., vol 115, #2, Feb. 1989, (pp. 158-169).
31. Tzachkov V. y Izurieta J. "Manual del usuario simulador hidráulico de redes AH206", IMTA de Jiutepec, Mor. 1994
32. Tung Y.; "Model optimal-risk based water, distribution network design", Proceddings Water Forum '86 vol. 2, California 1986, (pp. 1280-1285)
33. Tung B. C. et al.; "Advanced methodologies for design of storm sewer systems", Research Report No. 112, (pp 69-92), Water Resources Center, University of Illinois at urbana-Champaign, 1976
34. Wagner J. y Shamir U. "Water Distribution Reliability, Analitical Methods", J. Water Resources Planning and Mannegement, vol. 114 #3, March 1987, (pp 253-275)
35. Wagner J. y Shamir U. "Water Distribution Reliability, Simulation Methods", J. Water Resources Planning and Mannegement, vol 114, #3, March 1987, (pp 277-295)
36. Walski T. M., et al; "Battle of the Network modelos: Epilogue", Journal of Water Resources plannign and Management, vol 113 #2, March, 1987, (pp. 191-203)