

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. ING. INDUSTRIAL**

**PROFESORES GUÍA:
SR. FELIPE BAESLER ABUFARDE**



**“MODELOS DE OPTIMIZACION PARA LA COMPRA DE REPUESTOS
CRITICOS BASADO EN LA CONFIABILIDAD DE LOS EQUIPOS DE
PETROQUIM S.A. “**

Trabajo de Titulación: Presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil Industrial, Mención Gestión.

CONCEPCIÓN, Marzo de 2004.

IVAN G MASIAS C.

AGRADECIMIENTOS

Al recordar el momento en que decidí estudiar esta carrera, se viene a mi muchos recuerdos y no puedo dejar de sentir emoción que he cumplido una gran meta. Es el final de una bella etapa y el comienzo de otra, y no quiero dejar de reconocer que sin ayuda y apoyo de muchas personas no hubiese podido hacer realidad mi sueño.

Agradezco a Dios por acompañarme en todo momento.

Agradezco profundamente a mi Madre Magaly y a mi Abuelita Judith por decidir apoyarme y esforzarse junto a mí, ya que sin ellas esta meta no sería posible.

Agradezco a mi Abuelito Juan por todo su cariño, apoyo y por transformarse en un ejemplo de vida y admiración para mí.

Agradezco a mi Polola y Amiga Carol por todo el cariño, y por su compañía incondicional en los momentos mas difíciles para mí.

Agradezco a la Sociedad Protectora de Empleados de Talcahuano, por todo su apoyo y preocupación.

Agradezco a mi amigo Alex, por todas sus ideas, y principalmente por todo su afecto.

Quiero expresar sinceros agradecimientos a todos aquellos que han participado y me han apoyado para llegar a esta etapa, en especial a todos mis Tíos y Tías.

INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCION.....	6
1.1. - TITULO DEL TEMA PROPUESTO.....	7
1.2. - JUSTIFICACION.....	7
1.3.- OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	8
▪ 1.3.1.- Objetivo general.....	8
▪ 1.3.2.- Objetivos específicos.....	8
1.4.- ALCANCES O AMBITO DEL ESTUDIO.....	9
CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	10
2.1.- INTRODUCCIÓN	10
2.2.- ANTECEDENTES GENERALES.....	10
2.3.- SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN PETROQUIM	13
2.4.- PROCESO PRODUCTIVO	15
▪ 2.4.1.- Área Preparación del Catalizador	16
▪ 2.4.2.- Área Prepolimerización y Polimerización	16
▪ 2.4.3.- Área Desgasificación y Recompresión del Monómero.....	17
▪ 2.4.4.- Área Sección de Copolímero de Alto Impacto.....	17
▪ 2.4.5.- Área Steaming y Secado	18
▪ 2.4.6.- Área Extrusión	18
▪ 2.4.7.- Área Homogenización y Ensacado	18
▪ 2.4.8.- Área Sistema de Evacuación y unidades de servicio	18
2.5.- PRODUCTOS	19
▪ 2.5.1.- Polipropileno Homopolímero	20
▪ 2.5.2.- Copolímero Randómico.....	21
▪ 2.5.3.- Copolímero Heterofásico (Alto Impacto).....	23
CAPITULO 3: MARCO TEORICO	25
3.1.- PROBABILIDADES.....	25
▪ 3.1.1.- Probabilidad.....	25
▪ 3.1.2.- Experimento aleatorio.....	25
▪ 3.1.3.- Reglas de la Adición	25
▪ 3.1.4.- Eventos Independientes	26
▪ 3.1.5.- Eventos dependientes.....	26
▪ 3.1.6.- Teorema de Bayes.....	28
3.2.- COMPORTAMIENTO DE LOS EQUIPOS.....	29
▪ 3.2.1.- Disponibilidad de Operación	29
▪ 3.2.2.- Efectividad.....	30
3.3.- CONFIABILIDAD.....	33
▪ 3.3.1.- Definición de Confiabilidad.....	33
▪ 3.3.2.- Función de Confiabilidad, vida media y tasa de falla	35
▪ 3.3.3.- Mecanismos de Falla	39
▪ 3.3.4.- Ley de Falla $f(t)$	45
▪ 3.3.4.1.- Ley de Weibull	46
▪ 3.3.4.2.- Ley exponencial.....	49
▪ 3.3.5.- Predicción de la Confiabilidad.....	50
▪ 3.3.5.1.- Sistema en serie	51
▪ 3.3.5.2.- Sistema en paralelo(Redundancia).....	52
▪ 3.3.5.3.- Sistema r-de-n.....	53
▪ 3.3.5.4.- Sistemas Complejos.....	53
▪ 3.3.5.5.- Confiabilidad del Sistema en función del Tiempo	55

3.4.- ALGORITMOS GENETICOS.....	57
▪ 3.4.1.- Introducción.....	57
▪ 3.4.2.- Caracterización.....	58
3.5.- SIMULACION.....	65
▪ 3.5.1.- Generación de variables aleatorias en @Risk.....	66
▪ 3.5.1.1.- Generación de variables aleatorias Monte Carlo.....	66
▪ 3.5.1.2.- Generación de variables aleatorias Latin Hypercube.....	68
▪ 3.5.2.- Definición de funciones de probabilidad.....	71
▪ 3.5.2.1- Adaptar distribuciones de probabilidad a sus datos.....	72
▪ 3.5.2.2.- Definición de las funciones de probabilidad según literatura.....	73
CAPITULO 4: MODELO DE INVERSIONES.....	74
4.1.- TERMINOLOGIA.....	74
▪ 4.1.1.- Repuestos críticos y Confiabilidad del sistema.....	74
▪ 4.1.2.- Fallas Criticas.....	76
▪ 4.1.3.- Costos.....	77
▪ 4.1.4.- Probabilidad de falla de repuestos en bodega.....	78
▪ 4.1.5.- Probabilidad de falla actual ($P_{F.sin.inv_i}$).....	79
▪ 4.1.6.- Confiabilidad actual.....	79
▪ 4.1.7.- Probabilidad de falla del equipo actual mas repuesto ($P_{F.inv_i}$).....	79
▪ 4.1.8.- Confiabilidad equipo actual mas repuesto.....	79
▪ 4.1.9.- Confiabilidad del componente según política adoptada.(R _i).....	80
▪ 4.1.10.- Indices.....	80
▪ 4.1.11.- Costo esperado evitado.....	81
▪ 4.1.12.- Políticas.....	81
4.2.- DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD.....	81
▪ 4.2.1.- Uso de Solver en la estimación de β	84
4.3.- OPTIMIZACION DE LA COMPRA DE REPUESTOS.....	86
▪ 4.3.1.- Enfoque 1 (Deterministico).....	86
▪ 4.3.1.1.- Enfoque 1.1.....	86
▪ 4.3.1.2.- Enfoque 1.2.....	87
▪ 4.3.2.- Enfoque 2 (Probabilistico).....	89
▪ 4.3.2.1.-Funcion objetivo en RiskOptimizer.....	89
▪ 4.3.2.2.- Métodos de Resolución de Problemas en RiskOptimizer.....	90
▪ 4.3.2.3.- Consideraciones realizadas en RiskOptimizer para el modelo.....	92
▪ 4.3.2.4.- Diseño de experimentos.....	93
▪ 4.3.2.4.1.- Definición de Parámetros.....	93
▪ 4.3.2.4.2.- Diseño factorial 2^3	93
▪ 4.3.2.4.3.- Optimización de los parámetros metodología RSM.....	101
▪ 4.3.3.- Comparación de los enfoques.....	105
▪ 4.3.4.- Análisis de riesgo.....	106
CAPITULO 5: VALIDACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	110
5.1. - VALIDACION DE RESULTADOS.....	110
5.2. - CONCLUSIONES.....	111

ANEXOS	113
ANEXO A	114
▪ Distribuciones más Habituales en Confiabilidad	114
ANEXO B	123
▪ Evaluación de Adaptaciones de Distribuciones en @Risk.....	123
ANEXO C	129
▪ Fallas	129
▪ Probabilidades de Fallas.....	129
▪ Esperanzas de Fallas	129
▪ Parámetro para la Distribución Weibull.....	129
ANEXO D	133
▪ Resultados Enfoque 1.1 (Determinístico) Minimizar el Costo Esperado s/a Inversión	133
ANEXO E.....	136
▪ Resultados Enfoque 1.2 (Determinístico)	136
▪ Minimizar el Riesgo Total del Sistema s/a Inversión.....	136
ANEXO F.....	138
▪ Resultados del Diseño de Experimento.....	138
ANEXO G	143
▪ Resultados del Enfoque Probabilístico.....	143
ANEXO H	146
▪ Análisis de Riesgo para el Enfoque 2 Política 1.....	146
BIBLIOGRAFÍA	152

CAPITULO 1: INTRODUCCION

En virtud de la Certificación ISO 9001 obtenidas en el año 2001, Petroquim esta frecuentemente realizando mejoras a sus procedimientos, de cómo realiza sus trabajos, en virtud de esto y una previa revisión de la forma en que planificaba las compras de repuestos críticos, se cree necesario desarrollar este trabajo, que tiene como gran problemática cuantificar la probabilidad de falla de los equipos y compatibilizarla con aspectos económicos como el costo del repuesto y una posible perdida de ganancia por el impedimento de no-producción, por una “falla” en un componente no reparable, en donde no se posee su repuesto para su pronta reparación.

De esta manera se espera al final de este trabajo tener una idea mas concreta de lo que el futuro depara y estar de alguna manera mejor preparado a una eventual falla y evitar costos de no-producción ya que una eventual falla en especial en los equipos críticos significaría pérdidas millonarias que por sí sola podrían justificar cualquier inversión.

1.1. - TITULO DEL TEMA PROPUESTO

Modelos de Optimización para la compra de repuestos críticos basados en la Confiabilidad de los equipos de Petroquim S.A.

1.2. - JUSTIFICACION

En estos momentos en Petroquim S.A., existe un plan de compra de repuestos críticos, el cual fue desarrollado por cada encargados de área (Mecánica, Electricidad y Instrumentación) y supervisado por Adquisiciones, los cuales basaron sus recomendaciones en; (1) criterios económicos, (2) diferenciando los recursos críticos de los no críticos y (3) “criterios subjetivos de riesgo de falla”, este último sin contar con un fundamento teórico al respecto, así este trabajo busca dar una mayor solidez a este plan de compras concentrándose en poder predecir de mejor forma la ocurrencia de fallas ya que ésta es la variable clave que permitirá tomar una mejor decisión y dar fundamentos mas técnicos e ingenieriles a la problemática en análisis.

Entonces la alta dirección solicitó al alumno entregar una nueva propuesta al Plan de Inversiones en repuestos críticos que permita decidir en que invertir el próximo año y además permita la reactualización para años posteriores.

De esta manera se espera tener una idea mas concreta de lo que el futuro depara y estar de alguna manera mejor preparado a una eventual falla y evitar costos de no-producción ya que una eventual falla en especial en los equipos críticos

significaría pérdidas millonarias que por sí sola podrían justificar cualquier inversión, pero surgen interrogantes cómo: ¿Qué sucede si no fallan?, ¿Cómo se justifican tales inversiones si estamos hablando de sumas considerables de dinero? ¿Cómo asignar de mejor forma los recursos de inversión?, Por lo tanto se busca dar un mayor sustento a las posibles decisiones.

1.3.- OBJETIVOS DEL ESTUDIO

▪ 1.3.1.- Objetivo general

Trazar un Modelo de inversiones en repuestos críticos que compatibilice los aspectos económicos de su adquisición y los de confiabilidad de los equipos, tendiente a garantizar la continuidad operacional de la planta.

▪ 1.3.2.- Objetivos específicos

- Apoyar las tareas de programación de mantenimiento, al definir cuales son los equipos con mayor probabilidad de falla y cuando se espera que fallen, estableciendo además los principales casos de falla.
- Crear un modelo que permita decidir cuánto invertir y en qué invertir a un nivel de riesgo, o cuanto invertir a un nivel de riesgo que quiera asumir la Dirección, o donde invertir para evitar de alguna forma costo por no-producción.

1.4.- ALCANCES O AMBITO DEL ESTUDIO

Como se dijo anteriormente este tema es un trabajo específico propuesto por la Empresa en el que se deben entregar los primeros avances al Directorio de Petroquim S.A. el día 22 de Diciembre, pero este se profundizará entre Enero y Febrero para quedar en condiciones de exposición comienzos de Marzo.

Este trabajo rescata toda la información proporcionada por el plan de inversiones anteriores y busca profundizar éste. Con respecto a las limitaciones y salvedades: en este trabajo sólo se analizarán los repuestos críticos que no tienen posibilidad de reparación en donde la definición de crítico será definido por los encargados de departamento y la información de tiempos entre fallas será proporcionada por ellos, no siendo nuestra responsabilidad la veracidad de ésta, se “espera” contar con toda la información con respecto al historial de falla de los equipos, pero de no contar con dicha información se recreará tomando en consideraciones teóricas y especificaciones de equipos similares, vida útil de los equipos y cualquier información que ayude definir de mejor forma su comportamiento. Se debe señalar que Petroquim S.A. es una Empresa nueva por lo tanto la información que se posee no sobrepasa los 4 años, además este trabajo rescata la teoría básica del “mantenimiento basado en confiabilidad”, no siendo el fin entrar en mayor profundidad, así solo se analizará el tiempo entre fallas y no hace un mayor alcance en el tiempo entre mantenimiento, el cual será incluido indirectamente en el costo de no-producción, los cuales fueron estimados en el estudio anterior ya señalado.

CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

2.1.- INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describirá la situación actual de la empresa, mencionando como se efectúan las operaciones que serán útiles para el desarrollo del tema. Para ello se presentará una breve reseña de la empresa en la cual se enmarca el proyecto, descripciones específicas tanto del proceso como de los productos que se fabrican.

2.2.- ANTECEDENTES GENERALES

En el año 1990, Petrox S.A. retoma de su carpeta de proyectos la construcción de una planta de Polipropileno, iniciando un estudio de prefactibilidad cuyos positivos resultados llevaron a ENAP y Petrox S.A. a procurar socios para este proyecto, para así formar la Sociedad de gestión de Estudios y proyectos de Petroquim Ltda. En el año 1996 Ipiranga Petroquímica S.A., empresa brasileña con basta experiencia en la producción y comercialización de resinas, se incorpora como socio estratégico de este proyecto.

Elegida la tecnología que utilizaría la planta se estructura un plan para conseguir el financiamiento, luego se selecciona a la empresa Tecnimont para el desarrollo de la ingeniería y montaje de la planta, quienes a través de Sigdo Koppers inician la construcción el año 1997.

Petroquim S.A. inicia sus actividades el 20 de diciembre de 1999, como único productor de polipropileno en Chile, con el objetivo de producir y comercializar un producto de alta calidad con la protección adecuada del medio ambiente, que permita aportar significativamente al desarrollo de la industria del plástico, uno de los sectores más modernos y dinámicos de la economía regional.

Con una inversión de 160 millones de dólares y con la licencia de Basell Polyolefins para el uso de la tecnología Spheripol®, Petroquim cuenta con una capacidad productiva de 120.000 ton/año, perfilándose como la compañía líder en el mercado chileno de los plásticos, capaz de cubrir la totalidad de la demanda nacional de polipropileno y abastecer en forma competitiva a otros países de Latinoamérica.

La planta de polipropileno de Petroquim se encuentra emplazada estratégicamente en el “Polo Petroquímico Energético de Talcahuano”, en un terreno de 14 hectáreas, junto a Petrox, principal proveedor de materias primas. Además la cercanía a los principales puertos de la región, a 5 kilómetros de San Vicente y a 6 kilómetros de Talcahuano y a otras principales vías transporte, permiten garantizar una distribución rápida y efectiva de los productos hacia clientes nacionales y extranjeros.

Las oficinas comerciales están ubicadas en Santiago, cerca de los principales clientes, proveedores y actividades económicas del país, proporcionando el apoyo adecuado tanto a los usuarios nacionales como extranjeros.

Accionistas

Ipiranga Petroquímica S.A., con un 33,4% de participación, es uno de los principales grupos económicos privados de Brasil, dedicado a la industria petroquímica y distribución de combustible, ubicado en Triunfo, Río Grande Do Sul, Brasil.

Petroquímica San Julio S.A., con un 43,4% de participación es una empresa de inversiones de la familia Izquierdo-Menéndez, con actividades en diversos rubros industriales, tales como industrias pesquera y maderera del país.

Petrox S.A., con un 7,5% de participación, es una empresa del holding ENAP, responsable de la refinación y abastecimiento de más del 41% del mercado de productos derivados del petróleo en Chile.

Empresa Nacional de Petróleos (ENAP), con un 7,5% de participación, es una entidad pública orientada a la exploración, extracción, refinamiento, transporte, almacenamiento y distribución de combustibles.

Inversiones Lengua S.A., con un 8,2% de participación, es una empresa de inversiones formada por los trabajadores de Petrox S.A., abocada a desarrollar proyectos de diversa índole.

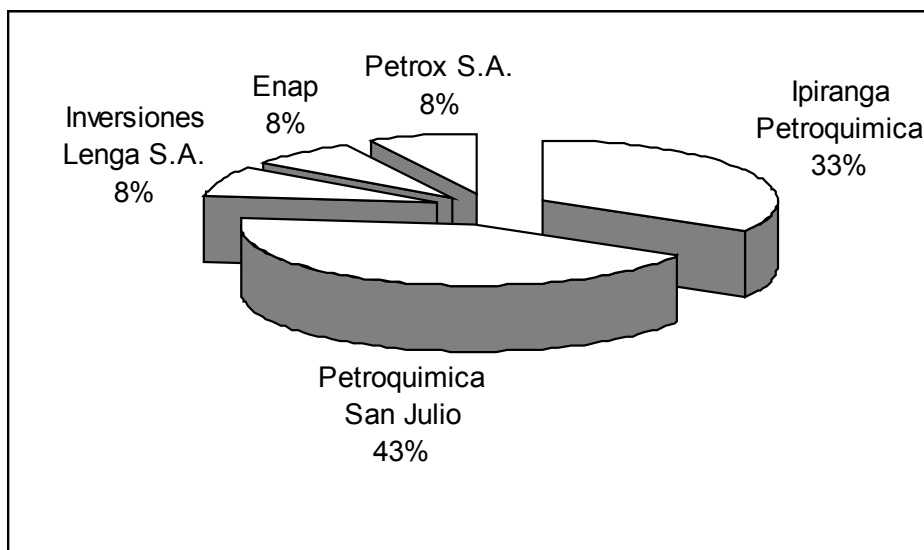


Gráfico 2.1: Distribución de la Propiedad de Petroquim S.A.

Fuente: Petroquim S.A.

2.3.- SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN PETROQUIM

Las exigencias del mercado en cuanto a calidad de productos y servicios con un mínimo impacto ambiental, y la necesidad interna de contar con directrices claras para operar en forma eficiente y segura fueron factores claves para que Petroquim implementara un Sistema Integrado de Gestión (SIGP) en el año 2001. Esta manera de trabajar considera la estructura organizacional, las actividades de planificación, responsabilidades, prácticas, procedimientos, procesos y recursos para desarrollar, implementar, revisar y mantener la Política Integrada de la empresa. El Sistema contempla las Gestiones de Calidad, Seguridad, Protección al Medio Ambiente, Recursos Humanos e Información.

El **Sistema de Gestión de Calidad (SGC)** asegura el cumplimiento de las actividades que influyen en la calidad del producto. Enmarcado en los requisitos establecidos en la norma **ISO 9001 del año 2000**, este sistema vela para que los

procesos se efectúen en forma disciplinada y estructurada de acuerdo a la política y objetivos de calidad de Petroquim, garantizando la satisfacción de los clientes.

El **Sistema de Gestión Medio Ambiental (SGMA)** consiste en fijar actividades que permitan actuar en compromiso con el medio ambiente. Para lograr un desempeño ambiental sano, este sistema actúa bajo la norma **ISO 14001**, lo que implica controlar el impacto de las actividades de la compañía según la política y objetivos ambientales que impere en Petroquim. Para mantener un alto nivel de eficiencia, productividad y motivación del personal, el **Sistema de Gestión de Recursos Humanos (SGRH)** asegura el cumplimiento de actividades que permitan alcanzar estos objetivos. Para llevar a cabo este método se cumplen con las normas **ISO 9001 del año 2000 e ISO 14001** en lo referente a las gestiones de recursos humanos.

Trabajar en un ambiente seguro y libre de riesgos para la salud son los objetivos del **Sistema de Seguridad y Salud Ocupacional (SGS)**.

Por último, el **Sistema de Información de Petroquim (SIP)** asegura el cumplimiento de las actividades relacionadas con el funcionamiento del Sistema Informático mediante el Software OneWorld de J.D. Edwards que apoya en forma integrada las labores administrativas de Petroquim.

Conducta responsable

Petroquim S.A. ha adoptado el compromiso voluntario con los códigos de Conducta Responsable®, los cuales están considerados en la planificación y desarrollo de las actividades del Sistema Integrado de Gestión Petroquim (SIGP).

Conducta Responsable® es el compromiso voluntario por el cual las empresas químicas se obligan a realizar esfuerzos permanentes para perfeccionar los procesos de producción, manejo, distribución, uso y disposición de sus productos, con el objeto de obtener las mejores condiciones de salud y seguridad para las personas y la más adecuada protección del medio ambiente y de los bienes de la comunidad.

La iniciativa, que comenzó en Canadá en el año 1986, está siendo adoptada por la industria química de todo el mundo. En Chile se formalizó en el año 1993, cuando ASQUIM, la Asociación Gremial de Industriales Químicos de Chile, desarrolló el Código de Conducta Ambiental, el cual fue adoptado por sus asociados.

2.4.- PROCESO PRODUCTIVO

El proceso productivo utilizado en la planta es el proceso Spheripol® cuya tecnología, garantiza una operación segura de la planta con un mínimo de impacto sobre el medio ambiente, dicho proceso consiste en la polimerización del monómero propileno en fase líquida, llevado a cabo en una batería de reactores en presencia de complejos catalizadores

El resultado final del proceso de polimerización, extrusión y homogenización es el polipropileno, uno de los materiales más importantes y cuyo uso es el de mayor crecimiento en el ámbito mundial. Es liviano, con alta resistencia, tanto mecánica como química y una gran versatilidad. Se utiliza en la fabricación de envases (rígidos y flexibles), piezas industriales, artículos domésticos, juguetes, menajes, sacos, etc.

La secuencia de tratamiento y procesos por el cual las materias primas van dando forma al producto terminado, se encuentran descritas a continuación.

▪ **2.4.1.- Área Preparación del Catalizador**

El catalizador sólido es dispersado en una mezcla de aceite/ grasa, para producir una pasta catalítica y enviarla al proceso. Los tres componentes del catalizador (Trietil Aluminio, Donor y Antiestáticos) son alimentados en la razón requerida al Precontactor, donde se activa el catalizador.

▪ **2.4.2.- Área Prepolimerización y Polimerización**

Los componentes del área de preparación del Catalizador, se cargan en el Precontactor donde ocurre la conversión del catalizador. La pasta tiene un tiempo de permanencia determinado, para luego inyectarla al mezclador donde entra en contacto con el propileno líquido frío.

El Catalizador, Donor y Teal (Trietil Aluminio) provenientes del Precontactor, se mezclan con propileno en el mezclador en línea para luego alimentar a los dos Reactores Loop que operan en serie.

Ambos reactores son alimentados con propileno (para mantener una concentración constante) e hidrógeno (para controlar la viscosidad intrínseca del Polímero). Se adiciona Etileno en caso de producir Copolímero Randómico.

La temperatura de la reacción es regulada por medio de agua que circula en la chaqueta de los reactores. El tiempo de residencia en los reactores es de 1.5 horas.

▪ **2.4.3.- Área Desgasificación y Recompresión del Monómero**

El polímero es continuamente descargado hacia la primera etapa de desgasificación (Estanque de Flash) a través de una línea enchaquetada con vapor donde se gasifican los monómeros. El gas que sale de este estanque es condensado y reciclado a la reacción previo paso por el Lavador de Propileno.

En esta etapa también se recibe el propileno proveniente de Petrox, el cual llega al Estanque de Alimentación y de ahí es enviado al proceso.

▪ **2.4.4.- Área Sección de Copolímero de Alto Impacto**

El Homopolímero del Estanque de Flash es enviado Reactor Fase Gas, para la producción de Polímero de Alto Impacto. La fluización es mantenida reciclando el gas del reactor. La corriente rica en Etileno sale por el tope de este Lavador, reciclada al Reactor Fase Gas, mientras que en el fondo, mezcla de propileno y propano se junta con el tope del Lavador de Propileno y van hacia el enfriador de tope, donde se condensa y recicla.

▪ **2.4.5.- Área Steaming y Secado**

Para todos los productos, el polímero que sale del área de reacción fluye hacia el Steamer, donde el catalizador es completamente desactivado con vapor y el monómero residual es eliminado.

Desde el Steamer, el polímero fluye por gravedad hacia el secador, siendo transportado hacia un Silo intermedio.

▪ **2.4.6.- Área Extrusión**

Desde este Silo, diversos aditivos son mezclados con el polímero en el Mezclador Continuo que alimenta la Extrusora para la producción de pellets.

Los pellets son llevados al Secador centrífugo para separar el agua y luego a un Harnero Clasificador, posteriormente pasan a los Silos de Homogenización.

▪ **2.4.7.- Área Homogenización y Ensacado**

Se cuenta con cuatro Silos de Homogenización, desde los cuales se envían los pellets hacia los Silos de Ensaque, que alimentan una ensacadora automática para Big Bags de 700 y 1250 Kg, y una ensacadora semiautomática de bolsas de 25 Kg.

▪ **2.4.8.- Área Sistema de Evacuación y unidades de servicio**

Se cuenta con sistemas de evacuación de alta y baja presión y un ciclón para las descargas a la antorcha.

Las unidades de servicio son las unidades de refrigeración, de recuperación de condensado, pulmón de aire de instrumento y unidad de tratamiento de aceite contaminado.

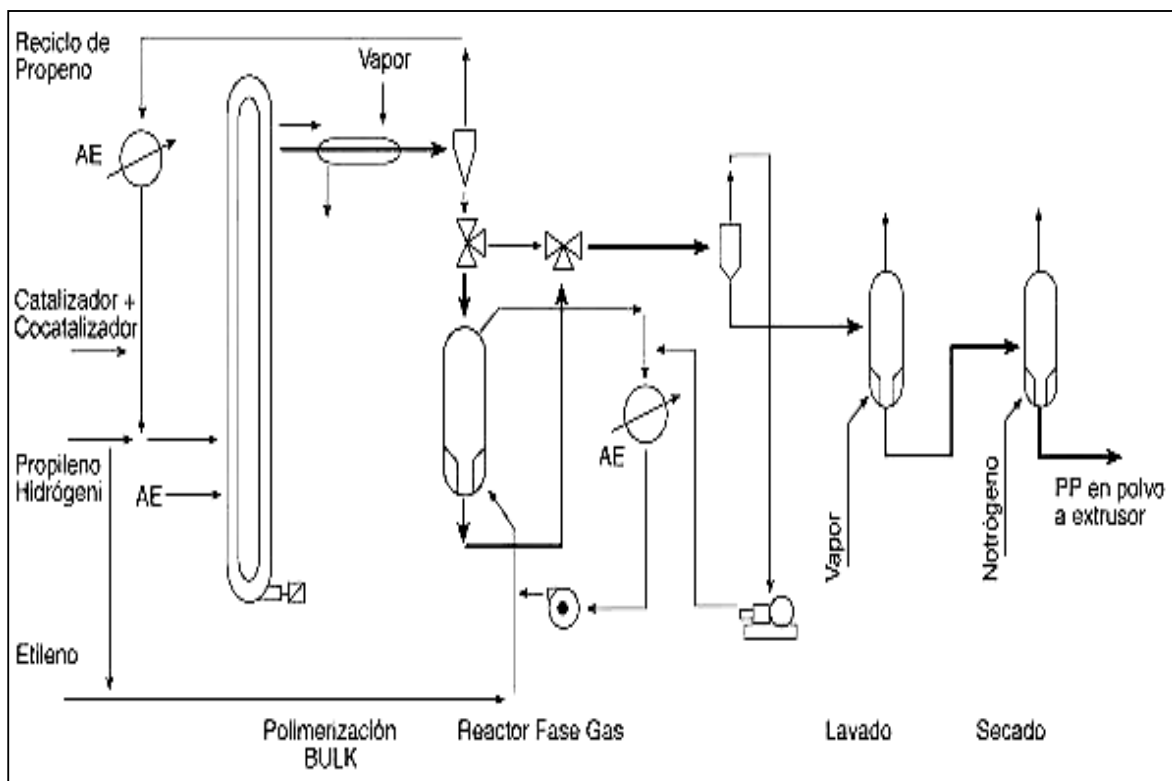


Figura 2.1: Proceso Productivo

Fuente: Petroquim S.A.

2.5.- PRODUCTOS

Petroquim S.A. elabora polipropileno que se presenta en tres formas comerciales: Homopolímero (HOMO), Copolímero Randómico (RACO) y Copolímero Heterofásico (HECO). Cada uno de ellos tiene aplicaciones específicas y la

posibilidad de ser modificado y adaptado, a través de múltiples sistemas de aditivación. Estos productos se detallan a continuación:

▪ **2.5.1.- Polipropileno Homopolímero**

Contiene sólo monómeros de propileno a lo largo de su cadena polimérica. Su estructura presenta un alto grado de cristalinidad, lo que se traduce en el aporte de rigidez y dureza a la pieza elaborada, pero exhibe pobre resistencia al impacto a bajas temperaturas y su transparencia no es suficiente para algunas aplicaciones.

El homopolímero se utiliza:

- Inyección de artículos de uso doméstico, envases y contenedores, muebles, juguetes y tapas.
- Extrusión de fibras y filamentos (para cordeles, alfombras, hilos, tapices, sacos, pañales desechables)
- Películas orientadas y no orientadas y termorretraíbles (empaquete flexible para alimentos y vestuario)
- Extrusión de grandes planchas (de hasta 250 µm de espesor) para cubiertas de muebles y estanques y planchas delgadas para termoformar envases y contenedores.

Petroquim fabrica 16 productos o grados de Homopolímero para diversas aplicaciones, estos son el PH0130, PH0131, PH0241, PH0242, PH0320, PH 0362, PH 0950, PH0952, PH0953, PH1310, PH1312, PH1321, PH1710, PH2610, PH2621 y el PH3515.

▪ **2.5.2.- Copolímero Randómico**

Este copolímero se produce con la adición de un comonomero, generalmente etileno y en algunos casos 1-buteno y 1-hexeno, durante la reacción de polimerización en el reactor.

El comonomero sustituye parcialmente (1 a 7%) al propileno en el crecimiento de la cadena. La inserción del comonomero es al azar y su distribución es estadística a lo largo de la cadena. La inserción de etileno disminuye la formación de esferulitas, bajando el porcentaje de zonas cristalinas. De esta manera, se obtiene un material más transparente que el homopolímero y también, inferior temperatura de fusión y gravedad específica. La menor temperatura de fusión, conlleva a un menor calor de distorsión, menor temperatura de ablandamiento y menor temperatura de sellado.

La temperatura de transición vítrea del copolímero randómico, es menor que la del homopolímero. Esto sumado a la reducción de las zonas cristalinas y aumento de las zonas amorfas, da como resultado una mayor resistencia al impacto, aún a bajas temperaturas (-20 °C).

La reducción de cristalinidad, resulta en una disminución de la rigidez, dureza y un incremento del ablandamiento y la flexibilidad, disminuyendo la resistencia a la tracción, con respecto al homopolímero.

El bajo punto de fusión (<132 °C) del copolímero randómico, permite incrementar la velocidad en las líneas de envasado, debido a las menores temperaturas de sellado.

Por otro lado, puede ser reciclado con pérdidas poco significativas en resistencia y claridad.

- El principal uso del copolímero randómico son aplicaciones donde se requiere alta claridad, poca rigidez y propiedades de barrera a la humedad.
- Soplado de botellas para llenado en caliente y con barrera de multicapa (envases de alimentos, productos de higiene personal y limpieza del hogar)
- Inyección de envases rígidos y semirígidos, estuches de video cassette, juguetes, bandejas desechables y reusables para alimentos, potes y envases de alimentos posibles a ser utilizados en microondas.
- Películas orientadas y no orientadas y termorretraíbles (empaquete flexible para alimentos y vestuario)
- Película orientada de alta claridad, brillo y resistencia en envoltorios contraíbles para alimentos, juguetes, cigarrillos y juegos.

En Petroquim se fabrican 4 grados de Copolímero Randómico el PRB 0131, PRB 1311, PRB 0851, y el PRB 2511.

▪ 2.5.3.- Copolímero Heterofásico (Alto Impacto)

Este copolímero tiene un contenido mayor de etileno (entre 10 y 25%). En la producción del copolímero de alto impacto se forma una fase bipolimérica de etileno/propileno con características gomosas. Se producen mediante un sistema de reactores en cascada. En el primer reactor se obtiene un homopolímero con menor tiempo de proceso, que es transferido a un segundo reactor en fase gas, donde se adicionan etileno y propileno. Estos se activan por acción del catalizador proveniente del primer reactor, formando el copolímero de etileno-propileno (60% de etileno y 40% de propileno) que crece dentro de la matriz de polipropileno.

El copolímero de alto impacto, o también denominado copolímero heterofásico o en bloque, se utiliza, como su nombre lo indica, en aplicaciones que requieren elevada resistencia al impacto y dureza, en especial a bajas temperaturas (hasta -35 °C). La resistencia al impacto depende del tipo, cantidad y morfología de la fase elastomérica (etileno-propileno), mientras que la rigidez es determinada por la matriz de polipropileno.

El principal uso de estos copolímeros es:

- Inyección de piezas automotrices, artículos de uso doméstico, baldes industriales, carcasas de batería, envases de pintura y muebles de terraza.
- Extrusión de planchas, para sustitución de termoplásticos de ingeniería de alto impacto, cartónplast, fitting, tuberías.
- Soplado de botellas para llenado en caliente y con barrera de multicapa

(envases de alimentos, productos de higiene personal y limpieza del hogar).

Petroquim fabrica 7 grados de Copolímero Heterofásico para diversas aplicaciones, estos son el PCC 0141, PCC 0615, PCC 0642, PCC 2315, PCC 4414, PCC 7015 y el PCD 1214.

CAPITULO 3: MARCO TEORICO

3.1.- PROBABILIDADES

▪ 3.1.1.- Probabilidad

Mide la mayor o menor posibilidad de que se dé un determinado resultado (suceso) cuando se realiza un experimento aleatorio. En donde la probabilidad toma valores entre 0 y 1.

▪ 3.1.2.- Experimento aleatorio

Es aquel que puede representar diversos resultados, dentro de conjunto posible de soluciones, y aún realizando el experimento en las mismas condiciones. Por lo tanto a priori no se conoce cual de los resultados se va a presentar.

▪ 3.1.3.- Reglas de la Adición

La regla de la Adición expresa que: la probabilidad de ocurrencia de al menos dos sucesos A y B es igual a:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad \text{si A y B son mutuamente excluyentes} \quad (3.1)$$

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad \text{si A y B son no excluyentes} \quad (3.2)$$

Siendo:

$P(A)$ = Probabilidad de ocurrencia del evento A.

$P(B)$ = Probabilidad de ocurrencia del evento B.

$P(A \cap B)$ = Probabilidad de ocurrencia simultánea de los eventos A y B.

▪ 3.1.4.- Eventos Independientes

Dos o más eventos son independientes cuando la ocurrencia o no-ocurrencia de un evento no tiene efecto sobre la probabilidad de ocurrencia de otro evento (o eventos). Un caso típico de eventos independientes es el muestreo con reposición, es decir, una vez tomada la muestra se regresa de nuevo a la población donde se obtuvo.

▪ 3.1.5.- Eventos dependientes

Dos o más eventos serán dependientes cuando la ocurrencia o no-ocurrencia de uno de ellos afecta la probabilidad de ocurrencia del otro(o otros). Cuando tenemos este caso, empleamos entonces, el concepto de probabilidad condicional para determinar la probabilidad del evento relacionado. La expresión $P(A/B)$ indica la probabilidad de ocurrencia del evento A sí el evento B. Se debe tener en claro que A/B no es una fracción.

$$P(A/B) = P(A \cap B) / P(B)$$

(3.3)

Reglas de Multiplicación

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad \text{Si A y B son independientes} \quad (3.4)$$

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B/A) \quad \text{Si A y B son dependientes.} \quad (3.5)$$

$$P(A \cap B) = P(B) \cdot P(A/B) \quad \text{Si A y B son dependientes} \quad (3.6)$$

Ejemplo:**Caso 1**

Si existe un sistema compuesto por dos equipos, en donde el sistema falla si alguno de ellos falla, la probabilidad que “no falle el sistema”, es equivalente a decir que es la probabilidad que no falle el primer equipo y que no falle el segundo equipo.

Sea:

$P(R_1)$ = Probabilidad que no falle el primer equipo

$P(R_2)$ = Probabilidad que no falle el segundo equipo

$P(R_1 \cap R_2)$ = Probabilidad que “no” falle el Sistema.

Así la probabilidad que no falle el sistema se define como:

$P(R_1 \cap R_2) = P(R_1) \cdot P(R_2)$ (Según la ecuación 3.4, siempre cuando R_1 y R_2 sean independientes)

Caso 2

Ahora el mismo sistema compuesto por los mismos dos equipos, pero con la diferencia que basta que un equipo funcione para que el Sistema no falle, Por lo tanto la Probabilidad que falle el Sistema es la Probabilidad que Falle el Primer equipo y que falle el segundo equipo.

Sea:

$P(F_1)$ = Probabilidad que falle el primer Equipo.

$P(F_2)$ = Probabilidad que falle el segundo Equipo.

$P(F_1 \cap F_2)$ = Probabilidad que Falle el sistema.

Así la probabilidad que falle el sistema se define como:

$P(F_1 \cap F_2) = P(F_1) \cdot P(F_2)$ (Según la ecuación 3.4, siempre cuando F_1 y F_2 sean independientes)

En estadística el caso 1 es conocido como sistema en serie y el caso 2 sistema en paralelo y la mezcla de ambos casos es conocido como sistema mixto.

▪ **3.1.6.- Teorema de Bayes**

Si B_1, B_2, \dots, B_n son n eventos mutuamente excluyentes, de los cuales uno debe ocurrir, es decir $\sum_{i=1}^n P(B_i) = 1$ entonces

$$P(B_j / A) = \frac{P(B_j)P(A / B_j)}{\sum_{i=1}^n P(B_i)P(A / B_i)} \quad , j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.7)$$

A primera vista no es más que una aplicación de las probabilidades condicionales. Sin embargo, ha sido clave en el desarrollo de inferencia estadística bayesiana en la que se emplea la interpretación subjetiva de la probabilidad.

3.2.- COMPORTAMIENTO DE LOS EQUIPOS

▪ 3.2.1.- Disponibilidad de Operación

Si observamos la situación de un equipo en algún instante cualquiera, podemos reconocer 2 situaciones.

- Equipo disponible para la operación
- Equipo no disponible para la operación

Estas situaciones la podemos representar en la siguiente escala de tiempo.

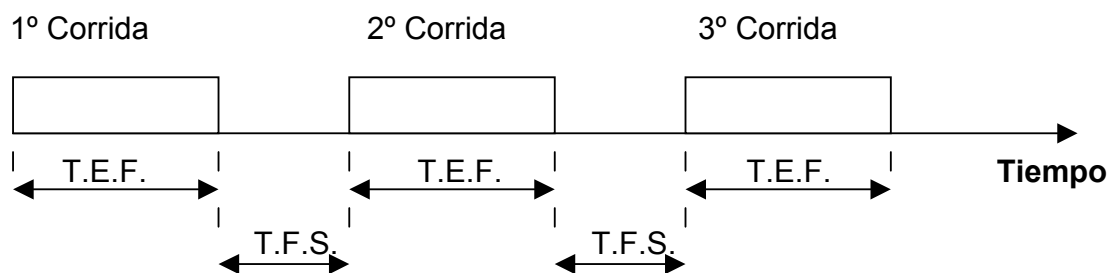


Figura 3.1: Disponibilidad de un equipo en el tiempo
Fuente: "HF", Consultores técnicos Gerenciales

Donde:

T.E.F. = Tiempo entre Fallas.

T.F.S. = Tiempo fuera de Servicio.

Se denomina "corrida" a la condición de servicio sin interrupción (por falla o detención para mantenimiento programada), esto se define para equipos reparables.

El equipo se caracteriza por los tiempos asociados a estos 2 eventos (En servicio y fuera de servicio).

El comportamiento de los equipos (máquina, sistema, etc.) se representa a través del comportamiento de los tiempos disponibles para la operación y el no disponible para ello.

Por otra parte una característica general de los diferentes “Tiempos” que se pueden definir es que ellos son “aleatorios”.

Clasificación de los Tiempos según las características definidas.

- T.E.F. = Tiempo entre fallas definidas para elementos reparables.

T.P.E.F = Tiempo promedio entre fallas.

$$T.P.E.F. = \frac{\sum Tpo.Servicio.}{N^{\circ}.Corridas} \quad (3.8)$$

- T.A.F. = Tiempo antes de la falla (definido para elementos no reparables)

T.P.A.F = Tiempo promedio hasta la falla.

El equipo se conoce cuando se conocen estos tiempos.

▪ 3.2.2.- Efectividad

A partir de estos tiempos se definen algunos conceptos relacionados entre sí, muy importantes en mantención los cuales se definen y visualizan en la siguiente imagen:

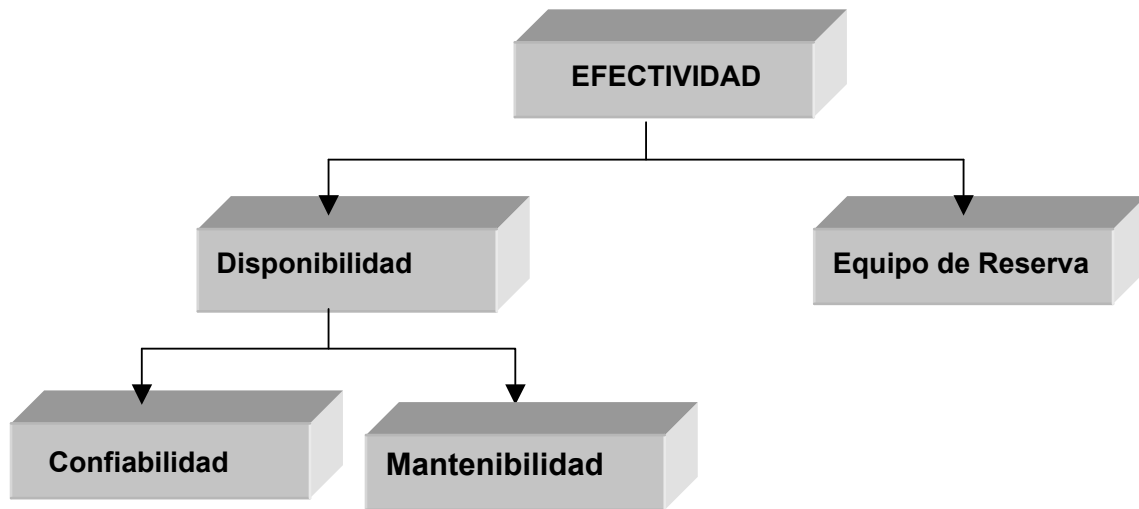


Figura 3.2: Componentes de la Efectividad
 Fuente: "Hf", Consultores técnicos Gerenciales

Definición de Efectividad

Probabilidad de que el sistema (Maquina o Equipo) realice las funciones requeridas conforme a los estándares establecidos durante un periodo determinado.

Equipo de reserva

Probabilidad de falla inaceptable (muy caro).

Falla de alto costo (en los aviones se manejan equipos adicionales "se llaman equipos imposibles")

Disponibilidad

Probabilidad de que una maquina (sistema o elemento) este disponible para la operación (conforme a los estándares requeridos) durante un determinado periodo de tiempo.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\sum Tpo.Servicio}{\sum Tpo.Servicio + \sum Tpo.Fuera.Servicio} \quad (3.9)$$

Confiabilidad

“Probabilidad de que una maquina (Sistema o elemento) no falle” durante un periodo de tiempo determinado. Este concepto será analizado con mayor profundidad mas adelante.

Mantenibilidad

Probabilidad de que el sistema (Maquina o equipo) realice las funciones requeridas conforme a los estándares establecidos durante un periodo determinado. Capacidad de volverlo al servicio en caso de falla.

La Mantenibilidad esta para evitar problemas, para esto está la Confiabilidad.

3.3.- CONFIABILIDAD

▪ 3.3.1.- Definición de Confiabilidad

Es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, cuando opera en el entorno para el que ha sido diseñado.

Debe observarse que hay cuatro atributos específicos de esta definición. Estos son: (1) probabilidad; (2) un funcionamiento adecuado; (3) calificación con respecto al entorno; y (4) tiempo. Los cuatro son importantes.

Así los modelos de Confiabilidad serán desarrollados sucesivamente incluyendo secuencialmente en los mismos cada uno de los cuatro atributos.

Probabilidad: El resultado general que buscamos es poder cuantificar la posibilidad de no fallar. Así la probabilidad es la unidad de medida de la Confiabilidad.

Además sé, espera poder expresar la probabilidad de funcionamiento del sistema en términos de los componentes que lo integran.

Funcionamiento adecuado: El punto de partida para el estudio de la Confiabilidad es el funcionamiento correcto. Anteriormente, no definimos el correcto funcionamiento. En cambio, señalamos el hecho de que el complemento del funcionamiento correcto es el fallo.

Entorno: Para examinar las relaciones entre el entorno de funcionamiento y la Confiabilidad, comenzamos con la pregunta de por qué fallan los equipos.

Una respuesta razonable es que normalmente el fallo de un sistema se debe al fallo o fallos de uno o varios componentes. Esta es una razón por la que los modelos de estructura componentes-sistema son importantes. ¿Entonces por qué fallan los componentes? Una respuesta verosímil es que la operación de un sistema implica la imposición de fuerzas (energía) sobre el sistema y sus componentes. Estas fuerzas inducen y sostienen el progreso de varios tipos de procesos de deterioro, los cuales finalmente tienen como resultado el fallo de componentes.

Tiempo: La Confiabilidad es la probabilidad de funcionamiento satisfactorio a lo largo del tiempo. El supuesto subyacente implícito es que en una muestra de dispositivos idénticos, la supervivencia (o duración de vida) se dispersa de una manera que se modela bien con la probabilidad y, por tanto, con una función de distribución. Por tanto, la extensión de las medidas de fiabilidad para incluir el tiempo implica la especificación de las distribuciones de probabilidad, las cuales deben ser modelos razonables de la dispersión de duración de vida. Este es el tema que se trata a continuación

▪ **3.3.2.- Función de Confiabilidad, vida media y tasa de falla**

Notación: En lo que sigue, se denotará por **T** a la variable aleatoria continua que describe los tiempos de fallo de un determinado sistema, por lo tanto $T =$ "tiempo transcurrido hasta que se produce el fallo".

Denotando por $f(t)$ a la función de densidad de probabilidad (f.d.p.) de T , y por $F(t)$ a su función de distribución (f.d.), se cumplirá:

$$P(a \leq T \leq b) = \int_a^b f(t) dt \quad (3.10)$$

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad (3.11)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3.12)$$

La función de Confiabilidad $R(t)$, es la complementaria de la f.d.($F(t)$) , nos determina la probabilidad de que el sistema "sobreviva" al instante t (esta función determina la proporción de que el dispositivos inicial siga funcionando correctamente en el instante t) o sea que el lapso de duración del sistema sea mayor que un tiempo t . De acuerdo con lo anterior.

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (3.13)$$

Vida Media

Se llama **vida media** o **tiempo medio hasta el fallo** (*Mean Time To Failure*) de un dispositivo a la esperanza de la v.a. T , la vida media determina el tiempo de duración esperada de un dispositivo:

$$T.M.E.F = E[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (3.14)$$

Cuando se consideren dispositivos reparables (que puedan seguir funcionando tras un fallo), se hablará de “tiempo medio entre fallos” (T.M.E.F).

Tasa de Falla (Indice de Riesgo)

Con respecto a la tasa de falla se puede decir lo siguiente:

Es un indicador de cuan correlacionado con el tiempo en operación está la condición del equipo.

Es una cantidad que permite determinar mayor o menor predictibilidad del tiempo de falla.

Es una magnitud interesante en el ámbito o propósito del mantenimiento “basado en tiempo”.

Probabilidad de tener una falla (del sistema o elemento) entre los instantes “ t ” y “ $t+dt$ ”, en condiciones de que el sistema no haya fallado antes de “ t ”.

Se define la **tasa de fallo media** en el intervalo (t_1, t_2) como:

$$\lambda(t_1, t_2) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)}$$

Observar que $R(t_1) - R(t_2)$ representa la proporción de dispositivos totales que, habiendo sobrevivido al instante t_1 , han fallado en el intervalo (t_1, t_2) . Al dividir esta diferencia por $R(t_1)$ se obtiene la proporción de dispositivos supervivientes a t_1 que han fallado en (t_1, t_2) .

$$\frac{R(t_1) - R(t_2)}{R(t_1)} \tag{3.15}$$

es la probabilidad condicional de que un dispositivo que haya sobrevivido al instante t_1 falle en el intervalo (t_1, t_2) . Finalmente, al dividir por la longitud del intervalo, obtenemos la proporción anterior (su media) por unidad de tiempo.

Haciendo tender t_2 a t_1 , obtenemos la llamada **tasa de fallo** o **tasa de riesgo**:

$$\lambda(t_1) = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} = \frac{-R'(t_1)}{R(t_1)} = \frac{f(t_1)}{R(t_1)} \tag{3.16}$$

De lo anterior podemos expresar matemáticamente la tasa de falla como:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{3.17}$$

Demostración:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta F(\bar{t}) / dt}{R(t)} ; \quad \Delta F(t) = F(t + \Delta t) - F(t)$$

$$\lambda(\bar{t}) = \frac{\Delta F / \Delta t}{1 - F(\bar{t})} = \frac{\Delta F / \Delta t}{R(\bar{t})} = \frac{f(t)}{R(\bar{t})} \quad \text{donde} \quad R(t) + F(t) = 1$$

Para datos discretos se puede calcular conforme a la expresión aproximada

siguiente:
$$\bar{\lambda}(\bar{t}_i) = \frac{u_i}{N_S(s)} * \frac{1}{\Delta t_i} \quad (3.18)$$

Donde:

$\bar{\lambda}(\bar{t}_i)$ = Tasa de falla promedio en el intervalo de tiempo Δt_i

u_i = N° de fallas producidas en el intervalo de tiempo Δt_i

N_S = N° de sobrevivientes al comienzo del intervalo Δt_i

La tasa de fallo puede pues interpretarse como la “velocidad” a la cual se producen los fallos, es una medida de lo propenso que resulta el dispositivo a fallar en función de su edad.

Observar que, a partir de la última ecuación, es posible expresar $R(t)$ como función de $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\left(\frac{dF(t)}{dt}\right)}{R(t)} = \frac{-1}{R(t)} * \frac{dR(t)}{dt} \Rightarrow \lambda(t)dt = \frac{-dR(t)}{R(t)}$$

si ahora tomamos integrales a ambas partes:

$$\int_0^t h(u)du = \int_0^t \frac{dR(u)}{R(u)}du = -[\log R(u)]_0^t = -\log R(t)$$

de donde:

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(u) du} \quad (3.19)$$

▪ 3.3.3.- Mecanismos de Falla

Los mecanismos de falla es una información interesante para poder determinar la forma (tendencia) de la tasa de falla para así poder predecir la falla a partir del tiempo de operación.

Estos mecanismos incluyen:

- **Fatiga:** el material es sujeto a esfuerzos alternados y las fallas son progresivas y ocurre como una extensión de grietas en pequeños incrementos.
- **Desgaste:** es el daño superficial en la cual hay una pérdida progresiva de material debida a contacto mecánico. El desgaste puede ser abrasivo, oxidativo, corrosivo.
- **Esfuerzos,** son fallas que se producen por sobrecarga.
- **Erosión,** destrucción del material por acción abrasiva de fluidos o partículas en movimiento.
- **Corrosión,** la reacción química o electromecánica entre un material y su medio ambiente.

La erosión-corrosión, acción conjunta de erosión y corrosión en la presencia de un fluido en movimiento ya sea líquido o gas.

- **Cavitación,** degradación superficial debido a la implosión de gas o burbujas de vapor.

- **Corrosión acuosa**, ocurre a temperaturas relativamente bajas en la presencia de agua líquida.

El comportamiento de la tasa de falla nos permite “observar” en que medida el tiempo en operación influye sobre la acción de los mecanismos de fallas.

Respecto de los mecanismos de tasa de falla v/s tiempo, se tienen los siguientes casos.

Caso1

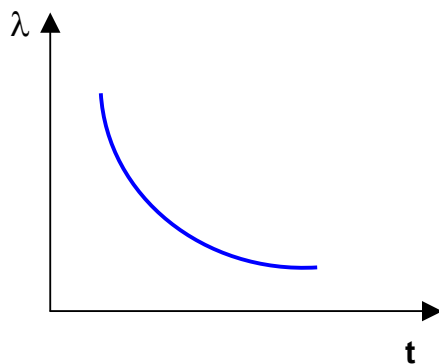


Figura 3.3: Tasa de falla descendiente

Caso 2

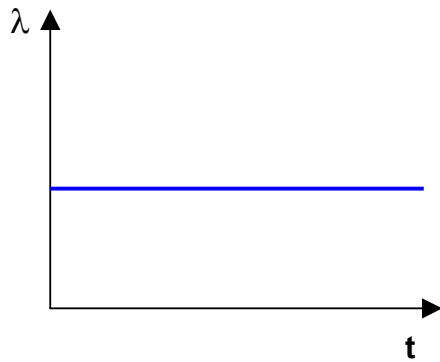


Figura 3.4: Tasa de falla Constante

Caso 3

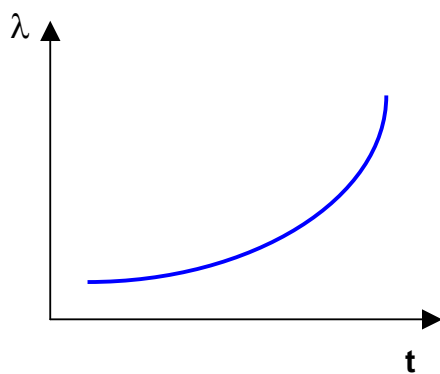


Figura 3.5: Tasa de Falla ascendente

Los mecanismos señalados en el caso 1 y caso 2 no tienen nada que ver con el tiempo en operación.

En el caso 3 la falla está vinculada con el tiempo de operación.

Importante: El comportamiento de la tasa de falla está determinado por los mecanismos de falla.

En relación con esto, parece razonable el comportamiento siguiente:

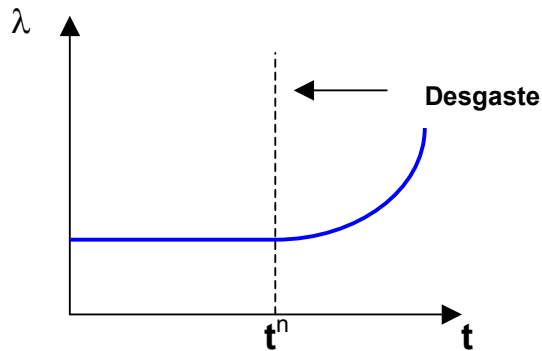


Figura 3.6: Desgaste de un Equipo

Esto implica que el equipo funciona “bien” durante el periodo $(0-t^n)$ y después se “desgasta”.

Esto es verdad para ciertos tipos de equipos sencillos y para algunos elementos complejos con modos de fallo dominante.

En particular las características de desgaste se encuentran a menudo donde los elementos están en contacto directo. También las fallas son debidas a la corrosión o fatiga.

¿Cuál es el comportamiento de la tasa de falla para los distintos elementos?

Se han hecho estudios que permiten reconocer la existencia de los siguientes modelos.

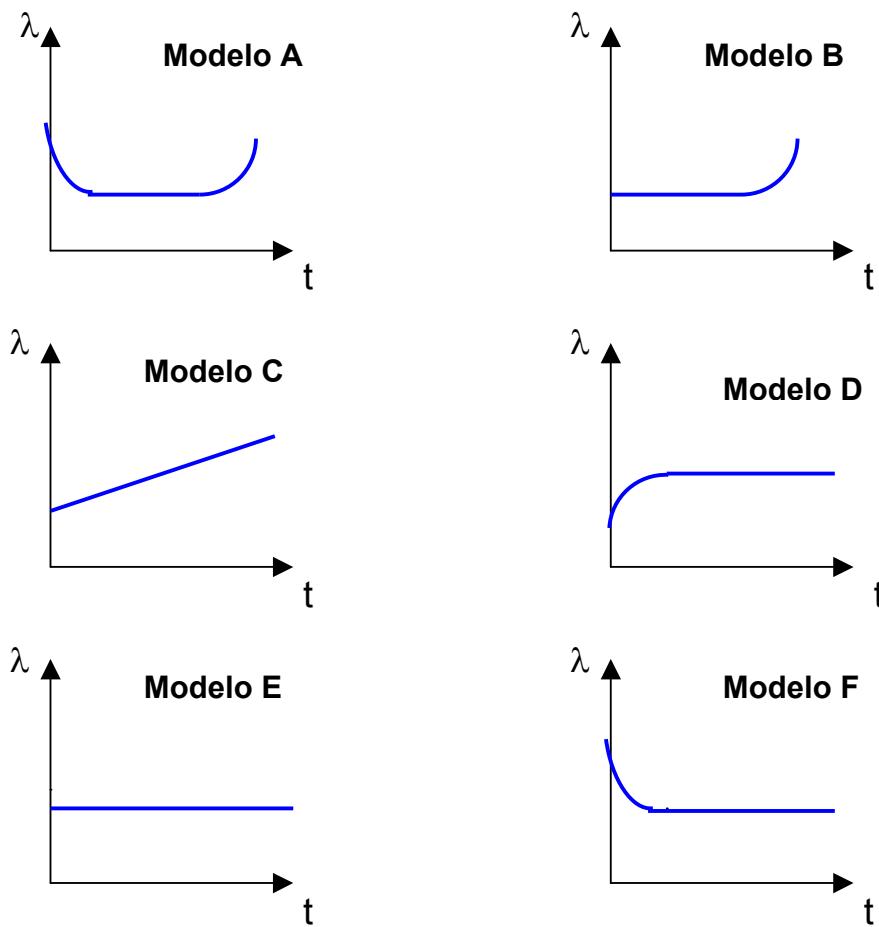


Figura 3.7: Comportamientos de la tasa de falla
 Fuente: "HF", Consultores técnicos Gerenciales.

De estos modelos, el modelo tradicionalmente se ha reconocido como válido para sistemas mecánicos es el A, conocido como "curva de la bañera"

Curva de la Bañera

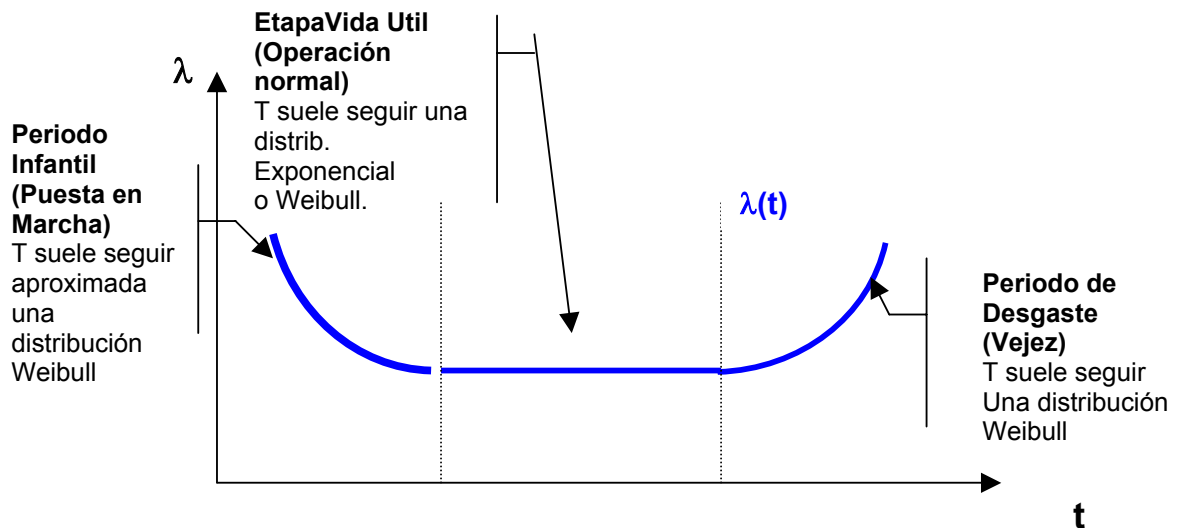


Figura 3.8: Curva de la Bañera
Fuente: UOC, Universitat Oberta de Catalunya

En la etapa de periodo infantil o puesta en marcha (tasa de falla decreciente) no es el desgaste el causante principal de las fallas sino más bien son los errores humanos los causantes de estas, mal montaje, fallas de diseños (es importante la supervisión y procedimientos claramente establecidos).

En la etapa de vida útil o operación normal (tasa de falla constante), el mecanismo de falla no tiene nada que ver con el tiempo de operación, son fallas que se producen por sobrecarga $\alpha=1$. El avión choca con un pájaro, son absolutamente aleatorios, pedrazo a un auto. Uno no puede establecer un tiempo entre falla y el tiempo de operación.

En el periodo de vejez o desgaste (tasa de falla creciente), el deterioro está vinculado con el tiempo, antes de que falle se debería arreglar.

En la mayoría de los dispositivos electromecánicos, la función tasa de fallo tiene forma de bañera: cuando se inicia la vida de un aparato, la tasa de fallo instantánea resulta ser relativamente alta (es lo que se denomina "mortalidad infantil"); una vez que los componentes y partes electromecánicas se han acoplado, la tasa de fallo es relativamente constante y baja (etapa de "vida útil"); más adelante, tras un tiempo de funcionamiento, la tasa de fallo vuelve a incrementarse hasta que, finalmente, todos los dispositivos habrán fallado ("efecto envejecimiento").

Así, por ejemplo, muchos automóviles nuevos suelen presentar pequeños defectos de funcionamiento al poco de comprarse (elevada tasa de fallos inicial). Una vez solventados tales defectos, es de esperar que el vehículo proporcione un largo y complaciente período de funcionamiento (baja tasa de fallos intermedia. Mas tarde, conforme pasan los años, el automóvil se vuelve más propenso a sufrir averías hasta que, finalmente, después de 15 o 20 años, prácticamente todos los vehículos están inservibles (elevada tasa de fallos final).

El mecanismo de falla está vinculado con el tiempo de operación para la etapa de desgaste no así para el periodo infantil y la etapa de vida útil.

▪ **3.3.4.- Ley de Falla $f(t)$**

Es el modelo probabilístico asociado al comportamiento del tiempo entre fallas. Las leyes de falla que mejor parecen reflejan el comportamiento del T.E.F. son la "exponencial" y la "Weibull".

La ley exponencial resulta particularmente adecuada para el estudio de la confiabilidad de sistemas eléctricos, en tanto que la ley de Weibull, lo es para sistemas mecánicos.

▪ **3.3.4.1.- Ley de Weibull**

Es una distribución probabilística versátil que permite modelar el cambio de la probabilidad en función del tiempo y que permite representar varios modelos estadísticos según sea el valor de alguno de sus parámetros.

Su f.d.p es:

$$f(t; \alpha, \beta) = \frac{\alpha(t - \delta)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\beta}\right)^\alpha} \quad x - \delta > 0, \quad t = \text{Tiempo en operación} \quad (3.20)$$

α = Parámetro de forma: Depende del mecanismo de desgaste.

β = Parámetro de escala (tpo) o también denominado característica de falla.

δ = Parámetro de posición.

Según la evidencia empírica se ha podido hacer una estimación del parámetro de forma para la distribución Weibull, para distintos mecanismos de falla.

Estas estimaciones se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 3.1
Fuente "Hf" Consultores técnicos Gerenciales.

MECANISMO DE FALLA	α
Esfuerzo	1
Fatiga	1.3
Corrosión	2.5
Desgaste	3.5
Paradas Adm.	0.5

Importante:

$\alpha < 1$, tasa de falla, descendente.

$\alpha = 1$, tasa de falla, constante.

$\alpha > 1$, tasa de falla, ascendente.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\beta}\right)^\alpha} \tag{3.21}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\beta}\right)^\alpha} \tag{3.22}$$

Si $\delta = 0 \Rightarrow F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\beta}\right)^\alpha}$

$$E(t) = T.P.E.F. = \delta + \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad \Gamma(x) = \text{Función gamma} \tag{3.23}$$

$$\lambda(t) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \tag{3.24}$$

Para $\delta=0$ y $\beta=10$

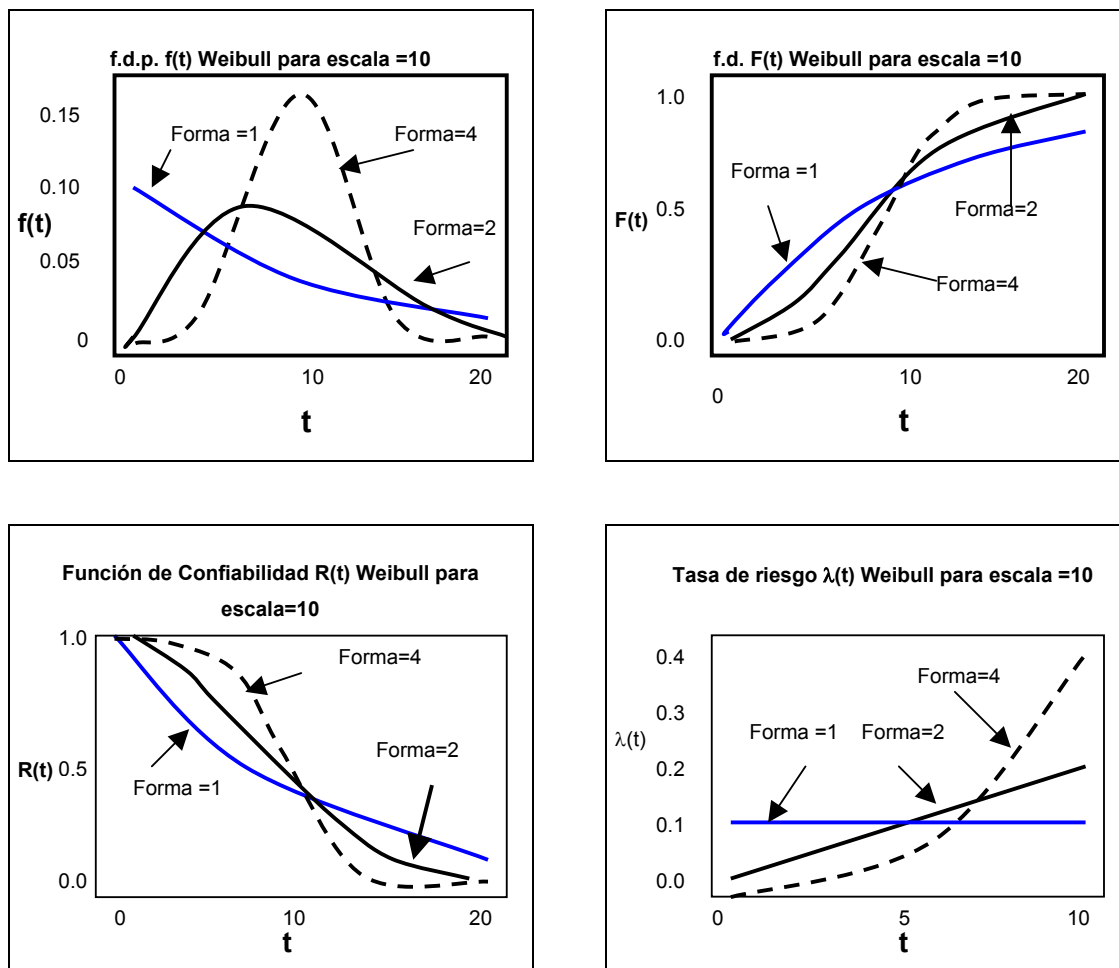


Figura 3.9: Relación entre la función de densidad de Probabilidad, y su Función de Distribución de Probabilidad, Confiabilidad y Tasa de Falla, para una distribución Weibull.

Fuente: UOC, Universitat Oberta de Catalunya

Si $\beta=1$ y $\delta=0$, corresponde a la Ley de fallas Exponencial.

▪ **3.3.4.2.- Ley exponencial**

Es una distribución que se utiliza para modelar el tiempo transcurrido entre dos sucesos aleatorios no muy frecuentes cuando la tasa de ocurrencia se supone constante. Una tasa de fallo constante significa que, para un dispositivo que no haya fallado con anterioridad, la probabilidad de fallar en el siguiente intervalo infinitesimal es independiente de la edad del dispositivo (ver figura)

Su f.d.p es.

$$f(t) = \frac{e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)}}{\beta} \qquad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)} \qquad R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)} \qquad \mathbf{(3.25)}$$

Como $\beta = 1/\lambda$, reemplazamos y obtenemos:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \qquad F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \qquad R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \qquad \mathbf{(3.26)}$$

donde λ representa la tasa de falla y como además:

$$T.P.E.F = 1/\lambda \quad \text{se tiene que } T.P.E.F. = \beta \qquad \mathbf{(3.27)}$$

Por lo tanto lo práctico de la ley exponencial es que la tasa de falla es constante.

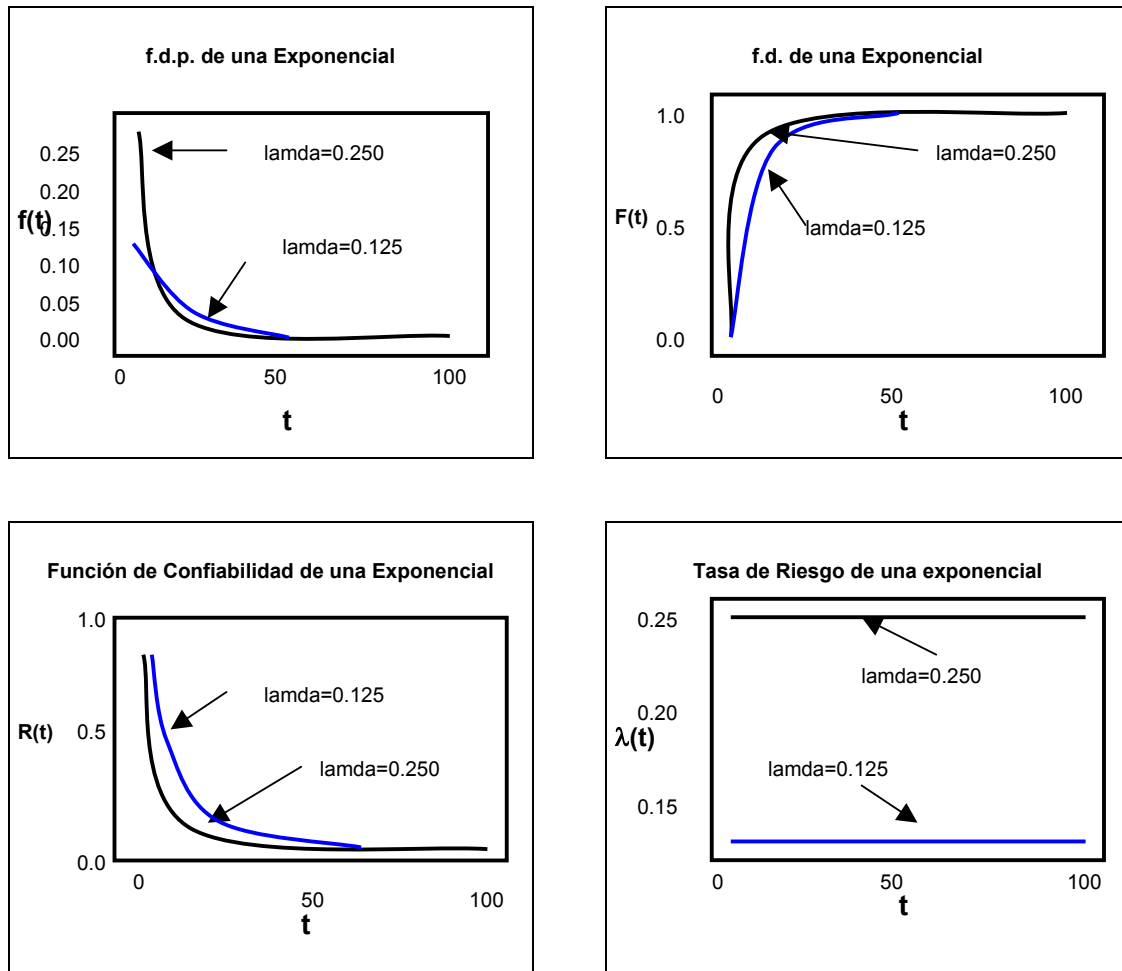


Figura 3.10: Relación entre la funciones de densidad de Probabilidad, y su función de distribución de Probabilidad de Falla, Confiabilidad y Tasa de Falla, para una distribución Exponencial.
Fuente: UOC, Universitat Oberta de Catalunya

▪ 3.3.5.- Predicción de la Confiabilidad

En el capítulo anterior definimos las funciones relacionadas con la Confiabilidad de una pieza o componente.

Cualquier producto puede estar integrado por una combinación de componentes.

La Confiabilidad del producto o sistema de componentes puede estimarse a partir de la Confiabilidad de las piezas individuales. Los componentes en el sistema

podrían tener una configuración en serie, en paralelo, serie y paralelo u otra configuración (compleja).

▪ **3.3.5.1.- Sistema en serie**

En un sistema en serie, cada componente debe funcionar de manera correcta a fin de que el sistema haga lo propio. Esquemáticamente, un sistema en serie puede representarse como se muestra en la figura. La Confiabilidad del Sistema,

R_{S_o} en esta configuración, si las Confiabilidades del componente son independientes, esta dada por:

$$R_{S_o} = R_1 * R_2 * R_3 * \dots * R_n \tag{3.28}$$

Donde R_1, R_2, \dots, R_n , son las Confiabilidades del equipo individuales y R_i representa la Confiabilidad del elemento E_i

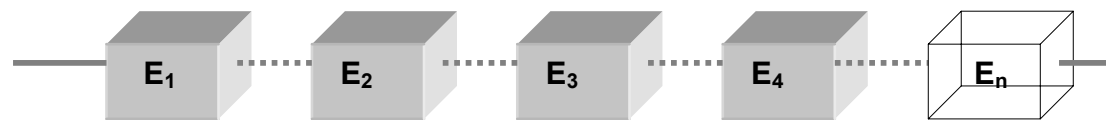


Figura 3.11: Sistema en Serie

Fuente: MAYNARD, Manual del Ingeniero Industrial.

Por ejemplo para un sistema con 4 elementos en serie la confiabilidad del sistema es:

$$R_{S_o} = R_1 * R_2 * R_3 * R_4$$

▪ **3.3.5.2.- Sistema en paralelo(Redundancia)**

En la figura se ilustra la una configuración de sistema en paralelo. La Confiabilidad de un sistema tal es:

$$R_{S_o} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \tag{3.29}$$

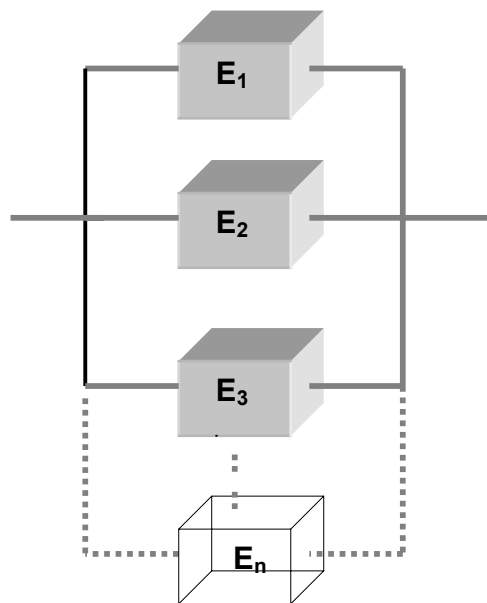


Figura 3.12: Sistema en Paralelo
Fuente: MAYNARD, Manual del Ingeniero Industrial

Por ejemplo para un sistema con 3 elementos en paralelo, la Confiabilidad del sistema es:

$$P_{S_o} = P_{E_1} * P_{E_2} * P_{E_3}$$

$$R_{S_o} = 1 - P_{S_o}$$

▪ **3.3.5.3.- Sistema r-de-n**

Un sistema r-de-n funciona en forma adecuada cuando r componentes de un número total de n componentes funcionan correctamente. La Confiabilidad de un sistema r-de-n con componentes idénticos, se calcula

$$R_{so} = \sum_{k=r}^n \binom{n}{k} R^k (1-R)^{n-k} \quad (3.30)$$

▪ **3.3.5.4.- Sistemas Complejos**

Sistemas que no son en serie ni en paralelo. Algunos sistemas no pueden clasificarse ni en serie ni paralelo; a tales sistemas se les define como sistemas complejos.

Un ejemplo sería un sistema como el que se muestra en la figura 3.13.

La Confiabilidad de un sistema tal puede observarse por enumeración, trazado de su trayectoria o condicionamiento sobre un elemento clave. Todos estos enfoques contemplan todas las combinaciones de componentes que deben funcionar de manera adecuada para que el sistema funcione correctamente. Este método de obtener la Confiabilidad resulta bastante tedioso y a menudo difícil de manejar en problemas reales con sistemas que tengan muchos componentes. Por lo tanto, en la práctica pueden usarse los métodos de aproximación. En uno de estos procedimientos es donde uno determina los límites superior e inferior para la Confiabilidad de un sistema complejo. Podría obtenerse un límite inferior algo burdo si se considera que todos los componentes constituyen una configuración en serie, en tanto un límite superior podría obtenerse considerando una

configuración en paralelo. Pueden obtenerse mejores límites considerando una configuración en serie de cortes mínimo y una configuración en paralelo de trayectorias mínimas. El corte mínimo se define como un conjunto mínimo de componentes que deben fallar para que se presente una falla del sistema; una trayectoria mínima es un conjunto mínimo de componentes que, en tanto funcionen, asegurarán la operación del sistema. Como ejemplo, la red compleja Figura representa como trayectorias y cortes mínimos se muestra abajo.

Trayectorias mínimas	Cortes mínimas
E_1, E_4	E_1, E_2
E_1, E_5	E_4, E_5
E_1, E_3, E_5	E_1, E_3, E_5
E_2, E_3, E_4	E_2, E_3, E_4

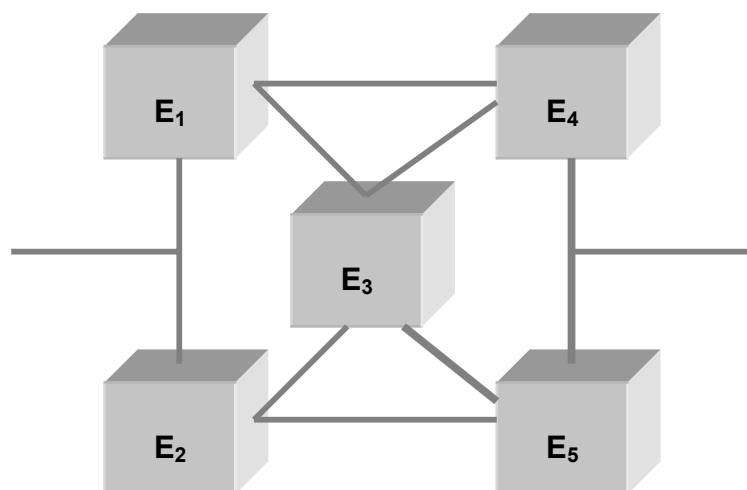


Figura 3.13: Sistema Complejo

Fuente: MAYNARD, manual del Ingeniero Industrial

▪ **3.3.5.5.- Confiabilidad del Sistema en función del Tiempo**

Confiabilidad del sistema cuando las confiabilidades de los componentes dependen del tiempo. Si consideramos componentes con los índices constantes, la Confiabilidad de un sistema en serie es.

$$\begin{aligned}
 R_{S_o}(t) &= \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} \\
 &= e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t}
 \end{aligned}
 \tag{3.31}$$

La Confiabilidad de un sistema en serie es como la del componente único cuyo índice de riesgo es la suma de todos los índices de riesgo de los componentes. El índice de riesgo compuesto de un sistema en serie, también es constante:

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = \lambda_{S_o} \text{ (Tasa de falla del sistema)}
 \tag{3.32}$$

Para un sistema en paralelo puro, la Confiabilidad del sistema es.

$$R_{S_o}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t})
 \tag{3.33}$$

El índice de riesgo de un sistema en paralelo, compuesto de componentes con índice de riesgo constante, es una función de tiempo que aumenta monótonamente. El tiempo medio a la falla (MTTF, por sus siglas en inglés) de un sistema en paralelo con componentes idénticos es:

$$M.T.T.F. = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right)
 \tag{3.34}$$

Donde “n” es el número de componentes.

Se desprende de la ecuación que al aumentar el número de componentes en un sistema en paralelo aumenta el tiempo medio a la falla en un índice declinante; así, para incrementar el tiempo medio a la falla, el rediseñar constituye una mejor opción que la redundancia.

En general una configuración en serie peor disposición ya que puede conducir a confiabilidades del sistema muy bajas, por lo tanto es recomendable incorporar elementos en paralelo para aumentar la Confiabilidad del sistema.

3.4.- ALGORITMOS GENETICOS

▪ 3.4.1.- Introducción

Fueron introducidos por Holland (1975) y popularizado por Golberg (1989).

Los Algoritmos Genéticos constituyen una técnica de búsqueda y optimización, altamente paralela, inspirada en el principio Darwiniano de selección natural y reproducción genética.

Los principios de la naturaleza en los cuales están inspirados los GAs son muy simples.

De acuerdo con la teoría de C. Darwin, el principio de selección privilegia los individuos más aptos con mayor longevidad y, por lo tanto, con mayor probabilidad de reproducción. Los individuos con más descendentes tienen mas chances de transmitir sus códigos genéticos en las próximas generaciones. Tales códigos genéticos constituyen la identidad de cada individuo y están representados en los cromosomas.

Estos principios son imitados en la construcción de algoritmos computacionales que buscan la mejor solución para un determinado problema, a través da evolución de poblaciones de soluciones codificadas a través de cromosomas artificiales.

En los GAs, cada cromosoma es una estructura de datos que representa una de las posibles soluciones del espacio de búsqueda del problema. Los Cromosomas

son sometidos a un proceso de evolución que envuelve evaluación, selección, recombinación sexual (crossover) y mutación. Después de varios ciclos de evolución la población deberá contener individuos más aptos.

La analogía entre los Algoritmos Genéticos y el sistema natural se muestra a través de la siguiente tabla:

Tabla 3.3

Naturaleza	Algoritmos Genéticos
Cromosoma	Palabra binaria, vector, etc.
Gen	Características del problema
Alelo	Valor de característica
Loco	Posición en la palabra
Genotipo	Estructura
Fenotipo	Estructura sometida al problema
Individuo	Solución
Generación	Ciclo

▪ 3.4.2.- Caracterización

Podemos caracterizar los Algoritmos Genéticos a través de los siguientes componentes:

1. Problema a ser optimizado
2. Representación de Soluciones del Problema
3. Decodificación del Cromosoma
4. Evaluación
5. Selección
6. Operadores Genéticos
7. Inicialización de la Población.

A continuación se describen brevemente cada uno de los componentes anteriormente.

1 – Problema

Los GAs son particularmente aplicados en problemas complejos de optimización: problemas con diversos parámetros o características que precisan ser combinadas en busca de la mejor solución; problemas con muchas restricciones o condiciones que no pueden ser representadas matemáticamente y problemas con grandes espacios de búsqueda.

Los GAs han sido aplicados en diversos problemas de optimización, tales como:

Optimización de Funciones Matemáticas, Optimización Combinatoria, Optimización de Planeamiento, Problema del Cajero Viajante, Problema de Optimización de Rutas de Vehículos, Optimización de Layout de Circuitos, Optimización de Distribución, Optimización en Negocios, Síntesis de Circuitos Electrónicos, Etc.

2 – Representación

La representación de las posibles soluciones dentro del espacio de búsqueda de un problema define la estructura del cromosoma que va ser manipulado por el algoritmo. Normalmente, la representación binaria es la más empleada por ser más simple, fácil de manipular a través de los operadores genéticos, fácil de ser

transformada en entero o real y además, por facilitar la demostración de los teoremas.

Por ejemplo, sea el problema de encontrar el valor máximo de la función

$f(x) = x^2$, Siendo x entero $[0,63]$. Se pueden representar las soluciones del problema a través de un cromosoma de 6 bits.

C_1 0 0 1 0 0 1 representa $x=9$

C_2 0 0 0 1 0 0 representa $x=4$

3 – Decodificación

La decodificación del cromosoma consiste básicamente en la construcción de la solución real del problema. El proceso de decodificación construye la solución para que esta sea evaluada por el problema. La ventaja de la representación binaria es la gran facilidad para ser transformada en entero o en real.

4 – Evaluación

La evaluación es la unión entre el GA y el mundo externo. La evaluación se realiza a través de una función que representa de forma adecuada el problema y tiene como objetivo suministrar una medida de aptitud de cada individuo en la población actual. La función de evaluación es para un GA lo que el medio ambiente es para los seres humanos. Las funciones de evaluación son específicas de cada problema. En el ejemplo, la función matemática $f(x) = x^2$ mide la aptitud de cada individuo. C_1 es un individuo más apto que C_2 .

	Cromosoma	x	f(x)
C ₁	0 0 0 1 0 0 1	9	81
C ₂	0 0 0 0 1 0 0	4	16

5 – Selección

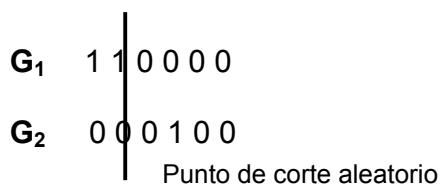
El proceso de selección en los algoritmos genéticos selecciona individuos para la reproducción.

La selección esta basada en la aptitud de los individuos: individuos más aptos tienen mayor probabilidad de ser escogidos para la reproducción.

La selección en los GAs se implementa normalmente por una ruleta donde cada individuo es representado por una porción proporcional a su evaluación relativa.

6 – Operadores Genéticos

Los individuos seleccionados (y reproducidos en la siguiente población) son recombinados sexualmente a través del operador de crossover. El operador de crossover es considerado la característica fundamental de los GAs. Los pares de progenitores son escogidos aleatoriamente y nuevos individuos son criados a partir del intercambio del material genético. Los descendentes serán diferentes de sus padres, pero con características genéticas de ambos progenitores. Por ejemplo




D₁ 1 1 0 1 0 0

D₂ 0 0 0 0 0 0

En la forma más simple el crossover de un punto de corte (one-point crossover) corta los dos progenitores en una posición escogida aleatoriamente, creando dos posibles descendientes: D₁ es un cromosoma más apto que sus progenitores, todavía D₂ es un individuo mediocre (baja evaluación con $f(x) = x^2$)

Los cromosomas criados a partir del operador de crossover son posteriormente sometidos a la operación de mutación. La mutación es un operador exploratorio que tiene como objetivo aumentar la diversidad en la población.

El operador de mutación altera el contenido de una posición del cromosoma, según una determinada probabilidad, en general baja (<1%).

C ₁	1 1 1 1 0 0	antes	
C ₁	1 1 1 1 0 1	después de la mutación	

Todavía hay un tercer operador genético denominado inversión, que cambia de posición dos genes escogidos aleatoriamente. La importancia de este operador esta, sin embargo, restringida a problemas con epistasia (fuerte interacción entre genes de un cromosoma).

7 – Inicialización de la Población

La inicialización de la población determina el proceso de creación de los individuos para el primer ciclo del algoritmo. Normalmente, la población inicial se forma a partir de individuos creados aleatoriamente.

Las poblaciones iniciales creadas aleatoriamente pueden ser sembradas con cromosomas buenos para conseguir una evolución más rápida, si se conocen a priori, el valor de estas “semillas” buenas.

8 – Parámetros y Criterios de Parada:

Parámetros:

En un algoritmo genético varios parámetros controlan el proceso de evolución:

- Tamaño de la Población → número de puntos del espacio de búsqueda siendo considerados en paralelo.
- Tasa de Crossover → probabilidad de un individuo de ser recombinado con otro.
- Tasa de Mutación → probabilidad de que el contenido de cada posición/gen del cromosoma sea alterado.

Criterios de Parada

- Número de Generaciones → número total de ciclos de evolución de un GA.

- Total de Individuos → número total de tentativas (tamaño de la población x número de generaciones)

Un algoritmo genético puede ser descrito como un proceso continuo que repite ciclos de evolución controlados por un criterio de parada, como se muestra en la siguiente figura:

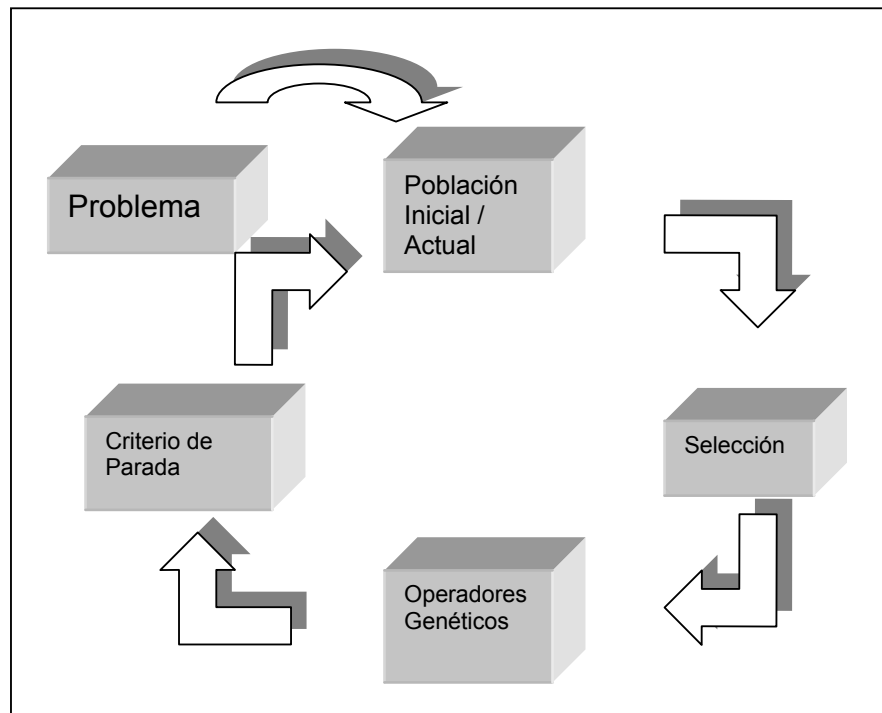


Figura 3.14: Proceso continuo de un algoritmo genético

3.5.- SIMULACION

Como en partes de este trabajo aplicamos herramientas de simulación, creemos conveniente dar una pequeña introducción de algunos conceptos tal vez poco difundidos y los cuales han sido considerados en este trabajo, es así como a continuación damos una introducción al método de generación de variables aleatorias Monte Carlo y a otro método un poco más moderno como es Latin Hypercube.

Además aunque es sabido por las personas que trabajan en simulación, hacemos una pequeña descripción de cómo se ajusta una distribución de Probabilidades a partir de un conjunto de datos, las cuales servirán como información de entrada del modelo. Estas temáticas serán explicando tomando como base el uso del software @Risk de Palisade.

- **3.5.1.- Generación de variables aleatorias en @Risk**

La generación de variables aleatorias es el proceso por el que se recogen una serie de valores aleatorios a partir de distribuciones de probabilidad de entrada. Las distribuciones de probabilidad de entrada en @RISK están establecidas por funciones de distribución de probabilidad, y el propio programa @RISK es el encargado de llevar a cabo la generación de variables aleatorias. La generación de variables aleatorias es un proceso continuo en una simulación. En este proceso se recoge una variable aleatoria por cada distribución de probabilidad de entrada de cada iteración. Si se llevan a cabo suficientes iteraciones, los valores de muestra de una distribución de probabilidad se distribuyen siguiendo aproximadamente el patrón teórico de la distribución de probabilidad de entrada. Las estadísticas de las distribuciones para las que se recogen variables aleatorias (media, desviación estándar y puntos altos) se aproximan a las estadísticas teóricas de esa distribución. El gráfico de esa distribución será incluso similar al gráfico teórico de la distribución de entrada.

- **3.5.1.1.- Generación de variables aleatorias Monte Carlo**

El método de generación de variables aleatorias Monte Carlo es una técnica tradicional que utiliza números aleatorios o pseudo-aleatorios para recoger las variables aleatorias de una distribución de probabilidad. Hoy en día, las técnicas Monte Carlo se aplican a una amplia variedad de problemas complejos con un

factor aleatorio. Existen una serie de algoritmos que sirven para generar las variables aleatorias de los diferentes tipos de distribuciones de probabilidad.

Las técnicas de generación de variables aleatorias del tipo Monte Carlo son totalmente aleatorias; o sea, una muestra puede estar en cualquier punto del rango de la distribución de entrada. Pero las variables aleatorias, por supuesto, tienen más probabilidades de aparecer en las zonas de la distribución que tienen una mayor probabilidad. En la distribución acumulativa anterior, cada una de las variables aleatorias Monte Carlo utiliza un nuevo número aleatorio entre 0 y 1. Si se realizan suficientes iteraciones, la generación de variables aleatorias Monte Carlo “recreará” la distribución de entrada.

Sin embargo puede aparecer un problema de agrupamiento cuando se lleva a cabo un número reducido de iteraciones.

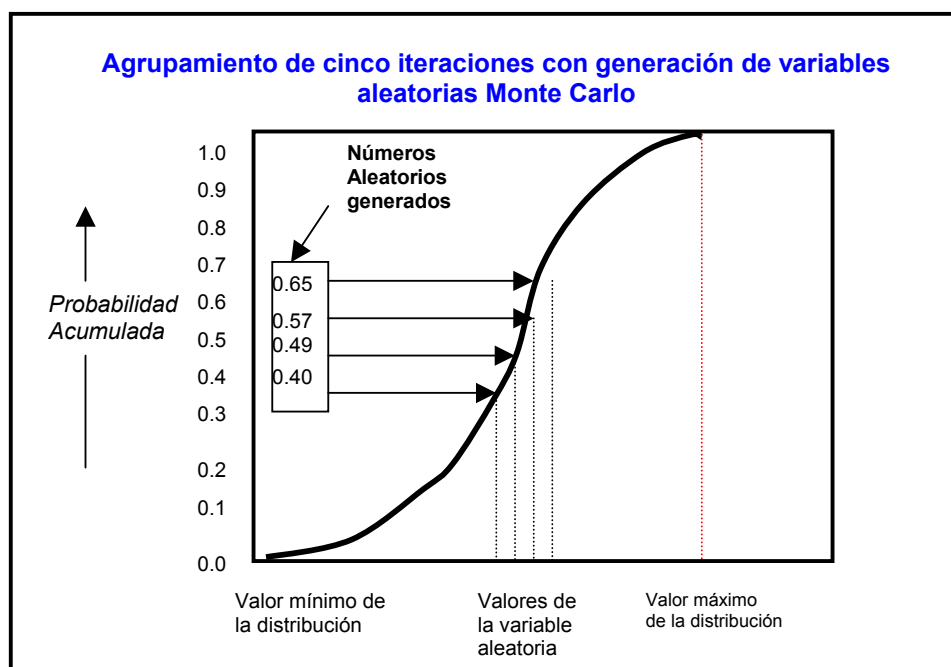


Figura 3.14: Método de generación de variables aleatorias Monte Carlo
Fuente: Manual @Risk, Versión 4.5

En la Figura 3.14 , las 5 variables aleatorias tomadas están en el medio de la distribución. Los valores de la parte exterior del rango de la distribución no aparecen representados en las variables aleatorias y, por lo tanto, el impacto de esos resultados no se refleja en la simulación de salida.

El agrupamiento se agudiza cuando una distribución contiene resultados de baja probabilidad que podrían tener un impacto importante en los resultados. Es importante tener en cuenta los efectos de estos resultados de baja probabilidad. Para poder incluir estos posibles resultados, es necesario tomar variables aleatorias de los mismos. Pero si la probabilidad de que ocurran es baja, un número reducido de iteraciones realizadas con el método Monte Carlo, podrían no recoger suficientes variables aleatorias de estos resultados como para representar con exactitud su probabilidad. Este problema ha impulsado el desarrollo de técnicas de tomas de variables aleatorias estratificadas, como la denominada Latin Hypercube que @RISK también utiliza.

▪ 3.5.1.2.- Generación de variables aleatorias Latin Hypercube

El método Latin Hypercube de generación de variables aleatorias, es un concepto nuevo en el desarrollo de métodos de recogida de variables aleatorias y está diseñado para recrear con precisión distribuciones de entrada tomando variables aleatorias para un número más reducido de iteraciones en comparación con las que requiere el método Monte Carlo. La clave del sistema del Latin Hypercube es la estratificación de las distribuciones de probabilidad de entrada. La estratificación

divide la curva acumulativa en intervalos iguales de la escala de probabilidad acumulativa

(de 0 a 1,0). A continuación, se toma una muestra aleatoria de cada uno de estos intervalos “estratificaciones” de la distribución de entrada. De este modo, las variables aleatorias representan necesariamente valores de cada intervalo y, por lo tanto, recrean precisamente la distribución de probabilidad de entrada.

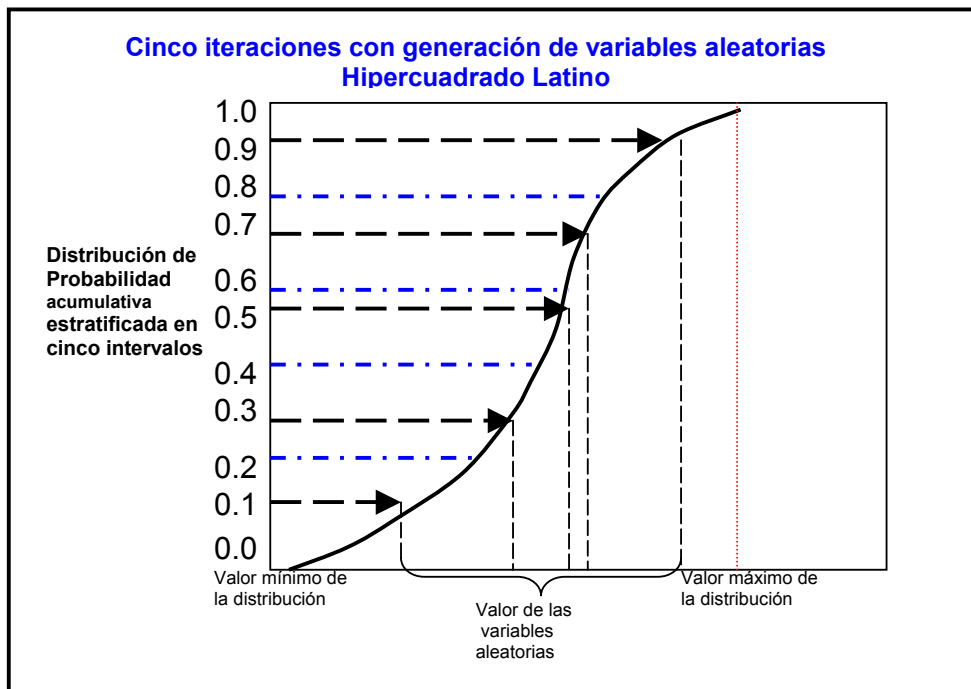


Figura 3.15: Método de Generación de variables aleatorias Hipercuadrado Latino
Fuente: Manual @Risk, Versión 4.5.

En la Figura 3.15, la curva acumulativa se ha dividido en 5 intervalos. En la generación de variables aleatorias se recoge una de cada intervalo.

Compare estas variables aleatorias con las cinco variables aleatorias agrupadas de la distribución que se realizó con el método Monte Carlo. Con el método Latin Hypercube, las variables aleatorias reflejan con mayor exactitud la distribución de los valores en la distribución de probabilidad de entrada.

La técnica que se utiliza con el método Latin Hypercube es la de “generación de variables aleatorias sin reemplazo”. En esta técnica el número de estratificaciones de la distribución acumulativa es igual al número de iteraciones llevadas a cabo. En el ejemplo anterior había 5 iteraciones y, por lo tanto, se hicieron 5 estratificaciones en la distribución acumulativa. Luego, se toma una muestra aleatoria de cada una de las estratificaciones. Sin embargo, una vez tomada la muestra aleatoria de una de las estratificaciones, no se vuelve a tomar una muestra aleatoria de la misma, porque su valor ya está representado en el grupo de variables aleatorias.

¿Cómo se lleva a cabo la generación de variables aleatorias de una misma estratificación? @RISK selecciona una estratificación y luego toma una muestra aleatoria dentro de esa estratificación.

Cuando se utiliza el método Latin Hypercube para tomar variables aleatorias de múltiples variables, es importante mantener la independencia entre las variables. Los valores tomados como muestra aleatoria para una variable deben ser independientes de los que se toman para otra variable (a menos que se indique expresamente que existe una correlación). Esta independencia es posible al seleccionarse aleatoriamente el intervalo del que se tomará una muestra aleatoria para cada variable. En una iteración determinada, la variable número 1 puede

recibir la muestra aleatoria de la estratificación número 4, la variable número 2 podría recibirla de la estratificación 22, etcétera. De este modo se mantiene la aleatoriedad y la independencia, y se evitan correlaciones no deseadas entre variables.

- El método Latin Hypercube también facilita el análisis de situaciones con distribuciones de probabilidad de entrada de resultados de baja probabilidad. Al forzar el proceso de la generación de variables aleatorias para que incluya los sucesos más marginales, el método Latin Hypercube asegura la precisa representación de estos resultados en las salidas de las simulaciones.

▪ **3.5.2.- Definición de funciones de probabilidad**

Esta etapa del proceso de simulación es de vital importancia ya que la simulación es una recreación que depende directamente de dicha información, así en este trabajo define las distintas metodológicas que se poseen a la hora de recrear el comportamiento de la variable en estudio.

Las metodológicas que se plantean son dos:

- Ajuste de funciones de probabilidad en función de los datos existentes.
- Definición de las funciones de probabilidad basándose en la literatura y opiniones de expertos.

La primera (Ajuste de funciones) solo se hará una pequeña descripción.

La segunda se profundizará ya que esta fue aplicada en nuestro modelo básicamente por la ausencia de información, si existiera se recomendaría hacer un ajuste de funciones como se describe a continuación:

▪ **3.5.2.1- Adaptar distribuciones de probabilidad a sus datos.**

Esta adaptación se realiza cuando tiene un grupo de datos que quiere utilizar como base de una distribución de entrada de la hoja de cálculo. Por ejemplo, en nuestro estudio se podría haber recogido datos históricos de los tiempos hasta la falla (tiempo de sobrevivencia) de un equipo, que no puede ser reparado, en donde lo que se quiere es crear una distribución de posibles tiempos hasta la falla de un equipo, basada en estos datos.

La adaptación se puede llevar a cabo utilizando el programa integrado BestFit, un programa de Palisade Corporation para la adaptación de distribuciones u otro como Input-analyzer de Arena.

Para adaptar distribuciones a los datos utilizando @RISK debe considerar cinco pasos:

1. Definición de los datos de entrada

@RISK permite analizar tres tipos de datos para adaptación de distribuciones: de muestra aleatoria, de densidad y acumulativos. En el caso de nuestro estudio son de muestra aleatoria.

2. Especificación de las distribuciones que se van a adaptar.

Se debe definir si los datos son continuos o discretos, ya que los datos en estudio son tiempos hasta la falla, estos son definidos como continuos.

3. Ejecución de la adaptación

Este paso es la adaptación propiamente tal. En el caso de datos continuos @Risk requiere un mínimo de datos para la adaptación, los cuales deben ser mayores o igual a cinco observaciones.

Para cada una de las distribuciones especificadas en el paso anterior, @RISK tratará de hallar el grupo de parámetros que más acerquen la función de distribución al grupo de datos, dichos parámetros son calculados a través de las estimaciones de Máxima Probabilidad.

4. Interpretación de los resultados

Cuando @RISK ha completado el proceso de adaptación, debe revisar los resultados. @RISK ofrece una amplia variedad de gráficos, estadísticas que le ayudarán a evaluar adaptaciones y a seleccionar la mejor opción para sus modelos. Ver Anexo A.

5. Uso de los resultados de una adaptación

Es el paso en que se pueden utilizar los resultados de una adaptación para un modelo de @RISK.

▪ 3.5.2.2.- Definición de las funciones de probabilidad según literatura

Este procedimiento será descrito en el Capítulo 4, sección 4.2 , ya que se realizó en el trabajo, por lo tanto pertenece a una parte del modelo.

CAPITULO 4: MODELO DE INVERSIONES

En este capítulo se describe el modelo propiamente tal, el que para una mayor comprensión se subdividido en dos enfoque, el primero que se denominó determinístico y un segundo denominado probabilístico, cada uno de los cuales puede ser aplicada en forma independiente o conjunta como se puede ver a continuación.

Previo a la descripción de los distintos enfoques de optimización a continuación describimos la distinta terminología, y variables que componen el modelo.

4.1.- TERMINOLOGIA

▪ 4.1.1.- Repuestos críticos y Confiabilidad del sistema

A continuación se pueden observar los distintos componentes clasificados como críticos y su configuración desde el punto de vista de Confiabilidad. Se debe entender para efectos de este trabajo el calificativo de componente crítico, aquel componente que si falla no se puede reparar y que puede detener el funcionamiento de la planta por lo tanto su repuesto pasa a ser crítico.

Se define la Confiabilidad del sistema como aquella que engloba todos los componentes del estudio tomando en consideración su configuración, para efectos prácticos la Confiabilidad del sistema podría interpretarse como la probabilidad que la Planta no falle producto de los componentes crítico.

Como se puede observar en la Figura 4.1, se trata de un sistema en serie, ya que todos son componentes críticos, y basta que uno falle para que la planta falle.

Para conocer en mayor profundidad sobre la predicción de la Confiabilidad de sistemas o componentes individuales, ver Sección 3.3.5

▪ 4.1.2.- Fallas Críticas

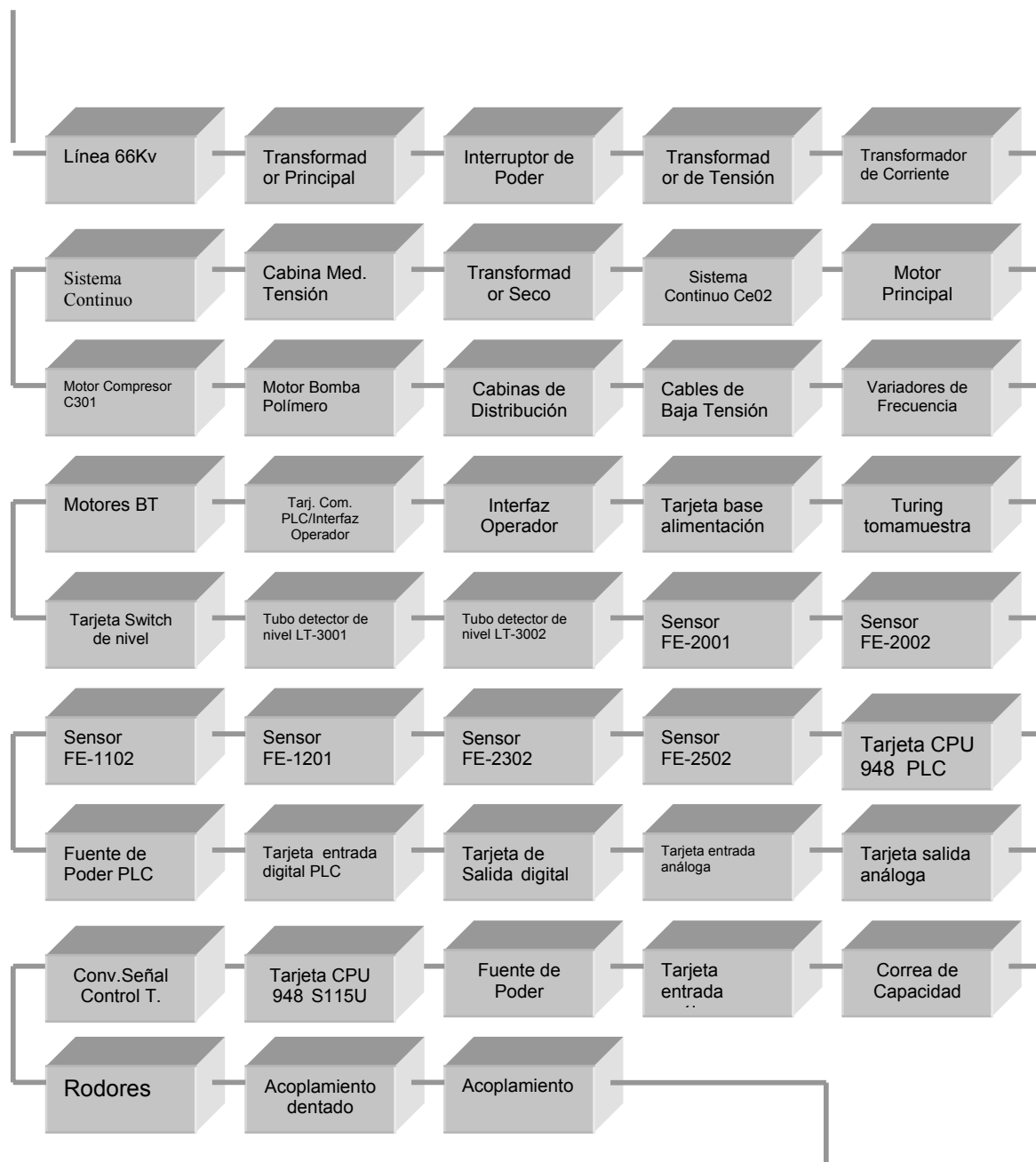


Figura 4.1: Configuración de las Fallas críticas

▪ **4.1.3.- Costos**

Se estimaron los distintos costos que se podrían incurrir en caso de falla de un componente:

• **Costo de Reparación.**

Es el costo que se incurre mayormente por concepto de Mano de Obra.

• **Costo del Repuesto.**

Es el costo de la compra del repuesto si el componente falla.

• **Costo del Lucro cesante o Costo de no Producción.**

Es la ganancia que se deja de percibir, si la Planta se detiene y se define como el Lucro diario por él numero de días de detención si no existe el repuesto en Planta.

CONCEPTOS IMPORTANTES

• **Costo Inevitable**

Es el costo en que se incurre independiente de la decisión de invertir o no en un repuesto crítico, por ejemplo el costo de reparación y el costo del repuesto ya sea si se compro anticipadamente o si se compra en el momento que falle el equipo.

• **Costo diferenciable o Relevante (CT)**

Expresan el incremento o disminución de los costos totales que implicaría la implementación de cada una de las alternativas. En consecuencia, son los costos diferenciables los que en definitiva deberán utilizarse para tomar una

decisión que involucre algún incremento o decrecimiento en los resultados económicos esperados de cada curso de acción que se estudie.

Por lo tanto el costo diferenciable o relevante es la diferencia entre los costos que se podrían incurrir entre la opción de Invertir en un repuesto crítico y no, para efectos de este trabajo entenderemos por costo relevante el Costo del Lucro Cesante o Costo de no Producción.

COSTO TOTAL(CT)

Es el costo que se incurriría si un componente crítico falla. Está compuesto por el Costo de no-producción mas el costo de la reparación y el costo del repuesto, este ultimo solo se incurre si no se cuenta con el repuesto, pero este es una simplificación para el modelo, además el costo del repuesto es insignificante en comparación con el costo de no-producción.

▪ 4.1.4.- Probabilidad de falla de repuestos en bodega

Es la probabilidad que el repuesto que se encuentra en bodega falle, en otras palabras es la probabilidad de falla de un equipo nuevo.

Para efectos de este trabajo definimos la probabilidad que un equipo nuevo falle como un porcentaje bajo de un 0.01%, para representar la posibilidad de que un equipo sin uso pueda fallar, aunque esta probabilidad sin duda puede ser mayor pero no será analizado en este trabajo.

Como supuesto planteamos que el equipo en reposo (repuesto), no pueden averiarse mientras el principal funciona, una vez averiado el componente principal se sustituye por el repuesto(Redundancia Activa o cargada).

- **4.1.5.- Probabilidad de falla actual ($P_{F .sin .inv_i}$)**

Es la probabilidad que un componente que se encuentran en funcionamiento falle (Probabilidad de falla sin inversión en el repuesto i) en el periodo en estudio, en nuestro caso es en el próximo año, por ejemplo si un equipo lleva funcionando 5 años sin falla, la probabilidad que falle antes del próximo año, es la probabilidad que el equipo falle antes del año seis.

El concepto que se encuentra en la palabra actual se refiere a que es la situación presente, que es que no se posee repuestos para ninguno de los componentes en estudio.

- **4.1.6.- Confiabilidad actual**

Es la probabilidad que no falle el componente actual, en el periodo en estudio.

- **4.1.7.- Probabilidad de falla del equipo actual mas repuesto ($P_{F .inv_i}$)**

Es la probabilidad de que el equipo actual y el repuesto en bodega fallen.

- **4.1.8.- Confiabilidad equipo actual mas repuesto**

Es la probabilidad de que no falle el equipo actual y el repuesto en bodega.

▪ **4.1.9.- Confiabilidad del componente según política adoptada.(R_i)**

Es la Confiabilidad del componente, que depende de la política adoptada, es decir si se adquiere o no un repuesto. Así, si se adquiere un repuesto para un componente la Confiabilidad de este aumenta. Es decir disminuye la probabilidad de incurrir en Costos, como se dijo anteriormente estos están compuestos básicamente por los Costos de no-producción.

▪ **4.1.10.- Indices**

Costo Esperado Total

*Costo.Esperado = Probabil.Falla * Costo.Total*

$$Costo.Esperado \ Total = \sum_{i=1}^{43} (1 - R_i) * CT_i$$

R_i = Probabilidad de que el componente no incurra en Costos producto de no-disponibilidad (Costo de no-producción).

CT_i = Costo total del componente i.

Para efectos de este trabajo el "Costo esperado Total" puede ser interpretado como el costo que se puede incurrir, que dependerá de la política de compra de repuesto, ya que la adquisición de un repuesto reduce en gran forma la probabilidad de falla del componente individual, este costo representa principalmente el "costo esperado" de los equipos que no tienen repuesto.

▪ **4.1.11.- Costo esperado evitado**

Es el mismo concepto anterior pero la diferencia radica en que este cuantifica el costo evitado por una eventualidad compra de un repuesto.

Este costo esperado cuantifica el costo que podría incurrir si no se hubieran comprado el repuesto.

▪ **4.1.12.- Políticas**

Consiste en el monto máximo que esta dispuesto a gastar la dirección en la compra de repuestos críticos.

**4.2.- DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD
SOBRE LA BASE DE LA LITERATURAY OPINIONES DE
EXPERTOS**

Debido a la ausencia de datos se describe el procedimiento utilizado en este trabajo el cual es definir las funciones y parámetros de cada componente en estudio en función a lo que los científicos han estudiado y la opinión de expertos al interior de la Planta.

Según diversos estudios científicos han llegado a determinar que las funciones que mejor se ajustan a los estudios Confiabilidad son la distribución Weibull y la Exponencial. Esta función (Weibull) puede adoptar distintas formas, las cuales va a depender de sus parámetros.

Así definimos esta distribución como la base para recrear los tiempos hasta la falla en función del tiempo en un equipo.

Para dar una mayor comprensión de la definición de los parámetros para la distribución Weibull hemos repetido la ecuación 3.20 y la Tabla 3.1

$$f(t; \alpha, \beta) = \frac{\alpha(t - \delta)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\beta}\right)^\alpha}, \quad x - \delta > 0, \quad t = \text{Tiempo en operación} \quad (4.1)$$

α = Parámetro de forma: Depende del mecanismo de desgaste.

β = Parámetro de escala (tpo) o también denominado característica de falla.

δ = Parámetro de posición.

Estimación del parámetro de forma para una distribución Weibull para distintos mecanismos de falla:

Estas estimaciones fueran hechas en base ha evidencias empíricas y los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4.1
Fuente: "Hf" Consultores técnicos gerenciales

MECANISMO DE FALLA	α
Esfuerzo	1
Fatiga	1.3
Corrosión	2.5
Desgaste	3.5
Paradas Adm.	0.5

Sin duda que estas estimaciones son generalidades y básicamente se utilizan para entender como los mecanismos de falla afectan la Confiabilidad de un componente en el tiempo.

Basándose en las estimaciones de la tabla anterior, en lo que respecta a nuestro trabajo, el parámetro (α) se estimó para distintos equipos que componían el estudio mediante una encuesta, en que cada encargado de especialidad, definieron el o los mecanismos de falla que afectaban a cada equipo, además de una estimación de la “esperanza de vida” de cada equipo según sus vivencias personales en la Planta y en la su vida profesional.

En función de la esperanza de vida de cada equipo mas la estimación del parámetro de forma α y asumiendo un parámetro de posición igual a cero se estimó el parámetro de escala β , usando herramientas de programación matemática (Solver de Excel).

La información disponible y la incógnita pueden quedar reflejada en la siguiente ecuación.

$$E(t) = \delta + \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (4.2)$$

Donde

- $\Gamma(x) = \text{Función gamma}$
- $E(t) = \text{Conocido}$

Es la esperanza de vida del equipo, conocido a través de encuesta.

- $\delta = 0$ Conocido

Se asume el parámetro de posición igual a cero porque el equipo puede empezar a fallar desde el tiempo igual a cero en adelante.

- α = Conocido

Parámetro de forma estimado a partir de la encuesta en donde se especifica el mecanismo de falla y de tabla se obtiene alfa.

Por lo Tanto el único parámetro desconocido es el parámetro de escala β .

▪ 4.2.1.- Uso de Solver en la estimación de β

Con una programación muy sencilla con la herramienta de Solver en Excel es posible calcular el ultimo parámetro para definir una función de Probabilidad Weibull. En @Risk al ingresar por defecto una función de probabilidad, en la celda activa aparece el valor esperado, por lo tanto se define la distribución la cual hace referencia a los parámetros que la conforman y se le dice a Solver que se quiere saber cual es el valor de beta para que la esperanza tome tal valor.

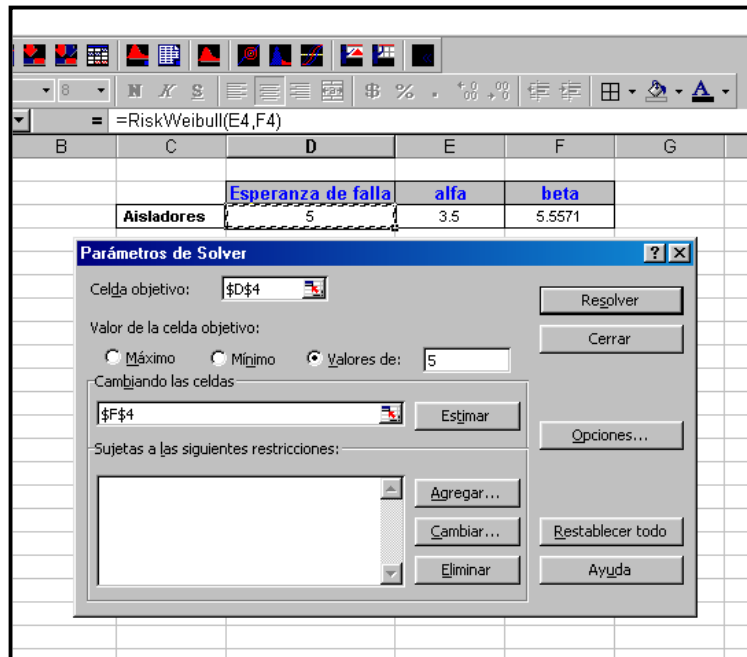


Figura 4.2: Uso de Solver en conjunto con @Risk para estimar el parámetro β

Ejemplo para un caso de un aislador ¿cual el parámetro beta para que la esperanza de falla de un aislador sea 5 años?, Sabiendo que el parámetro alfa es 3.5 ya que se encuentra expuesto a desgaste, ver Figura 4.2

Siguiendo los procedimientos se definen las distribuciones de probabilidad para los distintos componentes, los resultados se pueden ver en el Anexo C.

4.3.- OPTIMIZACION DE LA COMPRA DE REPUESTOS

▪ 4.3.1.- Enfoque 1 (Determinístico)

Probabilidad de falla constante.

Como método de cálculo de las probabilidades de falla para cada componente, se simularon fallas para cada uno de los componentes para así estimar probabilidades de falla esperadas y asumir estos valores como “determinístico”, si bien estas probabilidades se pudieron haber calculado sin necesidad de una simulación, este procedimiento se realizó para facilitar los cálculos, al realizar los cálculos para todos los componentes que puedan estar incluidos en la planilla Excel en forma automática.

Bajo este escenario se pueden definir las siguientes funciones de optimización, que pueden ser resueltas con programas de optimización como Premium Solver, Lindo, Qsb entre otros, En lo que respecta a este trabajo la optimización del modelo se realizó con Premium Solver.

▪ 4.3.1.1.- Enfoque 1.1

Minimizar el costo esperado sujeto al monto de Inversión.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i=1}^{43} CT_i * [X_i * P_{F.inv_i} + (1 - X_i) * P_{F.Sin inv_i}] \\ \text{s/a} \quad & \sum_{i=1}^{43} X_i * I_i \leq \text{Inversión} \end{aligned} \tag{4.3}$$

Donde

$$CT_i = \text{Costo Total del equipo } i$$

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{Sí se Invierte} \\ 0, & \text{Caso Contrario} \end{cases}$$

$P_{F.inv.i}$ = Probabilidad de Falla con inversión en repuesto i

$P_{F.Sin.inv.i}$ = Probabilidad de falla sin inversión en repuesto i

I_i = Costo o Inversión en el repuesto i

Inversión = Recursos disponibles para Invertir.

Así el modelo fue concebido como un problema de programación lineal entera.

Los resultados de este enfoque para distintas políticas de Inversión fue resuelto usando el método de Ramificación y Acotamiento, los resultados se pueden observar en el Anexo D.

▪ **4.3.1.2.- Enfoque 1.2**

Minimizar la Probabilidad de que la Planta se detenga, producto de un componente crítico sujeto a la Inversión.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & 1 - \prod_{i=1}^{43} [1 - (X_i * P_{F.inv.i} + (1 - X_i) * P_{F.Sin.inv.i})] \\ \text{s / a} \quad & \sum_{i=1}^{43} X_i * I_i \leq \text{Inversión} \end{aligned} \tag{4.4}$$

Donde

$P_{F.inv.i}$ = Probabilidad de Falla con inversión en repuesto i

$P_{F.Sin.inv.i}$ = Probabilidad de falla sin inversión en repuesto i

I_i = Costo o Inversión en el repuesto i

Inversión = Recursos disponibles para Invertir.

Este problema fue concebido como un problema de programación no lineal.

Este enfoque “no es muy recomendable” ya que según su configuración existente de los componente, basta que uno falle para que la Planta se detenga, y como son muchos componentes en serie la probabilidad de falla del sistema casi siempre bordea el 100%, y para que esto no ocurra se debe invertir casi la totalidad de los repuestos, es más, según los resultados (ver Anexo E) se observa que para montos de inversión bajo, la probabilidad de falla es siempre 100%, por lo tanto no se justifica invertir.

Otras Restricciones

Sin lugar a dudas que se pueden incluir otras restricciones para ambos enfoque como: que la probabilidad de cada componente individual no debe exceder a un cierto porcentaje (definido por los Ingenieros o por la Dirección).

▪ **4.3.2- Enfoque 2 (Probabilístico)**

Este enfoque profundiza aun más el enfoque anterior, ya que estudia además la incertidumbre de la Solución. Las herramientas utilizada para este fin son los Software @Risk 4.5 (Simulación Monte Carlo) y el RiskOptimizer, este ultimo es un software que combina la simulación y la optimización, para permitir la optimización de los modelos que contienen factores inciertos.

▪ **4.3.2.1.-Funcion objetivo en RiskOptimizer**

Este programa permite Maximizar o Minimizar distintos estadísticos como Media, Desviación Estándar, Varianza, Kurtosis, Min, Max, Rango, Moda, Percentil(x), entre otros estadísticos, los cuales son calculados según un gran numero de iteraciones para distintos escenarios. Donde cada escenario es una solución distinta (Combinaciones de unos y ceros, de invertir o no).

Con relación a nuestro modelo nuestra función objetivo queda definida como una minimización de la “media del costo esperado total”.

Enfoque 2

Minimizar la Media del costo esperado total sujeto al monto de Inversión.

$$Min \text{ Media} \left[\sum_{i=1}^{43} CT_i * [X_i * P_{F.inv_i} + (1 - X_i) * P_{F.Sin.inv_i}] \right] \tag{4.5}$$

$$s / a \sum_{i=1}^{43} X_i * I_i \leq Inversión$$

Donde

Media = Es el valor promedio o media aritmética.

$CT_i = \text{Costo Total del equipo } i$

$$X_i \begin{cases} 1, \text{ Sí se Invierte.} \\ 0, \text{ En otro caso} \end{cases}$$

$P_{F.inv.i}$ = Probabilidad de Falla con inversión en repuesto i

$P_{F.Sin.inv.i}$ = Probabilidad de falla sin inversión en repuesto i

I_i = Costo o Inversión en el repuesto i

Inversión = Recursos disponibles para Invertir.

▪ 4.3.2.2.- Métodos de Resolución de Problemas en RiskOptimizer.

Es el método de resolución, que se desea aplicar cuando se ajustan las celdas ajustables.

Cada método de resolución es en si un algoritmo genético completamente diferente con su propia selección de optimización, tasa de cruzamiento (crossover) y tasa de mutación)

Métodos de resolución

- RECIPE(Receta)

Es el tipo más simple y popular de los métodos de resolución. Se usa siempre que el juego de variables que son ajustadas puede variar independiente entre sí.

Genera los números para esas variables, en un esfuerzo para encontrar la mezcla mejor. La única restricción que se exige a las variables es un rango Máximo y Mínimo.

- ORDER

Es una permutación de una lista de artículos donde usted esta intentando encontrar la mejor manera de colocar un juego de valores dados. Order pregunta los valores existentes en el modelo y los usa.

- GROUPING (Agrupándose)

Cuando el problema involucra variables múltiples agrupándose en las celdas ajustables. Cuando se construye un modelo de un sistema, verificar que cada grupo debe ser representado por lo menos una vez.

Grouping está mas interesado en los valores de las distintas variables, porque se pueden cambalachear un juego de variables de un grupo con un juego de variables de otro grupo.

- BUDGET

Similar a un Recipe, solo que los valores deben sumar a un cierto numero.

- PROYECT

Similar a Order, solo que ciertos artículos(Tareas) deben preceder a otra.

- SCHEDULE

Es similar a un Grouping (es una agrupación de tareas en el tiempo)

▪ **4.3.2.3.- Consideraciones realizadas en RiskOptimizer para el modelo**

Selección del método de resolución de problema

Según las definiciones anteriores, en este trabajo se utilizó el método de resolución Grouping donde el grupo está formado por ceros y el otro por 1, por lo tanto lo que hace es cambalachear los ceros y unos.

Selección del método de generación de variables aleatoria.

Con respecto al método de generación de variables aleatorias, en este trabajo se utilizó el método Latin Hipercube, ya que hace que las variables aleatorias recogidas se correspondan más directamente con las distribuciones de entrada y, por lo tanto, las distribuciones convergen más rápidamente con las estadísticas teóricas de la distribución de entrada, por lo tanto requiere un menor número de iteraciones en comparación al método Monte Carlo

Número de iteraciones por escenario

Convergencia automática.

Generador de la semilla para cada escenario o simulación

Choose Randomly, o sea, que @RISK seleccione aleatoriamente un nuevo generador en cada simulación.

Criterio de detención de la Optimización

Como criterio de detención de la optimización se utilizó que, cuando no se produce una mejora en la solución después de 100 escenarios que cumplen las restricciones, la optimización se detiene.

Se definió un 1% como el valor mínimo del cambio en la simulación para que sea reconocido como una mejora en la solución.

▪ **4.3.2.4.- Diseño de experimentos**

▪ **4.3.2.4.1.- Definición de Parámetros**

Como el método de Optimización de RiskOptimizer se basa en algoritmos genéticos se realizó un diseño de experimento factorial de dos niveles con tres factores, con el software Desing-Expert 6.0.10, donde lo que se quiere es estimar cuales deben ser los valores para los distintos factores para que el Costo esperado sea mínimo.

▪ **4.3.2.4.2.- Diseño factorial 2^3**

Se construyo un diseño factorial de dos niveles y tres factores, en donde los factores a estudiar son: el Tamaño de la población, Tasa de cruzamiento y Mutación, los niveles bajos como altos para cada factor se describen a continuación en la siguiente Tabla:

Tabla 4.2: Niveles Bajos y Altos para distintos Factores

	Población	Cruzamiento	Mutación
Bajo (-1)	50	0.85	0.06
Alto (+1)	100	0.95	0.2

El diseño factorial de 2^3 se formulo de forma completa, con una “replica” (calcula el error), sin puntos de centro (calcula la curvatura y el error) y en un solo bloque. Así

se definieron 8 experimentos, asumiendo que los efectos se comportan linealmente.

Los experimentos son los que se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 4.3: Experimentos en función de factores cifrados (± 1)

	Factor (A) Población	Factor(B) Cruzamiento	Factor (C) Mutación
Exper. 1	-1	-1	-1
Exper. 2	+1	-1	-1
Exper. 3	-1	+1	-1
Exper. 4	+1	+1	-1
Exper. 5	-1	-1	+1
Exper. 6	+1	-1	+1
Exper. 7	-1	+1	+1
Exper. 8	+1	+1	+1

Se debe mencionar que se realizaron dos replicas para cada combinación de factores o experimento, pero estas no fueron hechas para calcular el error del experimento sino para dar mayor robustez a la variable de respuesta, así el valor usado como respuesta para el análisis de factorial es el mejor de estos para cada experimento, en nuestro caso es el valor mínimo entre las replicas.

El procedimiento se ejemplifica en la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Valor mínimo por experimento

	Replica 1	Replica2	Valor Mínimo
Exper. 1	53453860.88	67443077.98	53453860.88
Exper. 2	52110273.95	63797948.53	52110273.95
Exper. 3	53225812.69	54507184.98	53225812.69
Exper. 4	48735993.93	55718357.00	48735993.93
Exper. 5	52049193.25	50340060.24	50340060.24
Exper. 6	60957396.61	58744814.89	58744814.89
Exper. 7	58146033.53	53536325.18	53536325.18
Exper. 8	55215896.17	51262743.85	51262743.85

Tabla 4.5: Diseño de Experimento definitivo, usando el valor mínimo para cada experimento

	Factor (A) Población	Factor(B) Cruzamiento	Factor (C) Mutación	Respuesta Costo Esperado
Exper. 1	50	0.85	0.06	53453861
Exper. 2	100	0.95	0.06	48735994
Exper. 3	50	0.85	0.2	50340060
Exper. 4	100	0.85	0.06	52110274
Exper. 5	100	0.95	0.2	51262744
Exper. 6	50	0.95	0.06	53225813
Exper. 7	50	0.95	0.2	53536325
Exper. 8	100	0.85	0.2	58744815

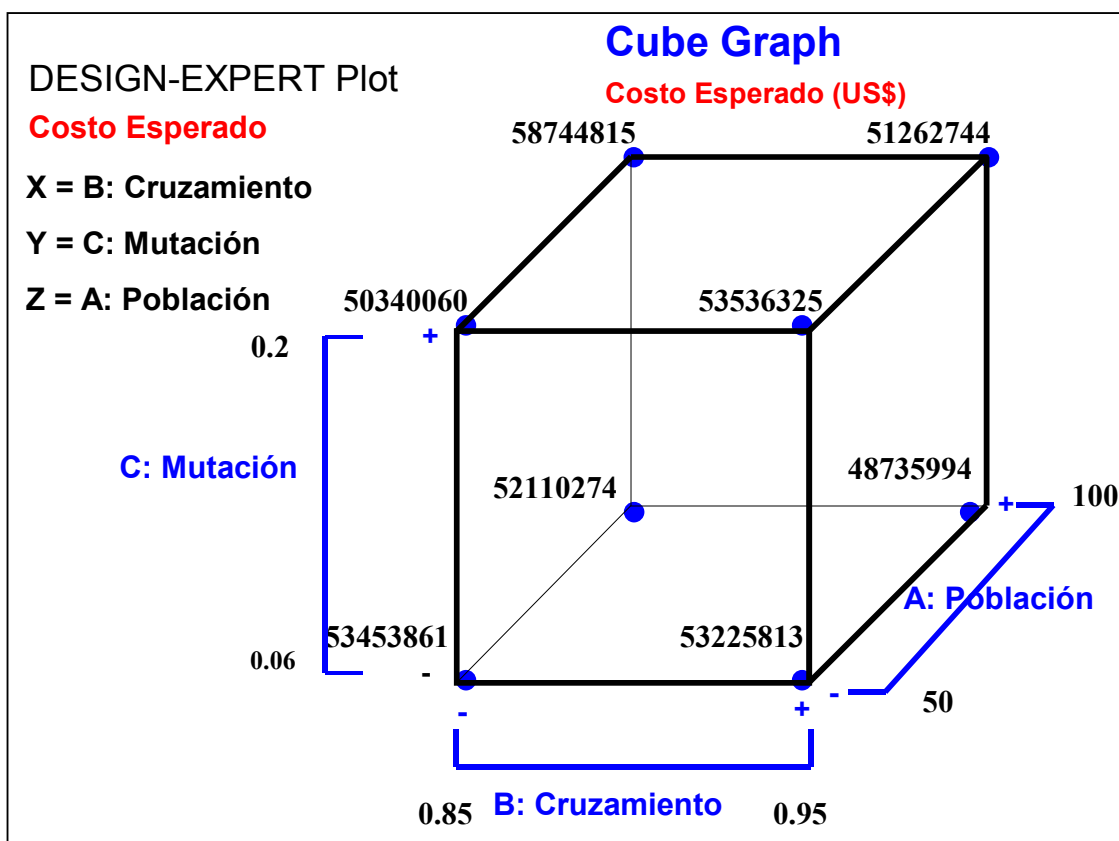


Figura 4.3: Mejores resultados por experimento, para cada combinación de factores.

Para mayor información de los resultados, ver el Anexo F.

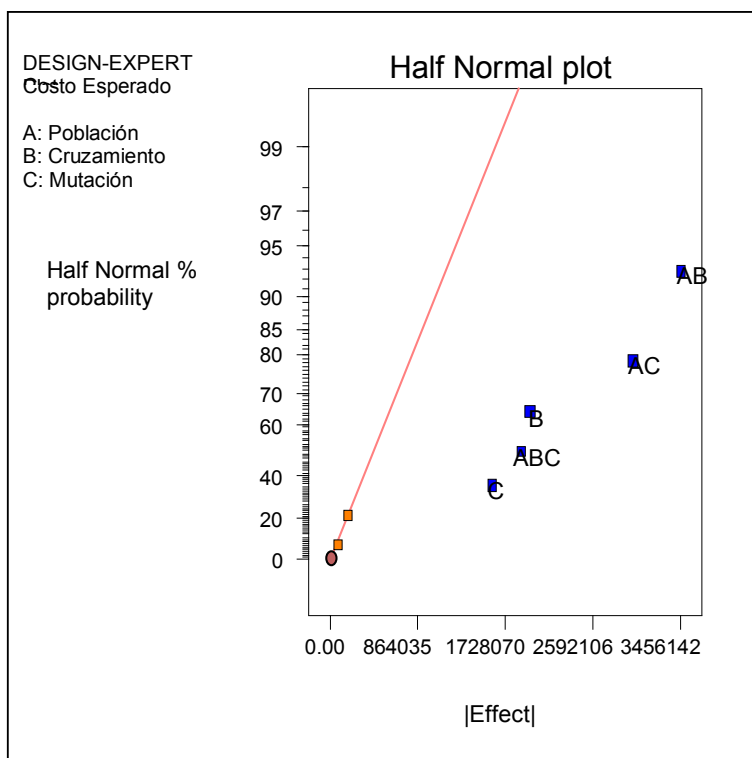


Figura 4.4: Gráfico de probabilidad normal para los efectos obtenidos con el software Design- Expert 6.010.

En la figura 4.4 los efectos que se encuentran en la en la línea son despreciables, mientras que los efectos grandes están alejados de la línea. Los efectos importantes que se descubren en este análisis son los efectos principales de B, C y las interacciones AB, AC y ABC.

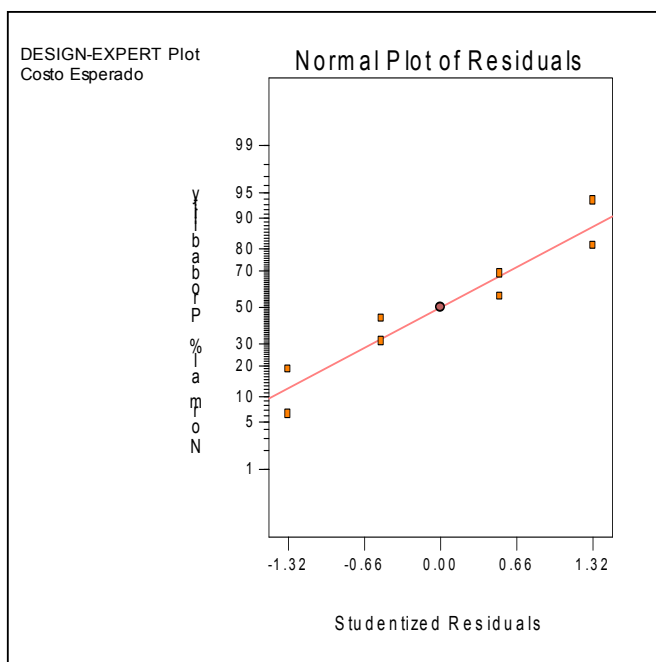


Figura 4.5: Gráfico de probabilidad para los residuos

Tabla 4.6: ANOVA

Response: Costo Esperado

ANOVA for Selected Factorial Model
Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	6.17062E+13	5	1.23412E+13	355.2663103	0.0028 significant
B	7.77783E+12	1	7.77783E+12	223.9000113	0.0044
C	5.05302E+12	1	5.05302E+12	145.4611244	0.0068
AB	2.38898E+13	1	2.38898E+13	687.7152394	0.0015
AC	1.78939E+13	1	1.78939E+13	515.1104558	0.0019
ABC	7.09157E+12	1	7.09157E+12	204.1447208	0.0049
Residual	69475948884	2	34737974442		
Cor Total	6.17756E+13	7			

Tabla 4.7: Estadísticos

Factor	Coefficient Estimate	Estadísticos			
Intercept	52676235.7				
B-Cruzamiento	-986016.789	Std. Dev.	186381.261	R-Squared	0.99887535
C-Mutación	794750.34	Mean	52676235.7	Adj R-Squared	0.99606373
AB	-1728070.98	C.V.	0.35382418	Pred R-Squared	0.98200561
AC	1495572.38	PRESS	1.1116E+12	Adeq Precision	62.0083312
ABC	-941513.017				

Según la Tabla 4.6, se observa que el valor F del modelo es de 355,27, con un valor-p para el modelo de un 0,28% , lo que implica que el modelo es significativo ya que es menor de un 5% (nivel de significancia) , y se rechaza la hipótesis nula de que ninguno de los tres factores no influyen en el costo esperado y se adopta la hipótesis alternativa que existe un modelo en función de los factores de estudio que explica el costo total esperado.

Así en esta tabla se observa que los factores B, C, y las interacciones AB, CA, ABC son términos significativos en este modelo, donde el factor A representa el tamaño de la población, el factor B la tasa de Cruzamiento y el factor C la tasa de Mutación.

Ecuación final en términos de factores cifrados (± 1)

$$\text{Costo Esper.} = 52676235 - 986016 * B + 794750 * C - 1728071 * A * B + 1495572 * A * C - 941513 * A * B * C \tag{4.6}$$

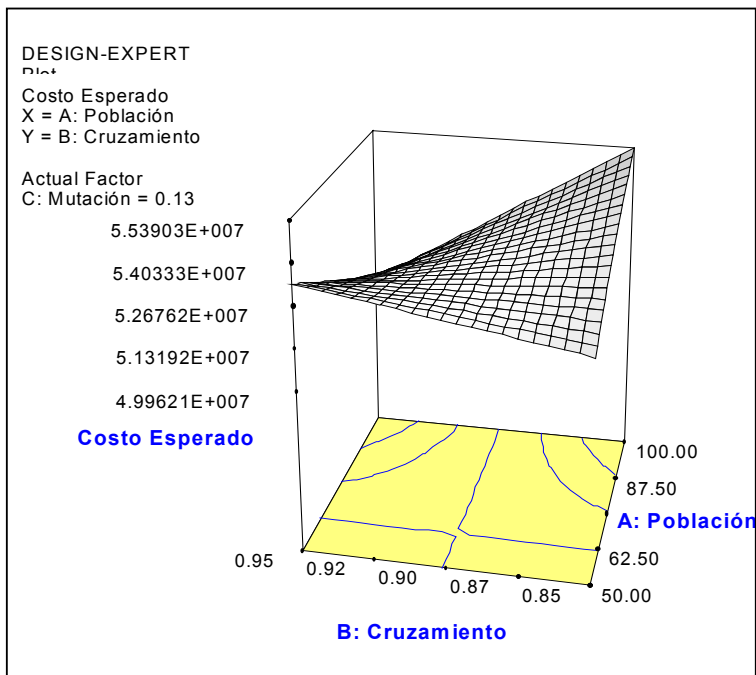


Gráfico 4.1: Vista 3D para el costo esperado en función de los parámetros de Población y Tasa de Cruzamiento donde la Tasa de mutación es constante.

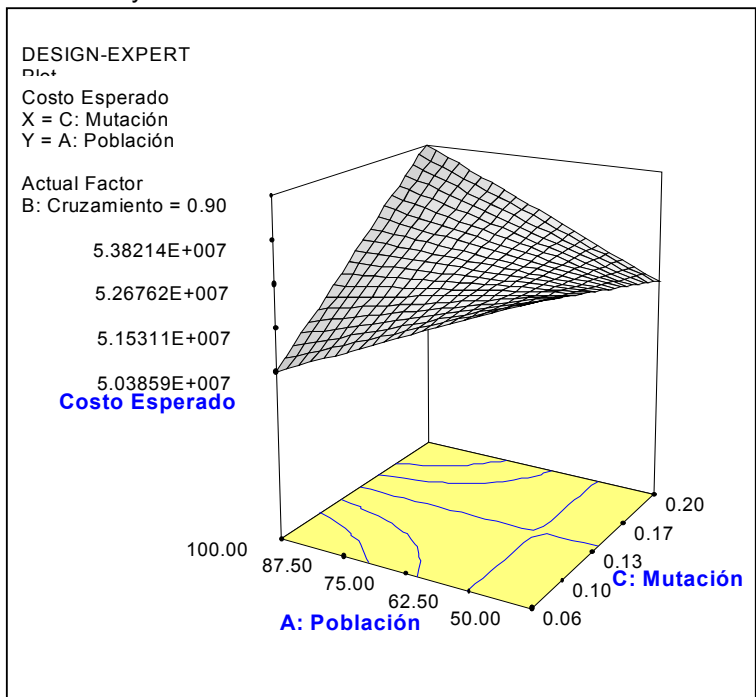


Gráfico 4.2: Vista 3D para el Costo esperado en función de los parámetros de Población y tasa de Mutación donde la Tasa de cruzamiento es constante.

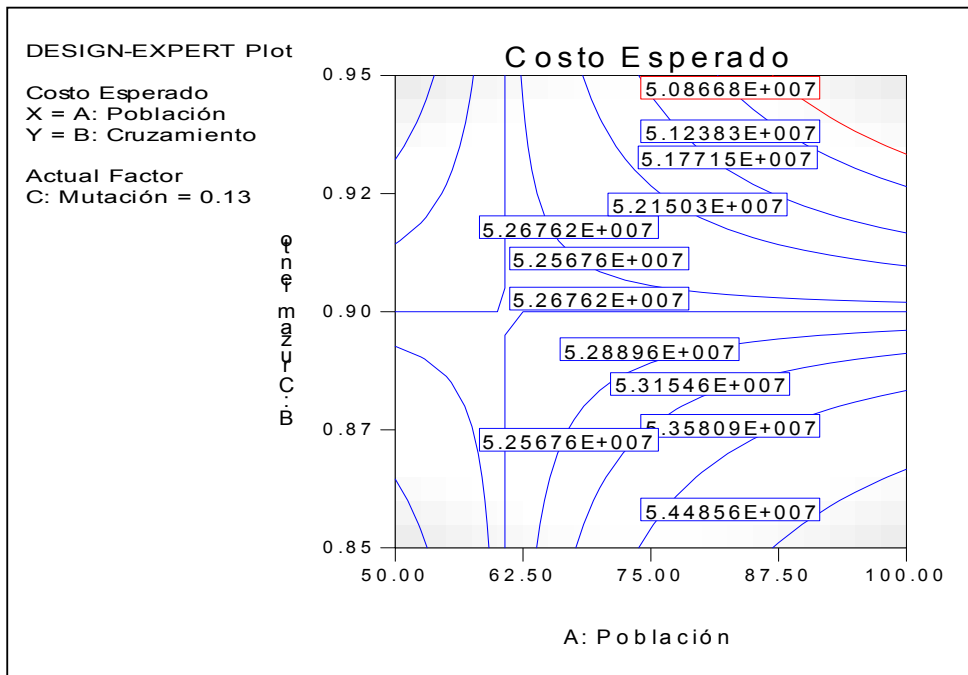


Gráfico 4.3: Gráfico de Contornos para el costo esperado en función de los parámetro Población y Tasa de Cruzamiento donde la Tasa de Mutación es Constante.

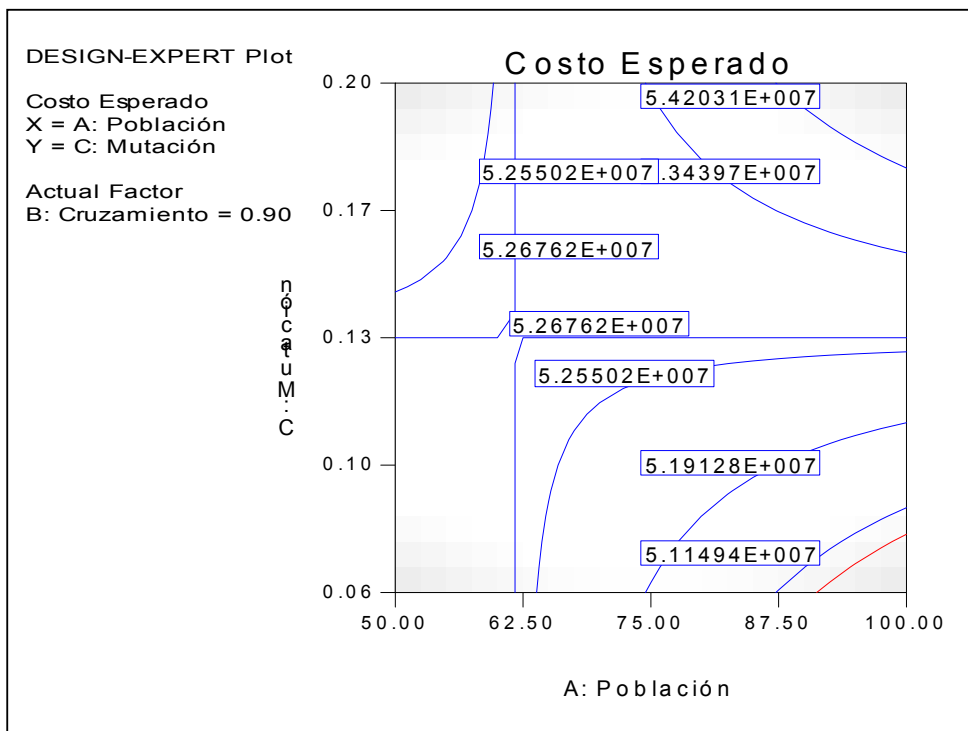


Gráfico 4.4: Gráfico de Contornos para el Costo esperado en función de los parámetros de Población y Tasa de Mutación donde la Tasa de Cruzamiento es Constante.

A simple vista se puede observar tanto en los gráficos en 3D como de contorno que para tamaños de población altos, tasa de cruzamiento alta, y tasa de mutación baja se observan los menores valores de Costo esperado Total, suponiendo que los efectos se comportan linealmente.

En este caso es fácil observar tanto en los gráficos 3D como de contorno los valores para que la función objetivo sea mínima, pero existen otros casos en que “no es fácil “ encontrar a simple vista cuales deben ser los valores de los factores para que la respuesta sea máxima o mínima, estos casos podrían ser superficies de respuestas no lineales, superficies para mas de tres variables, en donde no se puede graficar en 3D. Por lo tanto para generalizar todos estos inconvenientes definimos un procedimiento para optimizar la superficie de respuesta independiente de que si el modelo es lineal, cuadrático u otro.

▪ **4.3.2.4.3.- Optimización de los parámetros metodología RSM**

Para la optimización de la superficie de respuesta se usó la metodología (RSM o MSR) que es un conjunto de técnicas estadísticas útiles para modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés es influida por varias variables, y el objetivo es optimizar la respuesta. La RSM es una técnicas secuencial. A menudo, cuando se considera un punto sobre la superficie de respuesta alejado del óptimo, que podrían ser las condiciones actuales, el polinomio de primer grado es aproximadamente apropiado si existe poca curvatura en el sistema. En este caso, el objetivo consiste en guiar al experimentador rápida y eficientemente a la

cercanía general del punto óptimo usando el método de máxima pendiente en ascenso o máxima pendiente en descenso. Una vez que se ha determinado la región del punto óptimo, puede emplearse un modelo más elaborado, como por ejemplo una superficie de respuesta de segundo grado, y hacer un análisis para localizar el óptimo el cual consiste en calcular los puntos estacionario y caracterizar la superficie de respuesta es decir, si los puntos estacionales son mínimos, máximos o puntos de silla. El análisis para la superficie de respuesta puede interpretarse como el “ascenso a una loma”, donde la cima representa el punto de la máxima respuesta. Si el óptimo real es un punto de respuesta mínima, se puede pensar en el “descenso hacia un valle. Los procedimientos de la RSM para “escalar una loma” garantiza la convergencia sólo hacia un óptimo relativo.

En el caso de nuestro trabajo el ajuste de la superficie de respuesta se realizó usando un diseño factorial de 2^3 sin puntos de centros ya que supondremos que los efectos se comportan linealmente, hay que señalar que existen otros diseños para este fin. La superficie de respuesta queda definida para nuestro problema por la ecuación 4.6.

Además del ajuste de la Superficie de Respuesta se optimizo usando la metodología RSM con el programa Desing-Expert 6.0.10. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.8: Optimización de la superficie de respuesta

Solutions

Number	Población	Cruzamiento	Mutación	Media Costo Esperado	Desirability	
1	99.83	0.95	0.06	4.87E+07	1.00000	Selected
2	99.97	0.95	0.06	4.87E+07	1.00000	
3	99.32	0.95	0.06	4.87E+07	1.00000	
4	99.80	0.95	0.06	4.87E+07	1.00000	
5	99.60	0.95	0.06	4.87E+07	1.00000	
6	99.64	0.95	0.06	4.87E+07	1.00000	
7	99.89	0.95	0.06	4.87E+07	1.00000	
8	50.00	0.85	0.20	5.03E+07	0.84411	

Se define un índice de deseabilidad, que es un índice que varía entre cero y uno, donde la solución con mayor índice es mejor, considerando las restricciones, es decir se analiza las soluciones para la superficie de respuesta, limitada por los niveles inferiores y superiores para cada factor.

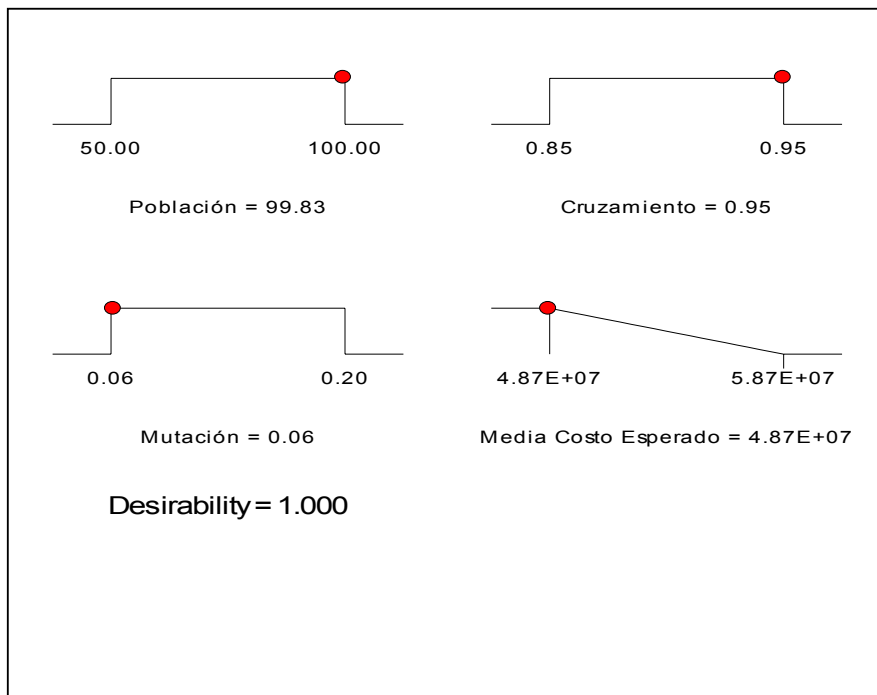


Gráfico 4.5: Gráfico de Ramplas

El gráfico 4.5 confirma las conclusiones hechas anteriormente al observar los gráficos 3D y contornos, en donde se observa que el mínimo Costo medio esperado dentro de la superficie de respuesta se observa para una población de 100 (nivel alto), una tasa de cruzamiento 0.95 (nivel alto) y una tasa de mutación de 0.06 (nivel bajo) además como detalle se puede observar una deseabilidad de 1, y que queda de mejor manifiesto en la siguiente gráfica.

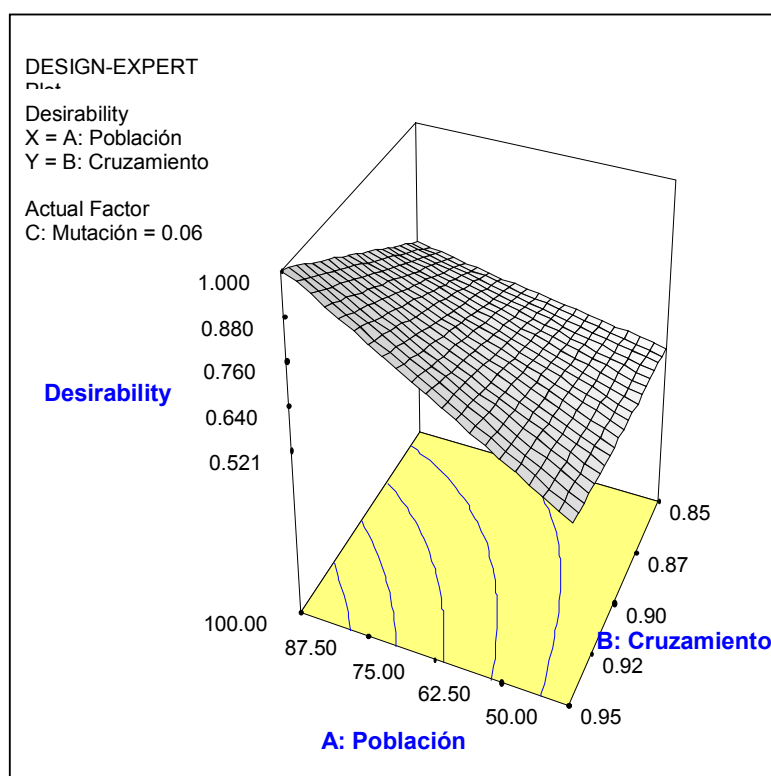


Gráfico 4.6: Gráfico de deseabilidad

Si bien se puede cuestionar el inclusión de la optimización de la superficie de respuesta, ya que solo bastaba con mirar los gráficos de 3D o de contornos para

visualizar los mejores parámetros, pero se incluyó como una metodología que tal vez pueda ser de utilidad para el lector.

Este procedimiento de optimización se puede ampliar a varias variables de entrada y con más una variable de respuesta

▪ 4.3.3.- Comparación de los enfoques

Si se comparan las soluciones del enfoque determinístico (Anexo D) y el enfoque probabilístico con algoritmos genéticos (Anexo F), pareciera ser que el enfoque determinístico podría llegar a mejores solución que el probabilístico, y que el algoritmo genético no encontró mejores soluciones quedándose atrapado en un óptimo local, además que hay que considerar que en la resolución de algoritmo genético se comenzó con una solución inicial que dista bastante del óptimo, pero aún así se comenzó con esta, para observar que tan bien se comportaba el algoritmo, si bien no se sabe cual es el óptimo se piensa que el óptimo no debería distar de la solución del enfoque determinístico resuelto con Solver, sobre la base de esta hipótesis es que podríamos decir que la solución con algoritmo genético con una mala solución (semilla) de inicio, no se comporta bien.

Por lo tanto para corroborar esta hipótesis y en la busca de una mayor robustez a nuestras soluciones se planteó el siguiente experimento: el resolver el problema usando los algoritmos genéticos de Riskoptimizer, con los valores ajustados en el diseño de experimento para los distintos factores o parámetros (Población de 100, tasa de Mutación de un 6% y un cruzamiento de un 95%) y además incluir como

solución inicial la solución obtenida con Solver (Enfoque 1.1 determinístico). Los resultados de este experimento se pueden observar en el Anexo G.

Si bien el diseño de experimento solo se realizó para una política de inversión (El monto de la inversión es menor o igual a USD500.000), supondremos que dichos resultados son extensibles a todas las otras políticas de inversión.

Una vez confirmado las hipótesis de que la solución de Solver tiene una gran robustez, ya que al resolver el modelo con Riskoptimizer se acepta la solución de inicio y además no es capaz en la mayoría de los casos, de encontrar otra mejor.

Si el problema fuese encontrar una buena solución y no hacer un mayor análisis de la dispersión que podría tener el Costo esperado Total, el enfoque determinístico bastaría, pero lo que se busca en este trabajo es entregar los suficientes argumentos para la toma de decisiones de un problema real que involucra grandes cantidades de dinero por lo tanto además de saber cual es el menor valor esperado del costo Total también se quiere saber que tan riesgosa es una decisión con respecto a otra, para lo cual se diseñó un Análisis de Riesgo que a continuación se explica.

▪ 4.3.4.- Análisis de riesgo

Para realizar un análisis de riesgo no basta con saber un valor esperado, además es conveniente saber el comportamiento del costo esperado y su dispersión, y conocer por ejemplo, cual es el Riesgo de tener valores superiores o menores al valor

esperado, o saber cual es el riesgo de tener Costos esperados mayor o menor que un valor dado, además saber una estimación de cual es el valor máximo o mínimo que podría presentar el Costo esperado para una alternativa de inversión, de esta forma se pretende dar solución al objetivo de este trabajo, el poder entregar una herramienta que permita discriminar entre distintas opciones de inversión y además encontrar soluciones que permitan minimiza el Costo esperado Total.

A continuación se realiza un análisis de Riesgo Para cuatro opciones de Inversión para la Política de Inversión (Inversión \leq USD 500.000), cabe señalar que estas cuatro soluciones tienen la particularidad que producen las menores medias del Costo esperado Total, donde tal media es el resultado de 1000 Iteraciones para distribución de entrada, de hecho estas soluciones son las mejores soluciones que se encontraron con RiskOptimizer con el uso de la solución inicial de Solver, de hecho tal vez si se quiere se podrían comparar mas soluciones arrojadas por el RiskOptimizer u otras alternativas que los ingenieros quieran evaluar, pero para efectos de este trabajo solo compararemos estas cuatro y solamente para el Política 1, debido a que lo que se busca es desarrollar una metodología, ya que aún no se posee la información para realizar un ajuste de curvas y dar mayor precisión a las estimaciones. En el anexo H se muestra en detalle las mejores soluciones bajo el enfoque probabilístico y un análisis de riesgo para los mejores 4 escenarios, pero un resumen se muestra a continuación.

Análisis de Riesgo Política 1

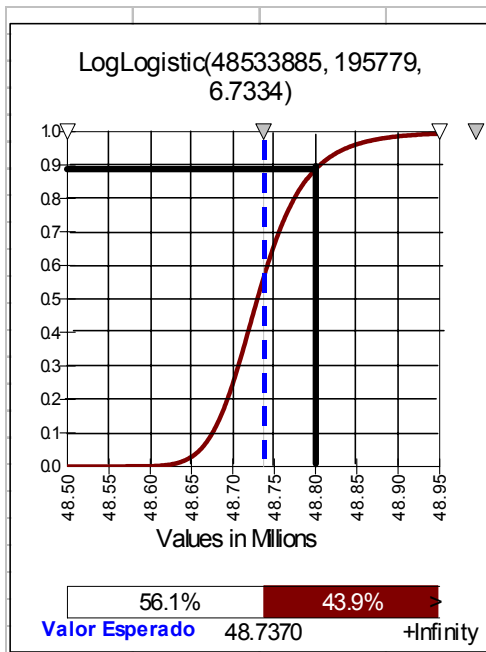


Gráfico 4.7: Función de Probabilidad del Costo Esperado. Escenario 1

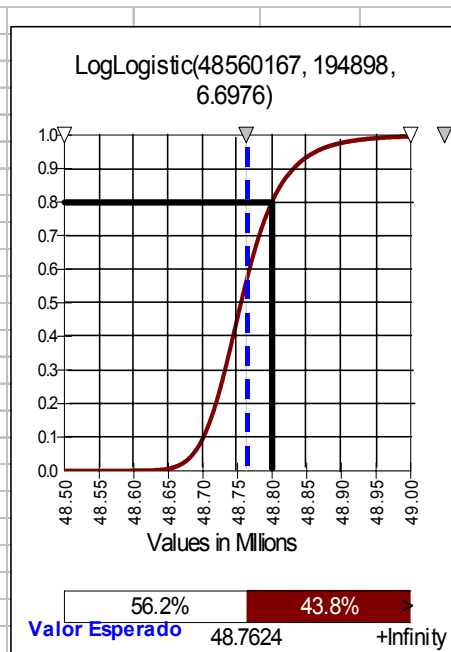


Gráfico 4.8: Función de Probabilidad del Costo Esperado. Escenario 2

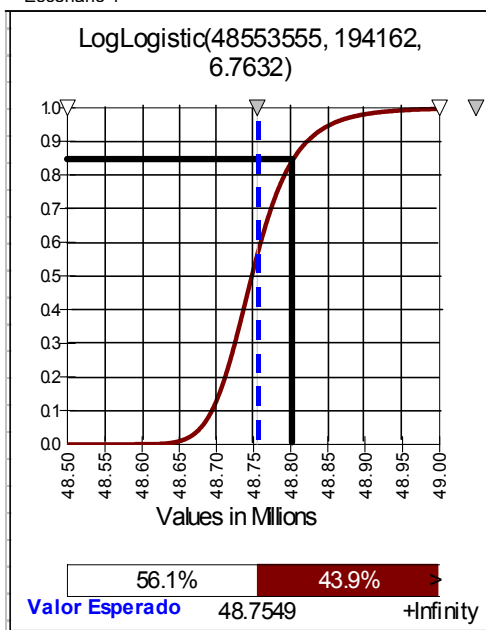


Gráfico 4.9: Función de Probabilidad del Costo Esperado. Escenario 3

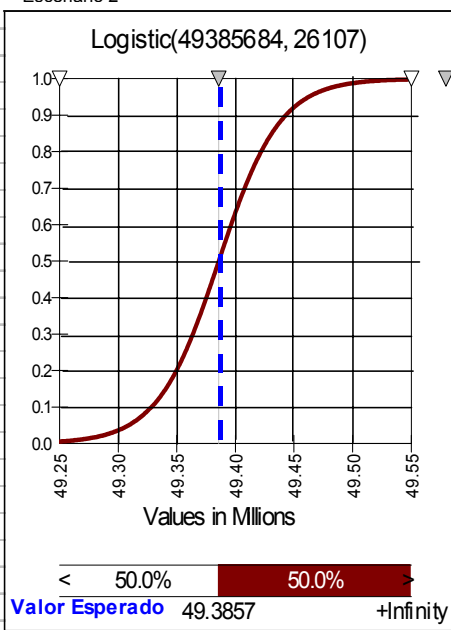


Gráfico 4.10: Función de Probabilidad del Costo Esperado. Escenario 4

Según los gráficos 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 se observa que el escenario 1 posee un costo esperado menor, además se puede ver qué, por ejemplo, si el tomador de decisiones quisiera saber cual es el riesgo de obtener un costo esperado mayor a 48.8 millones, el escenario 1 posee un menor riesgo, con tan solo un 11% de obtener un costo esperado mayor, además el escenario 1 posee menor valor observado en las iteraciones y un menor valor máximo, pero sin lugar a dudas que el tomador de decisiones puede hacer sus propios análisis, pero este trabajo entrega las herramientas, pero el inversionista decide.

Pero bajo las evidencias mostradas en los gráficos del Análisis de Riesgo, y si no existiera ninguna salvedad el escenario diría donde invertir.(Para la Política 1)

CAPITULO 5: VALIDACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1. - VALIDACION DE RESULTADOS

Con respecto a los resultados expuestos en este trabajo no han podido ser validados ya que se carece de información real que pueda alimentar el modelo, pero se espera que en un futuro próximo se pueda contar con esta. Sin embargo tanto la metodología como el modelo han sido aceptadas como herramienta de decisión por el Gerente de Planta y encargados de Sección y como se dijo anteriormente se espera contar con la información y alimentar el modelo con información real para generar el Plan de Inversiones 2005 en repuestos críticos para Petroquim S.A.

5.2. - CONCLUSIONES

El enfoque Determinístico (1.1) es capaz de encontrar buenas soluciones, esto puede ser comprobado al analizar las soluciones del enfoque Probabilístico.

No se recomienda realizar un análisis de la Probabilidad de Falla del Sistema (Enfoque 1.2.)

Una de las ventajas de los algoritmos genéticos es que permiten encontrar un conjunto de buenas soluciones en comparación al enfoque determinístico que solo encuentra una.

El enfoque determinístico puede ser utilizado como complemento para el enfoque Probabilístico ya que puede orientar la búsqueda de soluciones.

Al calcular el número de iteraciones (replicas en otros tipos de simuladores), se observó que el problema posee muy poca variabilidad, esto explica por qué el enfoque determinístico proporciona muy buenas soluciones.

En vista de lo anterior se puede resolver el enfoque 1.1, y con esa solución simular en @Risk4.5 (Simulación Monte Carlo) para observar su variabilidad.

Según el análisis de Riesgo realizado ha la política 1, comparando 4 alternativas de inversión que se observan en las Figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, se concluye que “el escenario 1 es la mejor alternativa de inversión.

ANEXOS

ANEXO A

- **Distribuciones más Habituales en Confiabilidad**

Distribuciones más habituales en Confiabilidad

- En general, la mayoría de distribuciones usadas en Confiabilidad tienen, a lo sumo, tres parámetros:

- **Parámetro de escala β :**

Este es el parámetro que caracteriza a las distribuciones uniparamétricas. El parámetro de escala define cuán dispersa se encuentra la distribución (en el caso de la distribución normal, el parámetro de escala es la desviación típica).

- **Parámetro de forma α :**

Este parámetro define la forma de la distribución. Algunas distribuciones (como la exponencial o la normal) carecen de este parámetro pues tienen una forma predeterminada que nunca varía (en el caso de la normal, ésta tiene siempre forma de campana).

- **Parámetro de localización δ :**

Se usa para desplazar una distribución hacia un lado u otro.

Esto significa que, dada una distribución cuyo dominio habitual sea $[0, +\infty)$, la inclusión de un parámetro de δ localización cambiará el dominio a $[\delta, +\infty)$.

Para incluir este parámetro hay que reemplazar x por $x - \delta$

Donde δ es el parámetro de localización.

Distribuciones de probabilidad

• Distribución Gamma

Esta distribución se emplea de manera extensa en una gran variedad de áreas; por ejemplo, para representar el tiempo aleatorio de falla de un sistema que falla sólo si de manera exacta los componentes fallan y la falla de cada componente ocurre con una frecuencia constante $\lambda=1/\beta$ por unidad de tiempo.

La distribución Gamma es versátil puesto que exhibe varios perfiles que dependen del valor del parámetro α , para $\alpha \leq 1$ la distribución Gamma tiene un perfil en forma de J traspuesta. Para $\alpha > 1$, presenta un pico que ocurre en $x = \beta(\alpha-1)$.

Casos especiales:

- Para valores de α grandes la distribución Gamma se puede aproximar, en algún grado por una distribución normal.
- Si α es un entero positivo, la distribución Gamma también se conoce como distribución de Erlang.
- Cuando el parámetro $\alpha=1$, la distribución Gamma se reduce a lo que se conoce como distribución exponencial negativa.
- Otro caso especial del modelo de probabilidad gama es la distribución Chi-Cuadrado si se reemplaza el parámetro α con $v/2$ y el parámetro β con 2.

Parámetros

α = Parámetro continuo de Perfil $\alpha > 0$

β = Parámetro continuo de escala $\beta > 0$

Dominio

$0 < x < +\infty$ continuo

Función de Densidad

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Función Acumulada

$$F(x; \alpha, \beta) = \frac{\Gamma_{x/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$$

Media

$\beta \alpha$

Varianza

$\beta^2 \alpha$

Coef. de Asimetria

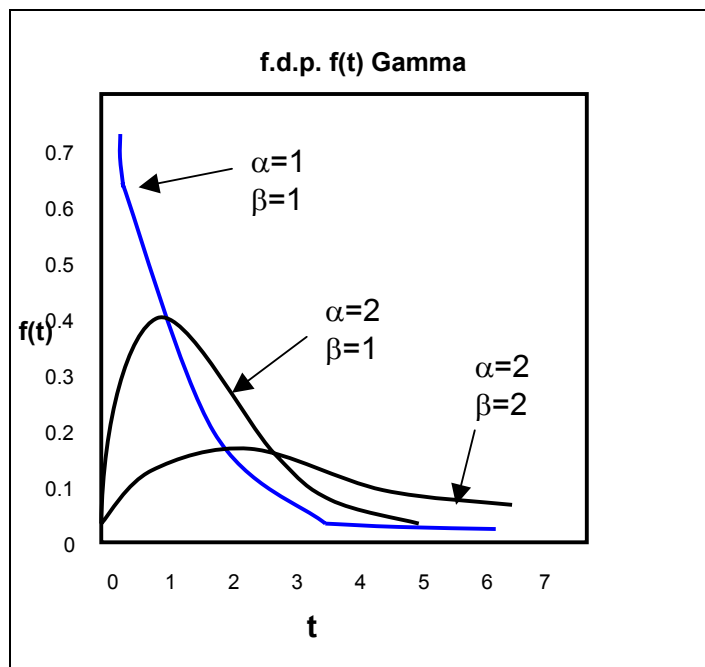
$\frac{2}{\sqrt{\alpha}}$

Curtosis

$3 + \frac{6}{\alpha}$

Moda

$\beta(\alpha - 1)$ si $\alpha \geq 1$
 No definido si $\alpha < 1$



Función de densidad Gamma

• Distribución Weibull

La distribución Weibull fue establecida por el físico del mismo nombre, quien demostró, con base en una evidencia empírica, que el esfuerzo al que se someten los materiales puede modelarse de manera adecuada mediante el empleo de esta distribución. En los 25 años esta distribución se empleo como modelo para situaciones del tipo tiempo-falla y con el objetivo de lograr una amplia variedad componentes mecánicos y eléctricos.

La distribución Weibull es versátil puesto que exhibe varios perfiles que dependen del valor del parámetro α , por ejemplo para $\alpha < 1$ tiene una forma de J transpuesta, y si $\alpha > 1$, la función de densidad de Weibull presenta un pico único. Si $\alpha = 3.6$ la distribución es Asimétrica, si es menor que 3.6 tiene un sesgo positivo y si es mayor a 3.6 tiene un sesgo negativo.

Casos especiales:

- Si $\alpha = 1$, al igual que la distribución Gamma se convierte en una exponencial negativa
- Si $\alpha = 2$ y se reemplaza β por $\sqrt{2}\sigma$ la función de densidad se reduce a la función de densidad de probabilidad que se conoce como distribución Rayleigh.

Parámetros

α = Parámetro continuo de Perfil $\alpha > 0$

β = Parámetro continuo de escala $\beta > 0$

Dominio

$0 < x < +\infty$

Continuo

Función de Densidad

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\alpha x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$$

Función Acumulada

$$F(x; \alpha, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$$

Media

$$\beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

Coefficiente de Asimetría

$$\frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{\alpha}\right) + 3\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]^{\frac{3}{2}}}$$

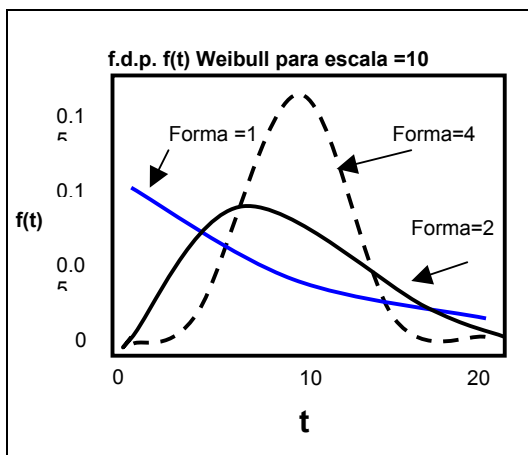
Varianza

$$\beta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]$$

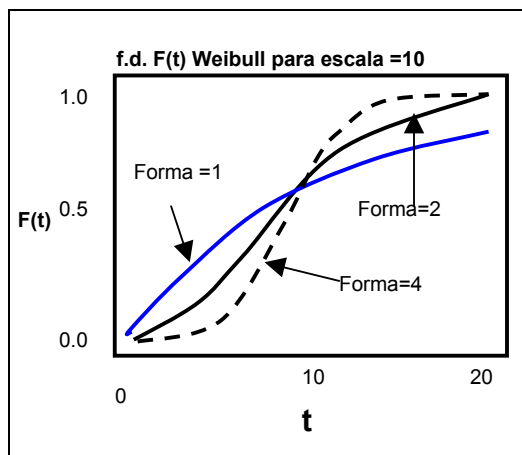
Moda

$$\beta \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad \text{Si } \alpha > 1$$

$$0 \quad \text{Si } \alpha \leq 1$$



Función de densidad Weibull ($\beta=10$).
Fuente: UOC



Función de Distribución Acumulada Weibull ($\beta=10$).
Fuente: UOC

• Distribución Exponencial

Se ha notado con anterioridad que la distribución exponencial(negativa) es un caso especial de los modelos Weibull y Gamma. Ya que es un caso especial de la distribución Gamma(Erlang), la variable aleatoria exponencial es el tiempo que transcurre hasta que se da el primer evento de Poisson. Es decir, la distribución exponencial puede modelar el lapso entre dos eventos consecutivos de Poisson que ocurren de manera independiente y a una frecuencia constante. Esta distribución se emplea con bastante frecuencia con el objeto de modelar problemas del tipo tiempo-falla y como modelo para el intervalo en problemas de líneas de espera.

La distribución exponencial es conocida por no tener memoria, es decir, la probabilidad de ocurrencia de eventos presentes o futuros no depende de los que hayan ocurrido en el pasado. De esta forma, la probabilidad de que una unidad falle en un lapso específico depende nada más de la duración de éste, no del tiempo en que la unidad ha estado en operación.

La distribución exponencial se caracteriza por un parámetro β , que representa el lapso promedio de tiempo entre dos eventos independientes de Poisson. En el contexto de Confiabilidad, β recibe el nombre de tiempo promedio entre fallas, y $1/\beta$ la frecuencia de falla.

Parámetros

β = Parámetro continuo de escala $\beta > 0$

Dominio

$0 < x < +\infty$

Continuo

Función de Densidad

$$f(x; \beta) = \frac{e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta}$$

Función Acumulada

$$F(x; \beta) = 1 - e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Media

β

Varianza

β^2

Coefficiente de Asimetria

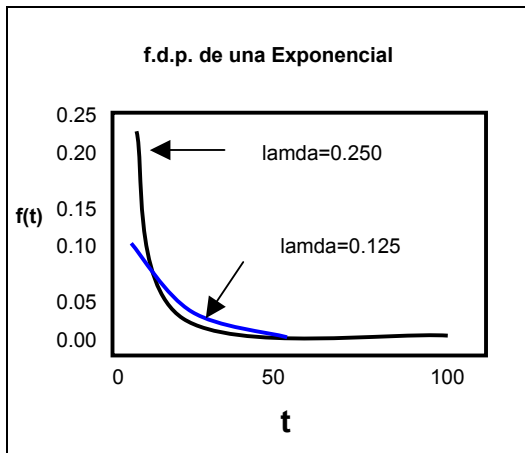
2

Curtosis

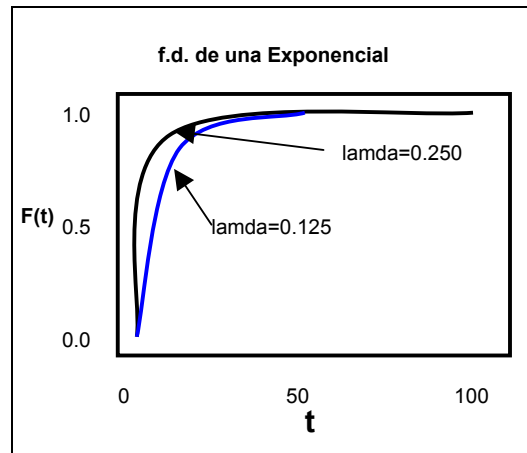
9

Moda

0



Función de densidad Exponencial($\alpha=1$).
Fuente: UOC



Función de Distribución Acumulada Exponencial($\alpha=1$)
Fuente: UOC

Otras funciones utilizadas

▪ **Distribución Lognormal**

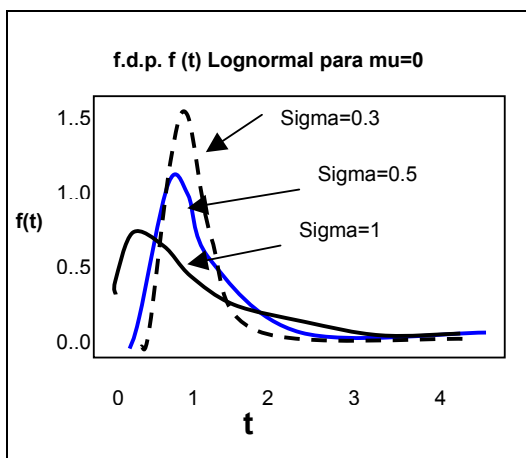
La f.d.p. de una distribución normal es no nula en todo el eje real (y no sólo en el semieje positivo). Por este motivo, el uso de la normal implicaría que el fallo puede

producirse antes del instante $t = 0$. Para evitar esta inconveniencia que presenta la distribución normal, se puede utilizar en su lugar la distribución Log-normal.

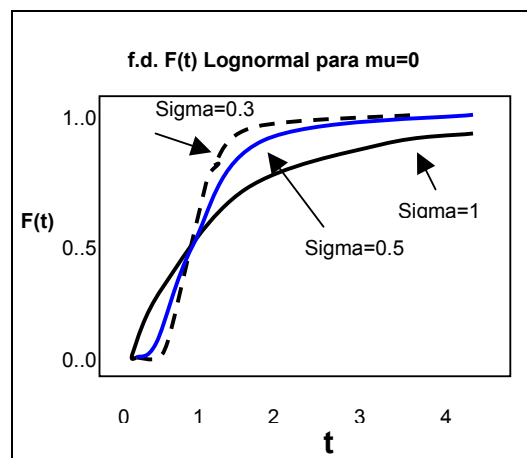
Se dice que una variable aleatoria T sigue una distribución Lognormal (base e), de parámetros δ (localización) y α (escala), cuando su logaritmo neperiano $Y = \text{Log}(T)$ se distribuye de forma normal con media δ y desviación típica α .

Inversamente, dada una v.a. $Y \approx N(\mu, \sigma)$, la variable aleatoria $T = e^Y$ seguirá una distribución Lognormal (base e) de parámetros $\delta = \mu$ (localización) y $\alpha = \sigma$ (escala), cuya f.d.p. será:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma * t \sqrt{2\pi}} * \exp\left\{ \frac{-1}{2\sigma^2} (\ln(t) - \nu)^2 \right\} \quad t > 0$$



Función de densidad Lognormal
Fuente: UOC



Función de Distribución Acumulada Lognormal
Fuente: UOC

Otra función en el ámbito de Confiabilidad es la Log-logística en la cual se realizan reemplazos de forma similar a los presentados anteriormente con la función Lognormal.

ANEXO B

- **Evaluación de Adaptaciones de Distribuciones en @Risk**

EVALUACION DE LAS ADAPTACION DE DISTRIBUCIONES EN @RISK

Cuando @RISK ha completado el proceso de adaptación, debe revisar los resultados. @RISK ofrece una amplia variedad de gráficos, estadísticas e informes que le ayudarán a evaluar adaptaciones y a seleccionar la mejor opción para sus modelos.

- **Gráficos**

@RISK Proporciona cuatro tipos de gráficos para que pueda evaluar visualmente la calidad de las adaptaciones.

Gráficos de comparación

Un gráficos de comparación superpone los datos de entrada y la distribución adaptada en un mismo gráfico, permitiéndole compararlos visualmente como curvas de densidad o acumulativas. Este gráfico permite determinar si la distribución adaptada coincide con los datos de entrada en áreas específicas. Por ejemplo, puede que sea importante que haya una buena coincidencia alrededor de la media o en los extremos.

Un gráfico de diferencias muestra el error absoluto entre la distribución adaptada y los datos de entrada.

Los gráficos de Probabilidad-Probabilidad (P-P) muestran la distribución de los datos de entrada (P_i) en comparación con la distribución del resultado ($F(x_i)$). Si la

adaptación es “buena”, la gráfica será casi lineal. Los gráficos P-P sólo se pueden hacer para adaptaciones de datos de muestra.

Los gráficos de Percentil-Percentil (Quantile-Quantile ó Q-Q, en inglés)

muestran los valores de percentil de la distribución de entrada (x_i) en comparación con los valores de percentil del resultado ($F^{-1}(P_i)$). Si la adaptación es “buena”, la gráfica será casi lineal. Los gráficos Q-Q sólo se pueden hacer para adaptaciones de datos de muestra continuos.

- **Estadísticas de adaptación**

Para cada adaptación, @RISK genera una o más estadísticas de adaptación. Estas estadísticas indican el nivel de coincidencia entre la adaptación y los datos de entrada, y el nivel de confianza que puede tener en que los datos han sido producidos por la función de distribución. Por cada una de estas estadísticas, cuanto menor sea el valor, mejor es la adaptación. @RISK utiliza cuatro estadísticas diferentes de adaptación:

Chi-Square, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling.

Cada prueba tiene sus ventajas e inconvenientes. A la hora de decidirse por una prueba, debe pensar qué información es más importante para usted.

- **Estadística Chi-Square Estadística**

La estadística Chi-Square es la estadística que mejor muestra la idoneidad de una adaptación. Se puede utilizar tanto con datos de muestra continuos como

independientes. Para calcular la estadística Chi-Square, primero debe dividir el eje x en varios “compartimentos”. La estadística Chi-Square se define entonces como:

$$X^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(N_i - E_i)^2}{E_i}$$

K = número de compartimentos

N_i = el número observado de muestras en el compartimento *i*

E_i = el número esperado de muestras en el compartimento *i*

Uno de los inconvenientes de la estadística Chi-Square es que no hay normas claras para seleccionar el número y localización de los compartimentos. En algunas situaciones, pueden alcanzarse diferentes conclusiones a partir de unos mismos datos dependiendo de cómo se establecieron los compartimentos.

Algunas de las arbitrariedades de la selección de compartimentos se puede eliminar indicando a @RISK que utilice compartimentos equiprobables. De este modo, @RISK ajusta los tamaños de los compartimentos basándose en la distribución adaptada, tratando de que cada compartimento contenga una cantidad igual de probabilidad.

Para las distribuciones continuas, este proceso es simple. Sin embargo, para las distribuciones independientes @RISK sólo puede hacer los compartimentos aproximadamente iguales.

@RISK permite controlar totalmente la forma en que se definen los compartimentos para la prueba Chi-Square. Esta configuración se establece en el cuadro de diálogo Define Chi-Squared Binning.

- **Estadística Kolmogorov-Smirnov (K-S)**

Otra estadística de adaptación que se puede usar con datos de muestra continuos es la Kolmogorov-Smirnov, que se define como

$$D_n = \sup \left[\left| F_n(x) - \hat{F}(x) \right| \right]$$

donde

n = numero total de puntos de datos

$\hat{F}(x)$ = La función de distribución acumulativa adaptada

$$F_n(x) = \frac{N_x}{n}$$

N_x = El numero de X_i 's menor que x .

La estadística K-S no requiere el establecimiento de compartimentos, lo cual hace que sea una estadística menos arbitraria que la Chi-Square. Uno de los inconvenientes de la estadística K-S es que no detecta muy bien discrepancias en los extremos.

- **Estadística Anderson-Darling (A-D)**

La última estadística de adaptación que se puede usar con datos de muestra continuos es la Anderson-Darling, que se define como

$$A_n^2 = n \int_{-\infty}^{+\infty} [F_n(x) - \hat{F}(x)]^2 \Psi(x) \hat{f}(x) dx$$

donde

n = número total de puntos de datos

$$\Psi^2 = \frac{1}{\hat{F}(x)[1-\hat{F}(x)]}$$

$\hat{f}(x)$ = la función de densidad de la hipótesis

$\hat{F}(x)$ = la función de distribución acumulativa de la hipótesis

$$F_n(x) = \frac{N_x}{n}$$

N_x = el número de menor que x.

Como la estadística K-S, la A-D no requiere el establecimiento de compartimentos. Pero a diferencia de la estadística K-S, que se enfoca en el medio de la distribución, la estadística A-D destaca las diferencias entre los extremos de la distribución adaptada y los datos de entrada.

- **¿En que casos es recomendable cada estadístico?**

- **Chi-Cuadrado**

Recomendable para distribuciones discretas o distribuciones continuas cuando existe gran cantidad de datos.

- **Kolmogorov-Smirnov (K-S)**

Recomendable para distribuciones continuas, no requiere gran cantidad de datos.

- **Anderson-Darling**

Recomendado para distribuciones con colas pronunciadas.

ANEXO C

- **Fallas**
- **Probabilidades de Fallas**
- **Esperanzas de Fallas**
- **Parámetro para la Distribución Weibull**

Electricidad

Fallas, Esperanzas de Falla y Probabilidades de Falla.

Por equipo y tipo de falla.

Equipo	Falla	Tipo de Falla	Prob.Falla. Falla.	Esperanza de Falla	Par. Escala (Beta)	Par. Forma (Alfa)
LT101			100.00%			
	Falla linea 66Kv	Corte de Linea	69.68%	5	5	1.0
		Falla de aisladores	100.00%	3	3.3343	3.5
		Rotura de postes	100.00%	2	2.2228	3.5
TR101			100.00%			
	Falla Transformador Principal	Falla de aislación	1.89%	20	22.2285	3.5
		Cortocircuito bobinas	27.92%	20	20	1.0
		contaminación de aceite	9.85%	10	11.1142	3.5
		rotura de estanque	68.51%	5	5.6353	2.5
		falla de aisladores	100.00%	3	3.3343	3.5
INT101			99.56%			
	Falla Interruptor de Poder	Falla de aisladores	70.64%	5	5.5571	3.5
		Falla de sistema de control	97.59%	2	2.0000	1.0
		Falla de presurización	15.18%	10	11.1142	3.5
		Falla polos interrupcción	26.93%	20	20.0000	1.0
TTPP2			96.42%			
	Falla Transformador de Tensión	Falla de aisladores	69.28%	5	5.5571	3.5
		Contaminación de aceite	44.63%	10	10.0000	1.0
		Rotura de estanque	71.64%	5	5.6353	2.5
		Falla de bobinas	25.87%	20	20.0000	1.0
TTCC2			97.23%			
	Falla Transformador de Corriente	Falla de los aisladores	74.45%	5	5.5571	3.5
		Contaminación de aceite	44.56%	10	10.0000	1.0
		Rotura de estanque	70.77%	5	5.6353	2.5
		Falla de bobinas	33.18%	20	20.0000	1.0
QR101			91.43%			
	Falla Sistema Continua CE01	Falla unidad rectificadora	68.03%	6	6.0000	1.0
		Falla de Baterías	73.18%	5	5.5571	3.5
QT201			91.66%			
	Falla Cabina Media Tensión	Falla de elementos de Control	83.60%	3	3.0000	1.0
		Falla camara de vacio	48.47%	10	10.0000	1.0
		Falla Sistema Mecánico	1.32%	20	22.2285	3.5
TRMEX801E			94.70%			
	Falla Transformador Seco	Falla aislamiento bobinas	2.67%	15	16.6713	3.5
		Cortocircuito de bobinas	65.82%	6	6.0000	1.0
		Falla sensores de temperatura	84.06%	3	3.0000	1.0
QR202			88.00%			
	Falla Sistema Continua CE02	Falla unidad rectificadora	63.10%	6	6.0000	1.0
		Falla de Batería	67.48%	5	5.0000	1.0

Electricidad

Fallas, Esperanzas de Falla y Probabilidades de Falla, por equipo y tipo de falla.

Equipo	Falla	Tipo de Falla	Prob.Falla. Falla.	Esperanza de Falla	Par. Escala (Beta)	Par. Forma (Alfa)
MEX801			99.14%			
	Falla Motor Principal	Falla de aislamiento bobinado	1.70%	20	22.2285	3.5
		Falla sensores temperatura	91.23%	3	3.0000	1.0
		Cortocircuito bobinas	43.48%	10	10.0000	1.0
		Falla Rodamientos	30.73%	7	7.7800	3.5
		Falla Ventiladores	65.22%	5	5.0000	1.0
		Falla Jaula Rotor	26.52%	15	15.0000	1.0
MC301			99.34%			
	Falla Motor Compresor C301	Falla de aislación bobinado	0.64%	20	22.2285	3.5
		Falla sensores temperatura	84.56%	3	3.0000	1.0
		Cortocircuito Bobinas	49.98%	10	10.0000	1.0
		Falla rodamientos	70.27%	5	5.5571	3.5
		Falla Ventilación	53.61%	8	8.0000	1.0
		Falla Jaula Rotor	37.39%	15	15.0000	1.0
MEX801E			100.00%			
	Falla Motor Bomba Polimero	Falla de aislación bobinado	0.00%	20	22.2285	3.5
		Falla sensores temperatura	87.70%	3	3.0000	1.0
		Cortocircuito Bobinas	48.54%	10	10.0000	1.0
		Falla rodamientos	100.00%	1	1.1114	3.5
		Falla Ventilación	58.14%	8	8.0000	1.0
		Falla Jaula Rotor	28.36%	15	15.0000	1.0
QE's			95.15%			
	Falla Cabinas de Distribución	Falla barras principales	35.99%	15	15.0000	1.0
		Falla interruptores	2.99%	15	16.6713	3.5
		Falla elementos de Control	83.41%	4	4.0000	1.0
		Falla de Protecciones	52.88%	8	8.0000	1.0
CABLES			83.91%			
	Fallas Cables de Baja tensión	Rotura de Cable	56.71%	7	7.0000	1.0
		Perdida de aislación	32.08%	15	15.0000	1.0
		Falla termica	45.28%	10	10.0000	1.0
VF's			99.20%			
	Falla Variadores de Frecuencia	Falla aislación unidad poder	3.20%	15	16.6713	3.5
		Falla de elementos de Potencia	53.56%	4	4.0000	1.0
		Falla por unidad de Continua	52.01%	8	8.0000	1.0
		Falla Ventilación	71.62%	5	5.0000	1.0
		Falla elementos de Control	75.97%	4	4.0000	1.0
		Falla unidad rectificadora	45.92%	12	12.0000	1.0
MOTORES			86.77%			
	Falla Motores BT.	Falla de aillción bobinado	2.73%	15	16.6713	3.5
		Cortocircuito bobinas	22.94%	10	10.0000	1.0
		Falla Rodamientos	2.17%	4	4.4457	3.5
		Falla Ventilación	70.07%	6	6.0000	1.0
		Falla Jaula Rotor	39.73%	12	12.0000	1.0

Instrumentación

Fallas, Esperanzas de Falla y Probabilidades de Falla por equipo y tipo de falla.

Equipo	Falla	Prob.Falla. Falla.	Esperanza de Falla	Par. Escala (Beta)	Par. Forma (Alfa)
PK-601	Falla Tarjeta comunicaciòn PLC/Interfaz operador	42%	10.0	10	1
PK-601	Falla Interfaz Operador	46%	10.0	10	1
Cromatógrafos	Falla tarjeta base alimentación	40%	10.0	10	1
Cromatógrafos	Falla Tubing tomamuestras	33%	5.0	5.63530249	2.5
Equipos Radiactivos	Falla Tarjeta Switch de nivel	50%	10.0	10	1
Equipos Radiactivos	Falla tubo detector de nivel LT-3001	49%	10.0	10	1
Equipos Radiactivos	Falla Tubo detector de nivel LT-3002	46%	10.0	10	1
Medidores de Flujo	Falla sensor FE-2001	42%	10.0	10	1
Medidores de Flujo	Falla sensor FE-2002	46%	10.0	10	1
Medidores de Flujo	Falla sensor FE-1102	46%	10.0	10	1
Medidores de Flujo	Falla sensor FE-1201	42%	10.0	10	1
Medidores de Flujo	Falla sensor FE-2302	47%	10.0	10	1
Medidores de Flujo	Falla sensor FE- 2507	43%	10.0	10	1
PK-803 Extrusora	Falla tarjeta CPU 948 de PLC Siemens	42%	10.0	10	1
PK-803 Extrusora	Falla Fuente de Poder PLC	44%	10.0	10	1
PK-803 Extrusora	Falla Tarjeta entrada digital PLC	41%	10.0	10	1
PK-803 Extrusora	Falla tarjeta salida digital	48%	10.0	10	1
PK-803 Extrusora	Falla tarjeta entrada análoga	41%	10.0	10	1
PK-803 Extrusora	Falla tarjeta salida análoga	34%	10.0	10	1
PK-803 Extrusora	Falla Conversor de señal control Temperatura	46%	10.0	10	1
PK-806	Falla tarjeta CPU 948 PLC S115U	50%	10.0	10	1
PK-806	Falla Fuente de Poder	49%	10.0	10	1
PK-806	Falla tarjeta entrada análoga	40%	10.0	10	1

Mecánica

Fallas, Esperanzas de Falla y Probabilidades de Falla por equipo y tipo de falla.

Equipo	Falla	Prob.Falla. Falla.	Esperanza de Falla	Par. Escala (Beta)	Par. Forma (Alfa)
C601	Correa de Capacidad	54%	8	8	1
C601	Rodores	60%	8	8	1
EX801	Acoplamiento de engranajes Red.Part	58%	8	8	1
P203	Acoplamiento	76%	4	4	1

ANEXO D

- **Resultados Enfoque 1.1 (Determinístico) Minimizar el Costo Esperado
s/a Inversión**

Soluciones para el Enfoque 1.1 (Determinístico)

Minimizar el Costo Esperado s/a Inversión

¿Dónde Invertir?

Equipo	Repuesto	Política 1 ≤500000	Política 2 ≤700000	Política 3 ≤800000	Política 4 ≤900000	Política 5 ≤1.000.000	Política 6 ≤1.200.000	Política 7 ≤1.600.000	Política 8 ≤2.000.000
LT101	Linea 66Kv	1	1	1	1	1	1	1	1
TR101	Transf.Principal	0	0	0	1	1	1	1	1
INT101	Interrup.de Poder	1	1	1	1	1	1	1	1
TTPP2	Transfor Tensión	1	1	1	1	1	1	1	1
TTCC2	Transf.Corriente	1	1	1	1	1	1	1	1
QR101	Sist.Cont.CE01	1	1	1	1	1	1	1	1
QT201	Cabina Med.Tens.	0	1	1	0	1	1	0	1
TRMEX80	Transf.Seco	1	1	1	1	1	1	1	1
QR202	Sist. Cont. CE02	1	1	1	1	1	1	1	1
MEX801	Motor Principal	0	0	0	0	0	0	1	1
MC301	Motor Comp. C301	0	0	1	0	0	1	0	1
MEX801E	Motor Bom. Poli.	1	1	1	1	1	1	1	1
QE's	Cabinas Dist.	0	0	1	1	1	1	0	1
CABLES	Cables Baja ten.	1	1	1	1	1	1	1	1
VF's	Var.Frecuencia	0	1	1	1	1	1	1	1
MOTORES	Motores BT.	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-601	Tar.C.PLC/Int.oper.	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-602	Interfaz Operador	1	1	1	1	1	1	1	1
Cromat.	Tarjeta base alimen.	1	0	1	1	1	1	1	1
Cromat.	Turing tomamues.	0	0	0	0	1	1	0	1
Cromat.	Tarjeta Switch nivel	1	1	1	1	1	1	1	1
Cromat.	Tubo detec.LT-3001	1	1	1	1	1	1	1	1
Cromat.	Tubo detec. LT-3002	1	1	1	1	1	1	1	1
Med. Flujo	Sensor FE-2001	1	1	1	1	1	1	1	1
Med. Flujo	Sensor FE-2002	1	1	1	1	1	1	1	1
Med. Flujo	Sensor FE-1102	1	1	1	1	1	1	1	1
Med. Flujo	Sensor FE-1201	1	1	1	1	1	1	1	1
Med. Flujo	Sensor FE-2302	1	1	1	1	1	1	1	1
Med. Flujo	Sensor FE-2502	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-797	Tarj. CPU 948 PLC S.	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-798	Fuente Poder PLC	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-799	Tarj. ent. digital PLC	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-800	Tarj. salida digital	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-801	Tarj. Ent. análoga	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-802	Tarj. salida análoga	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-803	Conver.señal cont.T.	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-806	Tarj.CPU 948 PLC S1	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-806	Fuente de Poder	1	1	1	1	1	1	1	1
PK-806	Tarj.entrada análoga	1	1	1	1	1	1	1	1
C601	Correa Capacidad	1	1	1	1	1	1	1	1
C601	Rodores	1	1	1	1	1	1	0	1
EX801	Acop. dentado	1	0	1	0	1	1	1	1
P203	Acoplamiento	1	0	1	1	1	1	1	1

¿Cuánto Invertir?

Polit.	Recursos disponible	Recursos utilizados	Costo Esperado evitado	Costo Esperado no evitado	Pf
1	500,000	491,785	97,508,198	48,703,276	100.000%
2	700,000	699,985	111,060,267	35,151,207	100.000%
3	800,000	794,785	114,717,748	31,493,726	100.000%
4	900,000	899,285	123,307,973	22,903,501	100.000%
5	1,000,000	990,785	126,746,307	19,465,167	99.994%
6	1,200,000	1,058,785	129,395,354	16,816,120	99.020%
7	1,600,000	1,596,785	135,995,453	10,216,021	99.999%
8	2,000,000	1,808,785	146,196,853	14,621	0.276%

Unidad: US\$

Recursos utilizados por Sección

Política	Rec. utilizados Electric.	Rec. Utilizados Instrument.	Rec. Utilizados Mecánica	Total Recursos Utilizados
1	338,000	79,785	74,000	491,785
2	553,000	76,985	70,000	699,985
3	641,000	79,785	74,000	794,785
4	748,000	79,785	71,500	899,285
5	823,000	93,785	74,000	990,785
6	891,000	93,785	74,000	1,058,785
7	1,478,000	79,785	39,000	1,596,785
8	1,641,000	93,785	74,000	1,808,785

Unidad: US\$

ANEXO E

- **Resultados Enfoque 1.2 (Determinístico)**

- **Minimizar el Riesgo Total del Sistema s/a Inversión**

Enfoque 1.2(Determinístico)

Minimizar el Riesgo Total del Sistema s/a Inversión

Política Monto Max Inv.	Polit.1 500000	Polit.2 700000	Polit.3 800000	Polit.4 900000	Polit.5 1000000	Polit.6 1200000	Polit.7 1600000	Polit.8 2000000
Linea 66Kv	0	0	1	1	1	1	1	1
Transf.Principal	0	0	1	1	1	1	1	1
Interrup.de Poder	0	0	1	1	1	1	1	1
Transfor Tensión	0	0	1	1	1	1	1	1
Transf.Corriente	0	0	1	1	1	1	1	1
Sist.Cont.CE01	0	0	1	1	1	1	1	1
Cabina Med.Tens.	0	0	1	0	1	1	1	1
Transf.Seco	0	0	1	1	1	1	1	1
Sist. Cont. CE02	0	0	1	1	1	1	1	1
Motor Principal	0	0	0	0	0	0	0	1
Motor Comp. C301	0	0	1	1	1	1	1	1
Motor Bom. Poli.	0	0	1	1	1	1	1	1
Cabinas Dist.	0	0	1	1	1	1	1	1
Cables Baja ten.	0	0	1	1	1	1	1	1
Var.Frecuencia	0	0	0	1	1	1	1	1
Motores BT.	0	0	0	1	1	1	1	1
Tar.C.PLC/Int.oper.	0	0	1	1	1	1	1	1
Interfaz Operador	0	0	1	1	1	1	1	1
Tarjeta base alimen.	0	0	1	1	1	1	1	1
Turing tomamues.	0	0	1	0	1	1	1	1
Tarjeta Switch nivel	0	0	1	1	1	1	1	1
Tubo detec.LT-3001	0	0	1	1	1	1	1	1
Tubo detec. LT-3002	0	0	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2001	0	0	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2002	0	0	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-1102	0	0	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-1201	0	0	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2302	0	0	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2502	0	0	1	1	1	1	1	1
Tarj. CPU 948 PLC S.	0	0	1	1	1	1	1	1
Fuente Poder PLC	0	0	1	1	1	1	1	1
Tarj. ent. digital PLC	0	0	1	1	1	1	1	1
Tarj. salida digital	0	0	1	1	1	1	1	1
Tarj. Ent. análoga	0	0	1	1	1	1	1	1
Tarj. salida análoga	0	0	1	1	1	1	1	1
Conver.señal cont.T.	0	0	1	1	1	1	1	1
Tarj.CPU 948 PLC S115U	0	0	1	1	1	1	1	1
Fuente de Poder	0	0	1	1	1	1	1	1
Tarj.entrada análoga	0	0	1	1	1	1	1	1
Correa Capacidad	0	0	0	0	0	1	1	1
Rodores	0	0	0	0	0	1	1	1
Acop. dentado	0	0	1	1	1	1	1	1
Acoplamiento	0	0	1	1	1	1	1	1

Recursos Util.	0	0	798785	899785	988785	1058785	1058785	1808785
Prob. Falla Sist.	100%	100%	99.9997%	99.9896%	99.78178%	99.01958%	99.01958%	0.27600%
Costo Esperado	146211474	146211474	44294509	27889751	24469640	16816120	16816120	14621

ANEXO F

- **Resultados del Diseño de Experimento**

Mejores Soluciones por Experimento.

Replica 1

Monto Máximo a Invertir <=500.000

Experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	Solución inicial o semilla
Linea 66Kv	1	1	0	1	1	1	1	0	1
Transf.Principal	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Interrup.de Poder	1	1	0	1	1	1	1	0	1
Transfor Tensión	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Transf.Corriente	1	1	1	1	1	0	0	1	1
Sist.Cont.CE01	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cabina Med.Tens.	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Transf.Seco	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sist. Cont. CE02	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Motor Principal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Motor Comp. C301	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Motor Bom. Poli.	0	1	0	1	1	0	1	1	1
Cabinas Dist.	0	1	0	0	0	1	1	0	1
Cables Baja ten.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Var.Frecuencia	1	0	1	0	0	1	0	1	1
Motores BT.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tar.C.PLC/Int.oper.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Interfaz Operador	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarjeta base alimen.	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Turing tomamues.	0	1	0	0	0	0	0	1	1
Tarjeta Switch nivel	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tubo detec.LT-3001	0	1	1	1	1	0	1	0	1
Tubo detec. LT-3002	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Sensor FE-2001	0	1	1	1	1	0	1	0	1
Sensor FE-2002	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-1102	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-1201	1	1	1	1	1	0	1	0	1
Sensor FE-2302	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2502	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. CPU 948 PLC S.	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Fuente Poder PLC	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Tarj. ent. digital PLC	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Tarj. salida digital	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. Ent. análoga	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. salida análoga	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Conver.señal cont.T.	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Tarj.CPU 948 PLC S115U	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fuente de Poder	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj.entrada análoga	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Correa Capacidad	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Rodores	0	0	1	1	1	0	0	0	1
Acop. dentado	0	1	1	1	1	1	1	0	1
Acoplamiento	1	1	1	1	0	1	1	1	1

Costo Medio esperado US\$	53453861	52110274	53225813	48735994	52049193	60957397	58146034	55215896
Recursos Utilizados US\$	498485	490785	498785	491785	485185	496585	497385	499485

Mejores Soluciones por Experimento

Replica 2

Monto Máximo a Invertir <= US\$ 500.000

Experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	Solucion inicial o semilla
Linea 66Kv	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Transf.Principal	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Interrup.de Poder	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Transfor Tensión	1	0	1	1	1	0	1	1	1
Transf.Corriente	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sist.Cont.CE01	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cabina Med.Tens.	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Transf.Seco	0	1	1	1	1	0	1	1	1
Sist. Cont. CE02	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Motor Principal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Motor Comp. C301	0	1	0	0	0	0	1	0	1
Motor Bom. Poli.	0	0	1	0	1	1	0	1	1
Cabinas Dist.	0	1	0	1	0	0	0	1	1
Cables Baja ten.	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Var.Frecuencia	0	0	1	1	0	1	0	0	1
Motores BT.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tar.C.PLC/Int.oper.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Interfaz Operador	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarjeta base alimen.	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Turing tomamues.	0	1	1	0	0	0	0	0	1
Tarjeta Switch nivel	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tubo detec.LT-3001	0	1	1	1	1	1	0	1	1
Tubo detec. LT-3002	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Sensor FE-2001	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2002	0	1	1	1	1	0	1	1	1
Sensor FE-1102	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-1201	0	1	1	1	1	1	1	0	1
Sensor FE-2302	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2502	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Tarj. CPU 948 PLC S.	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Fuente Poder PLC	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. ent. digital PLC	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. salida digital	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. Ent. análoga	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. salida análoga	0	1	1	1	0	1	0	1	1
Conver.señal cont.T.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj.CPU 948 PLC S115U	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Fuente de Poder	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj.entrada análoga	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Correa Capacidad	0	1	0	1	1	1	1	1	1
Rodores	1	1	0	0	1	0	1	1	1
Acop. dentado	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Acoplamiento	1	1	1	1	1	0	1	0	1

Costo Medio esper.US\$	67443078	63797949	54507185	55718357	50340060	58744815	53536325	51262744
Rec. Util US\$	498535	498785	490785	486785	488135	499185	499335	497485

ANEXO G

- **Resultados del Enfoque Probabilístico**

Minimizar la Media del Costo Esperado

Mejores Soluciones con RiskOptimizer utilizando como solución inicial la solución del Enfoque 1.1

Politica	Politica 1	Politica 2	Politica 3	Politica 4	Politica 5	Politica 6	Politica 7	Politica 8
Monto Max Inv.	<=500000	<= 700000	<= 800000	<= 900000	<= 1000000	<= 1200000	<= 1600000	<= 2000000
Linea 66Kv	1	1	1	1	1	1	1	1
Transf.Principal	0	0	0	1	1	1	1	1
Interrup.de Poder	1	1	1	1	1	1	1	1
Transfor Tensión	1	1	1	1	1	1	1	1
Transf.Corriente	1	1	1	1	1	1	1	1
Sist.Cont.CE01	1	1	1	1	1	1	1	1
Cabina Med.Tens.	0	1	1	0	1	1	0	1
Transf.Seco	1	1	1	1	1	1	1	1
Sist. Cont. CE02	1	1	1	1	1	1	1	1
Motor Principal	0	0	0	0	0	0	1	1
Motor Comp. C301	0	0	1	0	0	1	0	1
Motor Bom. Poli.	1	1	1	1	1	1	1	1
Cabinas Dist.	0	0	1	1	1	1	0	1
Cables Baja ten.	1	1	1	1	1	1	1	1
Var.Frecuencia	0	1	1	1	1	1	1	1
Motores BT.	1	1	1	1	1	1	1	1
Tar.C.PLC/Int.oper.	1	1	1	1	1	1	1	1
Interfaz Operador	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarjeta base alimen.	1	0	1	1	1	1	1	1
Turing tomamues.	0	0	0	0	1	1	0	1
Tarjeta Switch nivel	1	1	1	1	1	1	1	1
Tubo detec.LT-3001	1	1	1	1	1	1	1	1
Tubo detec. LT-3002	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2001	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2002	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-1102	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-1201	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2302	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2502	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. CPU 948 PLC S.	1	1	1	1	1	1	1	1
Fuente Poder PLC	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. ent. digital PLC	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. salida digital	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. Ent. análoga	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. salida análoga	1	1	1	1	1	1	1	1
Conver.señal cont.T.	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj.CPU 948 PLC S115U	1	1	1	1	1	1	1	1
Fuente de Poder	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj.entrada análoga	1	1	1	1	1	1	1	1
Correa Capacidad	1	1	1	1	1	1	1	1
Rodores	1	1	1	1	1	1	0	1
Acop. dentado	1	0	1	0	1	1	1	1
Acoplamiento	1	0	1	1	1	1	1	1

ANEXO H

- **Análisis de Riesgo para el Enfoque 2 Política 1**

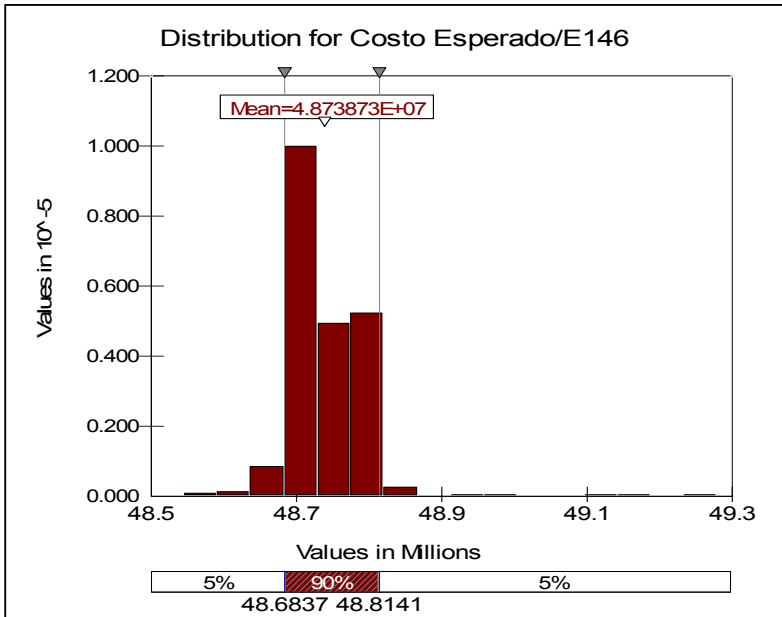
Mejores Soluciones Enfoque 2

Mejores 8 escenarios para la política 1, bajo el Enfoque 2 (Probabilístico)

Usando solución inicial del enfoque 1.1 y los parámetros óptimos para los algoritmos genéticos

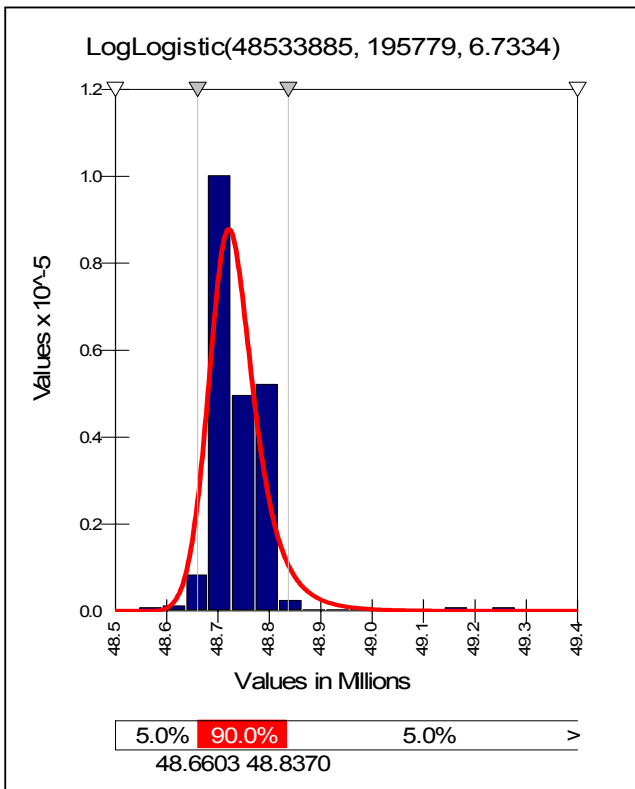
Soluciones	1	2	3	4	5	6	7	8
Sim#	659	729	536	556	644	689	736	297
Elapsed Time	0.10804398	0.12671296	0.07894676	01:59:26	02:28:57	02:46:53	03:05:17	00:34:03
Iters	4200	6700	2000	800	1800	500	500	400
Result	48702782.9	48729016.2	48731883.7	49355060.3	49424178.3	49578023.9	49593848.4	49619320
Output Mean	48702782.9	48729016.2	48731883.7	49355060.3	49424178.3	49578023.9	49593848.4	49619320
Output Std. Dev	37404.5783	28865.0294	53929.6228	62056.9446	92157.7219	124304.161	53188.4651	57757.5329
Output Min	48668070.8	48695869.9	48691169.7	49262915.6	49266296.3	49266296.3	49266296.3	49266296.3
Output Max	49266663.4	49286950.9	49301159.9	49775995.1	50896045.8	50769330.2	50128004.6	50149302.8
Linea 66Kv	1	1	1	1	1	1	1	1
Transf.Principal	0	0	0	0	0	0	0	0
Interrup.de Poder	1	1	1	1	1	1	1	1
Transfor Tensión	1	1	1	1	1	1	1	1
Transf.Corriente	1	1	1	1	1	1	1	1
Sist.Cont.CE01	1	1	1	1	1	1	1	1
Cabina Med.Tens.	0	0	0	0	0	0	0	0
Transf.Seco	1	1	1	1	1	1	1	1
Sist. Cont. CE02	1	1	1	1	1	1	1	1
Motor Principal	0	0	0	0	0	0	0	0
Motor Comp. C301	0	0	0	0	0	0	0	0
Motor Bom. Poli.	1	1	1	1	1	1	1	1
Cabinas Dist.	0	0	0	0	0	0	0	0
Cables Baja ten.	1	1	1	1	1	1	1	1
Var.Frecuencia	0	0	0	0	0	0	0	0
Motores BT.	1	1	1	1	1	1	1	1
Tar.C.PLC/Int.oper.	1	1	1	1	1	1	1	1
Interfaz Operador	1	1	1	1	1	1	1	1
T. base alimen.	1	1	1	0	1	1	1	1
Turing tomamues.	0	0	0	0	0	0	0	0
T. Switch nivel	1	1	1	1	1	1	1	1
Tubo D.LT-3001	1	1	1	1	1	1	1	1
Tubo D. LT-3002	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2001	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2002	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-1102	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-1201	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2302	1	1	1	1	1	1	1	1
Sensor FE-2502	1	1	1	1	1	1	1	1
T. CPU 948 PLC S.	1	1	1	1	1	1	1	1
Fuente Poder PLC	1	1	1	1	1	1	0	0
T. E.dig.PLC	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. salida digital	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj. Ent. análoga	1	1	1	1	1	0	1	1
Tarj. salida análoga	1	1	1	1	0	1	1	1
Conver.señal C.T.	1	1	1	1	1	1	1	1
T.CPU 948	1	1	1	1	1	1	1	1
Fuente de Poder	1	1	1	1	1	1	1	1
Tarj.entrada análoga	1	1	1	1	1	1	1	1
Correa Capacidad	1	1	1	1	1	1	1	1
Rodores	1	1	1	1	1	1	1	1
Acop. dentado	1	1	0	1	1	1	1	1
Acoplamiento	1	0	1	1	1	1	1	0
Recursos Util. US\$	491785	490285	489285	488985	489635	490185	488985	487485

Solución 1



Estadísticos	
Minimum	48545760
Mean	48738730
Maximum	49279380
Std Dev	63656.24
Variance	4052117000
Skewness	3.231926
Kurtosis	24.6596
Mode	48686270
Left X	48683680
Left P	5%
Right X	48814100
Right P	95%
Diff. X	130420
Diff. P	90%
5th Perc.	48683680
95th Perc.	48814100

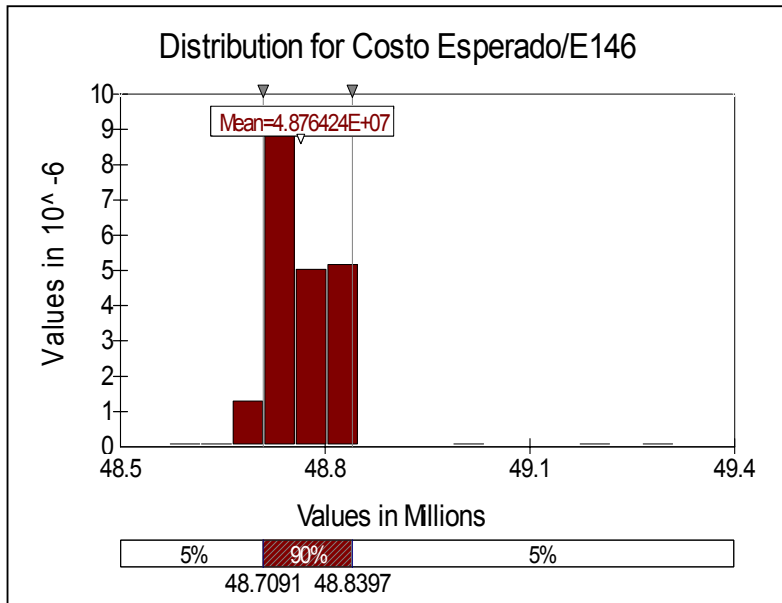
Estadísticas para el Costo esperado bajo el escenario 1, con 1000 iteraciones.



	Fit	Input
Function	Loglogistic(48533885, 195779, 6.7334)	
Shift	N/A	N/A
gama	48533884.88	N/A
beta	195778.9438	N/A
alfa	6.733370863	N/A
Left X	48660316	48660316
Left P	5.00%	1.30%
Right X	48837050	48837050
Right P	95.00%	98.50%
Diff. X	176730	176730
Diff. P	90.00%	97.20%
Minimum	48533885	48545764
Maximum	+Infinity	49279376
Esperanza	48736952	48738733
Mode	48721154	48686272 [est]
Median	48729664	48727266
Std. Dev.	57253	63656
Variance	3277926570	4048064920
Skewness	1.5377	3.2271
Kurtosis	11.1876	24.5455

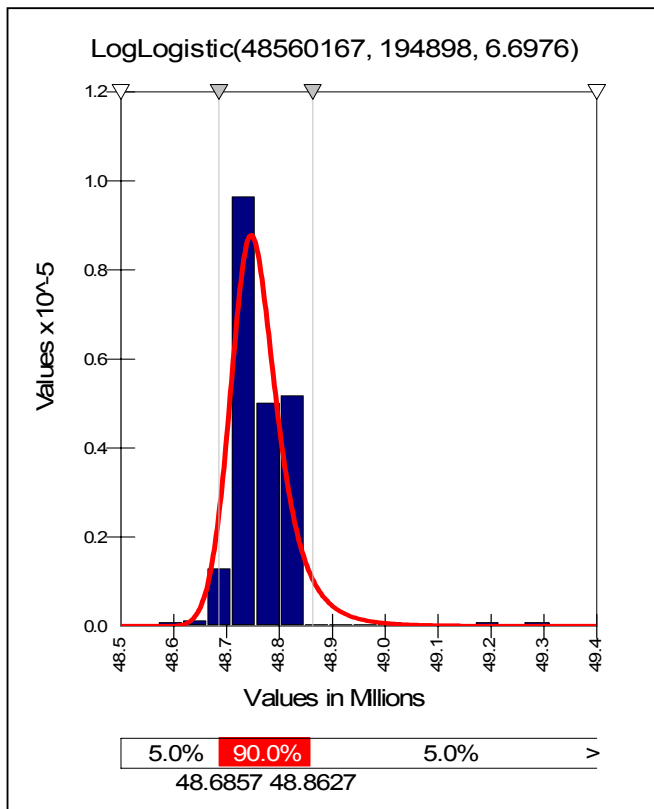
Comportamiento del Costo esperado representado por una curva de probabilidad, con sus respectivas estadísticas.

Solución 2



Estadísticos	
Minimum	48572040
Mean	48764240
Maximum	49311620
Std Dev	64073.86
Variance	4105460000
Skewness	3.30
Kurtosis	25.25
Mode	48730500
Left X	48709140
Left P	5%
Right X	48839710
Right P	95%
Diff. X	130572
Diff. P	90%
5th Perc.	48709140
95th Perc.	48839710

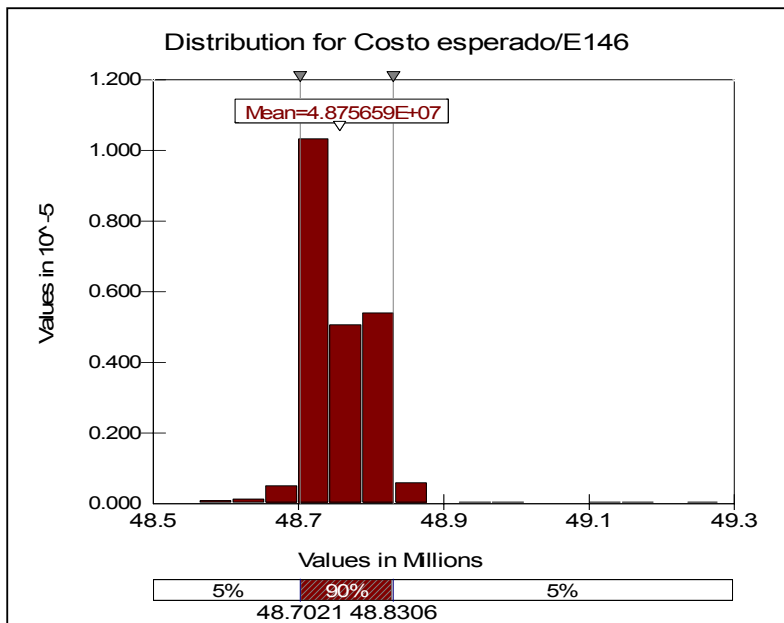
Estadísticas para el Costo esperado bajo el escenario 2, con 1000 iteraciones.



	Fit	Input
Function	LogLogistic(48560167, 194898, 6.6976)	
Shift	N/A	N/A
g	48560167.22	N/A
b	194898.2097	N/A
a	6.697579859	N/A
Left X	48685736	48685736
Left P	5.00%	1.30%
Right X	48862674	48862674
Right P	95.00%	98.50%
Diff. X	1.77E+05	176940
Diff. P	90.00%	97.20%
Minimum	48560167	48572040
Maximum	+Infinity	49311624
Esperanza	48762400	48764239
Mode	48746504	48730500 [est]
Median	48755065	48752646
Std. Deviation	57352	64074
Variance	3.29E+09	4101354270
Skewness	1.5492	3.292
Kurtosis	11.3125	25.1355

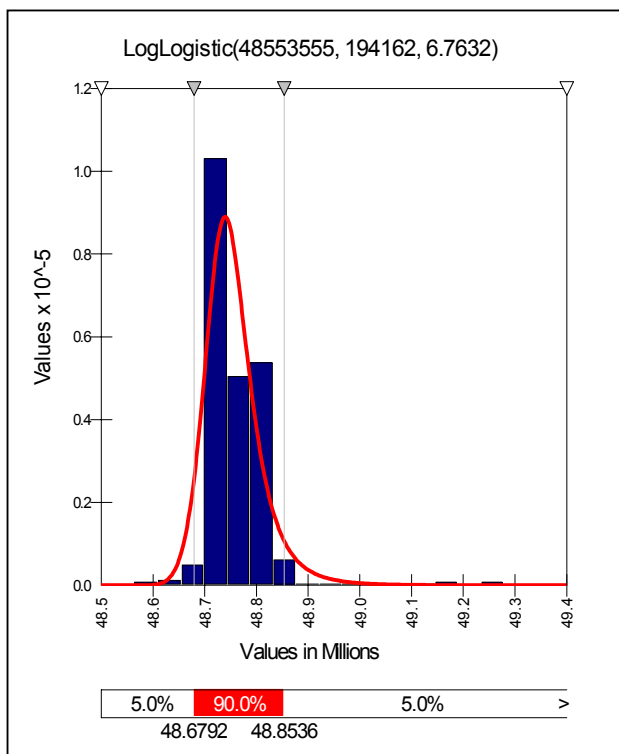
Comportamiento del Costo esperado representado por una curva de probabilidad, con sus respectivas estadísticas.

Solución 3



Estadísticos	
Minimum	48565220
Mean	48756590
Maximum	49279380
Std Dev	62622.25
Variance	3.92E+09
Skewness	3.181297
Kurtosis	24.0021
Mode	48705060
Left X	48702080
Left P	5%
Right X	48830580
Right P	95%
Diff. X	128492
Diff. P	90%
5th Perc.	48702080
95th Perc.	48830580

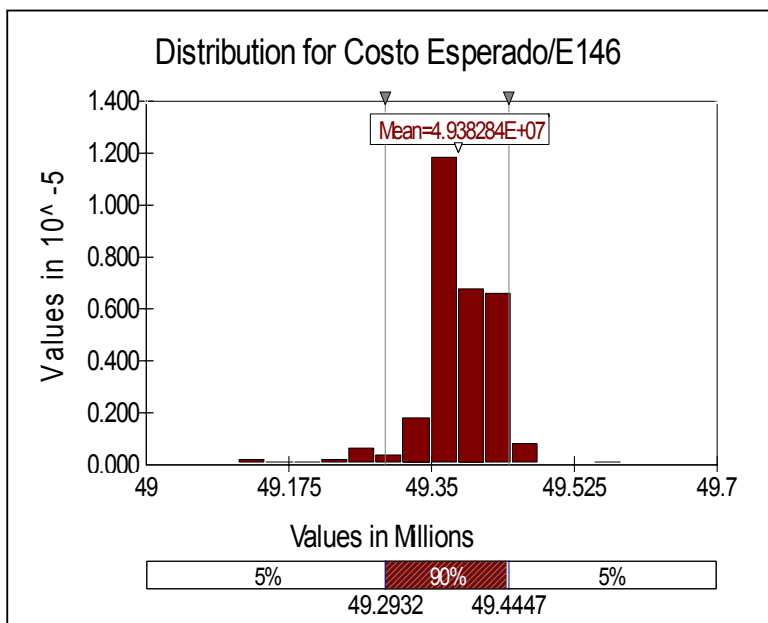
Estadísticas para el Costo esperado bajo el escenario 3, con 1000 iteraciones.



	Fit	Input
Function	Loglogistic(48553555, 194162, 6.7632)	
Shift	N/A	N/A
g	48553554.96	N/A
b	194161.7926	N/A
a	6.763242841	N/A
Left X	48679184	48679184
Left P	0.05	0.013
Right X	48853635	48853635
Right P	0.95	0.985
Diff. X	174450	174450
Diff. P	0.9	0.972
Minimum	48553555	48565220
Maximum	+Infinity	49279376
Esperanza	48754879	48756588
Mode	48739350	48705056 [est]
Median	48747717	48745562
Std. Deviation	56487	62622
Variance	3190819900	3917625230
Skewness	1.5283	3.1765
Kurtosis	11.0861	23.8912

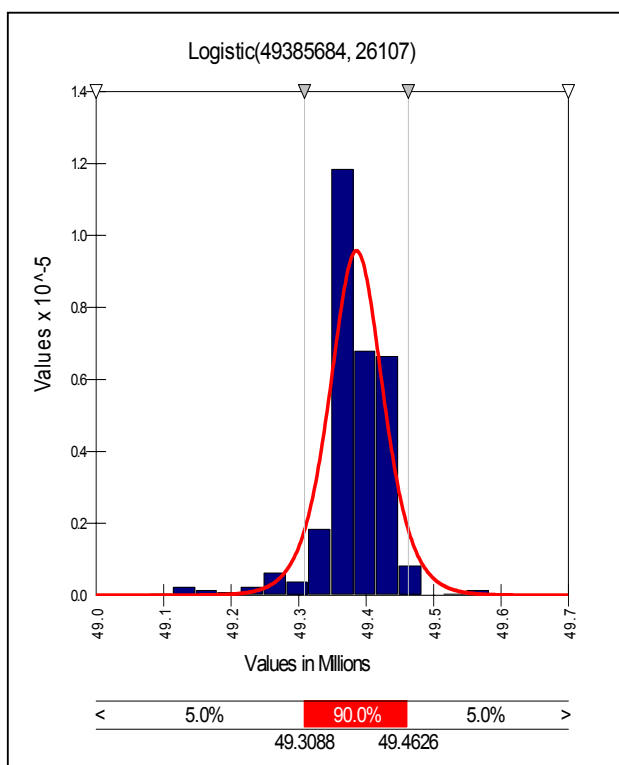
Comportamiento del Costo esperado representado por una curva de probabilidad, con sus respectivas estadísticas.

Solución 4



Estadísticos	
Minimum	49080450
Mean	49382840
Maximum	49616560
Std Dev	52829.62
Variance	2790969000
Skewness	-1.388447
Kurtosis	9.556881
Mode	49354510
Left X	49293230
Left P	5%
Right X	49444720
Right P	95%
Diff. X	151484
Diff. P	90%
5th Perc.	49293230
95th Perc.	49444720

Estadísticas para el Costo esperado bajo el escenario 4, con 1000 iteraciones.



	Fit	Input
Function	RiskLogistic(49385684, 26107)	
Shift	N/A	N/A
a	49385683.97	N/A
b	26107.36624	N/A
Left X	49308812	49308812
Left P	5.00%	5.40%
Right X	49462556	49462556
Right P	95.00%	98.70%
Diff. X	153740	153740
Diff. P	90.00%	93.30%
Minimum	-Infinity	49080448
Maximum	+Infinity	49616556
Esperanza	49385684	49382840
Mode	49385684	49354512 [est]
Median	49385684	49377482
Std. Deviation	47354	52830
Variance	2242356263	2788177590
Skewness	0	-1
Kurtosis	4	10

Comportamiento del Costo esperado representado por una curva de probabilidad, con sus respectivas estadísticas.

BIBLIOGRAFÍA

- Montgomery, Douglas y Runger, George. “Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería”, 1992, Editorial McGraw Hill.
- Montgomery, Douglas C. “Diseño y análisis de experimentos” Grupo Editorial Iberoamerica.
- Canavos, George C. .”Probabilidad y estadística :aplicaciones y métodos” Editorial McGraw-Hill,
- Algoritmos genéticos: Principios y Aplicaciones
www.ica.ele.puc-rio.br/pesquisa/download/paper.pdf
- Fiabilidad (I): conceptos básicos
www.uoc.edu/in3/emath/docs/Fiab_1.pdf
- Joel A. Nachlas , “Fiabilidad” , Publicaciones de Ingeniería de Sistemas “Isdese”
www.isdefe.es/webisdefe.nsf/0/98D8E7FC10519931C1256D940047BFF4?OpenDocument
- “Reliability and Maintainability”, Ramakumar, R., Dhillon, B., Jambekar, A., Pelc, K. Technology Management Handbook.,Ed. Richard C. Dorf, disponible en biblioteca virtual U.B.B.
- Hf Consultores técnicos Gerenciales. “Curso de Principios de optimización de Mantenimiento”.

- Taha, Hamdy A , “Investigación de Operaciones” [1991]
- Winston, Wayne L , “Investigación de Operaciones”, [1994]
- Hillier, Frederick S, “Métodos Cuantitativos para Administración”, Editorial McGraw-Hill.

Manuales

- Manual del Ingeniero Industrial, Cuarta Edición, Tomo 2, William K. Hodson. McGraw-Hill.
- @Risk “ Advanced Risk Analysis for Spreadsheets” Versión 4.5 año 2002
www.palisade.com
- Risk Optimizer “Optimization with simulation for Microsoft excel” Windows version , Release 1.0 May, 2000
www.palisade.com
- Premium Solver Platform , Versión 5.5
www.solver.com
- Design-Expert. Software, Versión 6
www.statease.com