



Metodología de Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (ARM): Estudio Aplicado al Sistema de Propulsión del Bote de Interdicción Marítima - Arcángel 65.

Joan Martin Suarez Loaiza
Víctor Gregorio Bacca Rodríguez
Ángel De Jesús Tuñón Cuello
José De Jesús Caro Urueta
Luis Fernando Mendoza Cardona





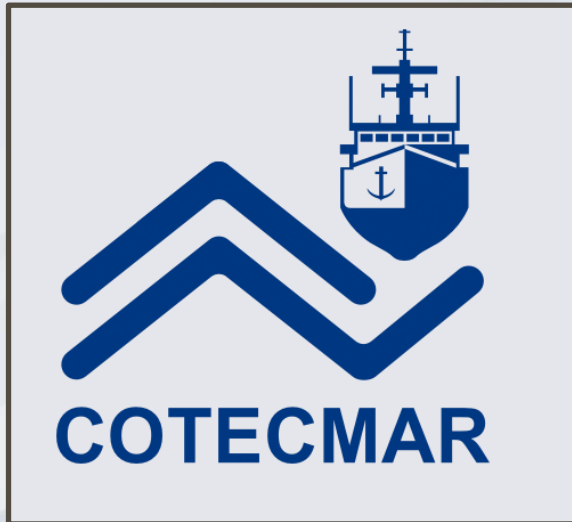
AGENDA

1. COTECMAR
2. Soporte Logístico Integrado
3. Bote Arcángel 65
4. Análisis de Fiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (ARM)
5. Proceso ARM
6. Alcance Contractual y Objetivo del Análisis
7. Taxonomía de Sistema y Equipos
8. Pasos para ejecutar el RFQ
9. Definición de Métricas Claves: MIL-STD 721C
10. OREDA
11. Datos: Motor MTU
12. Proceso del LDA
13. Resultados del LDA para el motor MTU
14. Relación de los elementos A-R-M
15. Hipótesis para realizar el RBD
16. Planos, Dibujos Técnicos y Diagramas funcionales
17. Tipos de Configuraciones básicas de los RBD
18. RBD para Configuraciones tipo 1
19. RBD para Configuraciones tipo 2
20. Construcción del RPD
21. Ejecución del SRA
22. Ciclos de trabajo y Relaciones Nodales
23. Ejecución del SRA por método probabilístico
24. Análisis de Elementos Críticos
25. Resultados de Simulaciones para las Misiones
26. Conclusiones del Análisis



COTECMAR

COTECMAR es una empresa dedicada al diseño, construcción, mantenimiento y reparación de buques y embarcaciones para uso militar y civil. Esta compañía se especializa en la implementación de tecnologías avanzadas en el sector naval, ofreciendo soluciones integrales para las necesidades de defensa y seguridad marítima.



Corporación DE **Ciencia** Y **Tecnología** PARA EL **Desarrollo de la industria**

MARCO NORMATIVO
SNCTI COLOMBIA

CONOCIMIENTO

RESULTADO
APLICACIÓN X

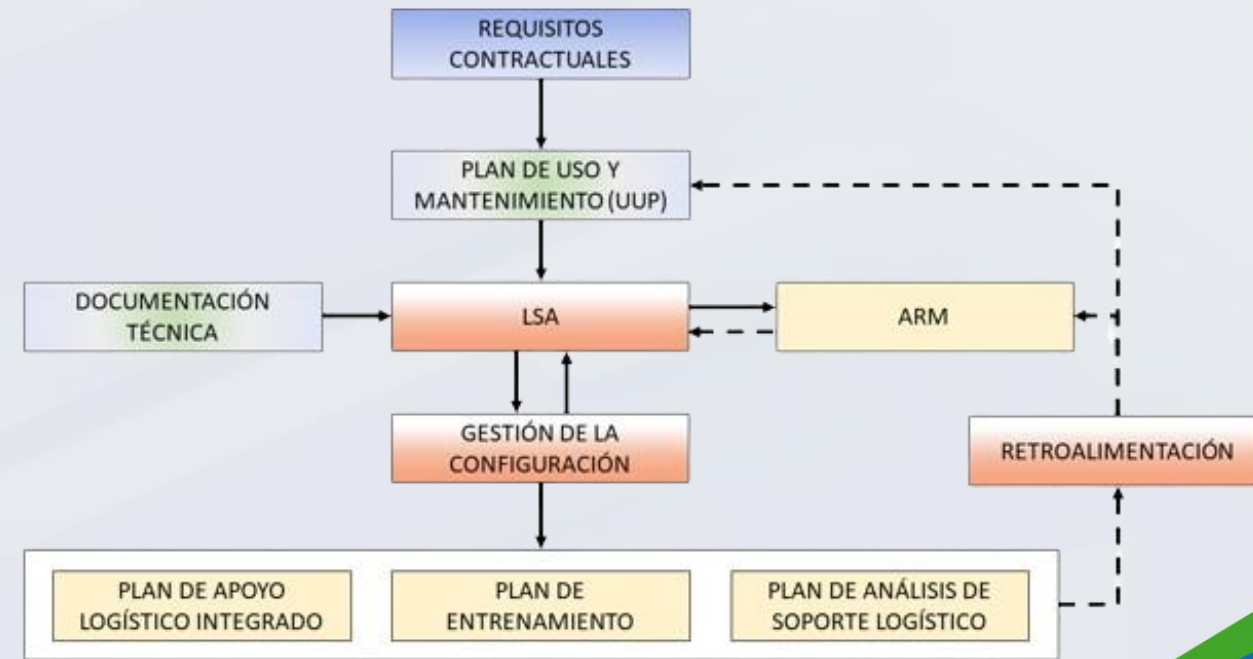
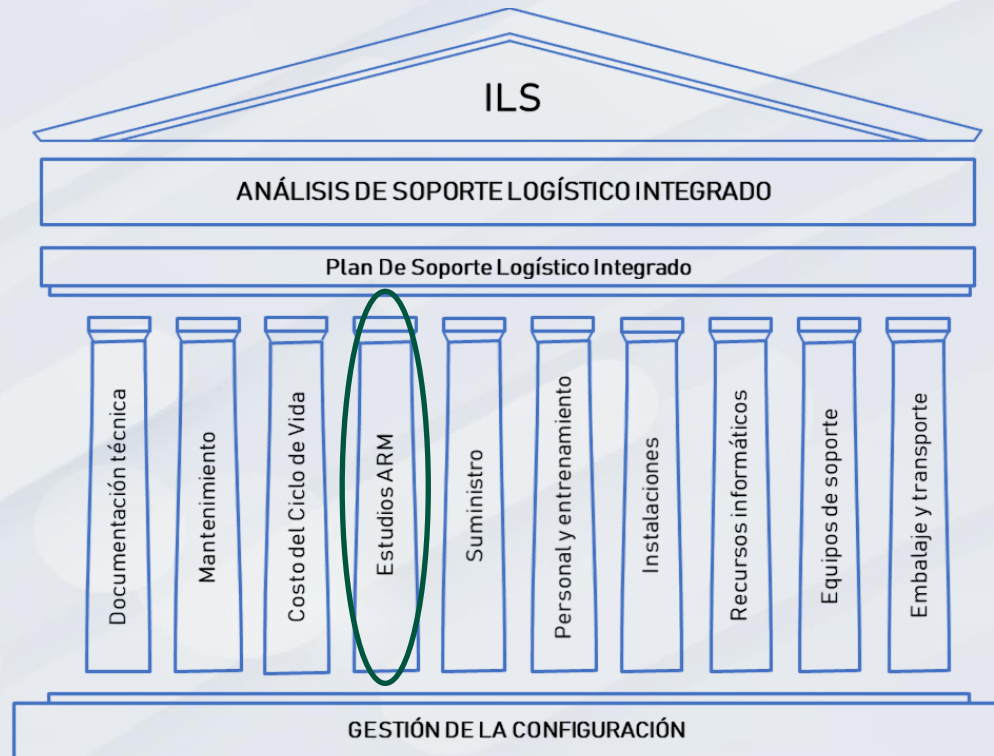
SISTEMA SECTORIAL DE
INNOVACIÓN

Naval
Marítima
Fluvial



SOPORTE LOGÍSTICO INTEGRADO

El Soporte Logístico Integrado (ILS) es un enfoque integral que abarca procesos técnicos y de gestión de forma iterativa, con el propósito de brindar un acompañamiento continuo al buque a lo largo de todo su ciclo de vida.





BOTE ARCÁNGEL 65



Embarcación de alto rendimiento para patrulla, vigilancia, búsqueda y rescate en mares severos. Monocasco de aluminio naval, sistema de propulsión Waterjet para alcanzar hasta 38 nudos.

Sistema de Propulsión

El bote emplea un sistema dual con:

- Motores diésel MTU.
- Cajas reductoras ZF2060
- Ejes de propulsión con acople cardán
- Propulsores tipo Water Jets.

El control desde la cabina y el puente se realiza mediante sistemas que permiten supervisar y ajustar parámetros de operación.

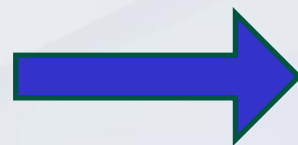
| Característica | Descripción |
|----------------|--|
| Eslora | 20,3 m |
| Manga | 5m |
| Motores | 02 motores MTU Diesel 1600 BHP @2300 rpm |
| Propulsores | 02 propulsores Water Jets con Sistema de refrigeración abierta |
| Autonomía | 6 días de autonomía máxima |



Análisis De Fiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (ARM)

Es un análisis detallado de la capacidad de producción y la eficiencia de los servicios en un periodo específico. Su objetivo es evaluar el estado actual y predecir el rendimiento futuro de un proceso, sistema o maquinaria, considerando la configuración y fiabilidad de sus componentes y la estrategia de mantenimiento.

Su objetivo es la optimización de los tiempos de reparación y la focalización de recursos para elementos críticos.



Definición del
alcance del ARM



Proceso de
RFQ



Análisis de datos
de vida



Construcción
del RBD



Asignación de
condiciones



Diagrama de
fases



Simulaciones



Resultados

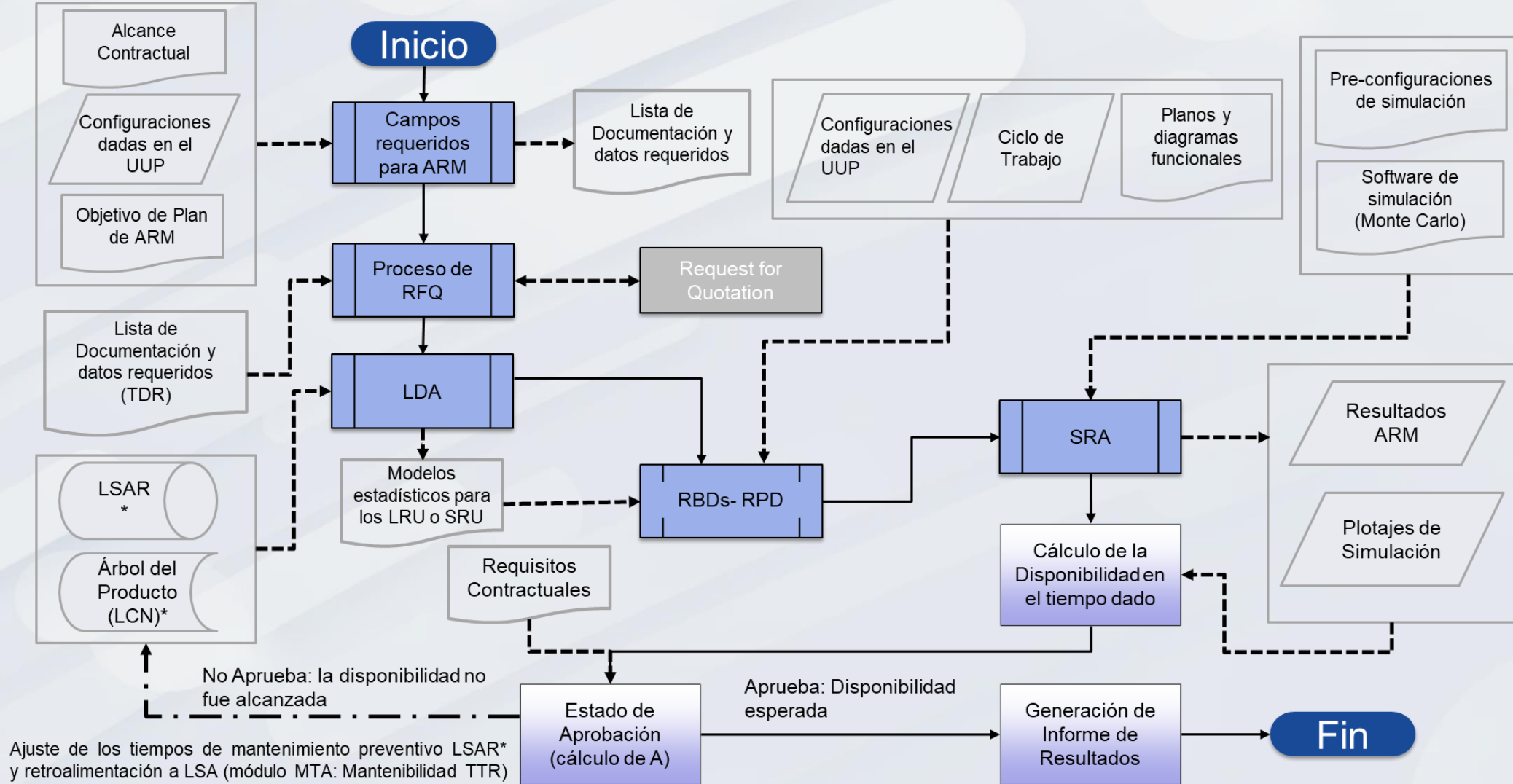


Tiempos para
Mantenimiento



Recursos

Proceso ARM





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

Alcance contractual y objetivo del análisis

- Se satisface el cumplimiento con una disponibilidad del 80% al año de navegación.
- Se solicita hacer análisis ARM hasta el nivel ESF del Sistema de Propulsión.
- Se determinan los análisis bajo el perfil de uso y navegación dado.
- El diseño no es objeto de modificaciones

| Operación | Definición | Funciones Operativas | Velocidad (nudos) | Número de Motores | Potencia / Energía (%) |
|----------------|--|--|-------------------|-------------------|------------------------|
| Max. Velocidad | Se ejecuta la interdicción marítima | Todo poder | $>35 \leq 40$ | 2 | 100 |
| Patrulla | Se ejecutan acciones de ronda por ruta. | Vel. Sostenida de 2 motores | $>25 \leq 35$ | 2 | 70 |
| Tránsito | Se encarga de la asistencia y apoyo de desastres | 50% de poder por ambos motores. | $>14 \leq 25$ | 1 | 100 |
| Escolta | Seguridad integral marítima | Vel. a equivalencia de 50% del poder de 1 motor. | $>8 \leq 14$ | 1 | 70 |
| Baja Velocidad | Búsqueda y rescate | Baja velocidad | $>0 \leq 8$ | 1 | 10 |
| Stationing | Fondeo | Motores usados sólo para maniobrar | 0 | 1 | >0 |



Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

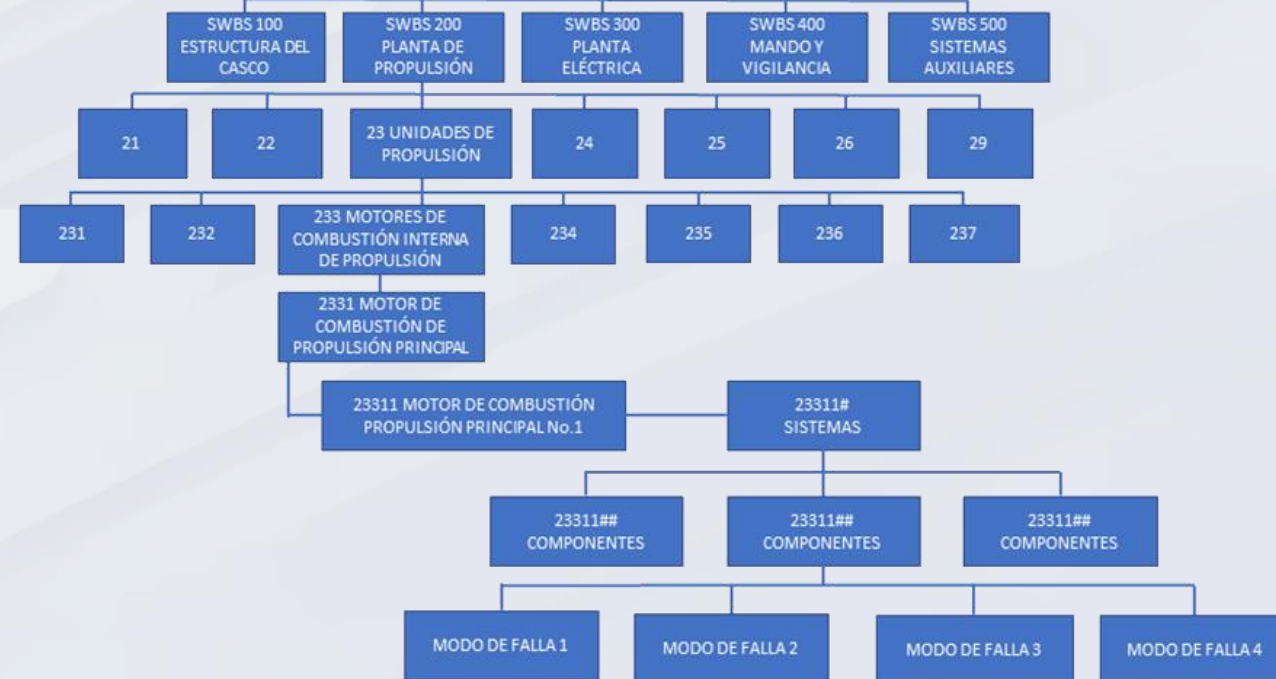
SRA

Resultados

TAXONOMÍA DE SISTEMAS Y EQUIPOS



Doctrina de Material
Naval Tomo II
Clasificación
(Macro)



ISO 14224
(Micro)



Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

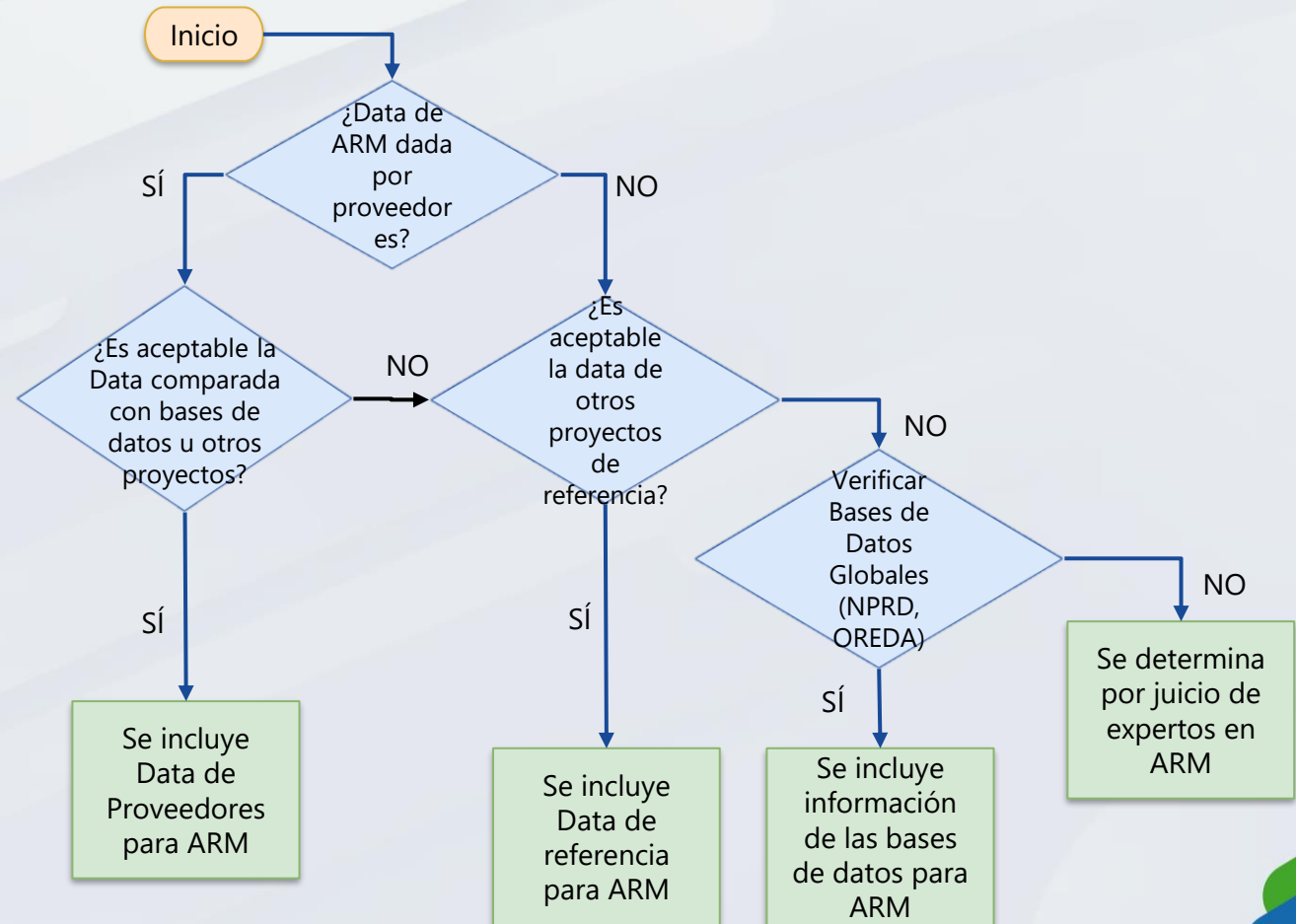
RBD - RPD

SRA

Resultados

PASOS PARA EJECUTAR EL RFQ

| Paso | Descripción |
|-------------------------------------|---|
| 1. Establecer la petición de oferta | El proyecto dicta los requisitos para los datos, estrechamente relacionados con el LSA. El RFQ incluye las Condiciones y Requisitos Generales Adicionales para establecer los límites. |
| 2. Plantillas Determinadas | En función de los requisitos del modelo ARM, las plantillas se adaptan a las necesidades del proyecto. Ejemplos de plantillas enviadas a los proveedores son la lista de materiales (BOM) y la lista de información de mantenimiento. |
| 3. Enviar petición de oferta | Para hacer un seguimiento de la petición de oferta, la comunicación se realiza a través del departamento de compras. |
| 4. Comprobación de datos | Una vez recibida la información, se comprueba si hay anomalías o datos que falten por medio del proceso especificado en la figura proceso de recolección de datos de ARM |





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

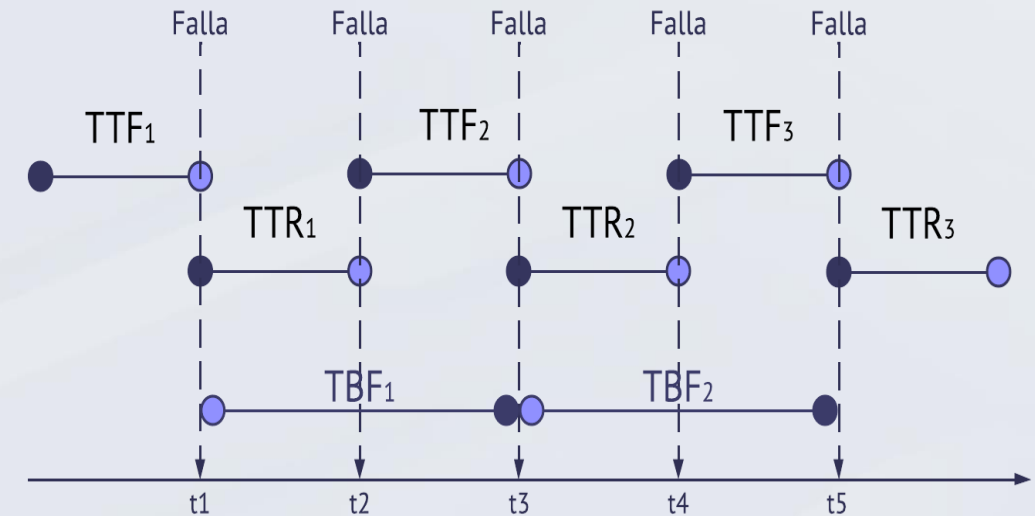
SRA

Resultados

DEFINICIÓN DE MÉTRICAS CLAVES: MIL-STD 721C

| Acrónimo | Nombre | Definición |
|-------------|----------------------------|--|
| MTBF | Mean Time Between Failures | El número promedio de unidades de vida durante las cuales todas las partes del elemento funcionan dentro de sus límites especificados, durante un intervalo de medición particular bajo condiciones establecidas. |
| MTTF | Mean Time To Failure | El número total de unidades de vida de un elemento dividido por el número total de fallas dentro de esa población, durante un intervalo de medición particular bajo condiciones especificadas. |
| MTTR | Mean Time To Repair | La suma de los tiempos de mantenimiento correctivo en cualquier nivel específico de reparación, dividido por el total de fallos dentro de un artículo reparado en ese nivel durante un intervalo particular bajo condiciones establecidas. |

Relación determinística





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

OREDA

Un banco de datos completo de confiabilidad recopilados en equipos de superficie (y submarinos) de operaciones en alta mar y en tierra en el Mar del Norte, GOM, WOS, Angola, Adriático, Caspio, etc.

| Equipo | Equipo de OREDA MTBF | Fallas Críticas | Fallas Degradadas | Fallas Incipientes | Fallas Desconocidas | Equipo | Equipo de OREDA MTTR | Fallas Críticas | Fallas Degradadas | Fallas Incipientes | Fallas Desconocidas |
|-------------------------------------|--|-----------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|--|-----------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| Motor MTU Diesel 1600 BHP @2300 rpm | Combustion engines [CE], Diesel engine, (Main power Water injection Essential power Emergency power) | 30,78 | 126,07 | 47,22 | 29,87 | Motor MTU Diesel 1600 BHP @2300 rpm | Combustion engines [CE], Diesel engine, (Main power Water injection Essential power Emergency power) | 12,32 | 3,48 | 8,39 | 14,05 |
| Caja de reductora ZF 2060A | Combustion engines [CE], Diesel engine | 26,3 | 101,8 | 85,4 | 18,6 | Caja de reductora ZF 2060A | Combustion engines [CE], Diesel engine | 10,35 | 3,85 | 3,33 | 15,45 |
| Water Jets Hamilton HM521 | PUMPS (Rotary Gear) (Ballast water Chemical injection Combined function Condensate processing Crude oil handling Fuel gas Gas processing Gas treatment Heating medium Main power Oil export Oily water treatment Sea water lift Steam Water alternating gas Water fire fighting Water injection) | 48,03 | 161,51 | 49,33 | 0 | Water Jets Hamilton HM521 | PUMPS (Rotary Gear) (Ballast water Chemical injection Combined function Condensate processing Crude oil handling Fuel gas Gas processing Gas treatment Heating medium Main power Oil export Oily water treatment Sea water lift Steam Water alternating gas Water fire fighting Water injection) | 8,13 | 1,95 | 3,58 | 15,25 |
| Generador Caterpillar C2.2 de 25kW | Electric generators [EG], Motor driven (diesel, gas motor), (Essential power Main power Emergency power) | 63,86 | 53,11 | 14,58 | 19,89 | Generador Caterpillar C2.2 de 25kW | Electric generators [EG], Motor driven (diesel, gas motor), (Essential power Main power Emergency power) | 5,45 | 4,45 | 20,01 | 22,04 |



Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

DATOS: MOTOR MTU

• DATOS DE VIDA

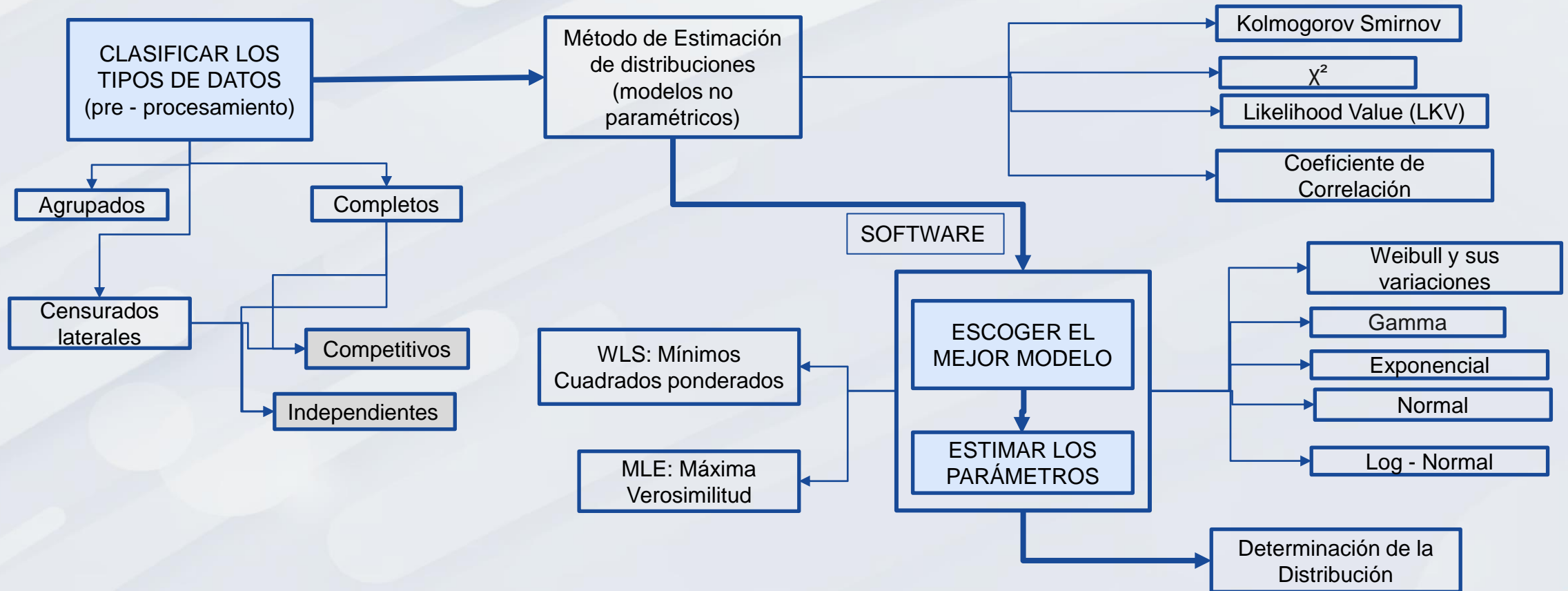
| TBF (h) | TTR (h) | % |
|----------|---------|-------|
| 6896,55 | 0,25 | 0,034 |
| 7130,12 | 0,34 | 0,083 |
| 7299,27 | 0,50 | 0,13 |
| 7352,94 | 0,55 | 0,18 |
| 7581,50 | 0,57 | 0,23 |
| 7692,31 | 1,02 | 0,28 |
| 7812,50 | 2,5 | 0,33 |
| 8061,92 | 2,8 | 0,38 |
| 8695,65 | 3,70 | 0,43 |
| 9523,81 | 3,45 | 0,48 |
| 12500,00 | 3,70 | 0,52 |
| 20000,00 | 4,52 | 0,57 |

• FMEA

| Código Modo de Falla | Modo de Falla ISO 14224 | Descripción Modo de Falla | Causas | Mecanismo de Falla | Detalle Mecanismo de Falla | Efecto | NPR |
|----------------------|------------------------------------|--|--|--------------------|----------------------------|---|-----|
| ELU | Fuga externa – medio de suministro | El fluido de lubricación presenta fugas en el sello de la bomba. | Dañado por bombeado rápido. | Mecánica | General | Pérdida lubricante. Alta probabilidad de aumento de coeficiente de fricción. Posible afectación a partes móviles del motor. | 18 |
| BRD | Parada | Para imprevista del motor | Apoyos del cigüeñal desgastados/rotos. | Material | Desgaste | Pérdida de maniobrabilidad de la embarcación | 20 |
| BRD | Parada | Para imprevista del motor | Apoyos de bancada girados/rotos. | Material | Desgaste | Pérdida de maniobrabilidad de la embarcación | 20 |
| BRD | Parada | Para imprevista del motor | Apoyos de biela rotos. | Mecánico | Fatiga | Pérdida de maniobrabilidad de la embarcación | 20 |
| ELU | Fuga externa – medio de suministro | Pérdida de presión de combustible en la descarga de la bomba. | Fisura en tubería de alta presión | Material | General | Pérdida de combustible. Efecto en la seguridad del operador. Disminución en el rendimiento del motor. | 18 |



PROCESO DEL LDA



*Los datos obtenidos son considerados datos completos y de carácter causal independiente.



Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

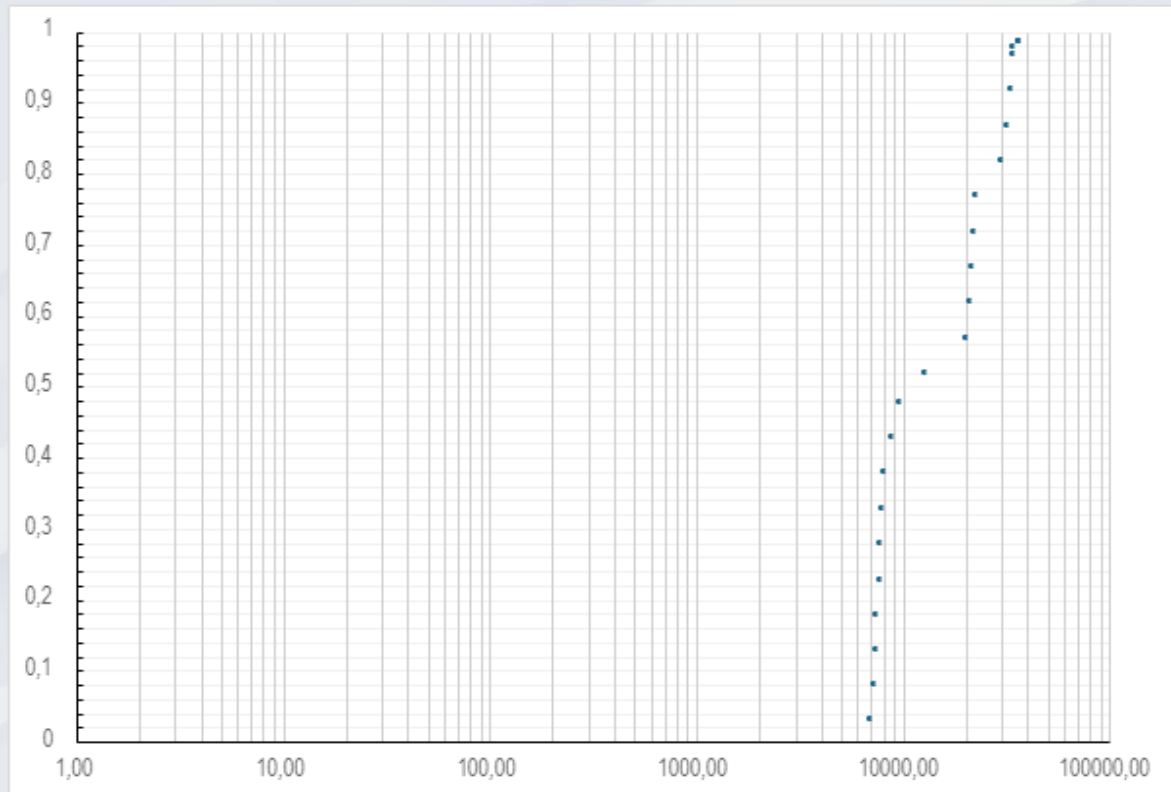
LDA

RBD - RPD

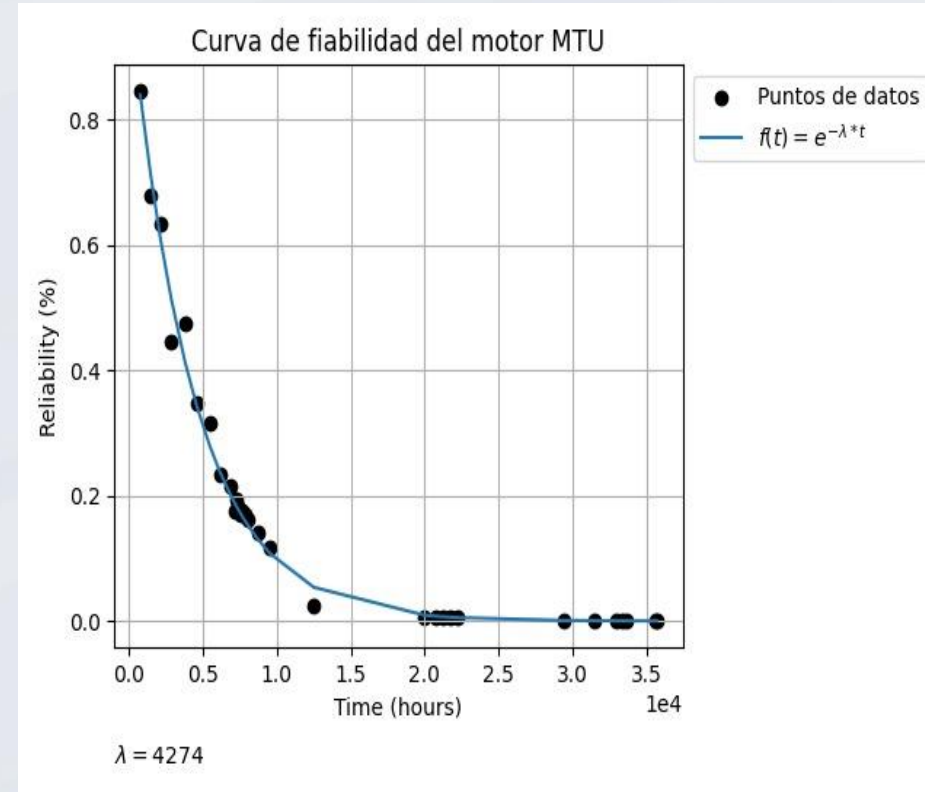
SRA

Resultados

RESULTADOS DEL LDA PARA EL MOTOR MTU



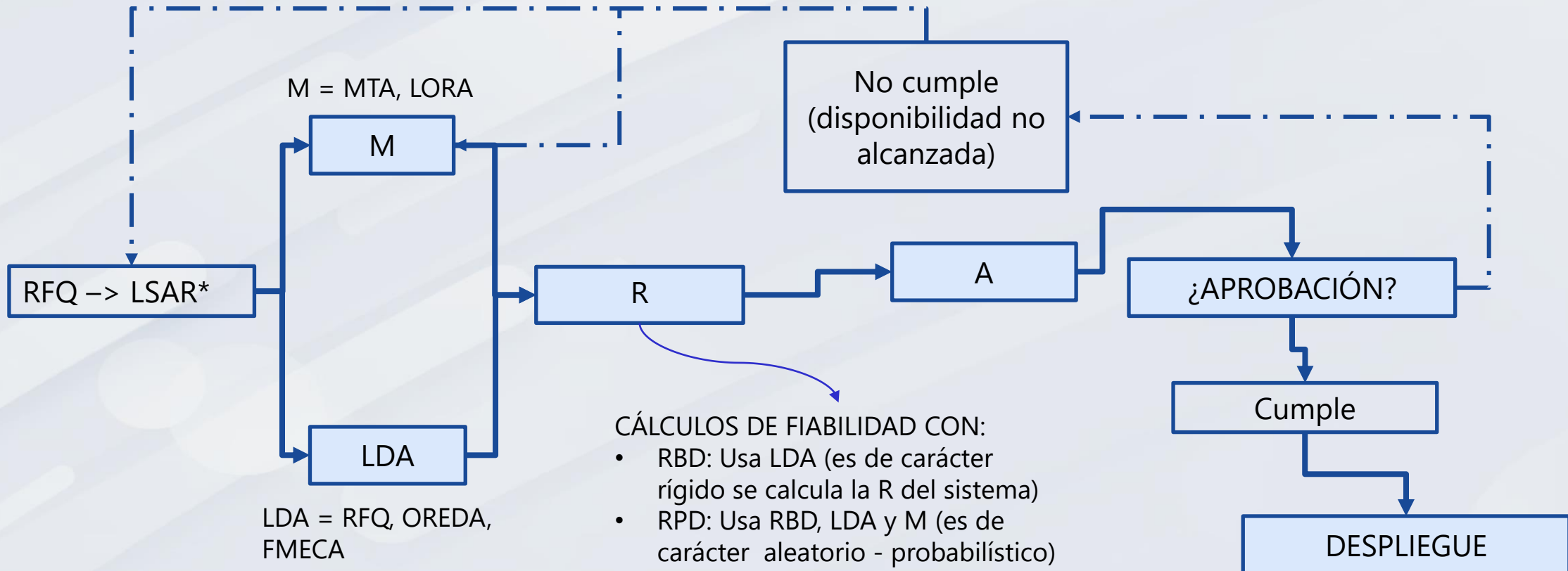
Cdf linealizada en escala logarítmica



Curva de fiabilidad



RELACIÓN DE LOS ELEMENTOS A-R-M





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

HIPÓTESIS PARA REALIZAR EL RBD

Para el cálculo de la fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad en este Análisis ARM, se han considerado las siguientes hipótesis:

- a) Se considera innecesario analizar tuberías, cables y demás elementos cuya confiabilidad es inherentemente alta.
- b) Cada Línea de propulsión se considera como sección independiente tal como se define en el Arreglo de Línea de Eje.
- c) Tratamos con ítems reparables.
- d) Se consideran sin desgaste inicial los componentes.
- e) La condición de reparabilidad otorga un estado de "As Good as new"



Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

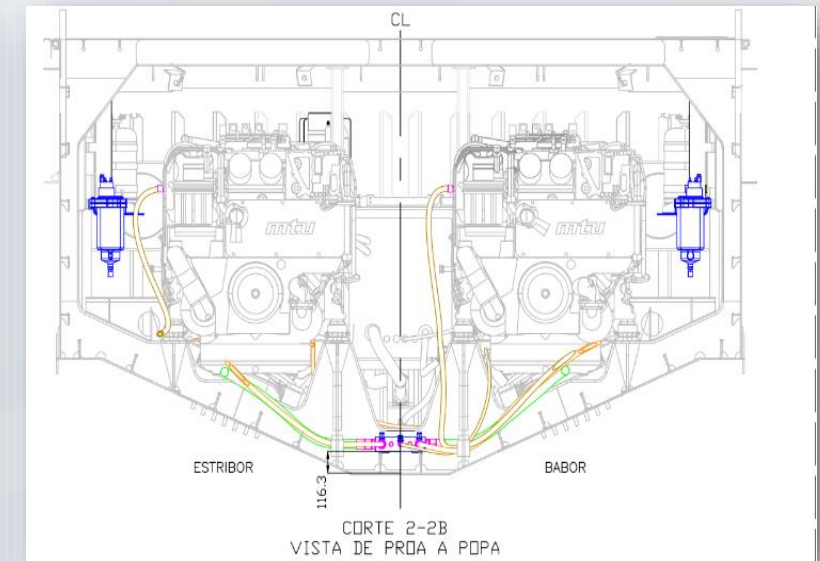
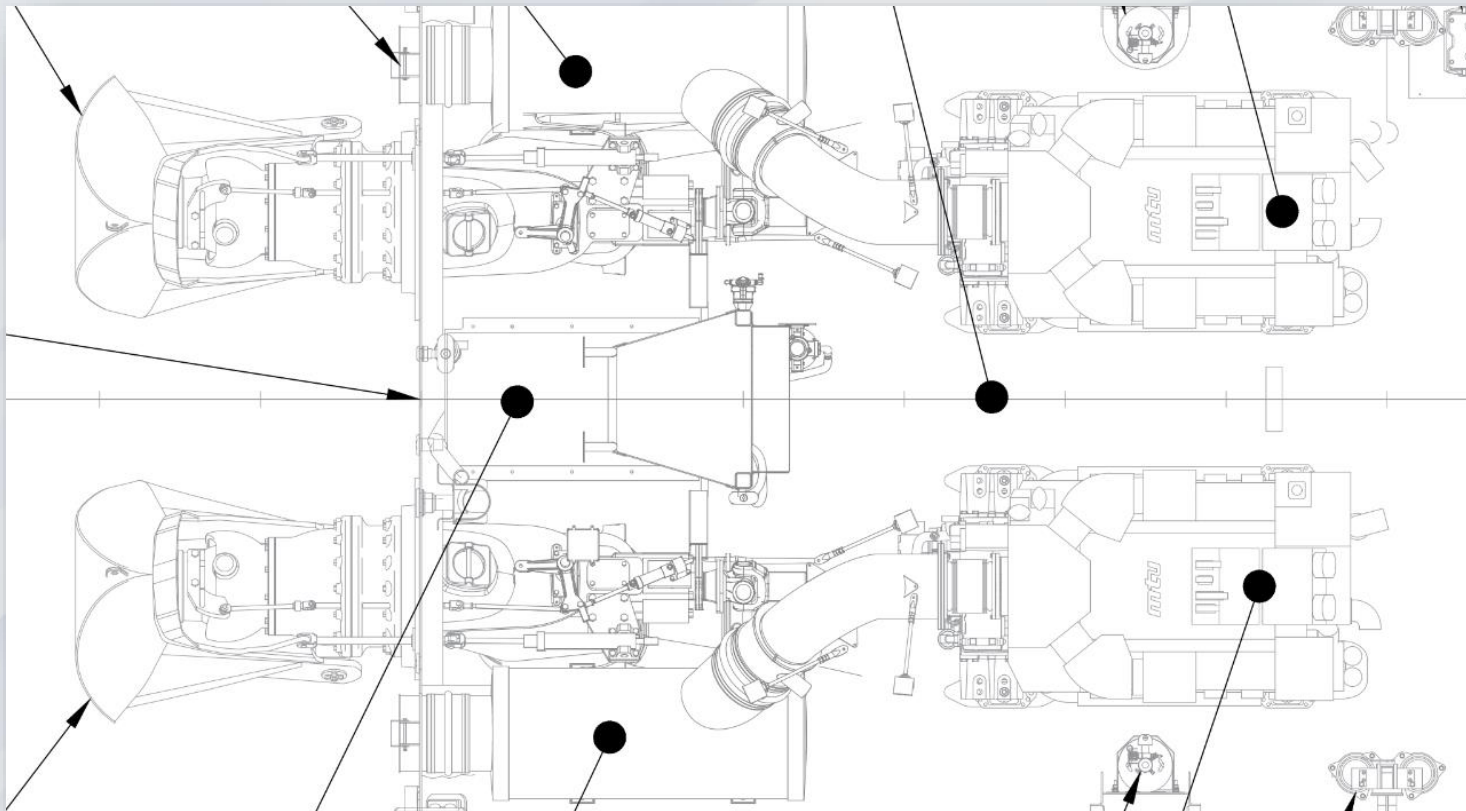
LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

PLANOS, DIBUJOS TÉCNICOS Y DIAGRAMAS FUNCIONALES





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

SRA

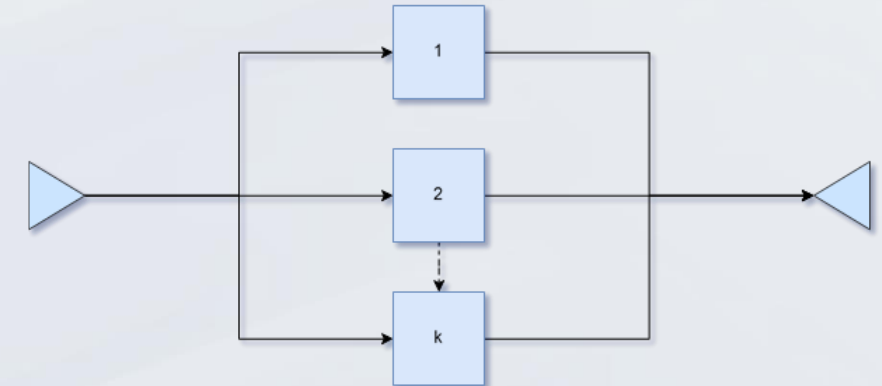
Resultados

TIPOS DE CONFIGURACIONES BÁSICAS PARA LOS RBD

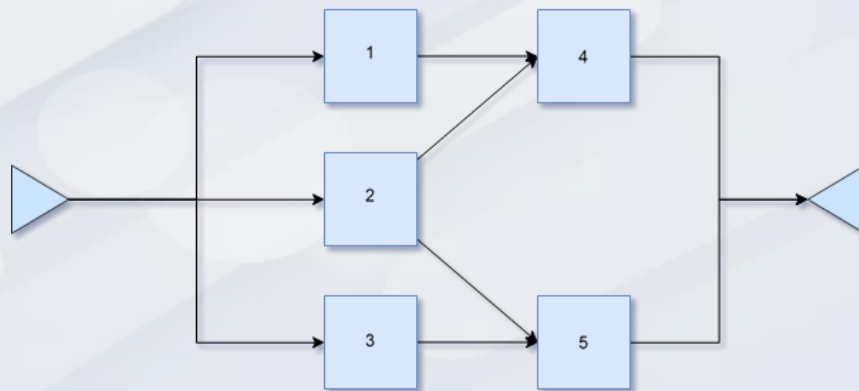
Serie



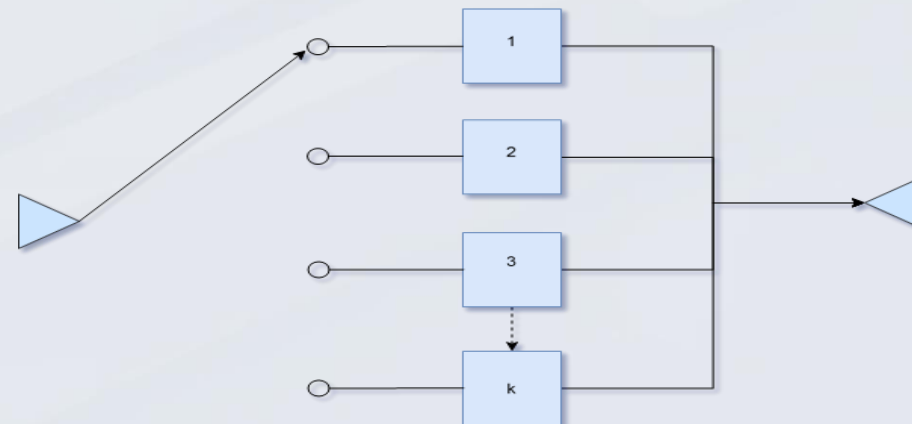
Redundancia activa (k,n)



Compleja



Redundancia pasiva (k,n)





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

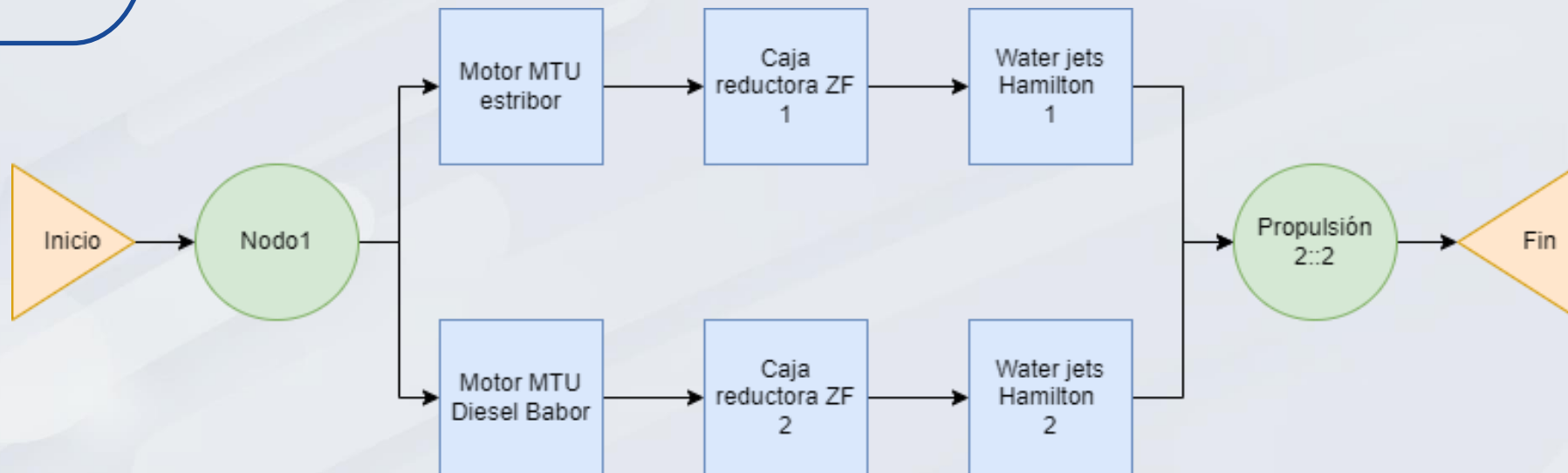
RBD - RPD

SRA

Resultados

RBD PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES TIPO 1

Configuración dada
para: Máx. Velocidad,
Patrulla.





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

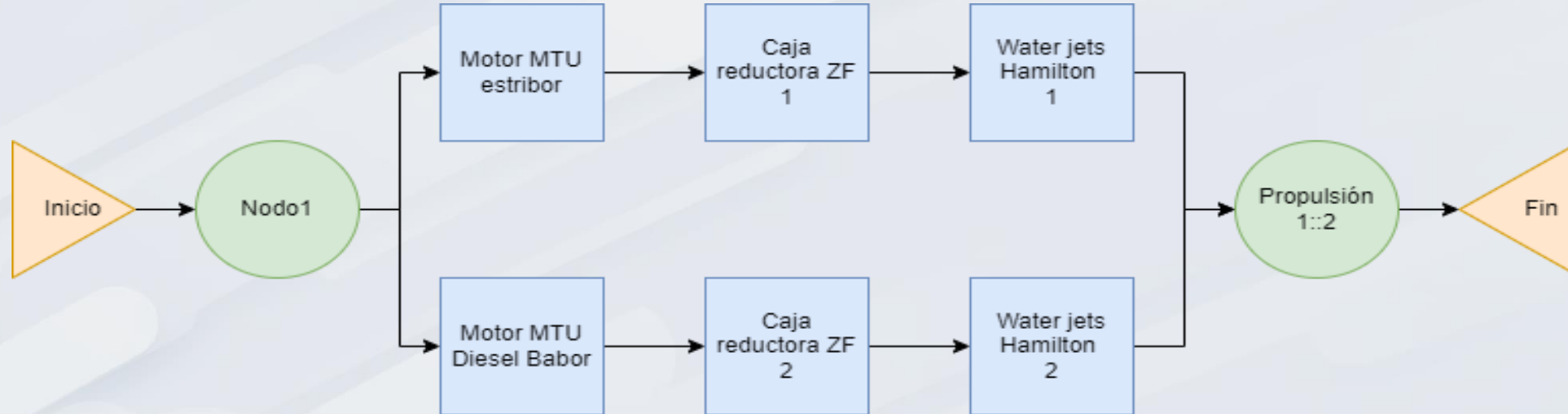
LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

RBD PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES TIPO 2



Configuración dada para:
Tránsito, Escolta, Baja
Velocidad y Stationing

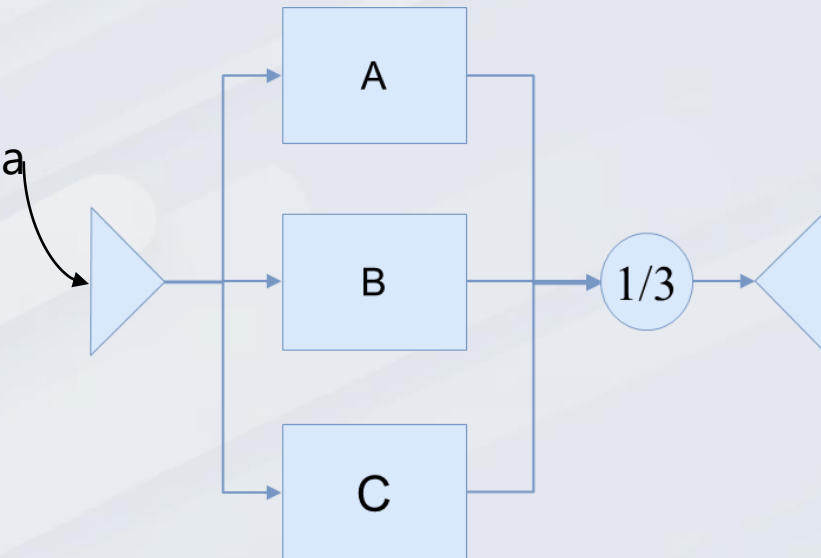


CONSTRUCCIÓN DEL RPD



Métodos de Cálculo:

- Tabla de Verdad Booleana
- Descomposición
- Eventos espaciados
- Trazados de Caminos



| A | B | C | Success or Failure |
|--------------------------------|---|---|--------------------|
| 0 | 0 | 0 | F |
| 0 | 0 | 1 | S |
| 0 | 1 | 0 | S |
| 0 | 1 | 1 | S |
| 1 | 0 | 0 | S |
| 1 | 0 | 1 | S |
| 1 | 1 | 0 | S |
| 1 | 1 | 1 | S |
| TOTAL (suma de valores) | | | |



Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

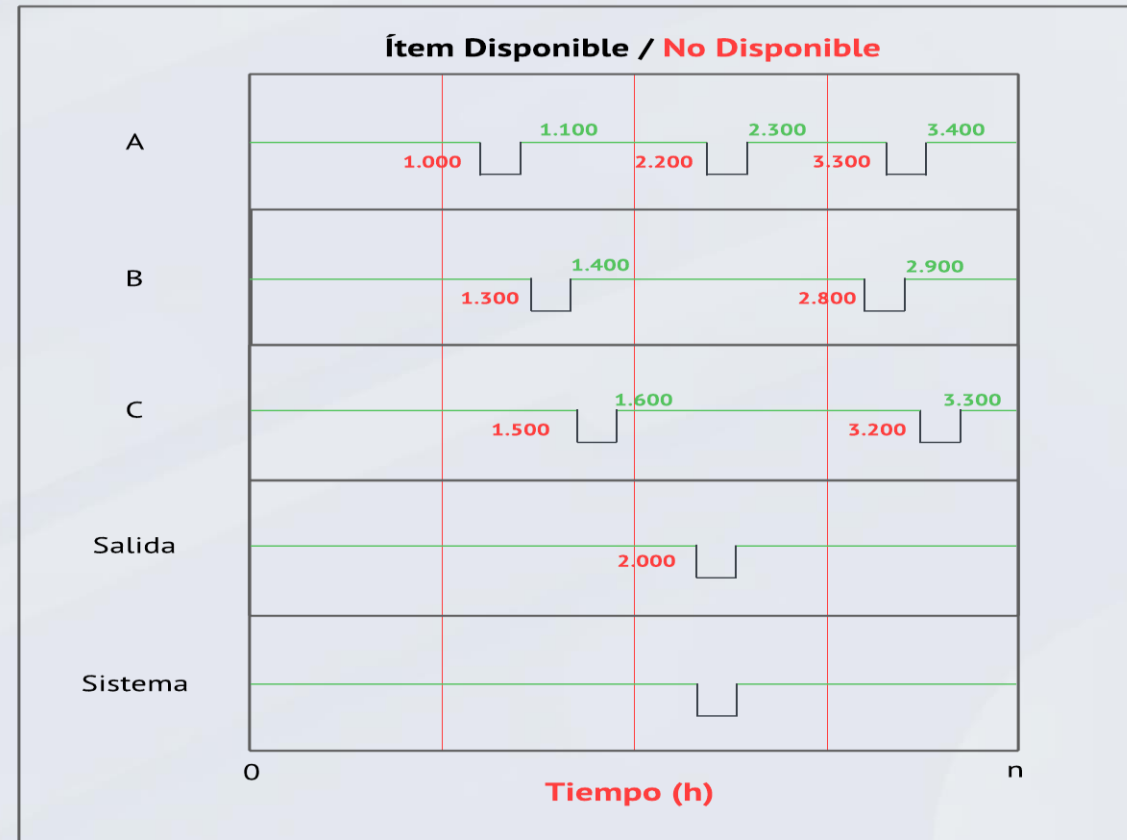
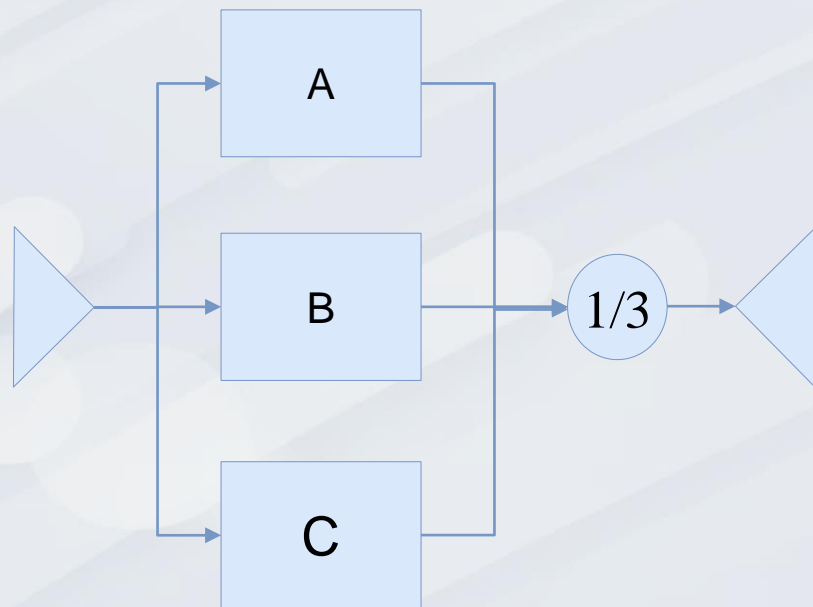
RBD - RPD

SRA

Resultados

EJECUCIÓN DEL SRA

Método determinístico de cálculo de la disponibilidad





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

CICLOS DE TRABAJO PARA CADA COMPONENTE EN CADA MISIÓN (CÁLCULOS AOR)

RELACIÓN NODAL POR MISIÓN

| Grupo | SWBS | DESCRIPCIÓN | Max. Velocidad | Patrulla | Tránsito | Escolta | Baja Velocidad | Stationing |
|-------|-------|---|----------------|----------|----------|---------|----------------|------------|
| 200 | 23311 | MOTOR PROPULSOR PRINCIPAL DIESEL NRO. 1 | 100% | 90% | 80% | 100% | 25% | 10% |
| 200 | 23312 | MOTOR PROPULSOR PRINCIPAL DIESEL NRO. 2 | 100% | 90% | 80% | 100% | 25% | 0,5% |
| 200 | 24111 | REDUCTOR DE ENGRANAJES NRO. 1 (ER) | 100% | 90% | 80% | 100% | 25% | 10% |
| 200 | 24112 | REDUCTOR DE ENGRANAJES NRO. 2 (BR) | 100% | 90% | 80% | 100% | 25% | 0,5% |
| 200 | 24511 | PROPULSOR (ER) | 100% | 100% | 90% | 50% | 13% | 5% |
| 200 | 24512 | PROPULSOR (BR) | 100% | 100% | 90% | 50% | 13% | 0,5% |

| MISIONES | Relación Nodal (k/n) |
|----------------|----------------------|
| Max. Velocidad | 2/2 |
| Patrulla | 2/2 |
| Tránsito | 1/2 |
| Escolta | 1/2 |
| Baja Velocidad | 1/2 |
| Stationing | 1/2 |



Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

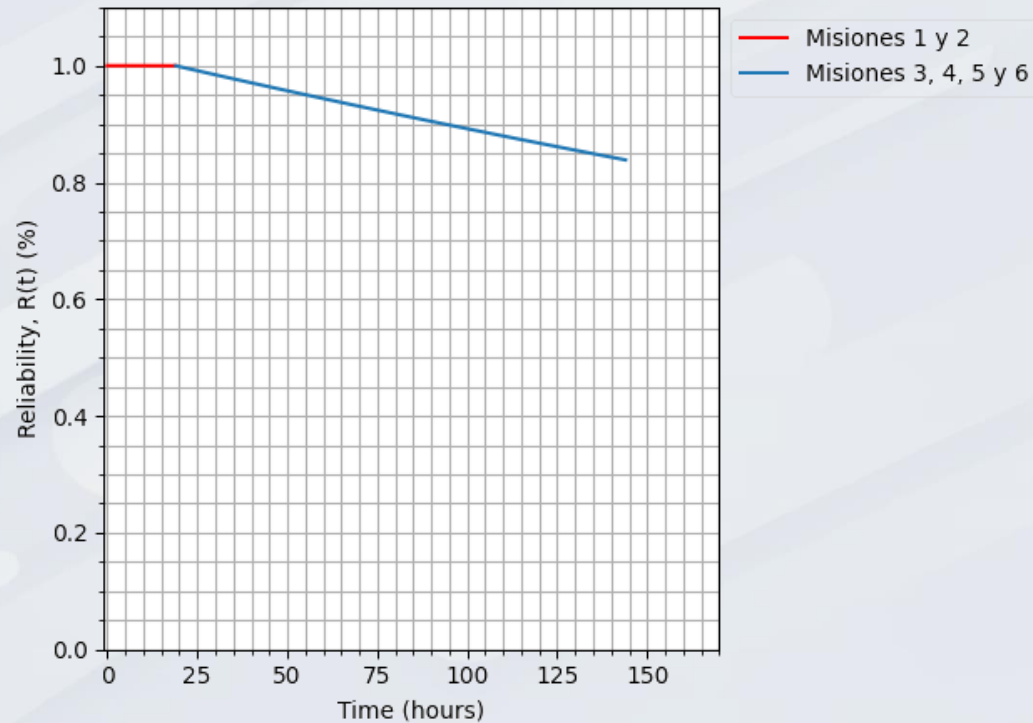
SRA

Resultados

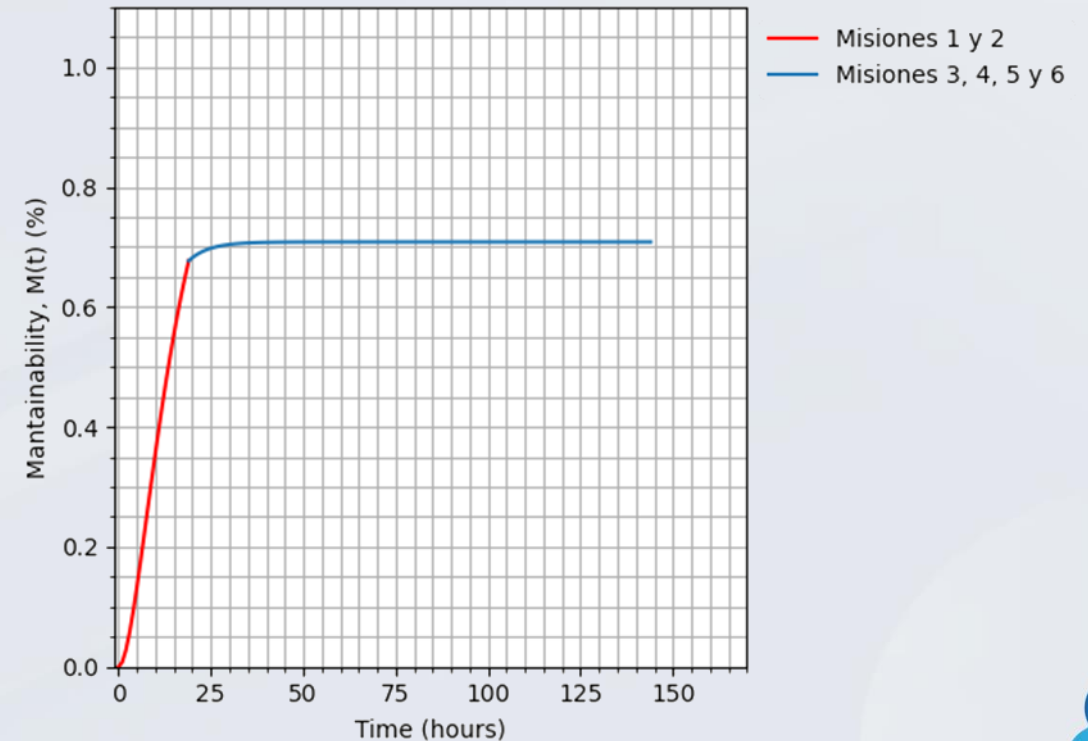
EJECUCIÓN DEL SRA POR MÉTODO PROBABILÍSTICO

Simulación de Montecarlo (hiper-parámetros): Semilla, número de iteraciones

Curva de fiabilidad del sistema de propulsión



Curva de mantenibilidad del sistema de propulsión





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

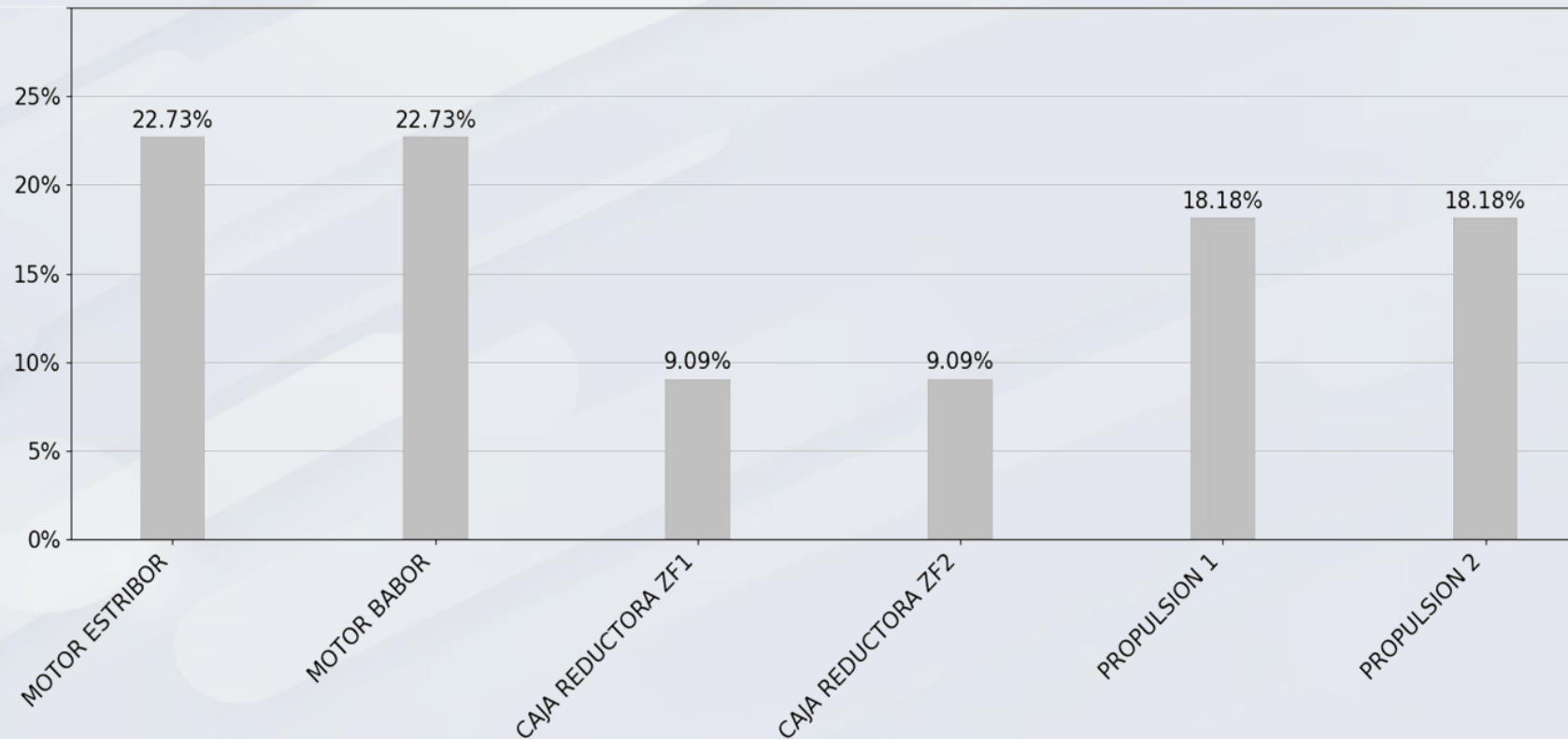
LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

ANÁLISIS DE ELEMENTOS CRÍTICOS





Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES PARA LAS MISIONES

| Descripción | Max. Velocidad | | Patrulla | | Tránsito | | Escolta | | Baja Velocidad | | Stationing | |
|---|----------------|--------|----------|--------|----------|--------|---------|--------|----------------|--------|------------|--------|
| | R (%) | A (%) | R (%) | A (%) | R (%) | A (%) | R (%) | A (%) | R (%) | A (%) | R (%) | A (%) |
| MOTOR PROPULSOR PRINCIPAL DIESEL NRO. 1 | 0,9723 | 0,9915 | 0,9561 | 0,9912 | 0,9561 | 0,9912 | 0,8988 | 0,9911 | 0,9507 | 0,9912 | 0,9944 | 0,9957 |
| MOTOR PROPULSOR PRINCIPAL DIESEL NRO. 2 | 0,9723 | 0,9915 | 0,9561 | 0,9912 | 0,9561 | 0,9912 | 0,8988 | 0,9911 | 0,9507 | 0,9912 | 0,9944 | 0,9957 |
| REDUCTOR DE ENGRANAJES NRO. 1 (ER) | 0,9725 | 0,9926 | 0,9564 | 0,9924 | 0,9564 | 0,9924 | 0,8996 | 0,9924 | 0,9511 | 0,9924 | 0,9944 | 0,9959 |
| REDUCTOR DE ENGRANAJES NRO. 2 (BR) | 0,9725 | 0,9926 | 0,9564 | 0,9924 | 0,9564 | 0,9924 | 0,8996 | 0,9924 | 0,9511 | 0,9924 | 0,9944 | 0,9959 |
| PROPULSOR (ER) | 0,9694 | 0,9927 | 0,9515 | 0,9926 | 0,9515 | 0,9926 | 0,8887 | 0,9926 | 0,9456 | 0,9926 | 0,9938 | 0,9957 |
| PROPULSOR (BR) | 0,9694 | 0,9927 | 0,9515 | 0,9926 | 0,9515 | 0,9926 | 0,8988 | 0,9926 | 0,9456 | 0,9926 | 0,9938 | 0,9957 |



Requisitos
ARM

Proceso
de RFQ

LDA

RBD - RPD

SRA

Resultados

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS

- Los tiempos de reparación (TTR) para los equipos son apropiados
- Debido a la inherente alta fiabilidad de los equipos, el sistema posee una alta disponibilidad duradera, que, en concordancia con la filosofía de mantenimiento impuesta, puede ajustarse fielmente a los resultados
- Se hace una correcta disposición de los recursos a los activos más comprometidos

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Fiabilidad del sistema promedio | 91.33% |
| Disponibilidad del sistema promedio | 95.72% |