



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo la realización del diseño de un modelo probabilista para el cálculo de la disponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar (AAA) de un reactor de agua a presión y establecer los criterios que mejoren dicha disponibilidad. Para llevar a cabo este cometido se emplea el software Isograph Reliability Workbench que permite realizar este modelado probabilista mediante la construcción del Árbol de Fallos del sistema AAA, del cual es posible obtener la indisponibilidad del sistema.

Se realiza, a partir del estudio de las medidas de importancia Fussell-Vesely y Birnbaum, el análisis de sensibilidad de diferentes parámetros que influyen en el cálculo final de la disponibilidad del sistema como son los diferentes componentes que lo forman, los fallos de origen humano, los fallos de causa común entre componentes y el mantenimiento del sistema.

Para finalizar se proponen una serie de medidas de mejora de los parámetros que afectan a la disponibilidad del sistema con el objeto de conseguir una mejora en la seguridad de las centrales nucleares.

Palabras clave: reactor de agua a presión, sistema de alimentación de agua auxiliar, disponibilidad, Fussell-Vesely, Birnbaum, Árbol de Fallos.

RESUM

L'objectiu del present treball es la realització del diseny d'un model probabilista per al càlcul de la disponibilitat del sistema d'alimentació d'aigua auxiliar (AAA) d'un reactor d'aigua a pressió y establir els criteris per a millorar aquesta disponibilitat. Per a dur a terme aquesta feina s'utilitza el software Isograph Reliability Workbench el qual permeteix realitzar aquest modelat probabilista mitjançant la construcció de l'Àrbre d'Errors del sistema AAA, a partir del qual es possible obtindre l'indisponibilitat del sistema.

Es realitza, a partir de l'estudi de les mesures d'importancia, l'anàlisi de sensibilitat de diferents paràmetres que influeixen en el càlcul final de la disponibilitat del sistema com son els diferents components que el formen, els errors d'orige humà, els errors de causa comú d'error entre components y el manteniment del sistema

Finalment es proposen una serie de mesures de millora dels paràmetres que afecten a la disponibilitat del sistema AAA amb l'objectiu d'aconseguir una millora en la seguretat de les centrals nuclears.

Paraules clau: reactor d'aigua a pressió, sistema d'alimentació d'aigua auxiliar, disponibilitat, Fussell-Vesely, Birnbaum, Àrbre d'Errors.

ABSTRACT

This document has the objective of design a probabilistic model to calculate the availability for auxiliary feedwater system from a pressurized water reactor (PWR). In addition, the project provides a criterion in order to improve the system's availability. To achieve all these goals it is used the software Isograph Reliability Workbench because it allows creating the probabilistic model by means of the Fault Tree Analysis (FTA).

When the availability is calculated from the Fault Tree, the importance measures are analyzed to classify in an importance order the parameters that have influence on the system's availability. These parameters are the system components, human errors, maintainability errors and common cause faults.

Finally, a series of measures to improve the parameters affecting system availability in order to achieve an improvement in the safety of nuclear power plants are proposed.

Keywords: Pressurized water reactor, auxiliary feedwater system, availability, Fussell-Vesely, Birnbaum, Fault Tree Analysis.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TRABAJO

- Memoria
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. Introducción.....	2
1.1. La seguridad nuclear.....	2
1.2. Papel de las salvaguardias tecnológicas en la seguridad de centrales nucleares....	3
2. Objetivo.....	5
3. Descripción del sistema de alimentación de agua auxiliar (AAA).....	6
3.1. Funcionalidad y estructura.....	6
3.2. Dependencia de sistemas soporte.....	6
3.3. Trenes y elementos principales.....	7
3.4. Esquema del sistema AAA.....	8
4. Papel del sistema AAA en la seguridad de una central nuclear.....	11
5. Metodología.....	13
5.1. El Análisis Probabilista de Riesgo (APR).....	13
5.2. Modelos de disponibilidad de sistemas. El Árbol de Fallos.....	13
5.3. Modelos de disponibilidad de componentes.....	16
5.4. Tipos de indisponibilidad y modelo.....	17
5.5. Medidas de importancia.....	19
5.6. Software. Isograph Reliability Workbench.....	20
6. Modelo de disponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar (AAA).....	21
6.1. Modelo de Árbol de Fallos del sistema.....	21
6.2. Modelo de Sucesos Básicos.....	21
6.3. Datos.....	25
7. Análisis de disponibilidad del sistema AAA.....	28
7.1. Indisponibilidad del sistema.....	28
7.2. Medida de importancia Fussell-Vesely.....	30

7.3. Medida de importancia Birnbaum.....	32
8. Propuestas de mejora.....	35
9. Discusión de resultados.....	43
10. Bibliografía.....	44
11. Anexo.....	I

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. Introducción.....	2
2. Presupuesto.....	4

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Leyenda de los componentes del sistema. Fuente: Elaboración propia.....	8
Tabla 2. Análisis de la medida de importancia a nivel de sistemas en una central nuclear. Fuente: S. Martorell, I. Martón, P. Martorell, S. Carlos, A.I. Sánchez, 2015.....	12
Tabla 3. Modelos de indisponibilidad de componentes. Fuente: Elaboración propia.....	17
Tabla 4. Modelos de los sucesos básicos independientes. Fuente: Elaboración propia.....	21
Tabla 5. Modelos de los sucesos básicos por error humano. Fuente: Elaboración propia.....	24
Tabla 6. Modelos de los sucesos básicos por mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.....	24
Tabla 7. Modelos de sucesos básicos por causa común de fallos. Fuente: Elaboración propia.....	25
Tabla 8. Datos de los sucesos básicos independientes, por errores humanos y mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.....	26
Tabla 9. Datos de los sucesos básicos por causa común de fallo (CCF). Fuente: Elaboración propia.....	27
Tabla 10. Indisponibilidad del sistema AAA. Fuente: Elaboración propia.....	29
Tabla 11. Resultados de la indisponibilidad del sistema por trenes y por tramos. Fuente: Elaboración propia.....	29
Tabla 12. Resultados del estudio de la medida Fussell-Vesely. Fuente: Elaboración propia.....	31
Tabla 13. Resultados del estudio de la medida de importancia Birnbaum. Fuente: Elaboración propia.....	33
Tabla 14. Datos de la turbobomba tras el cambio. Fuente: Elaboración propia.....	36

Tabla 15. Indisponibilidades con el cambio en la turbobomba. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 16. Indisponibilidades por trenes y por tramos una vez realizado en cambio en la turbobomba. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 17. Datos de las válvulas de control tras el cambio. Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 18. Indisponibilidades tras el cambio en las válvulas de control. Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 19. Indisponibilidades por trenes y por tramos una vez realizado en cambio en las válvulas de control. Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 20. Indisponibilidades tras el cambio en el periodo entre pruebas de las MV. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 21. Indisponibilidades por trenes y por tramos una vez introducida la mejora en el periodo entre pruebas. Fuente: Elaboración propia.....	39
Tabla 22. Resultados del estudio de la medida Fussell-Vesely tras la mejora. Fuente: Elaboración propia.....	39
Tabla 23. Indisponibilidades tras introducir todas las medidas de mejora. Fuente: Elaboración propia.....	41
Tabla 24. Indisponibilidades por trenes y por tramos una vez introducidas todas las propuestas. Fuente: Elaboración propia.....	41
Tabla 25. Resultados del estudio de la medida Fussell-Vesely tras incorporar al sistema todas las mejoras. Fuente: Elaboración propia.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del sistema de alimentación de agua auxiliar. Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 2. Gráfica Qx-B de sistemas relevantes. Fuente: S. Martorell, I. Martón, P. Martorell, S. Carlos, A.I. Sánchez, 2015.....	11
Figura 3. Símbolos empleados en la construcción del Árbol de fallos. Fuente: Aven, 1992.....	15
Figura 4. Resultados del estudio Fussell-Vesely. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 5. Resultados del estudio de la medida Birnbaum. Fuente: Elaboración propia.....	32

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1 LA SEGURIDAD NUCLEAR

La energía nuclear se ha posicionado desde sus inicios como un pilar fundamental para la generación de energía eléctrica en todo el mundo.

En octubre de 1956 la puesta en marcha de la central nuclear Calder Hall de Gran Bretaña supuso el inicio del aprovechamiento de la energía nuclear para usos no militares, principalmente para generación eléctrica.

En este momento en el que la tecnología nuclear se empieza a aplicar para usos civiles es cuando comienzan a desarrollarse los primeros estudios sobre seguridad nuclear.

Con el diseño de las primeras centrales nucleares se utilizó como medida de seguridad la realización de un diseño con amplios márgenes de seguridad.

El siguiente paso que se siguió en esta materia fue el estudio sobre las consecuencias de los accidentes.

A mediados de los años 60 se llevaron a cabo revisiones sobre la actuación de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo; además en 1966 se hicieron más restrictivas las condiciones para el licenciamiento de centrales nucleares y se mejoraron los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo.

En 1967 se llevó a cabo otro importante paso en materia de seguridad proponiendo la definición de riesgo como medida de seguridad.

Se establecieron también en 1971 unos criterios provisionales de diseño de reactores PWR. Finalmente en 1975 se llevó a cabo un estudio sobre el cálculo de probabilidad de ocurrencia y consecuencias de accidentes.

Con todo esto, la primera aplicación a gran escala de los métodos probabilísticos en la industria nuclear fue el estudio de seguridad de reactores conocido como WASH-1400, que fue publicado como borrador en 1974 y como informe final en 1975. El origen de este estudio responde a una exigencia del Congreso de EE.UU. de determinar cuál sería la probabilidad de un accidente con consecuencias al exterior durante la vida útil de los reactores en el país. Esta acción del Congreso americano vino acompañado de un amplio presupuesto para investigación y desarrollo, de manera que el proyecto no sólo representó la primera aplicación de estos métodos, sino que también permitió el desarrollo de conocimientos y tecnología sobre accidentes más allá de la base de diseño, necesarios para su implementación.

El accidente de la central Three Mile Island en marzo de 1979 significó un punto decisivo respecto al uso de métodos probabilísticos. El estudio de este accidente condujo a respaldar la opinión de los que consideraron los resultados del WASH-1400 demasiado optimistas, pero por el otro demostró la validez de los principales resultados cualitativos del estudio, es decir, que el riesgo de plantas nucleares está dominado por accidentes que se encuentran fuera de los accidentes base de diseño (accidentes severos), y que los accidentes iniciados por transitorios operacionales y fugas pequeñas de refrigerante contribuyen más que la peor pérdida de refrigerante en la base de diseño.

Lo anterior llevó a un incremento en el uso de los resultados cualitativos y comparativos del Análisis Probabilista de Seguridad (APS), como la identificación de eventos y secuencias dominantes, el establecimiento de prioridades de temas relacionados con seguridad en el ambiente regulador, y la comparación del beneficio entre diversas opciones de mejora de los diseños. Por otro lado, la utilización del resultado de un APS, la frecuencia de accidentes, como criterio de aceptabilidad de una central tuvo una evolución más lenta, provocando que algunas versiones de este criterio de aceptabilidad no hayan sido aceptadas por organismos reguladores en varios países hasta hace pocos años.

Por lo tanto, la metodología APS aparece en una etapa tardía del licenciamiento de la mayoría de los reactores existentes, hecho que representó un reto para su incorporación a la normativa y a las prácticas reguladoras. (Weinberg, 1994).

1.2 EL PAPEL DE LAS SALVAGUARDIAS TECNOLÓGICAS EN LA SEGURIDAD DE CENTRALES NUCLEARES

La actividad nuclear que se realiza en las centrales nucleares se desarrolla basándose en la premisa principal de explotación segura de sus instalaciones. Esto significa que tanto en la fase de diseño, la de construcción, la de operación y la de desmantelamiento la seguridad debe ser el principal y más importante de los condicionantes.

El objetivo de la Seguridad Nuclear puede ser explicado de acuerdo con la definición proporcionada por el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA):

“Proteger a los individuos, a la sociedad y al medio ambiente estableciendo y manteniendo en las centrales nucleares una defensa efectiva contra los riesgos radiológicos.” (OIEA, Jovenes Nucleares).

El riesgo es entendido como el concepto complementario de seguridad y es empleado para indicar la posibilidad de causar pérdidas o daños a las personas, al medio ambiente y/o a la propiedad como consecuencia de la ocurrencia de sucesos no deseados.

De este modo el riesgo depende tanto de la propia instalación como del emplazamiento en el que esté ubicada. Por tanto, con el objetivo de minimizar el riesgo, la selección de un emplazamiento para ubicar una central nuclear se lleva a cabo evaluando una serie de factores relacionados con la seguridad como son sucesos externos que puedan afectar a la central, tanto naturales como de origen humano, y la viabilidad de los planes de emergencia, que constituyen el último nivel de seguridad frente a posibles accidentes.

Con respecto a los criterios para el diseño de centrales nucleares, se deben cumplir las siguientes funciones de seguridad: controlar la reacción de fisión, refrigeración del reactor nuclear, confinar las sustancias radiactivas dentro de barreras físicas y por último mitigar las consecuencias radiológicas tras un accidente.

Con la intención de cumplir estas funciones de seguridad en el diseño de centrales aparece el concepto de Defensa en Profundidad, que se centra en varios niveles de protección que incluyen barreras sucesivas con la finalidad de prevenir el escape incontrolado de materiales radiactivos al

exterior (protección multibarrera) y la protección de las propias barreras, evitando daños en la instalación y en las barreras (salvaguardias tecnológicas).

La función de las salvaguardias tecnológicas es prevenir o hacer frente a los accidentes que pudieran producirse, evitando que se ponga en peligro la integridad de las barreras y no se vea afectada su función de seguridad. En su diseño se tiene en cuenta la aparición de sucesos iniciadores que pueden provocar estados accidentales. Estos sucesos iniciadores pueden ser fenómenos externos a la instalación, como terremotos, inundaciones o sabotajes, o sucesos propios de la planta, como puede ser el fallo de algún componente de un sistema, la rotura del circuito de refrigerante del reactor que podría dejar sin refrigeración al núcleo del reactor o errores humanos. Estas salvaguardias deben de cumplir unos estándares de calidad y están diseñadas de manera que sean redundantes, es decir, que aunque no funcionen correctamente existan sistemas de respaldo que cumplan su misma función de seguridad.

Como ejemplos de estos sistemas de seguridad se puede nombrar el sistema de alimentación de agua auxiliar (AAA), el sistema de inyección a alta presión (HPIS), el sistema de inyección a baja presión (LPIS), el sistema de inyección por acumulador. (Jóvenes nucleares).

2. OBJETIVO

El objetivo del proyecto es realizar un estudio sobre la disponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar de una central nuclear PWR mediante la implementación de un análisis probabilista de seguridad (APS). Para ello resulta necesaria la modelización estadística del sistema de modo que sea posible evaluar los factores que influyen en la disponibilidad, como los componentes del sistema, su mantenibilidad y los factores humanos que pueden derivar en fallos en la operación del sistema auxiliar. Esta modelización se lleva a cabo mediante la implantación del Árbol de Fallos del sistema en el programa Isograph Reliability Workbench.

Con los datos obtenidos de indisponibilidad y las medidas de importancia de estos factores, llamados sucesos básicos, se realizará un estudio y una posterior clasificación de aquellos que presenten una mayor contribución a la indisponibilidad del sistema y que por tanto destacan como los sucesos más importantes dentro de esta salvaguardia tecnológica.

Para finalizar, una vez realizado este estudio, se llevará a cabo una serie de propuestas de mejora que afecten a aquellos sucesos básicos identificados como los más relevantes dentro del sistema AAA y que permitan reducir la indisponibilidad del sistema y de esta forma contribuir a una mayor seguridad de la central nuclear.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA AUXILIAR

3.1 FUNCIONALIDAD/ESTRUCTURA

El sistema de alimentación de agua auxiliar (AAA) se utiliza en todos los diseños de reactor de agua a presión. El principal objetivo del sistema AAA es proporcionar agua de alimentación a los generadores de vapor para mantener la disipación del calor extraído del núcleo en el caso de una pérdida de agua de alimentación principal, de un disparo del reactor y pérdida de potencia, y de un accidente por pequeña pérdida de refrigerante. En algunas plantas, el sistema también sirve como fuente de agua de alimentación a los generadores de vapor durante el arranque y apagado de la planta. Sin embargo, el sistema no puede suministrar suficiente flujo de agua de alimentación durante el funcionamiento a potencia. En la mayoría de las plantas, el sistema sólo puede suministrar agua de alimentación a los generadores de vapor con cargas de vapor de menos de 5% del flujo nominal.

Por tanto la función de seguridad del sistema AAA es mantener el inventario de agua en los generadores de vapor para reactor de extracción de calor residual cuando el sistema de agua de alimentación principal no está disponible. El sistema está diseñado para arrancar automáticamente y suministrar agua de alimentación suficiente. (Yoshiaki, 2008).

3.2 DEPENDENCIA DE SISTEMAS SOPORTE

Los sistemas soporte son aquellos necesarios para el funcionamiento de los sistemas frontales, que son los utilizados para mitigar los accidentes. En el caso de estudio de este trabajo, el sistema de alimentación de agua auxiliar es el sistema frontal y se apoya en los siguientes sistemas soporte:

- Sistema eléctrico de corriente alterna de 6.9kV. Actúa sobre las motobombas, tanto la del tren 1 (MP1) como la del tren 3 (MP2).
- Sistema eléctrico de corriente alterna de 380V. Este sistema lleva a cabo su función actuando sobre las válvulas de control del primer (VC1) y del tercer tren (VC5). También lo hace sobre la válvula motora C1.
- Sistema eléctrico de corriente continua de 125V. Tiene influencia sobre la turbobomba situada en el tren 2 (TP1), las motobombas de trenes 1 y 2 (MP1 Y MP2), las válvulas de control VC1, VC3 Y VC5 y la motoválvula C1.
- Sistema eléctrico de corriente continua de 15V. Sirve de alimentación para las válvulas de control VC1, VC3 Y V5.
- Secuenciador de salvaguardias. Actúa sobre las dos motobombas MP1 Y MP2.
- Sistema de protección de estado sólido. Sirve de apoyo a la turbobomba (TP1) y a las motobombas MP1 y MP2.

-Circuito de actuación del sistema de mitigación automática. Realiza su actuación sobre la turbobomba TP y las motobombas MP1 Y MP2.

3.3 TRENES Y ELEMENTOS PRINCIPALES

El sistema de alimentación de agua auxiliar que se encuentra sujeto a estudio en el presente trabajo está formado por tres trenes redundantes que conectan un tanque de almacenamiento de condensado con cada uno de los generadores de vapor. Los trenes tienen un mismo diseño por lo que son iguales excepto el segundo de ellos. Esto se debe a que, a diferencia del primero y último, el segundo utiliza una turbobomba en lugar de motobomba.

El sistema posee dos tramos de interconexiones entre los diferentes trenes de manera que se mejora la fiabilidad y por tanto la disponibilidad del sistema de seguridad.

En cuanto a los principales componentes que lo forman cada tren cabe destacar las bombas motorizadas o turbobomba en caso del tren 2, válvulas de retención, válvulas manuales, válvulas neumáticas, válvulas motorizadas y válvulas de control.

A continuación se describe y detalla el funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema:

-Válvula motora: se las conoce también como válvulas “on/off” debido a que su funcionamiento se basa en la apertura total o por el contrario el cierre total de la válvula y por tanto de la tubería donde se encuentra.

-Válvula de control: utiliza controladores para abrir y cerrar, total o parcialmente, la válvula en relación a una comparación entre un valor de consigna y la medida tomada de alguna variable de interés. Se emplea con el objetivo de permitir el control del caudal, presión, temperatura y nivel de líquido.

-Válvula de retención: válvula diseñada para permitir el paso del fluido en una sola dirección, evitando así el retorno de fluido en caso de algún tipo de accidente. Estas válvulas actúan de manera automática por lo que la mayoría no tienen control externo.

-Motobomba: equipo capaz de comprimir y desplazar fluido mediante acción mecánica ya sea por medio de pistones o de elementos rotativos. Esta acción mecánica se lleva a cabo mediante el consumo de energía eléctrica producida por medio de un motor.

-Turbobomba: equipo capaz de comprimir y desplazar fluido mediante acción mecánica ya sea por medio de pistones o de elementos rotativos. La acción mecánica es posible gracias a una turbina por la que se hace circular vapor de la central.

-Válvula manual: dispositivo con características móviles que permite abrir y cerrar una vía de circulación con el fin de permitir, prevenir o controlar el flujo de fluidos.

-Válvula neumática: dispositivo que permite eliminar el aire estanco en la parte superior de elementos de la instalación como pueden ser las tuberías.

Como se ha comentado anteriormente, el sistema AAA consta de tres trenes redundantes, y su criterio de fallo es que fallen los tres trenes. Esto significa que con que entre uno de los trenes el sistema puede llevar a cabo su función.

3.4 ESQUEMA DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA AUXILIAR

En este apartado se presenta el esquema del sistema de alimentación de agua auxiliar (Figura 1) que ha servido de apoyo para la realización del presente trabajo.

A fin de conseguir una mayor facilidad a la hora de entender el esquema e identificar los componentes dentro del mismo, se muestra a continuación, a modo de leyenda, la Tabla 1 donde se indica el significado de cada identificador usado para la denominación de los componentes.

Tabla 1. Leyenda de los componentes del sistema

ID componente	Descripción
MP	Bomba motorizada
TP	Turbobomba
MV	Válvula motorizada
V	Válvula manual
A	Válvula neumática
VC	Válvula de control
VR	Válvula de retención

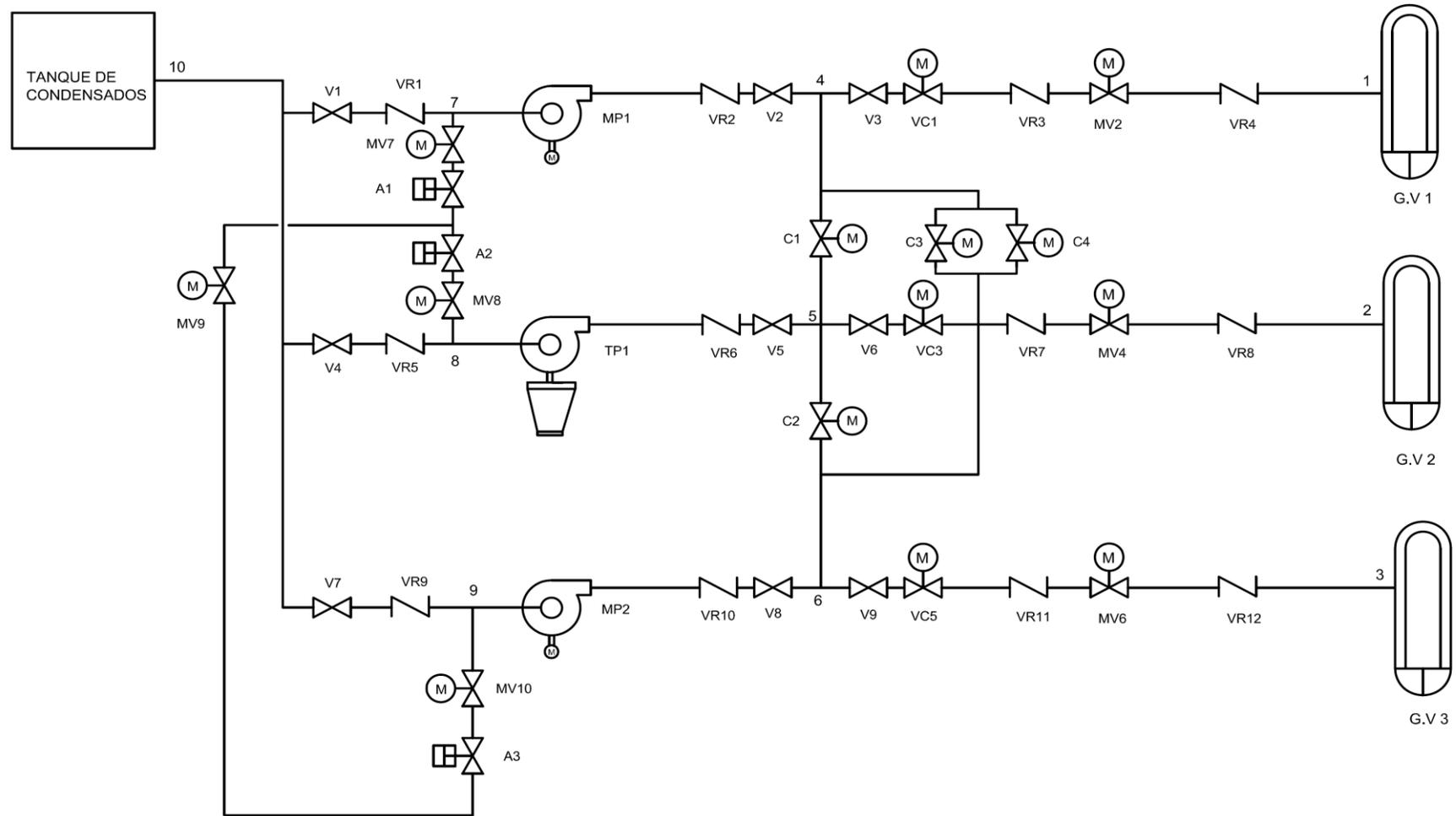


Figura 1. Esquema del sistema de alimentación de agua auxiliar

4. PAPEL DEL AAA EN LA SEGURIDAD DE LAS CENTRALES NUCLEARES

Mediante la aplicación, a nivel de sistemas, de las medidas de importancia del riesgo como son la Birnbaum, Fussell Vessely y Risk Increase Factor (RIF) es posible identificar los sistemas más críticos en referencia a la seguridad de la central. Además el riesgo inherente a un componente se puede expresar en términos de indisponibilidad de sistema.

De este modo el riesgo de un sistema dado puede ser observado mediante dos medidas de importancia, indisponibilidad del sistema (Q_x) y Birnbaum (B). Por esto ambas medidas son utilizadas para clasificar sistemas y analizar cambios en ellos.

El artículo "RAM based metrics for safety assessment of safety systems with application to ageing management" realizado por S. Martorell, I. Martón, P. Martorell, S. Carlos se basa en esta metodología para obtener la criticidad de cada sistema de seguridad considerando la relación de su indisponibilidad con la frecuencia de daño al núcleo en una central nuclear PWR típica.

Los resultados del estudio quedan representados en la Figura 2, en forma de una gráfica Qx-B donde se muestra el riesgo de cada sistema, calculado como su indisponibilidad por el Birnbaum.

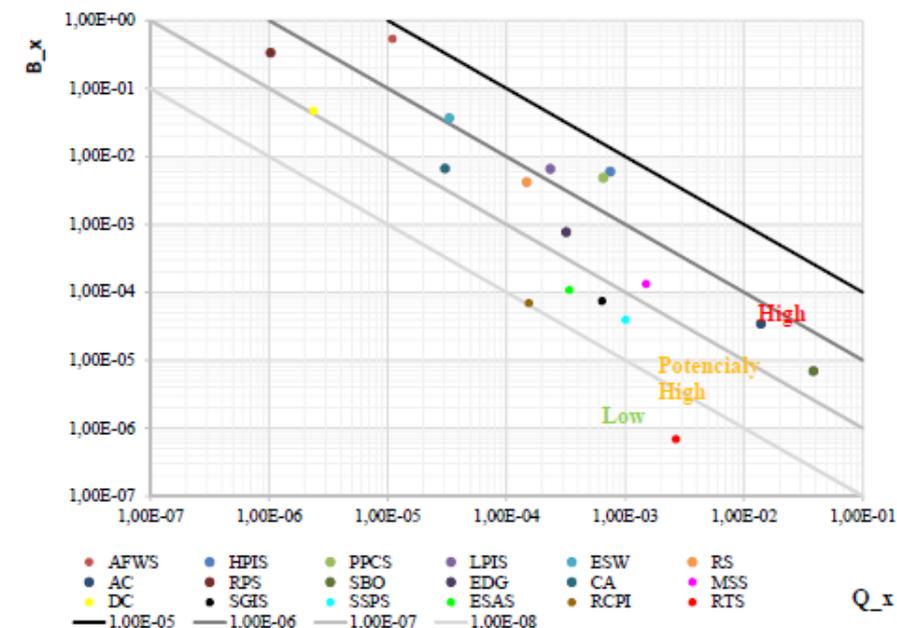


Figura 2. Gráfica Qx-B de sistemas relevantes. (S. Martorell, I. Martón, P. Martorell, S. Carlos, A.I. Sánchez, 2015).

Los sistemas más importantes están localizados cerca de la línea de riesgo igual a 1.00E-05. Los situados entre las líneas de riesgo de 1.00E-08 y 1.00E-07 se catalogan como sistemas de bajo riesgo.

Por último se clasifican como potencialmente de alto riesgo a los sistemas situados entre las líneas de riesgo de $1.00E-07$ y $1.00E-06$.

Como resultado de analizar los resultados mostrados en la gráfica se puede afirmar que el Sistema de Alimentación de Agua Auxiliar (AAA) es el sistema de seguridad más importante en una central nuclear debido a que se localiza en el gráfico cerca de la línea de mayor riesgo y aunque su indisponibilidad es menor que otros sistemas cerca de dicha línea, su valor del Birnbaum, que indica la importancia estructural del sistema dentro del conjunto de la central, concede a este sistema este mayor grado de importancia.

Este resultado coincide con el obtenido mediante las medidas de importancia Fussel Veselly y Risk Importance Factor (RIF) mostradas en la Tabla 2, donde el sistema AAA se clasifica también como el más importante.

Se han resaltado en color morado aquellos sistemas con un alto riesgo para la seguridad de la planta, en color naranja aquellos que se consideran con un alto riesgo potencial y por último, en azul, los sistemas con un bajo riesgo para la seguridad.

Tabla 2. Análisis de la medida de importancia a nivel de sistemas en una central nuclear.
(S. Martorell, I. Martón, P. Martorell, S. Carlos, A.I. Sánchez 2015).

Sistema	Descripción	FV	RIF
AFWS/AAA	Auxiliary Feed Water System	5,17E-01	47000
HPIS	High Pressure injection system	3,92E-01	524
PPCS	Primary pressure control system	2,77E-01	423
LPIS	Low Pressure injection system	1,34E-01	573
ESW	Essential service water	1,06E-01	3200
RS	Essential cooling water	5,41E-02	366
AC	AC power supply system 120 V.A.C	4,19E-02	3,97
RPS	Reactor protection system	3,04E-02	29400
SBO	Alternative DG Station Blackout	2,32E-02	1,58
EDG	Emergency diesel Generators	2,14E-02	68,1
CA	AC power supply system 6,9 KV and 400 V.C.A.	1,77E-02	582
MSS	Main Steam System	1,75E-02	12,6
DC	DC power supply 125 V.D.C	9,79E-03	4110
SGIS	Steam generator isolation system	4,14E-03	7,49
SSPS	Solid State Protection System	3,45E-03	4,42
ESAS	Engineered Safeguards Actuation System	3,19E-03	10,4
RCPI	Reactor coolant pumps up-stream injection	9,34E-04	7,03
RTS	Reactor trip system	1,61E-04	1,06

5. METODOLOGIA

5.1 ANÁLISIS PROBABILISTA DE SEGURIDAD

Los Análisis Probabilistas de Seguridad (APS) conforman una técnica de análisis de riesgos en la que mediante la realización de un modelado probabilista de la instalación se obtiene una estimación cuantitativa del riesgo de accidentes. Este modelado consiste en el desglose de las posibles secuencias de acontecimientos que pudieran conducir a un accidente y, dentro de cada secuencia, de las posibles combinaciones de sucesos básicos que la pueden causar. Mediante los APS se analizan los aspectos de diseño, componentes, mantenimiento y factores humanos de la instalación que pueden originar accidentes nucleares y evaluar la importancia de cada uno de estos aspectos.

De este modo se puede definir APS como una técnica utilizada para analizar los aspectos del diseño, procedimientos y prácticas operativas de la instalación que pueden originar y determinar la ocurrencia de situaciones accidentales. Se basa, por lo tanto, en la construcción de modelos lógico-probabilistas para la determinación de la frecuencia de ocurrencia de las posibles secuencias de sucesos que pueden provocar accidentes con graves consecuencias en la instalación o en su exterior. (BOE, nº 153. 2010).

El APS de nivel 1 consiste en el análisis del diseño y operación de la central para identificar las potenciales secuencias de accidentes que pueden dar lugar a un daño al núcleo del reactor y cambio de su geometría estructural, sus causas básicas y su frecuencia media anual. Es aquí donde se enmarca el presente proyecto, en el que se trabaja con modelos y datos a nivel de sistema.

Para entender en profundidad la anterior definición y el verdadero alcance del presente trabajo se define el concepto de riesgo.

El riesgo se utiliza para indicar la posibilidad de causar pérdidas o daños a las personas, al medio ambiente y/o a la propiedad como consecuencia de la ocurrencia de sucesos no deseados. Así, el riesgo puede entenderse como una medida cuantitativa del peligro, por lo que en términos ingenieriles se sustituye la palabra posibilidad por probabilidad en la anterior definición. Se trata de algo intangible y subjetivo, ya que tiene que ver con la posibilidad de ocurrencia de sucesos en el futuro y es relativo al objeto o sujeto que recibe el daño.

5.2 MODELO DE DISPONIBILIDAD DE SISTEMAS. ÁRBOL DE FALLOS.

El análisis por Árbol de Fallos, conocido también por las siglas FTA (Fault Tree Analysis) en inglés, es un método de análisis probabilista que tiene como objetivo el análisis en profundidad de un evento, generalmente un suceso no deseado que se pretende evitar, ya sea un accidente de gran magnitud como una explosión o fuga, o sea un suceso de menor importancia como por ejemplo el fallo de un sistema de cierre. Para ello, se descompone el evento, que recibe el nombre de suceso "TOP", en función de los factores contribuyen al mismo y luego se estudia la combinación de otros sucesos y condiciones que pueden llevar a dicho suceso "TOP".

Por lo tanto es una técnica que parte del suceso "TOP" o no deseado y va identificando las causas por las que se puede dar dicho suceso, es decir, se trata de un método que va de arriba a abajo. Cada

causa es analizada de la misma forma, analizando las causas de las causas primeras, y así sucesivamente hasta que se llega a las causas básicas o sucesos básicos del evento cumbre.

El evento no deseado que se pretende analizar con esta técnica puede corresponder directamente con un suceso iniciador de un accidente, puede formar parte de una secuencia de accidente, o puede representar a parte o todo un sistema dispuesto para llevar a cabo una función, por ejemplo de seguridad como es el caso de este trabajo.

El árbol de fallos es el diagrama que representa de forma lógica las diferentes relaciones que existen entre el suceso no deseado, denominado como suceso 'TOP', y las causas o sucesos básicos que lo hacen posible.

El análisis de árboles de fallos recibe este nombre debido al hecho de que la utilización más importante de esta técnica corresponde a la modelización del fallo de un sistema o función a partir de los sucesos básicos que tienen que ver con fallos de los componentes que constituyen dichos sistemas o que desempeñan una función cuyo fallo se está investigando.

El análisis de árboles de fallos se lleva a cabo normalmente atendiendo a las siguientes etapas:

- 1) definición del problema y establecimiento de condiciones límite
- 2) construcción del árbol de fallos
- 3) reducción del árbol
- 4) análisis cualitativo del árbol
- 5) análisis cuantitativo del árbol

A la hora de llevar a cabo la construcción de los árboles de fallo se emplea un conjunto de símbolos, para muchos de los cuales existe más de una representación gráfica aunque con un mismo significado lógico. En general, los símbolos utilizados se pueden dividir en dos clases, denominadas puertas lógicas y sucesos, un ejemplo de los cuales se muestra en la Figura 3.

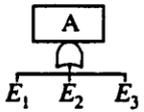
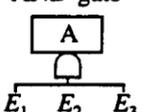
	Symbol	Description
Logic gates	OR-gate 	The OR-gate indicates that the output event A occurs if any of the input events E_i occur.
	AND-gate 	The AND-gate indicates that the output event A occurs only when all the input events E_i occur simultaneously.
Input events	Basic event 	The Basic event represents a basic equipment failure that requires no further development of failure causes.
	Undeveloped event 	The Undeveloped event represents an event that is not examined further because information is unavailable or because its consequence is insignificant.
Description of state	Comment rectangle 	The Comment rectangle is for supplementary information.
Transfer symbols	Transfer-out 	The Transfer-out symbol indicates that the fault tree is developed further at the occurrence of the corresponding Transfer-in symbol.
	Transfer-in 	

Figura 3. Símbolos empleados en la construcción del Árbol de fallos. (Aven, 1992).

Detrás del árbol de fallos se encuentra el álgebra lógica o álgebra booleana, ya que representa mediante símbolos y ecuaciones, las relaciones lógicas que se establecen entre sucesos y sus causas en el árbol de fallos.

De esta manera, el árbol de fallos equivale a una larga pero simple ecuación booleana que establece las combinaciones lógicas de ocurrencia de eventos que pueden derivar en la consecución del evento TOP y permite calcular la frecuencia de ocurrencia del mismo.

5.3 MODELOS DE DISPONIBILIDAD DE COMPONENTES

La disponibilidad de un equipo representa su capacidad para estar en un estado listo para realizar su función bajo condiciones específicas y sin fallo durante un periodo de tiempo dado. Por estar listo se entiende no estar fallado ni estar fuera de servicio, por ejemplo por prueba o mantenimiento. De este modo, la disponibilidad del equipo depende tanto de su mantenibilidad como de su fiabilidad. De hecho, el fallo puede ocurrir mientras el equipo se encuentra en espera, en el momento de la demanda o mientras está desarrollando la misión.

El modelo del APS se trabaja con un conjunto de combinaciones de sucesos básicos a los que les corresponden valores de indisponibilidad promediada, algunas de las cuales están asociadas con los diferentes estados en que se puede encontrar un componente.

Dependiendo de dicho estado en el que trabaja el componente, su valor de indisponibilidad viene dado por medio de diferentes modelos estadísticos. En la realización de este trabajo se consideran tres tipos de modos de fallo; el primero se conoce como fallo en espera, el segundo como fallo en demanda y por último encontramos el fallo en funcionamiento.

- Fallo en espera

Son aquellos fallos que se producen en componentes que no se encuentran en funcionamiento durante la operación normal, pero que deber estar disponibles en caso de ser requeridos. Hasta que dicho componente no entra en estado de funcionamiento o recibe pruebas o mantenimientos no es posible detectarlos.

El fallo en espera se adapta a un modelo de indisponibilidad por fallo del tipo “dormant” $\frac{1}{2}\lambda_E T$, donde λ_E representa la tasa de fallos en espera o dependiente del tiempo con unidades de hora⁻¹ y T hace referencia al intervalo de prueba o mantenimiento con unidades en horas.

- Fallo en demanda

Como fallo en demanda se entiende aquel producido cuando un componente es accionado de manera que supone un cambio en su estado. Se trata por tanto, de un fallo que no mantiene relación con el tiempo.

El modelo utilizado para los fallos en demanda depende únicamente de un parámetro (ρ), modelo “fixed”, ya que este tipo de fallo es independiente del tiempo. Por tanto ρ representa el fallo cíclico o por demanda.

- Fallo en funcionamiento

Por último, los fallos en funcionamiento se dan en componentes que deben funcionar correctamente de forma continuada durante un determinado tiempo, que se denomina tiempo de funcionamiento o de misión. Este fallo supone un cese en el funcionamiento normal del componente.

El modelo de indisponibilidad por fallo asociado a un fallo en funcionamiento toma la forma $\lambda_f t_f$. En esta expresión λ_f representa la tasa de fallos en funcionamiento con unidades en horas^{-1} y t_f hace referencia al tiempo en funcionamiento del componente en unidades en horas.

Se muestra a continuación en la Tabla 3 un resumen donde se asocia cada modo de fallo a su modelo estadístico.

Tabla 3. Modelos de indisponibilidad de componentes

Modo de fallo	Modelo estadístico	Expresión matemática
Fallo en espera	Dormant	$1/2 * \lambda_E * T$
Fallo en demanda	Fixed	ρ
Fallo en funcionamiento	Time at Risk	$\lambda_f * t_f$

5.4 TIPOS DE INDISPONIBILIDAD Y MODELOS

A la hora de establecer los sucesos básicos que intervienen en el funcionamiento de un sistema de una planta y que por tanto deben ser representados con los modelos de indisponibilidad desarrollados en el apartado 5.3, es necesario diferenciar entre los diferentes tipos de indisponibilidad existente.

- Indisponibilidad por fallos independientes

En primer lugar cabe destacar la indisponibilidad por fallos independientes. Esta hace referencia a la propia indisponibilidad de cada componente y que depende por tanto del modo de fallo del propio componente. De este modo es posible diferenciar entre tres tipos de indisponibilidad independiente como son por modo de fallo en espera (FE), por modo de fallo en demanda (FD) y por modo de fallo en funcionamiento (FF). Como se indica en el apartado anterior, el 5.3, el primero de estos modos queda definido mediante un modelo estadístico “Dormant”, el segundo mediante un “Fixed” y por último, el tercero mediante un “Time at Risk”.

- Indisponibilidad por fallos de causa común

Además de los anteriores, existen también fallos dependientes, que involucran el fallo simultáneo, o casi simultáneo, de varios componentes a la vez. Queda claro que resultan de vital importancia para la fiabilidad del sistema. Hay un grupo importante de fallos dependientes que se denominan fallos de causa común, o CCF (common cause failures), que representan el fallo simultáneo de varios componentes debido a una misma causa. Este es el segundo tipo de indisponibilidad y al igual que el

primero también tiene dependencia de si el fallo de causa común corresponde a demanda o a funcionamiento aplicándose en cada caso los modelos estadísticos anteriormente citados.

El grado de predisposición para que se pueda producir un fallo por causa común partiendo de un fallo independiente se describe mediante el factor beta (β). La obtención de la probabilidad de fallo debido a una causa común puede ser calculada como el valor independiente por el factor beta, es decir:

$$\lambda_{CCF} = \beta * \lambda_I \quad (1)$$

dónde λ_{CCF} es la tasa de fallos por causa común, λ_I es la tasa de fallos independientes y β es el factor beta.

- Indisponibilidad por fallos de origen humano

El tercer tipo de indisponibilidad es el debido a fallos de origen humano. Resulta evidente que se trata de una de las causas de indisponibilidad más importantes en la industria ya que resulta altamente complicado controlar el error humano, por lo tanto deben ser tenidos en cuenta en todo análisis de disponibilidad.

Desde el punto de vista estadístico los fallos de origen humano se descomponen en dos partes: la parte cognitiva y la parte mecánica. La primera hace referencia a la ventana de tiempo en la que el operador puede seleccionar el procedimiento adecuado y es posible actuar sobre ella mediante la mejora de componentes del sistema que conlleve una ampliación de dicho margen de tiempo. La parte mecánica a su vez es una contribución fija al fallo humano una vez el operador ha recibido un entrenamiento. Representa la probabilidad de que el operador no realice los procedimientos correctos en cualquier posible secuencia accidental.

Este tipo de fallos viene representado mediante un modelo "Fixed".

- Indisponibilidad debida a mantenimiento

Como último tipo de indisponibilidad aparece la debida al mantenimiento. El mantenimiento representa todas las actividades llevadas a cabo sobre el equipo con el propósito de valorar, mantener o restaurar su capacidad funcional. El mantenimiento introduce al menos dos tipos de aspectos positivos. Primero, el mantenimiento correctivo restaura la capacidad funcional del equipo fallado o degradado y el mantenimiento programado incrementa su fiabilidad intrínseca de los equipos no fallados por encima de su fiabilidad natural, por ejemplo, controlando la evolución de su degradación para que se encuentre siempre por debajo del punto de fallo. Sin embargo el mantenimiento también introduce efectos adversos como consecuencia de la inoperabilidad forzada del equipo durante el tiempo que éste se encuentra fuera de servicio sometido a mantenimiento. Por tanto queda demostrada la influencia del mantenimiento sobre la disponibilidad del sistema.

La indisponibilidad por mantenimiento se aplica en este caso por tramos, existiendo diferentes valores para los diferentes tramos del sistema. Desde un punto de vista matemático-estadístico se emplea un modelo "Fixed" para representar este tipo de indisponibilidad.

5.5 MEDIDAS DE IMPORTANCIA

El análisis de la importancia del riesgo de sistemas y componentes permite revelar aquellos componentes cuyo funcionamiento es más importante en materia de seguridad.

La importancia de los componentes de un sistema con respecto a la indisponibilidad del mismo se puede evaluar mediante la aplicación de medidas de importancia. Estas medidas representan la influencia de un suceso básico en la indisponibilidad de un sistema o la de un sistema sobre la indisponibilidad de una planta. Las medidas más importantes y, por tanto, las empleadas para para el análisis de resultados en este trabajo son Fussel-Vesely, Birnbaum, Risk Achievement Worth (RAW). (Guía de Seguridad 1.18, 2007).

La medida de importancia Birnbaum (B) para un componente es independiente de su propia fiabilidad y solamente depende de la estructura del sistema. Es decir, esta medida evalúa como de importante es, en la indisponibilidad, la posición que ocupa el componente dentro del sistema.

$$B_i = Q_i^1 - Q_i^0 \quad (2)$$

dónde Q_i^1 [año⁻¹] representa la indisponibilidad del sistema cuando el componente i falla y Q_i^0 representa la indisponibilidad cuando es conocido que el componente i no va a fallar.

La medida Fussel-Vesely (FV) se define como el ratio entre el valor de la frecuencia de daño al núcleo (CDF) de la suma de todos los cut-sets que contienen un suceso básico dado y el valor CDF total. A diferencia de la medida Birnbaum, la Fussel-Vesely tiene en cuenta, además de la importancia estructural del componente en el sistema, la indisponibilidad de este.

$$FV_i = \frac{Q - Q_i^0}{Q} \approx \frac{u_i * B_i}{Q} \quad (3)$$

dónde Q [año⁻¹] representa la indisponibilidad media anual del sistema, Q_i^0 representa la indisponibilidad cuando es conocido que el componente i no va a fallar, u_i representa la indisponibilidad media del componente i y B_i corresponde a la medida de la importancia Birnbaum del componente i .

Se puede observar en esta esta ecuación la importancia del componente i en la indisponibilidad del sistema a partir de su propia disponibilidad y su importancia estructural.

Por último la medida Risk Achievement Worth (RAW), también conocida como Risk Increase Factor (RIF) permite evaluar como mediante la introducción de redundancias con respecto a un componente o a un conjunto de componentes es posible mejorar la fiabilidad y por tanto la indisponibilidad del sistema. Cuanto mayor sea el valor del factor RAW, la mejora obtenida con esta redundancia también será mayor.

$$RIF_i = \frac{Q_i^1}{Q} \approx 1 + \frac{B_i}{Q} \quad (4)$$

dónde Q [año⁻¹] representa la indisponibilidad media anual del sistema, Q_i^0 representa la indisponibilidad cuando es conocido que el componente i no va a fallar y B_i corresponde a la medida

de la importancia Birnbaum del componente i . (S. Martorell, I. Martón, P. Martorell, S. Carlos, A.I. Sánchez 2015).

5.6 SOFTWARE

El software empleado para la realización del trabajo es el Isograph Reliability Workbench. El programa permite al usuario realizar un estudio de la indisponibilidad de equipos o sistemas mediante su función para la realización de árboles de fallos. Además permite la integración de sistemas mediante árboles de eventos donde es posible evaluar la frecuencia de ocurrencia de cualquier secuencia accidental. También realiza el cálculo de los minimal cut sets siguiendo la lógica Booleana.

Además el programa permite realizar un análisis del sistema y de los resultados obtenidos mediante la aplicación de las medidas de importancia Fussel-Vesely, Birnbaum y Risk Achievement Worth (RAW) explicadas en el apartado 5.5 del presente trabajo.

Mediante estos estudios, el programa facilita la localización de los componentes más críticos que forman parte del sistema y de este modo permite llevar a cabo mejoras en la disponibilidad del sistema introduciendo mantenimiento y cambios de diseño.

6. MODELO DE DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA AUXILIAR (AAA)

6.1. MODELO DEL ÁRBOL DE FALLOS

En este apartado tiene como objetivo mostrar el árbol de fallos del sistema de alimentación de agua auxiliar implementado en el programa Isograph Reliability Workbench. Este árbol de fallos se encuentra en el Anexo del proyecto.

6.2 MODELO DE SUCESOS BÁSICOS

Como se ha explicado en el apartado 5.4, se emplean en el presente trabajo cuatro tipos de indisponibilidad (independiente, causa común de fallo, error humano y por mantenimiento) siendo de este modo también cuatro los tipos de sucesos básicos a tener en cuenta en el análisis.

A continuación se introduce un listado con todos los sucesos básicos que pueden tener lugar en el sistema AAA. En la Tabla 4 se hallan los modelos de sucesos básicos independientes utilizados en el trabajo, en la Tabla 5 los de errores humanos, en la Tabla 6 los sucesos básicos por mantenimiento y en la Tabla 7 por causa común de fallo.

- Independientes

Tabla 4. Modelos de los sucesos básicos independientes

ID_Suceso Básico	Descripción	Modelo/ Dato
MP1_FE	Fallo en espera de la motobomba 1. Fallo al arrancar	MP_FE
MP1_FD	Fallo en demanda de la motobomba 1. Fallo al arrancar en demanda	MP_FD
MP1_FF	Fallo en funcionamiento de la motobomba 1. Fallo en operación	MP_FF
MP2_FE	Fallo en espera de la motobomba 2. Fallo al arrancar	MP_FE
MP2_FD	Fallo en demanda de la motobomba 2. Fallo al arrancar en demanda	MP_FD
MP2_FF	Fallo en funcionamiento de la motobomba 2. Fallo en operación	MP_FF
TP1_FE	Fallo en espera de la turbobomba. Fallo al arrancar	TP_FE
TP1_FD	Fallo en demanda de la turbobomba. Fallo al arrancar en demanda	TP_FD
TP1_FF	Fallo en funcionamiento de la turbobomba. Fallo en operación	TP_FF
MV2_FE	Fallo en espera de la motoválvula 2. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
MV2_FD	Fallo en demanda de la motoválvula 2. Fallo al cambiar de posición	MV_FD
MV2_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula 2. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
MV4_FE	Fallo en espera de la motoválvula 4. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
MV4_FD	Fallo en demanda de la motoválvula 4. Fallo al cambiar de posición	MV_FD

MV4_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula 4. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
MV6_FE	Fallo en espera de la motoválvula 6. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
MV6_FD	Fallo en demanda de la motoválvula 6. Fallo al cambiar de posición	MV_FD
MV6_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula 6. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
MV7_FE	Fallo en espera de la motoválvula 7. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
MV7_FD	Fallo en demanda de la motoválvula 7. Fallo al cambiar de posición	MV_FD
MV7_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula 7. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
MV8_FE	Fallo en espera de la motoválvula 8. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
MV8_FD	Fallo en demanda de la motoválvula 8. Fallo al cambiar de posición	MV_FD
MV8_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula 8. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
MV9_FE	Fallo en espera de la motoválvula 9. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
MV9_FD	Fallo en demanda de la motoválvula 9. Fallo al cambiar de posición	MV_FD
MV9_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula 9. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
MV10_FE	Fallo en espera de la motoválvula 10. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
MV10_FD	Fallo en demanda de la motoválvula 10. Fallo al cambiar de posición	MV_FD
MV10_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula 10. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
A1	Fallo en demanda de la válvula neumática 1. Fallo al cambiar de posición	A_FD
A2	Fallo en demanda de la válvula neumática 2. Fallo al cambiar de posición	A_FD
A3	Fallo en demanda de la válvula neumática 3. Fallo al cambiar de posición	A_FD
VR1	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 1. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR2	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 2. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR3	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 3. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR4	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 4. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR5	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 5. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR6	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 6. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR7	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 7. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR8	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 8. Fallo al permitir	VR_FF

	el flujo	
VR9	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 9. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR10	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 10. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR11	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 11. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
VR12	Fallo en funcionamiento de la válvula de retención 12. Fallo al permitir el flujo	VR_FF
V1	Fallo en demanda de la válvula manual 1. Fallo para permaneces abierta	V_FD
V2	Fallo en demanda de la válvula manual 2. Fallo para permaneces abierta	V_FD
V3	Fallo en demanda de la válvula manual 3. Fallo para permaneces abierta	V_FD
V4	Fallo en demanda de la válvula manual 4. Fallo para permaneces abierta	V_FD
V5	Fallo en demanda de la válvula manual 5. Fallo para permaneces abierta	V_FD
V6	Fallo en demanda de la válvula manual 6. Fallo para permaneces abierta	V_FD
V7	Fallo en demanda de la válvula manual 7. Fallo para permaneces abierta	V_FD
V8	Fallo en demanda de la válvula manual 8. Fallo para permaneces abierta	V_FD
V9	Fallo en demanda de la válvula manual 9. Fallo para permaneces abierta	V_FD
VC1	Fallo en demanda de la válvula de control 1.	VC_FD
VC3	Fallo en demanda de la válvula de control 3.	VC_FD
VC5	Fallo en demanda de la válvula de control 5.	VC_FD
C1_FE	Fallo en espera de la motoválvula C1. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
C1_FD	Fallo en demanda de la motoválvula C1. Fallo al cambiar de posición	MV_FD
C1_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula C1. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
C2_FE	Fallo en espera de la motoválvula C2. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
C2_FD	Fallo en demanda de la motoválvula C2. Fallo al cambiar de posición	MV_FD
C2_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula C2. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
C3_FE	Fallo en espera de la motoválvula C3. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
C3_FD	Fallo en demanda de la motoválvula C3. Fallo al cambiar de posición	MV_FD
C3_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula C3. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
C4_FE	Fallo en espera de la motoválvula C4. Fallo en mantener la posición, fallo estando cerrada.	MV_FE
C4_FD	Fallo en demanda de la motoválvula C4. Fallo al cambiar de posición	MV_FD

C4_FF	Fallo en funcionamiento de la motoválvula C4. Fallo en mantener la posición, fallo estando abierta.	MV_FF
-------	---	-------

- Errores humanos

Tabla 5. Modelos de los sucesos básicos por error humano

ID_Suceso Básico	Descripción	Modelo/Dato
FH_V1	Posición incorrecta de la válvula manual V1	FH_V1
FH_V2	Posición incorrecta de la válvula manual V2	FH_V2
FH_V3	Posición incorrecta de la válvula manual V3	FH_V3
FH_V4	Posición incorrecta de la válvula manual V4	FH_V4
FH_V5	Posición incorrecta de la válvula manual V5	FH_V5
FH_V6	Posición incorrecta de la válvula manual V6	FH_V6
FH_V7	Posición incorrecta de la válvula manual V7	FH_V7
FH_V8	Posición incorrecta de la válvula manual V8	FH_V8
FH_V9	Posición incorrecta de la válvula manual V9	FH_V9
FH_MP1	Motobomba MP1 desenergizada	FH_MP1
FH_MP2	Motobomba MP2 desenergizada	FH_MP2
FH_VM2	Motoválvula MV2 desenergizada y cerrada	FH_VM2
FH_VM4	Motoválvula MV4 desenergizada y cerrada	FH_VM4
FH_VM6	Motoválvula MV6 desenergizada y cerrada	FH_VM6
FH_OPERAR_AAA	Fallo del operador al control del sistema (AAA)	FH_OPERAR_AAA

- Mantenimiento

Tabla 6. Modelos de los sucesos básicos por mantenimiento

ID_Suceso Básico	Descripción	Modelo/Dato
FM_A1	Mantenimiento del tramo A1 del AA	FM_A1
FM_A2	Mantenimiento del tramo A2 del AA	FM_A2
FM_A3	Mantenimiento del tramo A3 del AA	FM_A3
FM_B1	Mantenimiento del tramo B1 del AA	FM_B1
FM_B2	Mantenimiento del tramo B2 del AA	FM_B2
FM_B3	Mantenimiento del tramo B3 del AA	FM_B3

- Causa común de fallos (CCF)

Tabla 7. Modelos de sucesos básicos por causa común de fallos

ID_Suceso Básico	Descripción	Modelo/Dato
CCF_FD_MP1/2	Fallo de causa común al arranque motobombas 1/2	CCF_FD_MP1/2
CCF_FF_MP1/3	Fallo de causa común en operación motobombas 1/2	CCF_FF_MP1/3
CCF_FF_VC1/5	Fallo ed causa común a controlar de válvulas de control 1/5	CCF_FF_VC1/5

6.3 DATOS

Este apartado es empleado para mostrar los valores empleados en los modelos que representan matemáticamente los sucesos básicos. Es decir, se muestran los valores tomados para la tasa de fallos en espera y tiempo entre pruebas en los modelos "Dormant", la tasa de fallos en funcionamiento y tiempo de funcionamiento para los modelos "Time at Risk" y el valor de ρ de fallo en demanda para los modelos "Fixed".

Los datos empleados en los modelos pertenecientes a sucesos básicos de indisponibilidad por fallo individual de componentes corresponden a los ofrecidos por la base de datos de la IAEA (International Atomic Energy Agency).

Sin embargo, en cuanto a los sucesos básicos debidos a indisponibilidad por error humano, por mantenimiento y por fallos de causa común, los datos para implementar los modelos se toman de los valores reales proporcionados por la ANAV (Asociació Nuclear Ascó-Vandellós II) en referencia al APS de la central nuclear de Ascó.

Los datos de los sucesos básicos independientes por errores humanos y mantenimiento se muestran en la Tabla 8 mientras que en la Tabla 9 se encuentran los datos de los sucesos básicos por causa común de fallo (CCF).

Tabla 8. Datos de los sucesos básicos independientes, por errores humanos y mantenimiento

Dato	Modelo Estadístico	ρ	λ_B	T	λ_F	t_f
MP_FE	Dormant		0,00001 hr ⁻¹	8760 h		
MP_FD	Fixed	4,00E-03				
MP_FF	Time at risk				8,4E-6 hr ⁻¹	8 h
TP_FE	Dormant		1E-4 hr ⁻¹	8760 h		
TP_FD	Fixed	2,30E-02				
TP_FF	Time at risk				9,9E-4 hr ⁻¹	8 h
MV_FE	Dormant		1,5E-6 hr ⁻¹	8760 h		
MV_FD	Fixed	5,70E-03				
MV_FF	Time at risk				1,6E-7 hr ⁻¹	8 h
A_FD	Fixed	5,90E-03				
VR_FF	Time at risk				2,2E-7 hr ⁻¹	8 h
V_FD	Fixed	1,00E-04				
VC_FD	Fixed	2,50E-03				
FH_V1	Fixed	4,86E-05				
FH_V2	Fixed	3,07E-05				
FH_V3	Fixed	1,09E-04				
FH_V4	Fixed	3,20E-05				
FH_V5	Fixed	2,54E-04				
FH_V6	Fixed	1,09E-04				
FH_V7	Fixed	3,15E-05				
FH_V8	Fixed	3,07E-05				
FH_V9	Fixed	1,09E-04				
FH_MP1	Fixed	1,66E-05				
FH_MP2	Fixed	1,66E-05				
FH_VM2	Fixed	3,71E-06				

FH_VM4	Fixed	3,71E-06				
FH_VM6	Fixed	3,71E-06				
FH_OPERAR_AAA	Fixed	6,71E-05				
FM_A1	Fixed	4,48E-04				
FM_A2	Fixed	4,48E-04				
FM_A3	Fixed	4,48E-04				
FM_B1	Fixed	1,24E-03				
FM_B2	Fixed	2,54E-03				
FM_B3	Fixed	1,24E-03				

Tabla 9. Datos de los sucesos básicos por causa común de fallo (CCF)

Dato	Modelo estadístico	ρ (independiente)	λ_F (independiente)	β	ρ (CCF)	λ_F (CCF)
CCF_FD_MP1/2	Fixed	4,00E-03		0,067	2,68E-04	
CCF_FF_MP1/3	Time at Risk		8,4E-6 hr ⁻¹	0,067		5,628E-07
CCF_FF_VC1/5	Time at Risk			0,056		2,40E-06

7. ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA AAA

7.1 INDISPONIBILIDAD DEL SISTEMA AAA

Una vez se lleva a cabo la modelización del sistema de alimentación de agua auxiliar mediante su correspondiente árbol de fallos y su implementación en el software de cálculo Isograph Reliability Workbench con los datos expuestos en el apartado 6.3 del presente documento para cada suceso básico, se obtienen, tras el cálculo del programa, resultados acerca de la indisponibilidad del sistema analizado a cualquier nivel del árbol de fallos. Esto significa que es posible obtener resultados tanto a nivel de evento TOP, en el caso de este trabajo sería el fallo del sistema AAA, como a nivel de eventos que dan forma al TOP, que podrían ser, en este caso, cada uno de los trenes del que está formado el sistema AAA.

En primera instancia resulta importante indicar el resultado de indisponibilidad obtenido para el evento TOP, evento definido como fallo del sistema de alimentación de agua auxiliar. El valor resultante es de $7.151E-05$.

Si se analiza el árbol de eventos de arriba hacia abajo es posible ver las contribuciones al evento TOP, y en un primer escalón se aprecia que el fallo del sistema AAA sucede si se produce un error humano al operar el sistema o si fallan los tres trenes que forman el AAA a la vez. La contribución a la indisponibilidad ya comentada del TOP por parte del error humano al operar es de $6.71E-05$ mientras que la indisponibilidad de los tres trenes a la vez toma un valor de $4.41E-06$. Estos tres primeros valores quedan recogidos en la Tabla 10.

A su vez se ha calculado la indisponibilidad de cada tren de manera que la del tren 1 es de 0.01535, la del tren 2 es de 0.0167 y la indisponibilidad del tren 3 toma el valor de 0.01535.

Si se lleva a cabo un estudio de estos primeros resultados es correcto afirmar que resulta más importante para la indisponibilidad total del sistema el fallo humano al operar el sistema AAA que el posible fallo de los tres trenes a la vez.

Por otro lado, entrando en los resultados de los trenes por separado, se puede observar que los resultados de indisponibilidad obtenidos son idénticos en los trenes 1 y 3, y un poco mayor el del tren 2. Esto resulta lógico ya que se trata de trenes redundantes y que están formados por los mismos componentes excepto en el caso del tren 2 que utiliza una turbobomba en lugar de una bomba motorizada como en los trenes 1 y 3.

Para conseguir un mayor entendimiento del sistema objeto de estudio se ha analizado la indisponibilidad de varios tramos dentro de cada tren; en concreto los tramos que se encuentran entre los generadores de vapor y la primera interconexión y el resto de tren en el que existen dos interconexiones.

En el tren 1 estos dos tramos son nombrados como como tramo de 1-4 al primero de ellos y tramo de 4 a tanque al resto del tren. El tramo de 1-4 muestra un valor de indisponibilidad de 0.01535 mientras que el tramo de 4 a tanque toma un valor de $2.573E-07$.

Los tramos analizados en el tren 2 son el tramo de 2-5 y el tramo de 5 a tanque. En este caso el primero de ellos toma el valor de 0.01533 y el resto del tren presenta una indisponibilidad de 0.001397.

Por último, en el tren 3 se ha analizado el tramo de 3-6 y el tramo de 6 a tanque obteniéndose en el primero un resultado de indisponibilidad de 0.01535 y en el segundo de 2.573E-07. Los valores obtenidos para los trenes se muestran en la Tabla 11.

A la luz de estos resultados queda demostrada la criticidad de los tramos 1-4, 2-5 y 3-6, los cuales no poseen ninguna redundancia o interconexión por lo que en caso de fallo de estos el tren fallará. En caso de los restantes tramos analizados, está claro por tanto que las interconexiones transfieren al tren y por lo tanto al sistema una fiabilidad mayor en caso de producirse un fallo, fiabilidad que acaba traduciéndose en una menor aportación a la indisponibilidad total del sistema.

Se muestra a continuación las tablas donde quedan resaltados los resultados analizados anteriormente.

Tabla 10. Indisponibilidad del sistema AAA

Suceso	Indisponibilidad
TOP	7.151E-05
Fallo de los 3 trenes	4.41E-06
Fallo al operar sistema AAA	6.71E-05

Tabla 11. Resultados de la indisponibilidad del sistema por trenes y por tramos

Tren	Indisponibilidad total	Tramo	Indisponibilidad
1	0,01535	de 1-4	0,01535
		de 4 a tanque	2,573E-07
2	0,0167	de 2-5	0,01533
		de 5 a tanque	0,001397
3	0,01535	de 3-6	0,01535
		de 6 a tanque	2,573E-07

7.2 MEDIDA DE IMPORTANCIA FUSSELL-VESELY

Como ya se ha explicado, la medida Fussell-Vesely (FV) se define como el ratio entre el valor de la indisponibilidad de la suma de todos los cut-sets que contienen un suceso básico dado y el valor de la indisponibilidad total del sistema. Por tanto se trata de una medida que evalúa tanto la importancia estructural del componente en el sistema como la indisponibilidad del mismo.

Los resultados obtenidos en el estudio del sistema de alimentación de agua auxiliar (AAA) se muestran a continuación en forma de gráfica en la Figura 4, que es el modo en el que se muestran en el programa informático empleado, y en formato numérico en la Tabla 12. Se han hallado los 18 sucesos básicos más importantes dentro del sistema.

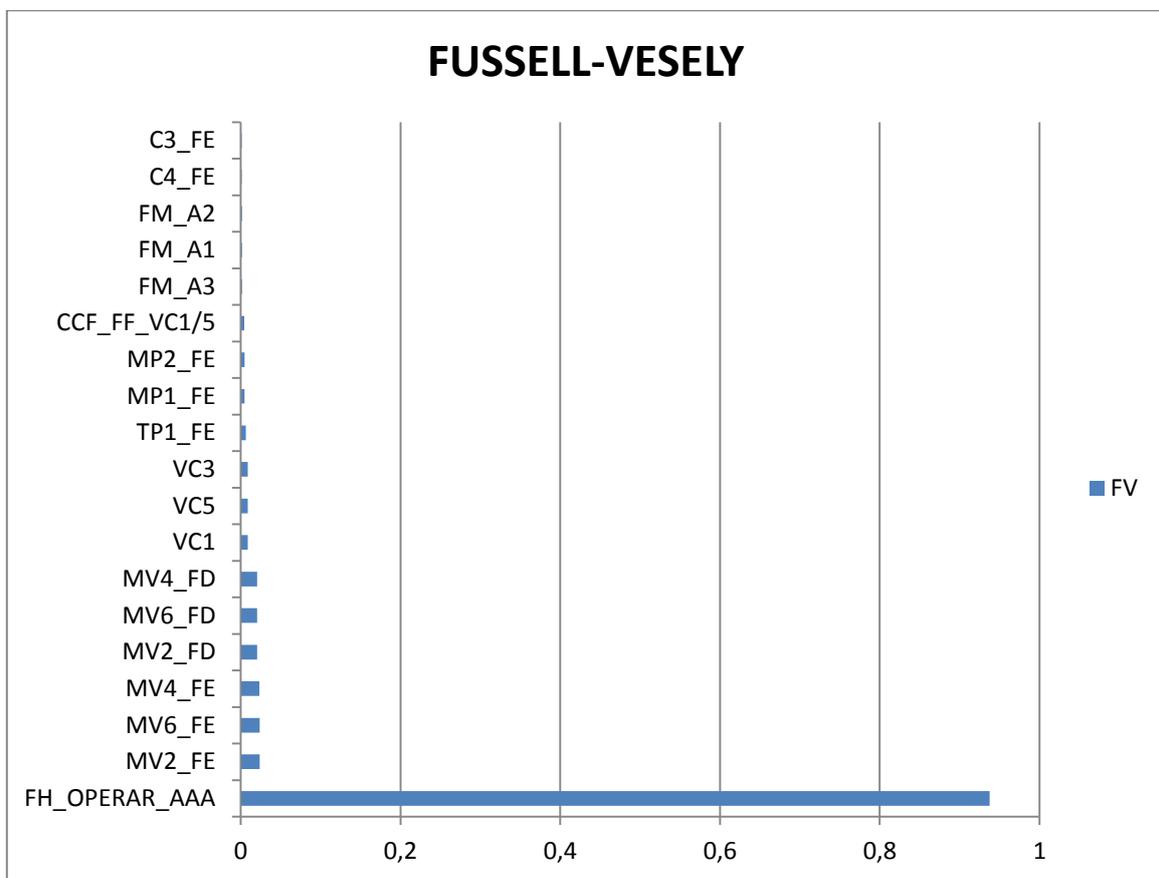


Figura 4. Resultados del estudio Fussell-Vesely.

Tabla 12. Resultados del estudio de la medida Fussell-Vesely

ID suceso básico	FV
FH_OPERAR_AAA	0,9376
MV2_FE	0,02373
MV6_FE	0,02373
MV4_FE	0,02345
MV2_FD	0,02068
MV6_FD	0,02068
MV4_FD	0,02043
VC1	0,009069
VC5	0,009069
VC3	0,008963
TP1_FE	0,006519
MP1_FE	0,004996
MP2_FE	0,004996
CCF_FF_VC1/5	0,004521
FM_A3	0,00165
FM_A1	0,00165
FM_A2	0,001606
C4_FE	0,001069
C3_FE	0,001069

De los resultados se obtiene de manera automática una clasificación de los sucesos básicos más importantes y por tanto, también de los componentes más críticos dentro del sistema.

Mediante el estudio de los resultados de la medida Fussell-Vesely se reafirman los resultados y conclusiones hallados mediante el análisis de indisponibilidad del sistema. Es decir, el fallo humano al operar el sistema AAA se vuelve a eruir como el suceso más importante a controlar para evitar fallos del sistema.

A continuación encontramos las válvulas motorizadas MV2, MV4 y MV6 tanto en espera como en demanda y las válvulas de control VC1, VC3 y VC5. También aparecen entre los sucesos más importantes el de causa común de fallo de las válvulas de control VC1 Y VC5 (CCF_FF_VC1/5) y el mantenimiento de los tramos A1 (de 1-4), A2 (de 2-5) y A3 (de 3-6). Todos estos sucesos básicos se dan en los tramos A1, A2 y A3, hecho que también respalda las anteriores conclusiones sobre la importancia de estos tramos dentro de la indisponibilidad del sistema. El análisis de esta medida de importancia permite además distinguir cuales son los sucesos básicos con mayor peso en la indisponibilidad de estos tramos de manera que se facilita una posible mejora de los componentes del mismo según sus importancias.

También aparecen en estos resultados como sucesos importantes el fallo en espera de las bombas motorizadas MP1 y MP2y el fallo en espera de la turbobomba TP1. Su relevancia viene provocada por

unas tasas de fallo en espera del orden de magnitud de 10^{-4} pero principalmente por el valor del periodo entre pruebas establecido en un año.

Por último se sitúan las motoválvulas C3 y C4 en fallo en espera cuya aparición se explica otra vez por el gran valor de periodo entre pruebas aunque también por su situación dentro de la segunda de las interconexiones entre trenes.

7.3 MEDIDA DE IMPORTANCIA BIRNBAUM

La medida de importancia Birnbaum (B) para un componente es independiente de su propia fiabilidad y solamente depende de la estructura del sistema. Es decir, esta medida evalúa como de importante es, en la indisponibilidad, la posición que ocupa el componente dentro del sistema.

Los resultados obtenidos en el estudio del sistema de alimentación de agua auxiliar (AAA) se muestran a continuación en forma de gráfica en la Figura 5, que es el modo en el que se muestran en el programa informático empleado, y en formato numérico en la Tabla 13.

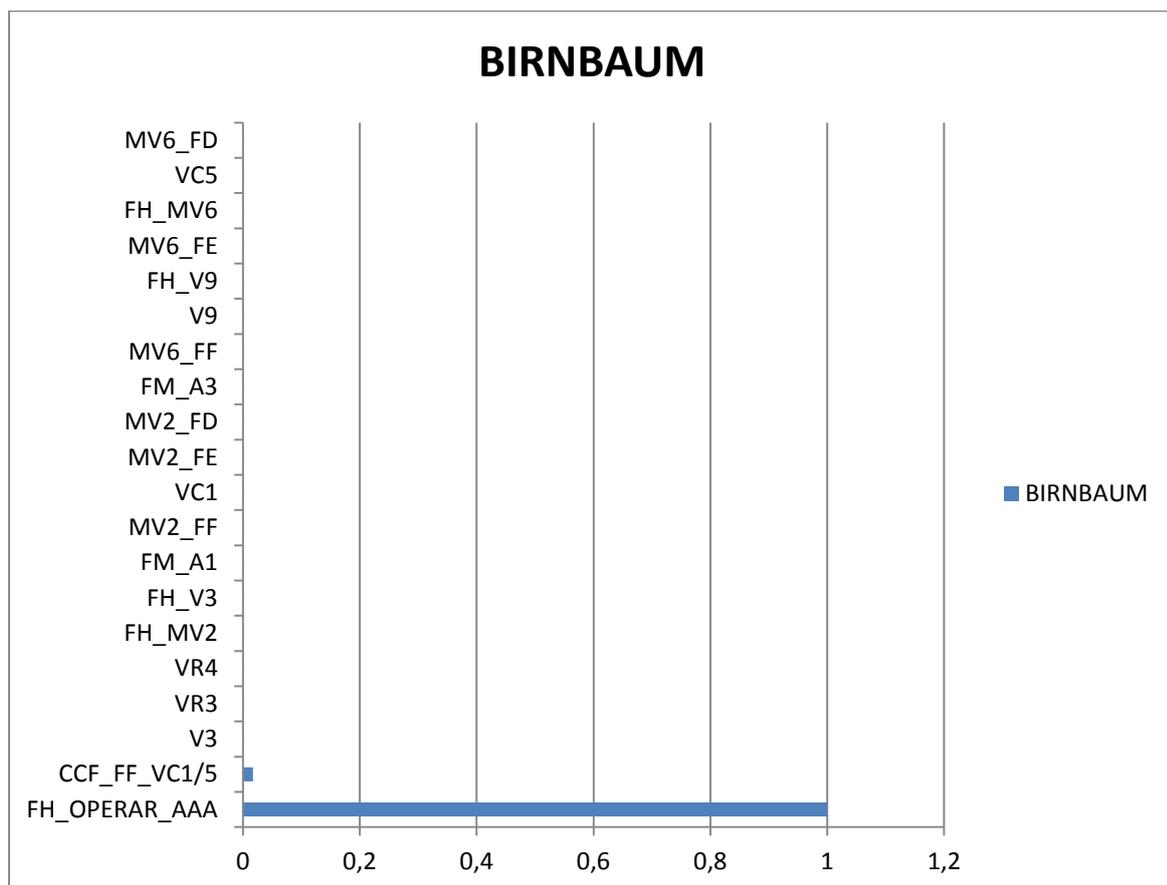


Figura 5. Resultados del estudio de la medida Birnbaum.

Tabla 13. Resultados del estudio de la medida de importancia Birnbaum

ID Suceso Básico	B
FH_OPERAR_AAA	1
CCF_FF_VC1/5	0,01685
V3	0,0002596
VR3	0,0002596
VR4	0,0002596
FH_MV2	0,0002596
FH_V3	0,0002596
FM_A1	0,0002596
MV2_FF	0,0002596
VC1	0,0002596
MV2_FE	0,0002596
MV2_FD	0,0002596
FM_A3	0,0002596
MV6_FF	0,0002596
V9	0,0002596
FH_V9	0,0002596
MV6_FE	0,0002596
FH_MV6	0,0002596
VC5	0,0002596
MV6_FD	0,0002596

Los resultados que se obtienen del cálculo de la medida de importancia Birnbaum siguen la misma pauta que los de la medida Fussell-Vesely y no hacen más que reafirmar, desde un punto de vista estructural, la importancia de los sucesos básicos ya mencionados en este apartado.

El fallo humano al operar el sistema de alimentación de agua auxiliar (FH_OPERAR_AAA) se presenta como el suceso básico más importante o más crítico desde el punto de vista de la posición que ocupa en la estructura del sistema. Esto puede ser entendido al ver el árbol de fallos, donde se aprecia que se trata de un suceso que afecta directamente al evento TOP; en otras palabras, si tiene lugar este suceso básico de fallo humano se producirá el fallo en el sistema AAA.

Como se viene manifestando tras los resultados de cada medida, el resto de sucesos básicos que aparecen como más relevantes en el estudio Birnbaum son los correspondientes a los tramos A1, A2 y A3 de los trenes. Esta aparición viene provocada por la inexistencia de interconexiones y redundancias en estos tramos.

El primer suceso que aparece referente a los tramos mencionados es el de causa común de fallo en funcionamiento de las válvulas de control y tiene un mayor valor del Birnbaum por el hecho de que afecta al tren 1 y al tren 3.

Por último los sucesos básicos que aparecen pertenecen como se ha comentado a los tramos más cercanos a los generadores de vapor, pero esta vez ejercen su influencia a solo uno de los

componentes del tramo por lo que estructuralmente se encuentran en un mismo punto y esto conduce a que obtengan resultados de la medida Birnbaum idénticos.

8. PROPUESTAS DE MEJORA

Existen dos líneas básicas de actuación para garantizar la confiabilidad, y por tanto la seguridad y economía de la empresa:

- Por un lado mediante el diseño de equipos y sistemas inherentemente más fiables
- Por el otro a través de la implantación de planes de vigilancia y mantenimiento más ajustados para garantizar que se mantienen los niveles de fiabilidad y disponibilidad deseados a lo largo de la vida de la instalación.

Por esto y siguiendo los resultados obtenidos de indisponibilidad y medidas de importancia Fussell-Vesely y Birnbaum se plantean a continuación una serie de propuestas de mejora para reducir la indisponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar y dotar de este modo de una mayor seguridad a la central nuclear. Estas medidas son presentadas según el aspecto sobre el que se actúa como pueden ser diseño y componentes, mantenimiento y error humano.

- Cambios de diseño en componentes

Los conceptos de disponibilidad y fiabilidad están completamente relacionados, como se demuestra en el los análisis RAM (Reliability, Availability, Maintainability), por lo que en la búsqueda de una mayor disponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar resulta necesaria la toma de medidas de mejora basadas en realizar cambios de componentes del sistema por otros que posean una mayor fiabilidad.

Analizando los resultados de las medidas de importancia se llega a la conclusión de que los componentes sobre los que un posible cambio de los mismos va a tener una mayor influencia en la indisponibilidad del sistema son los que se encuentran en los tramos A1 (de 1-4), A2 (de 2-5) y A3 (de 3-6), especialmente sobre las válvulas motoras y las válvulas de control.

Tras un estudio de los datos de los componentes del sistema también se aprecia un factible cambio de turbobomba, ya que esta cuenta con un valor de tasa de fallos en espera y sobre todo un valor de tasa de fallos en demanda demasiado bajos con respecto a los del resto de componentes.

- Realizamos en primer lugar el estudio de cómo influye un cambio de turbobomba sobre la disponibilidad. Para ello reducimos un 10% los valores de tasa de fallos en espera, tasa de fallos en funcionamiento y tasa de fallos en demanda y mantenemos el periodo entre pruebas y tiempo de funcionamiento con los valores iniciales. Los datos de la turbobomba tras la mejora se muestran en la Tabla 14 mientras que los resultados de indisponibilidad se exponen en la Tabla 15 y Tabla 16.

Tabla 14. Datos de la turbobomba tras el cambio

Dato	ρ inicial	λ_E inicial	λ_F inicial	$\rho-10\%$	$\lambda_E-10\%$	$\lambda_F-10\%$
TP_FE		1E-4 hr ⁻¹			9.00E-05	
TP_FD	2.30E-02			2.07E-02		
TP_FF			9,9E-4 hr ⁻¹			8.91E-04

Tabla 15. Indisponibilidades con el cambio en la turbobomba

Suceso	Indisponibilidad
TOP	7.147E-05
Fallo de los 3 trenes	4.373E-06
Fallo al operar sistema AAA	6.71E-05

Tabla 16. Indisponibilidades por trenes y por tramos una vez realizado en cambio en la turbobomba

Tren	Indisponibilidad total	Tramo	Indisponibilidad
1	0.0094	de 1-4	0.01535
		de 4 a tanque	2.445E-07
2	0.009415	de 2-5	0.01533
		de 5 a tanque	1.292E-03
3	0.0094	de 3-6	0.01535
		de 6 a tanque	2.445E-07

- Partiendo otra vez de los valores iniciales, llevamos a cabo un cambio en las válvulas de control, reduciendo un 10% su valor de tasa de fallos en demanda. Los datos de las válvulas de control tras la mejora se muestran en la Tabla 17 mientras que los resultados de indisponibilidad se exponen en la Tabla 18 y Tabla 19.

Tabla 17. Datos de las válvulas de control tras el cambio

Dato	ρ inicial	$\rho-10\%$
VC_FD	0.0025	2.25E-03

Tabla 18. Indisponibilidades tras el cambio en las válvulas de control

Suceso	Indisponibilidad
TOP	7.132E-05
Fallo de los 3 trenes	4.222E-06
Fallo al operar sistema AAA	6.71E-05

Tabla 19. Indisponibilidades por trenes y por tramos una vez realizado en cambio en las válvulas de control

Tren	Indisponibilidad total	Tramo	Indisponibilidad
1	0.0094	de 1-4	0.0151
		de 4 a tanque	2.573E-07
2	0.009415	de 2-5	0.01508
		de 5 a tanque	1.397E-03
3	0.0094	de 3-6	0.0151
		de 6 a tanque	2.573E-07

Tanto en el caso del cambio en la turbobomba como en el de las válvulas de control la mejora en la indisponibilidad adquiere un valor bajo, en el primer caso se reduce en 4E-08 y en el segundo en 1.9E-07. El hecho de que sea más relevante el cambio en las válvulas de control (VC) que en la turbobomba (TP) se explica por varios motivos; el primero de ellos tiene que ver con que solo existe una turbobomba (TP) en el sistema, concretamente en el tren 2, mientras que se dispone de una válvula de control (VC) en cada tren. La segunda explicación de esta diferencia viene dada por la situación de cada tipo de componente dentro del sistema AAA, la turbobomba se encuentra en un tramo que dispone de interconexión mientras que las válvulas de control se encuentran en los tramos que no se encuentran interconectados, de modo que si fallan supone el fallo de todo el tren.

Estos resultados vuelven a relevar la criticidad de los componentes que se hallan en los tramos más cercanos a los generadores de vapor, es decir, los tramos sin interconexiones (A1, A2 Y A3). De este modo, los resultados obtenidos certifican como correcto el criterio de la mejora de los componentes de estos tramos críticos en materia de disponibilidad.

- Cambios en la frecuencia entre periodos de pruebas

Se puede apreciar en los resultados obtenidos mediante el estudio de la medida Fussell-Vesely que adquieren mucha importancia los fallos en espera (FE) de componentes como las válvulas motorizadas, la turbobomba y las bombas motorizadas. Esta información induce a realizar un análisis de los datos empleados para estos sucesos básicos, es decir, de la tasa de fallos en espera y del periodo entre pruebas, del cual se plantea como propuesta de mejora la reducción de dicho periodo de un año, 8760 horas, a uno de 720 horas.

Sin embargo el cambio de esta frecuencia entre pruebas no tiene el mismo impacto en los tres componentes que tienen funcionamiento en espera. Se observa, en esta línea, que una reducción de 8760 a 720 horas del periodo entre pruebas de las bombas motorizadas (MP) y de la turbobomba (TP) afecta muy poco a la indisponibilidad del sistema. Concretamente, este cambio lleva al valor de indisponibilidad inicial de 7.151E-05 al de 7.1E-05 por lo que desde el punto de vista de costes- resultados, es razonable en este caso aumentar el periodo entre pruebas. El periodo entre pruebas de las bombas motorizadas y la turbobomba, y adopta el valor 10920 horas, correspondientes a 1 año y 3 meses.

En cuanto a las válvulas motorizadas, se ha observado que el cambio del periodo T entre pruebas si tiene un impacto relevante sobre la indisponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar y por tanto se establece ahora en 720 horas.

Las mejoras obtenidas introduciendo esta medida al escenario inicial se muestran en la Tabla 20 para la indisponibilidad del sistema y de los tres trenes conjuntamente, y en la Tabla 21 para los trenes por separado. En la Tabla 22 se muestran los resultados de las medida de importancia Fussell-Vesely.

Tabla 20. Indisponibilidades tras el cambio en el periodo entre pruebas de las MV

Suceso	Indisponibilidad
TOP	6.837E-05
Fallo de los 3 trenes	1.265E-06
Fallo al operar sistema AAA	6.71E-05

Tabla 21. Indisponibilidades por trenes y por tramos una vez introducida la mejora en el periodo entre pruebas

Tren	Indisponibilidad total	Tramo	Indisponibilidad
1	0.0094	de 1-4	0.0094
		de 4 a tanque	7.898E-08
2	0.009415	de 2-5	0.009381
		de 5 a tanque	1.829E-03
3	0.0094	de 3-6	0.0094
		de 6 a tanque	7.898E-08

Tabla 22. Resultados del estudio de la medida Fussell-Vesely tras la mejora

ID suceso básico	FV
FH_OPERAR_AAA	0.9813
MV4_FD	0.008975
MV6_FD	0.008856
MV2_FD	0.008856
VC3	0.003936
VC1	0.003884
VC5	0.003884
TP1_FE	0.003559
CCF_FF_VC1/5	0.003172
MP1_FE	0.003034
MP2_FE	0.003034
MV4_FE	0.0008499
MV6_FE	0.0008387
MV2_FE	0.0008387
C3_FD	0.0008133
C4_FD	0.0008133
FM_A2	0.0007054
FM_A3	0.000696
FM_A1	0.000696

Tras la implantación de esta mejora se aprecia una disminución de la indisponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar debida a la reducción del periodo entre pruebas de las válvulas motorizadas. Además se ha aumentado la frecuencia entre pruebas de aquellos componentes que apenas influyen en la indisponibilidad, como es el caso de turbobomba y bombas motorizadas, de modo que se consigue evitar costes por mantenimiento innecesarios.

Con todo esto la reducción obtenida es de $3.14E-6$, resultado del que es posible clasificar el parámetro de periodo entre pruebas como uno de los más relevantes en la seguridad de las centrales. Esto no hace más que resaltar la importancia de una correcta estrategia de mantenimiento.

En cuanto a los resultados del estudio de importancia Fussell-Vesely (FV) se aprecia la desaparición del suceso básico fallo en espera de válvulas motorizadas 2, 4 y 6 (MV2_FE, MV4_FE, MV6_FE) y una reducción del valor del FV en el resto de sucesos básicos frente al escenario inicial, salvo en el caso del FH_OPERAR_AAA.

- Cambios en los fallos por errores humanos

Los fallos por errores humanos se componen, desde un punto de vista de la ingeniería, de dos factores que los definen. Encontramos entonces la parte cognitiva y la parte mecánica del fallo. La primera de ellas hace referencia a el periodo de tiempo del que dispone el operador para realizar su actuación, cuanto mayor sea esta ventana de tiempo menor será la probabilidad de fallo por lo que se puede actuar sobre esta parte realizando cambios de diseño y de componentes.

En referencia al segundo factor que caracteriza el fallo humano este hace referencia a la propia actuación del operador, es decir, a si el operador realiza su actuación de manera adecuada. Esta parte puede ser mejorada mediante entrenamiento de los operadores para mejorar su preparación.

En el caso que nos ocupa, como se muestra mediante los datos de las medidas Fussell-Vesely y Birnbaum, el suceso básico más importante en el sistema es el fallo humano al operar el sistema (FH_OPERAR_AAA). Este error humano se caracteriza por tener únicamente una sola parte de las nombradas anteriormente sobre la que poder actuar, y esta es la manual. Si evaluamos ahora el valor aplicado a este suceso básico puede verse que se trata de un valor bajo, es decir ya se considera la preparación del operador por lo que no es posible realizar una mejora sobre el mismo.

- Resultados una vez introducidas todas las propuestas de mejora

En este apartado se exponen los efectos de las propuestas explicadas y analizadas anteriormente aplicadas de manera conjunta al escenario inicial del sistema de alimentación de agua auxiliar.

La indisponibilidad del sistema y conjunto de los trenes tras introducir todas las medidas de mejora se encuentran representadas en la Tabla 23. Los resultados de las indisponibilidades por trenes y por tramos se muestran en la Tabla 24 y en la Tabla 25 se exponen los resultados de la medida Fussell-Vesely tras la implementación de todas las mejoras.

Tabla 23. Indisponibilidades tras introducir todas las medidas de mejora

Suceso	Indisponibilidad
TOP	6.827E-05
Fallo de los 3 trenes	1.17E-06
Fallo al operar sistema AAA	6.71E-05

Tabla 24. Indisponibilidades por trenes y por tramos una vez introducidas todas las propuestas

Tren	Indisponibilidad total	Tramo	Indisponibilidad
1	0.0094	de 1-4	0.009151
		de 4 a tanque	7.439E-08
2	0.009415	de 2-5	0.009132
		de 5 a tanque	1.699E-03
3	0.0094	de 3-6	0.009151
		de 6 a tanque	7.439E-08

Tabla 25. Resultados del estudio de la medida Fussell-Vesely tras incorporar al sistema todas las mejoras

ID suceso básico	FV
FH_OPERAR_AAA	0.9827
MV4_FD	0.0086
MV6_FD	0.008335
MV2_FD	0.008335
VC3	0.003395
VC1	0.00329
VC5	0.00329
TP1_FE	0.003197
CCF_FF_VC1/5	0.003067

MP1_FE	0.002724
MP2_FE	0.002724
MV4_FE	0.0008144
MV6_FE	0.0007894
MV2_FE	0.0007894
C3_FD	0.0007546
C4_FD	0.0007546
FM_A2	0.0006759
FM_A3	0.0006551
FM_A1	0.0006551

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A la luz de los resultados obtenidos en el presente trabajo, el sistema de alimentación de agua auxiliar queda definido como una salvaguardia tecnológica segura por poseer una elevada disponibilidad.

El error humano al operar el sistema AAA (FH_OPERAR_AAA) se alza como el suceso básico que más contribuye a la indisponibilidad y los sucesos básicos asociados a los tramos A1 (de 1-4), A2 (de 2-5) y A3 (de 3-6) se muestran como los más críticos tras el FH_OPERAR_AAA.

Centrando la atención sobre el primer suceso básico nombrado en el párrafo anterior, es fácil entender la importancia de este ya que se trata de un suceso que afecta directamente al fallo del sistema AAA, como se puede ver en el Árbol de Fallos. En otras palabras, se trata de un error que si se produce conlleva, sin duda, al fallo del sistema.

En cuanto a la aparición de los sucesos pertenecientes a los tramos A1, A2 y A3, esta se explica por qué la función de estos tramos no puede ser realizada por ningún otro tramo, es decir, no dispone de interconexión con otro tren. Esto provoca su elevada relevancia dentro del sistema y conduce a la búsqueda de componentes más fiables para dichos tramos.

Por todo lo expuesto anteriormente, las medidas de mejora que se proponen para el sistema están relacionadas con estos “puntos débiles” de la instalación. Se propone una mejora en la preparación de los operarios, la reducción del periodo entre pruebas de los componentes con modo de fallo en espera y la sustitución de los componentes originariamente considerados por otros más fiables.

La primera medida, como ya se ha visto, no puede llevarse a cabo aunque teniendo en cuenta el análisis de las medidas de importancia, cualquier mejora en el error por operación del sistema se traducirá en una gran reducción en la indisponibilidad del sistema AAA.

En cuanto a la sustitución de componentes, queda en relevancia que la prioridad a la hora de cambiar componentes por otros más fiables se halla en los tramos anteriormente citados, A1, A2 y A3. Además, para que la mejora tenga un impacto considerable en materia de disponibilidad, la reducción de las tasas de fallos debe situarse por encima del 15%.

Las medidas tomadas con respecto al mantenimiento del sistema se centran en la frecuencia de periodos entre pruebas. Los tres componentes susceptibles de recibir esta mejora son las válvulas motorizadas, las bombas motorizadas y la turbobomba. Sin embargo no se actúa igual sobre los tres componentes por el hecho de que no todos ellos tienen la misma influencia sobre la indisponibilidad. De esta manera, el periodo entre pruebas de las válvulas motorizadas sí que se reduce hasta 720 horas y esta medida de mejora se posiciona como la más favorable a la hora de reducir la indisponibilidad del sistema.

En el extremo opuesto se hallan las bombas motorizadas y la turbobomba, cuyas frecuencias de periodos entre pruebas tienen tan poca influencia sobre la indisponibilidad que en lugar de seguir los pasos de las válvulas motoras, se opta por aumentar los periodos de pruebas a un año y tres meses de manera que desde el punto de vista de los costes por mantenimiento, existe un balance entre la disminución a las válvulas motoras y este aumento.

10. BIBLIOGRAFÍA

Weinberg A. (1994), *"The First Nuclear Era"*, Ed. AIP Press.

Yoshiaki O., Katsuo S. (2008), *"Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control"*, Ed. Springer.

"Instrucción IS-25, de 9 de junio de 2010, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios y requisitos sobre la realización de los análisis probabilistas de seguridad y sus aplicaciones a las centrales nucleares". BOE nº 153, de 24 Junio de 2010.

Martorell S., Martón I., Martorell P., Carlos S., Sánchez A.I. (2015), *"RAM based metrics for safety assessment of safety systems with application to ageing management"*. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. Universidad Politécnica de Valencia.

Martorell S., Martón I., Martorell P., Carlos S., Sánchez A.I. (2015), *"Risk based prioritization and management of relevant ageing components"*. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. Universidad Politécnica de Valencia.

Guía de Seguridad 1.18. *"Medida de la eficacia del mantenimiento en centrales nucleares"*. Consejo de seguridad nuclear, 31 de octubre de 2007.

"Curso básico de ciencia y tecnología nuclear". Jóvenes nucleares.

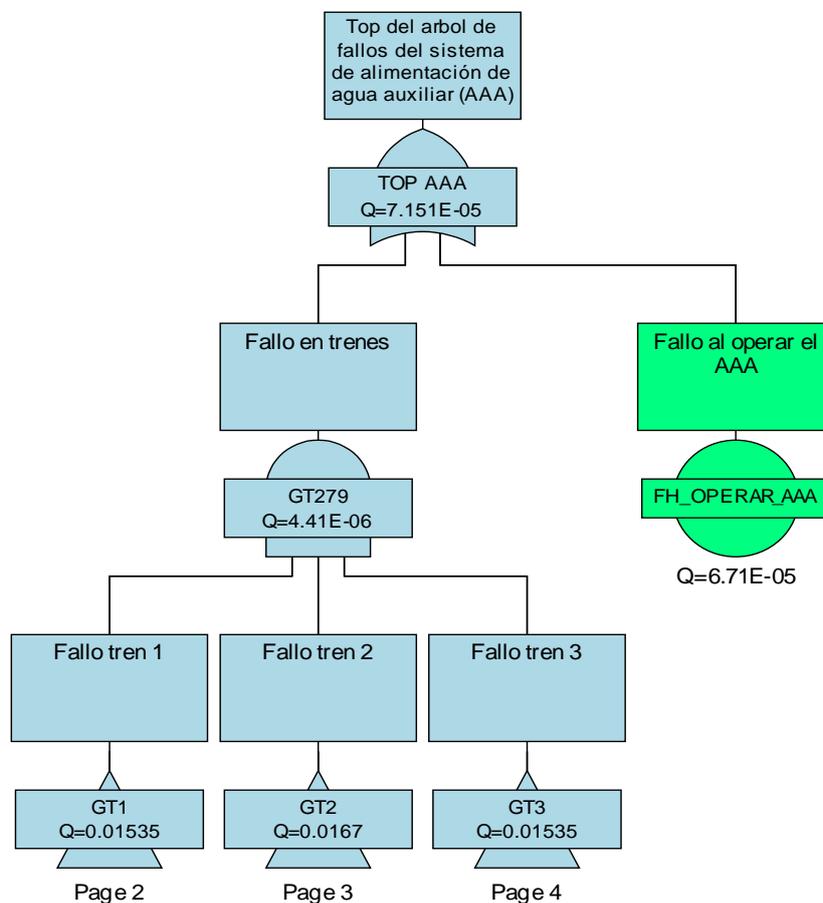
Aven, T. (1992), *"Reliability and Risk Analysis"*, Ed. Elsevier Applied Science.

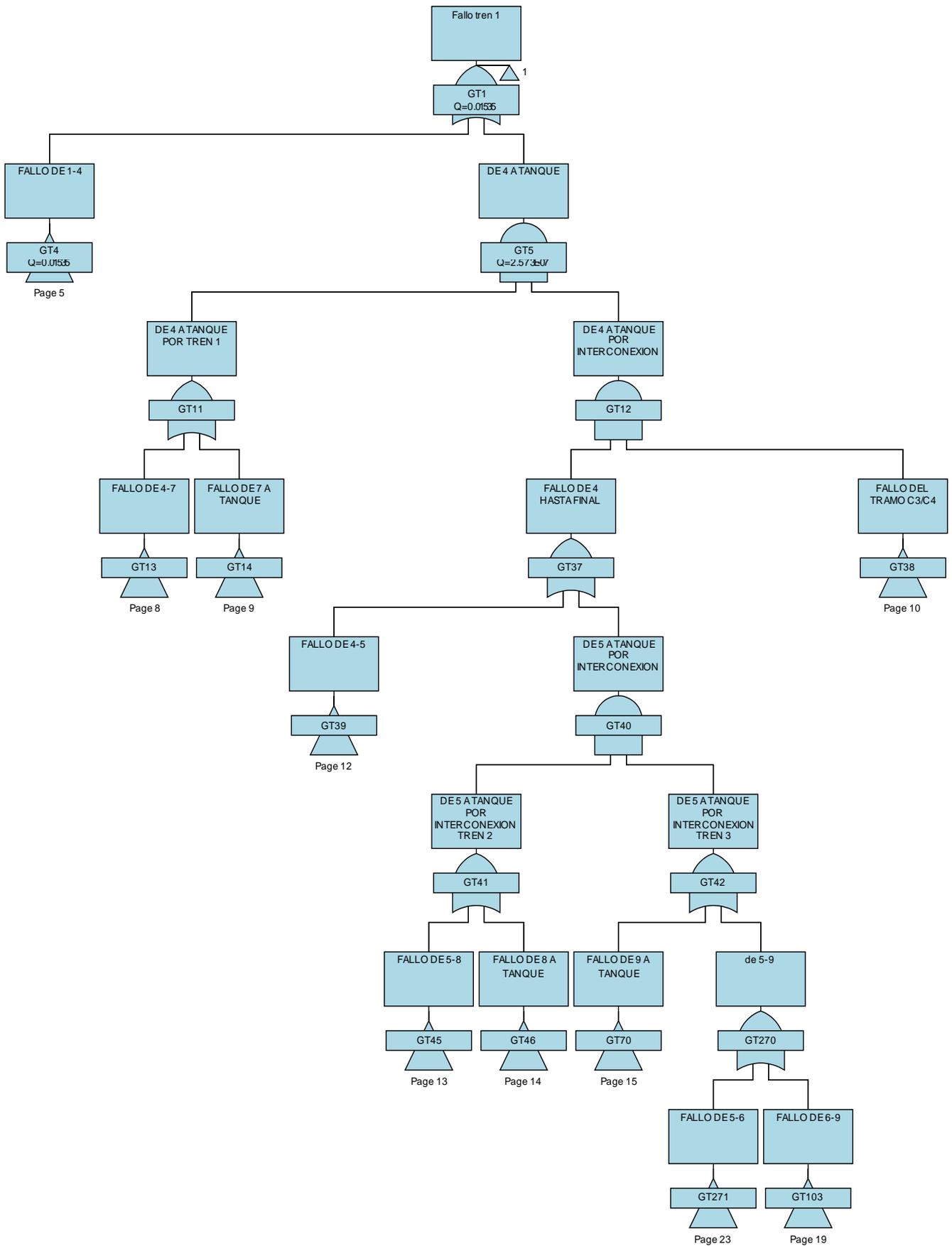
11. ANEXO

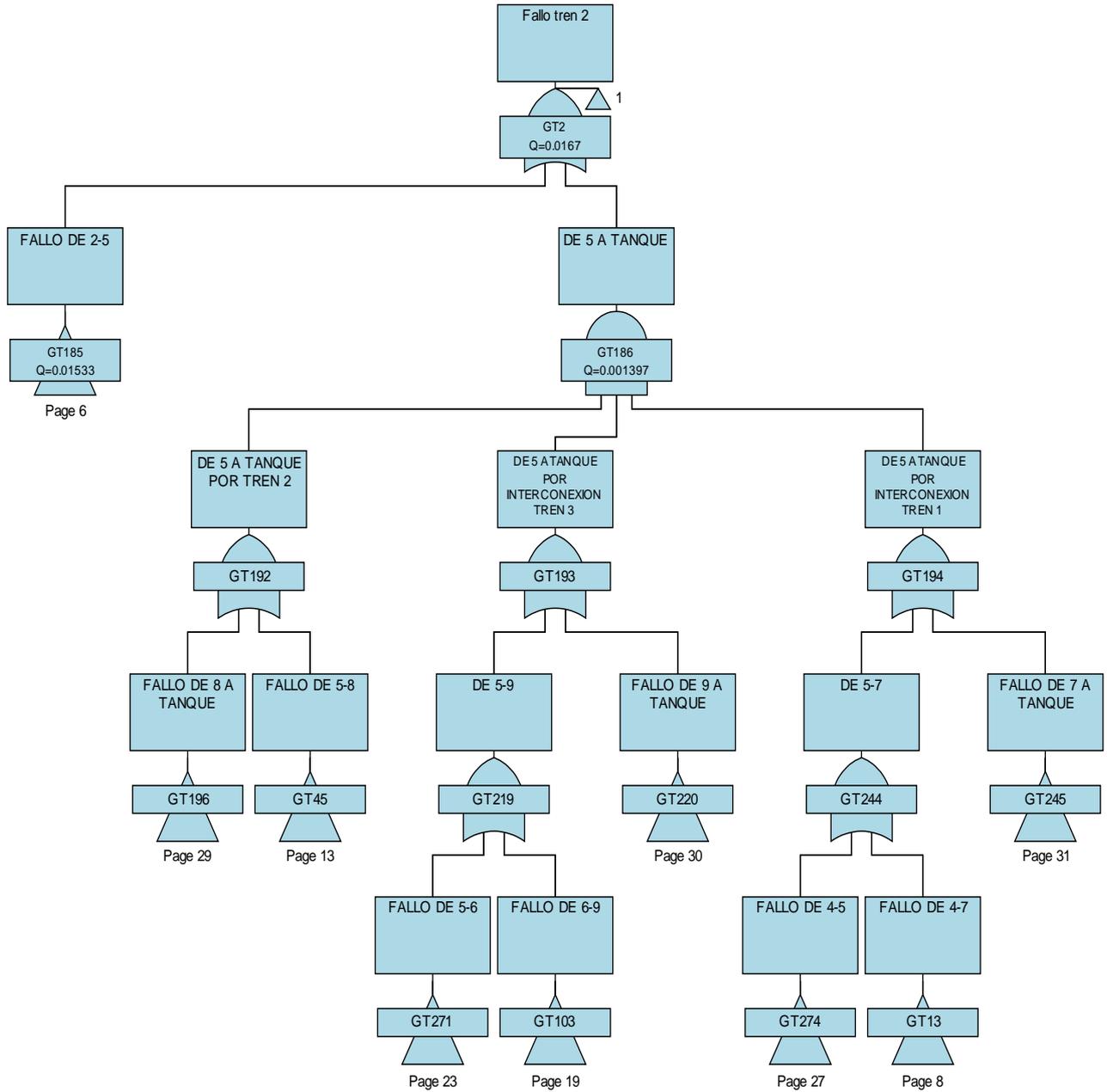
La numeración del anejo se realiza de forma independiente a la del resto de la memoria de modo que sea coherente con las referencias a páginas usando la forma "page X" utilizado para indicar donde se sitúa la continuación de cada ramificación del árbol de fallos.

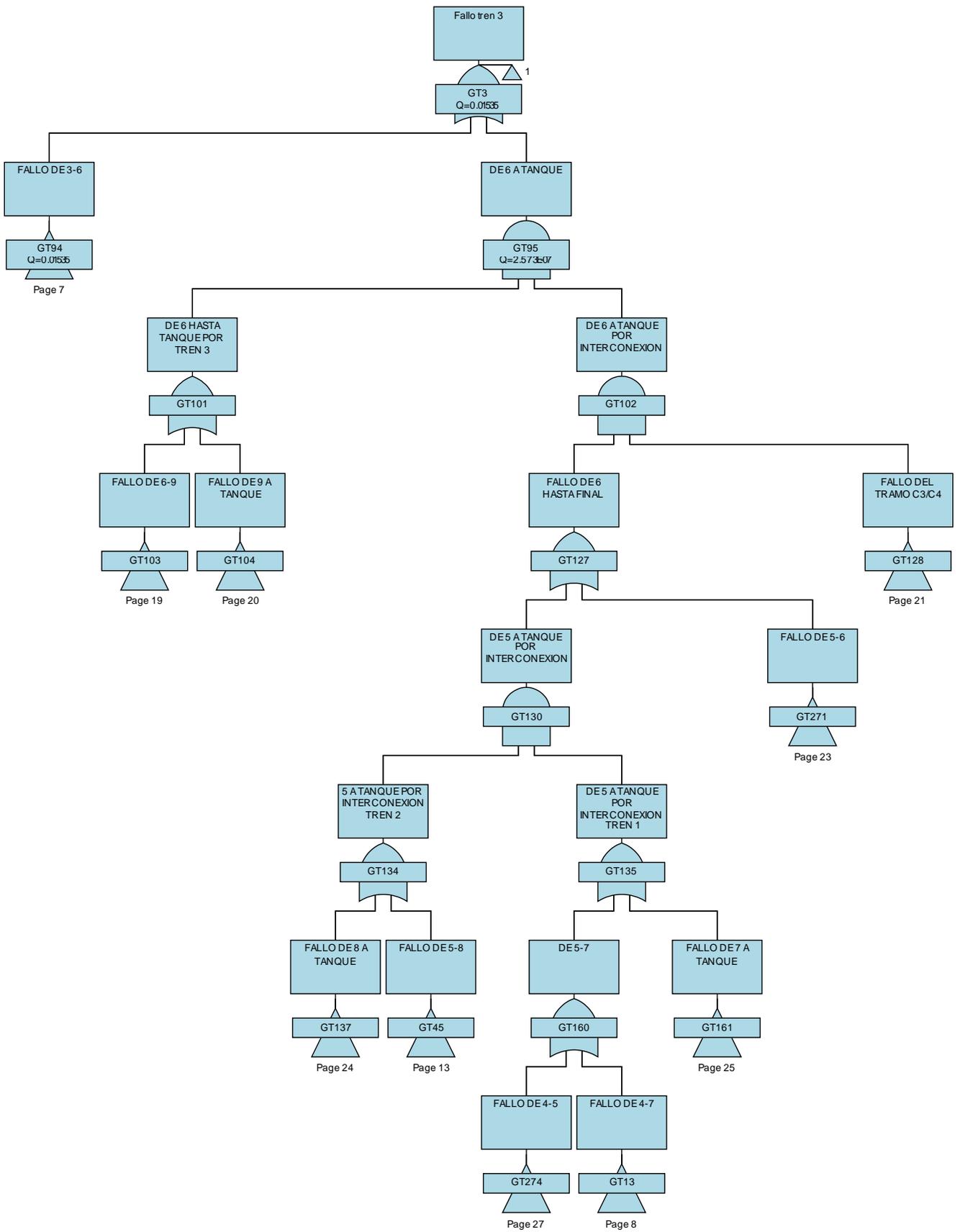
De las referencias mostradas como "page X", el número situado en la X hace referencia al número de página del anexo, expresado en el pie de página en números romanos.

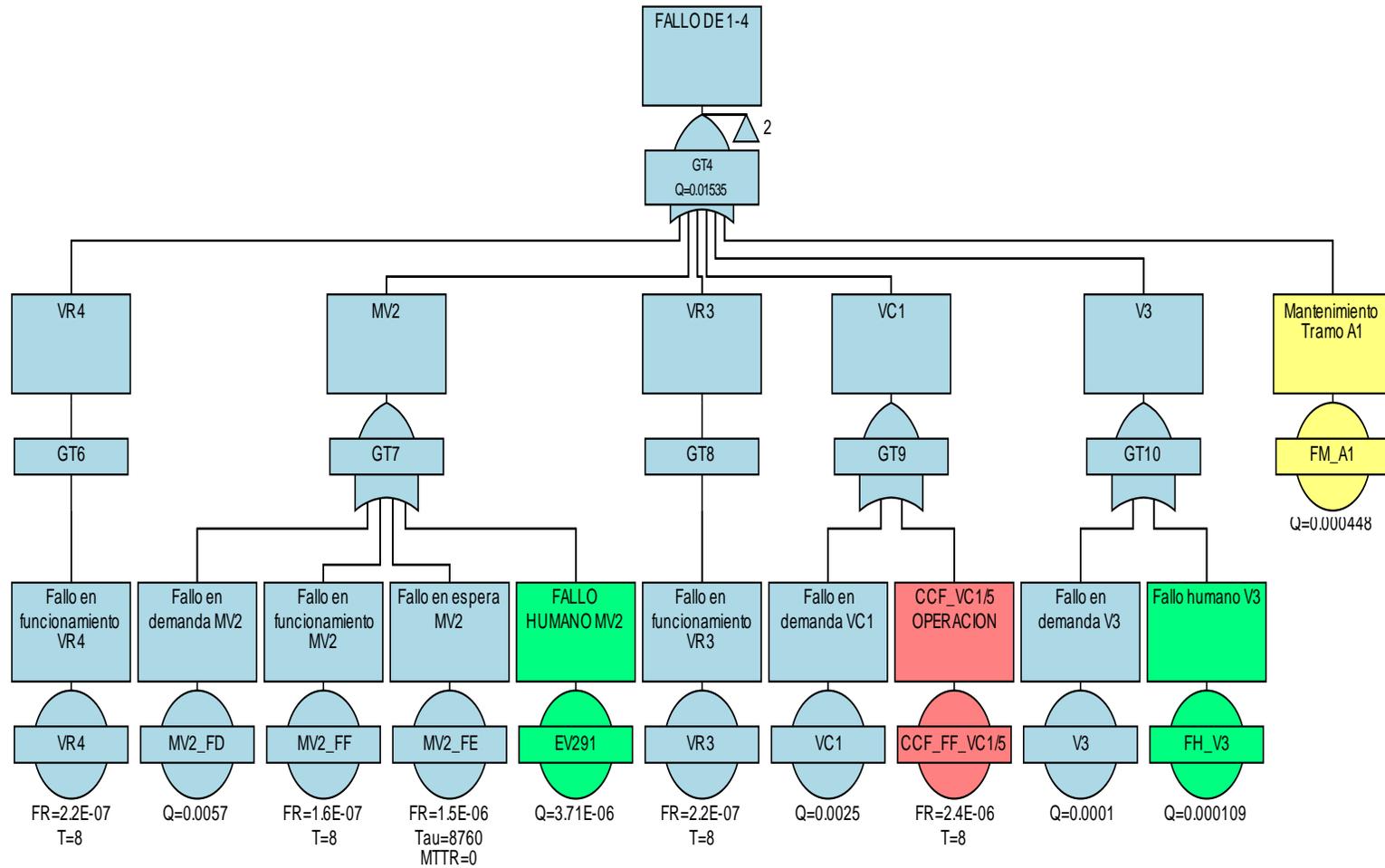
Se define el suceso "TOP" del Árbol de Fallos como fallo del sistema de alimentación de agua auxiliar (AAA).

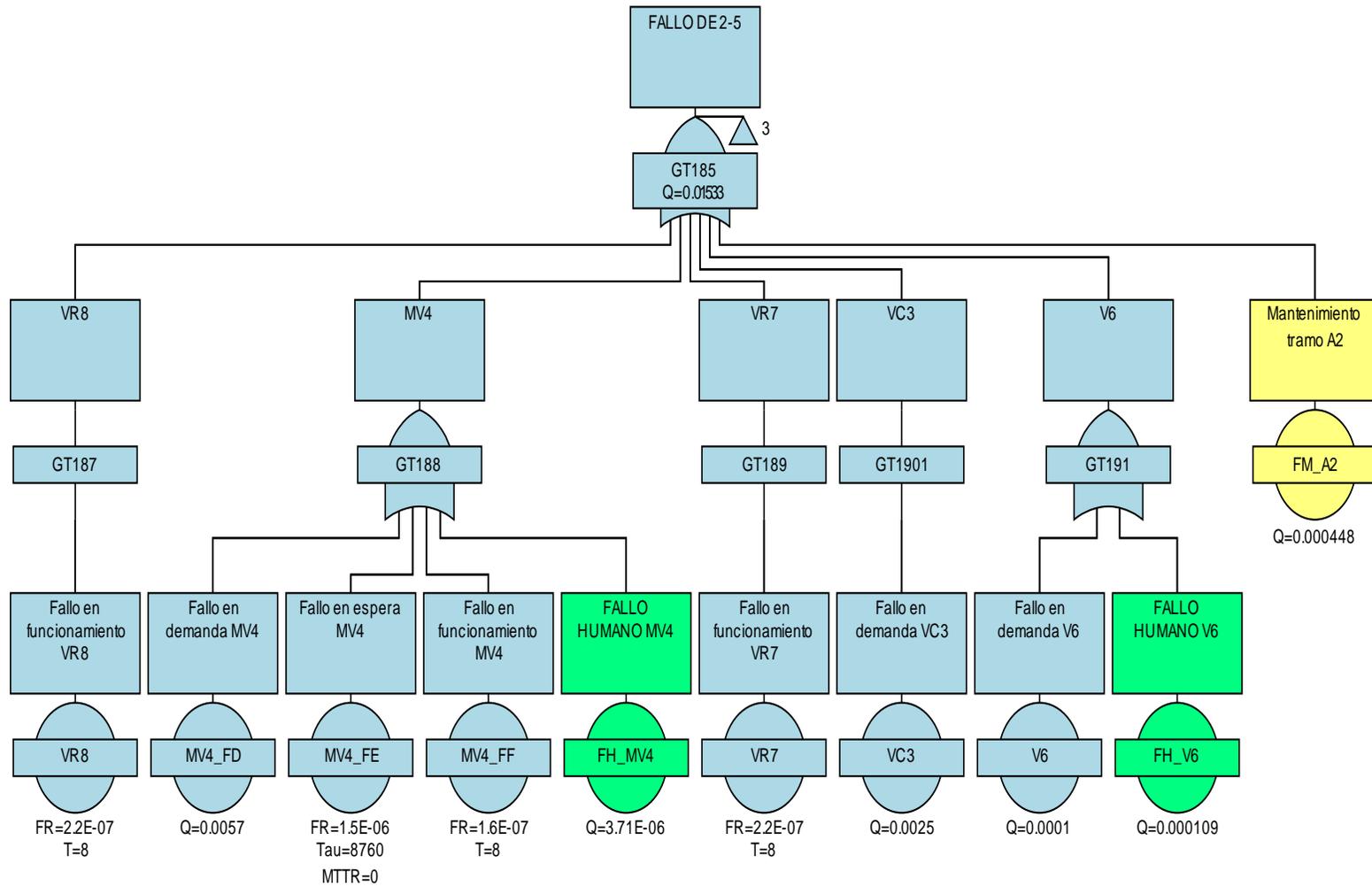


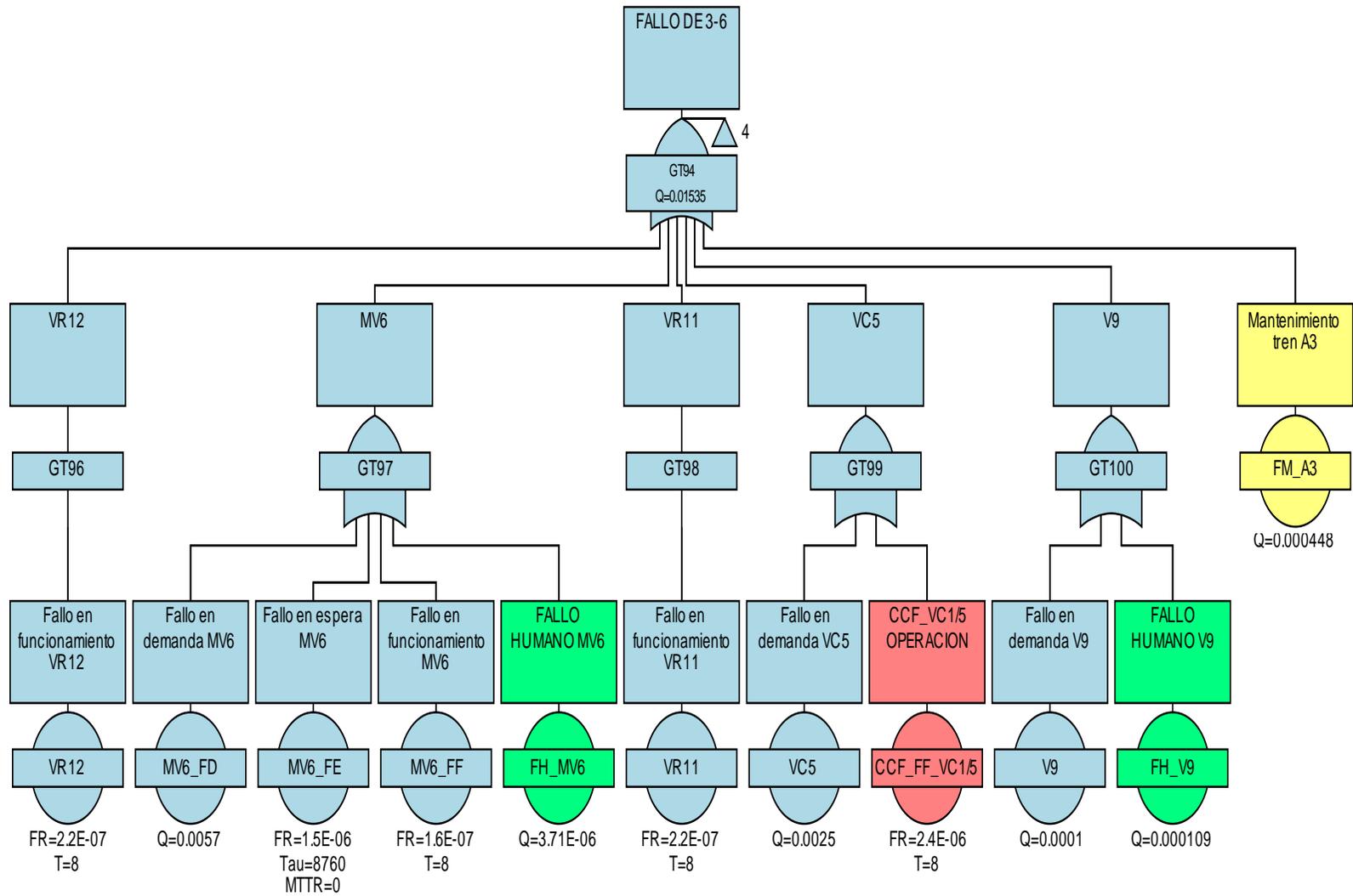


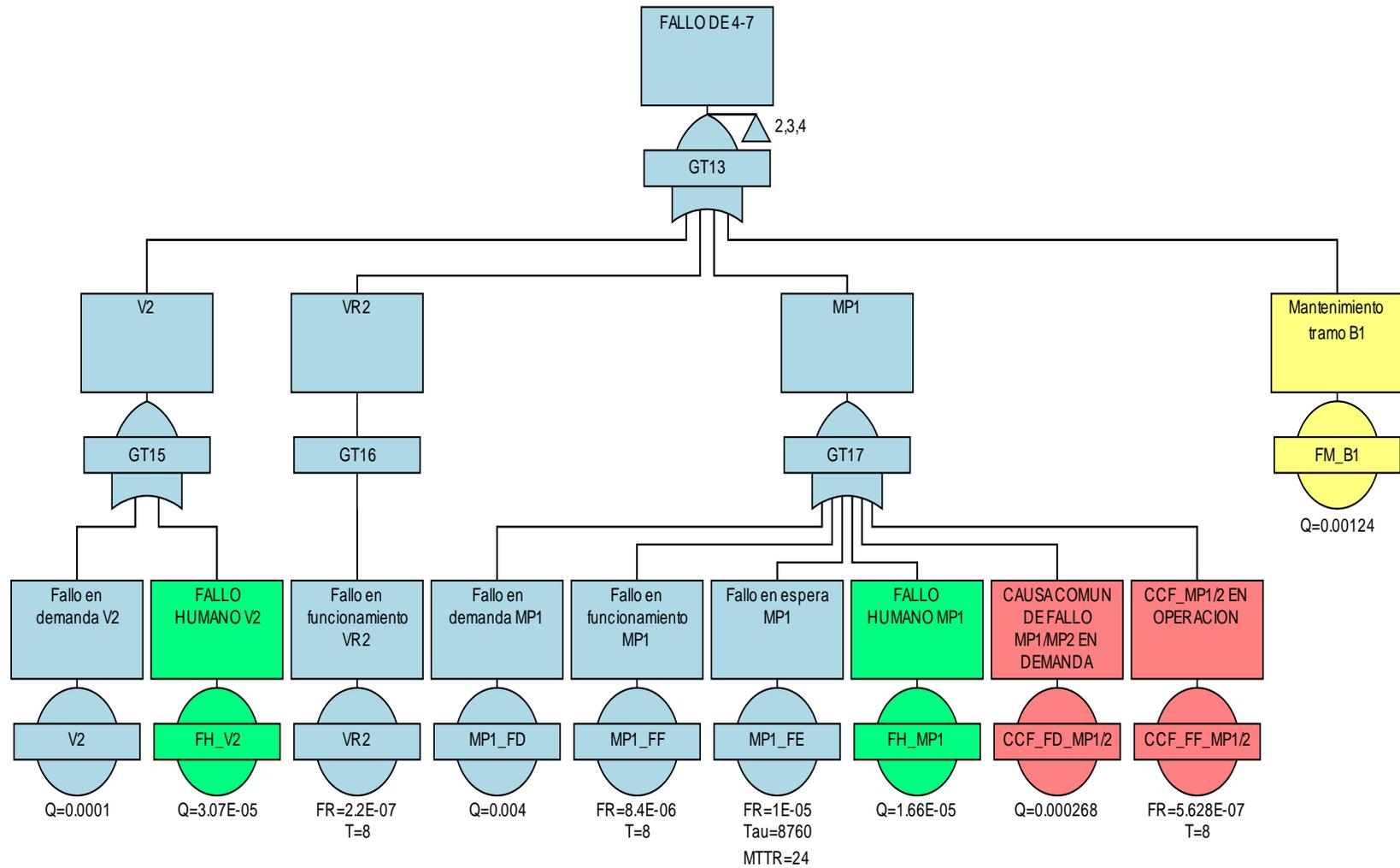


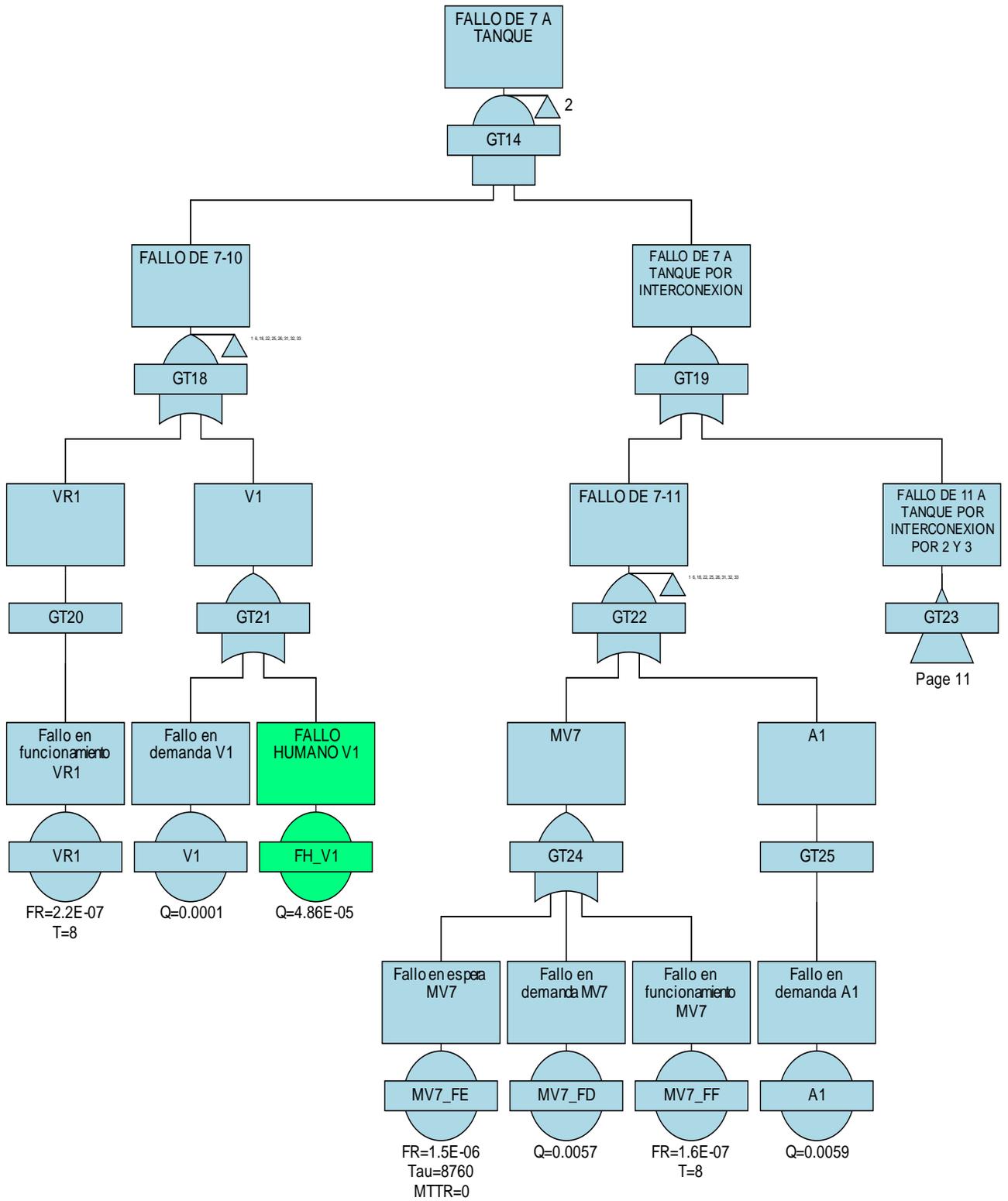


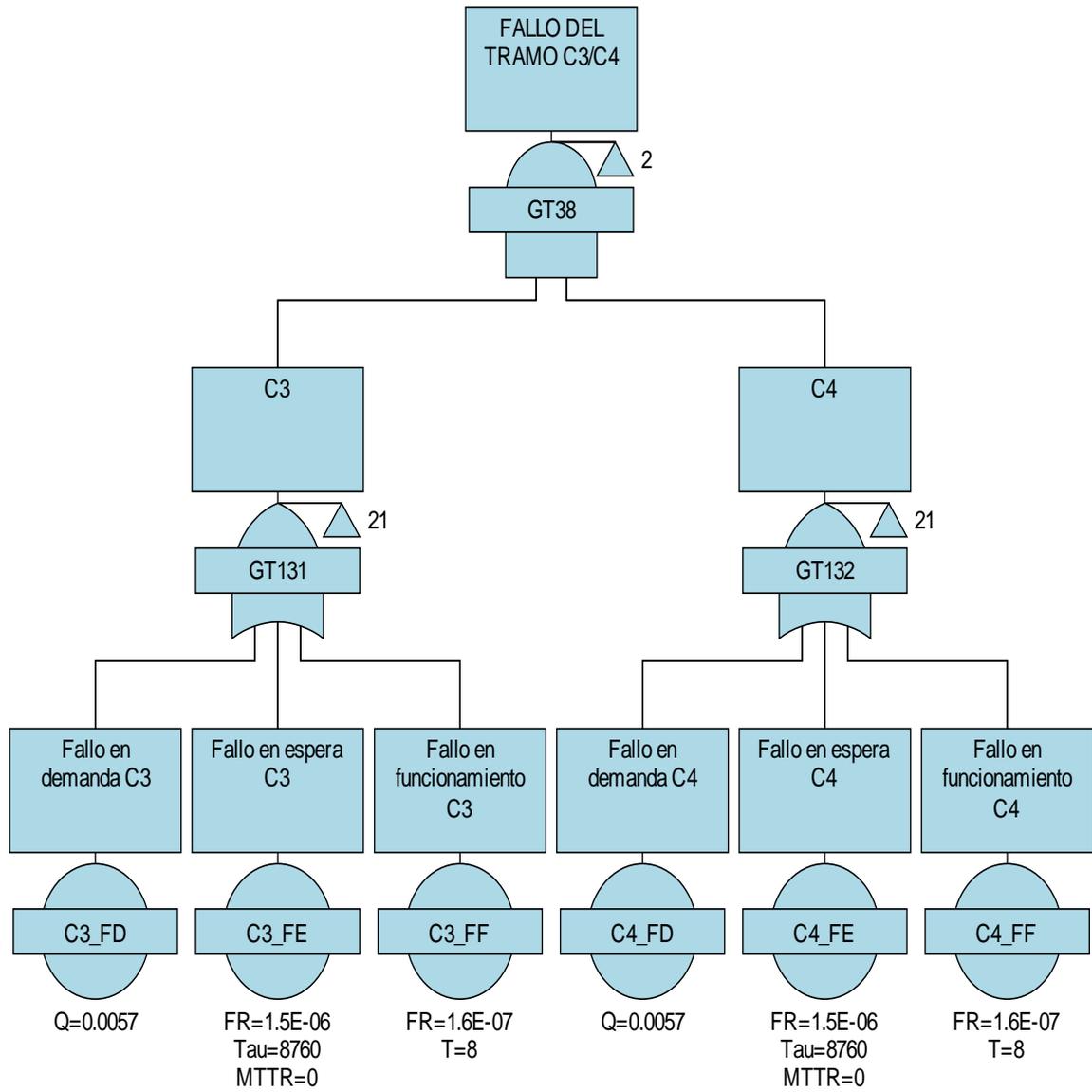


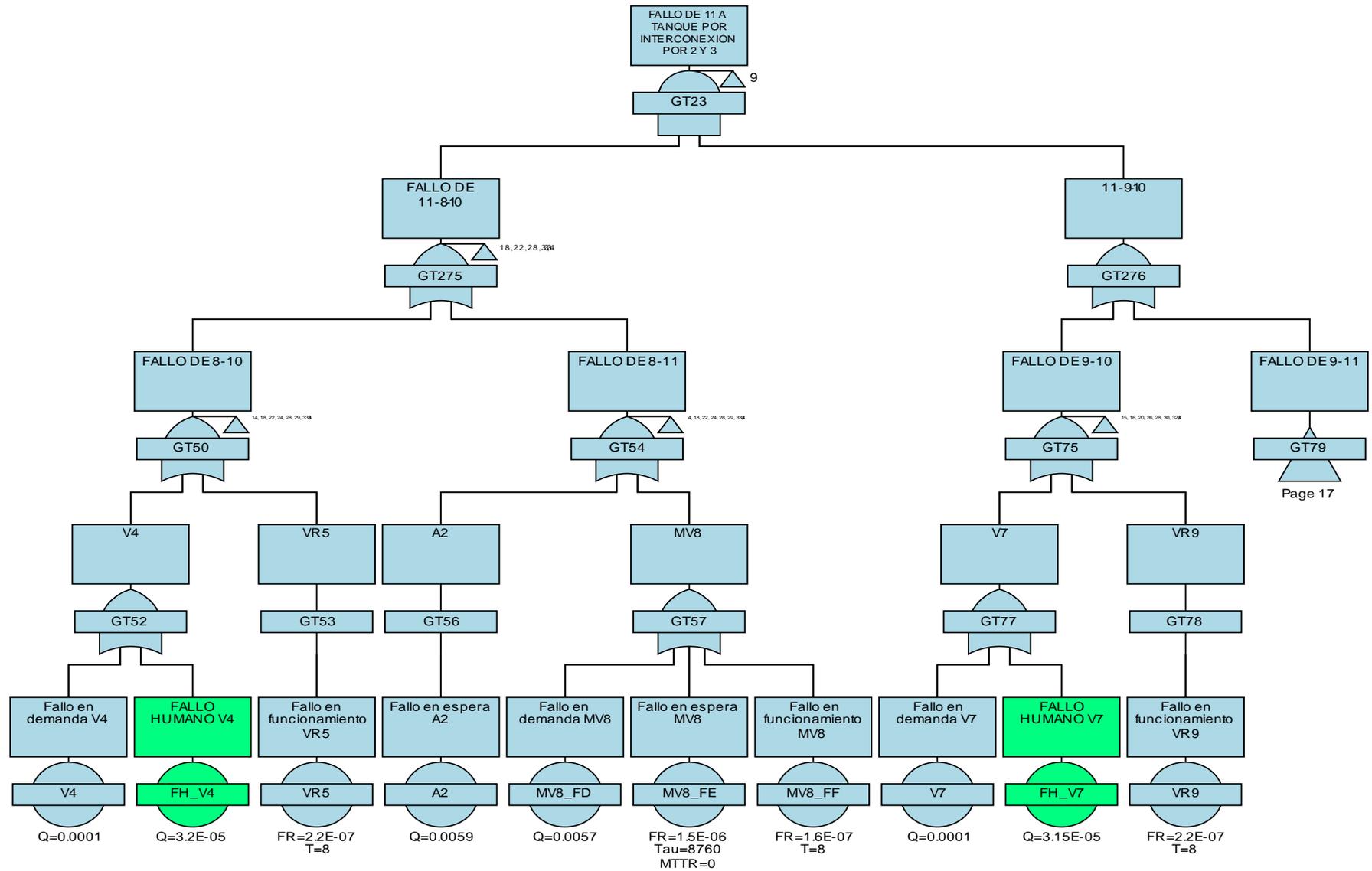


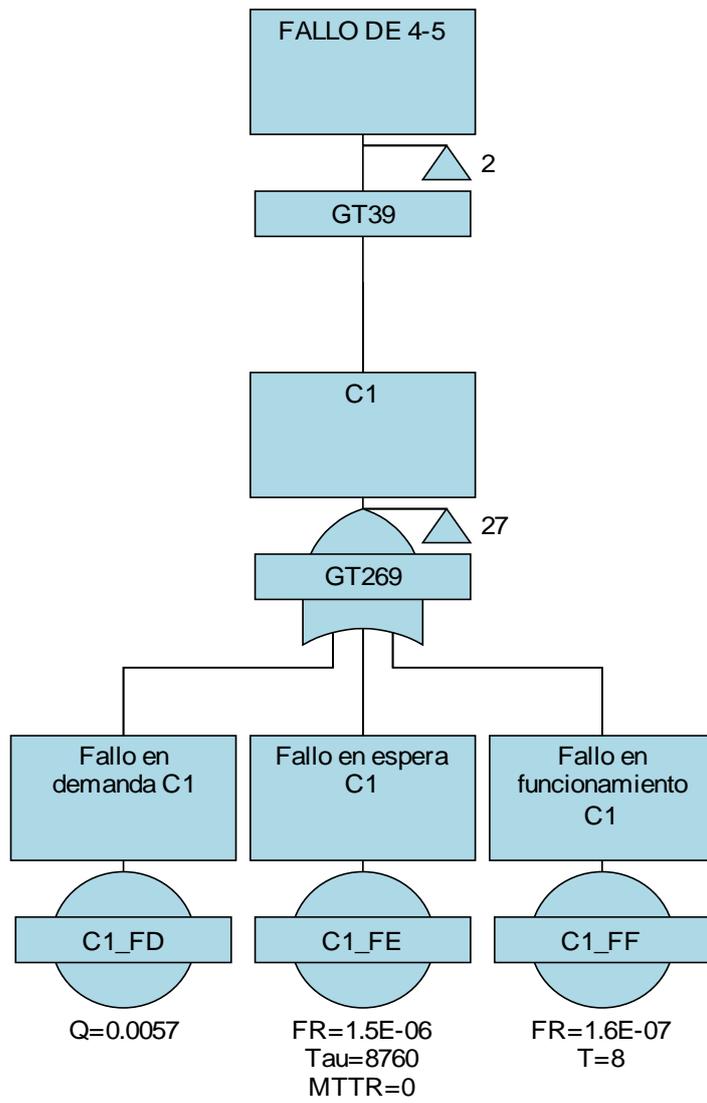


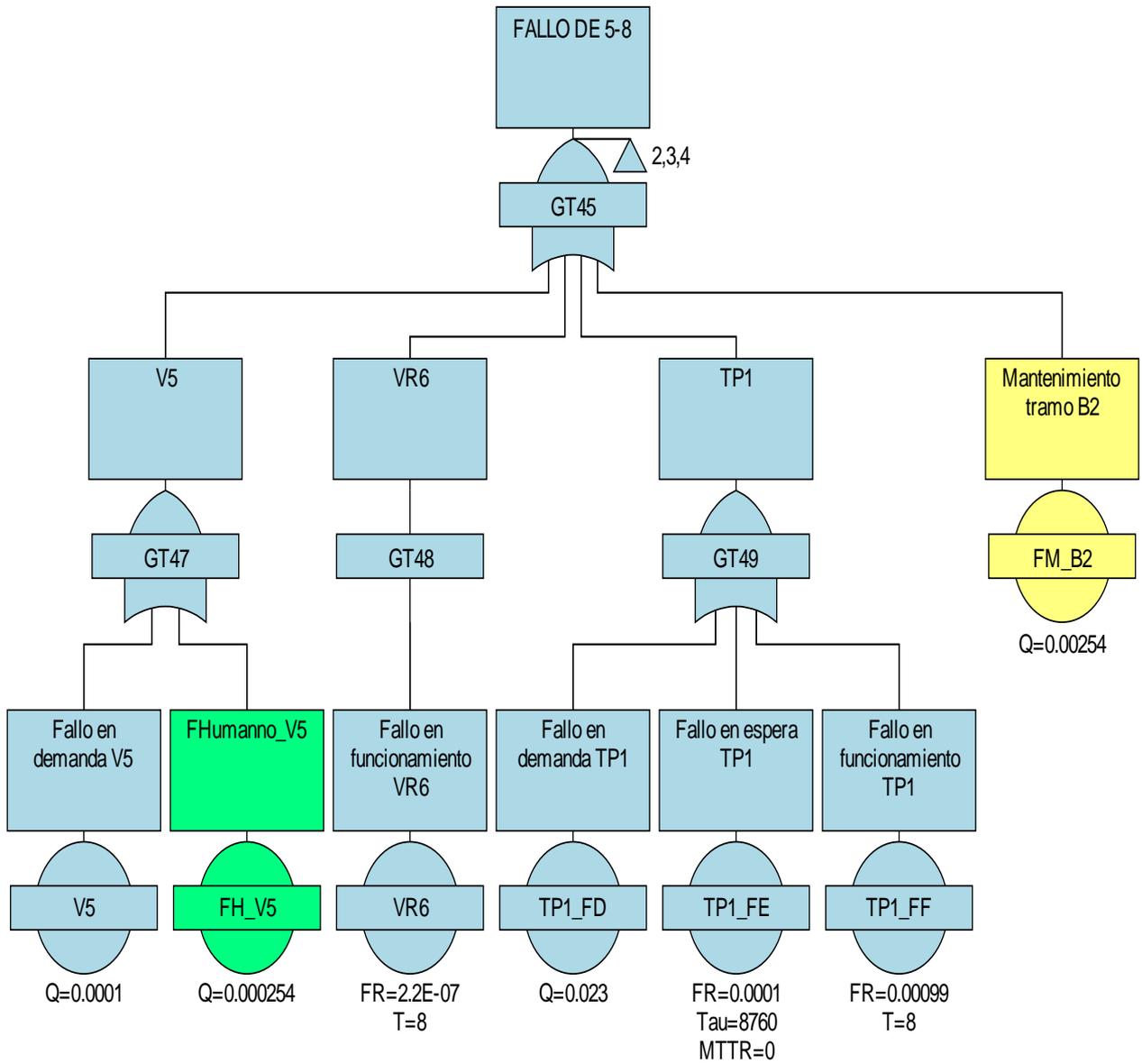


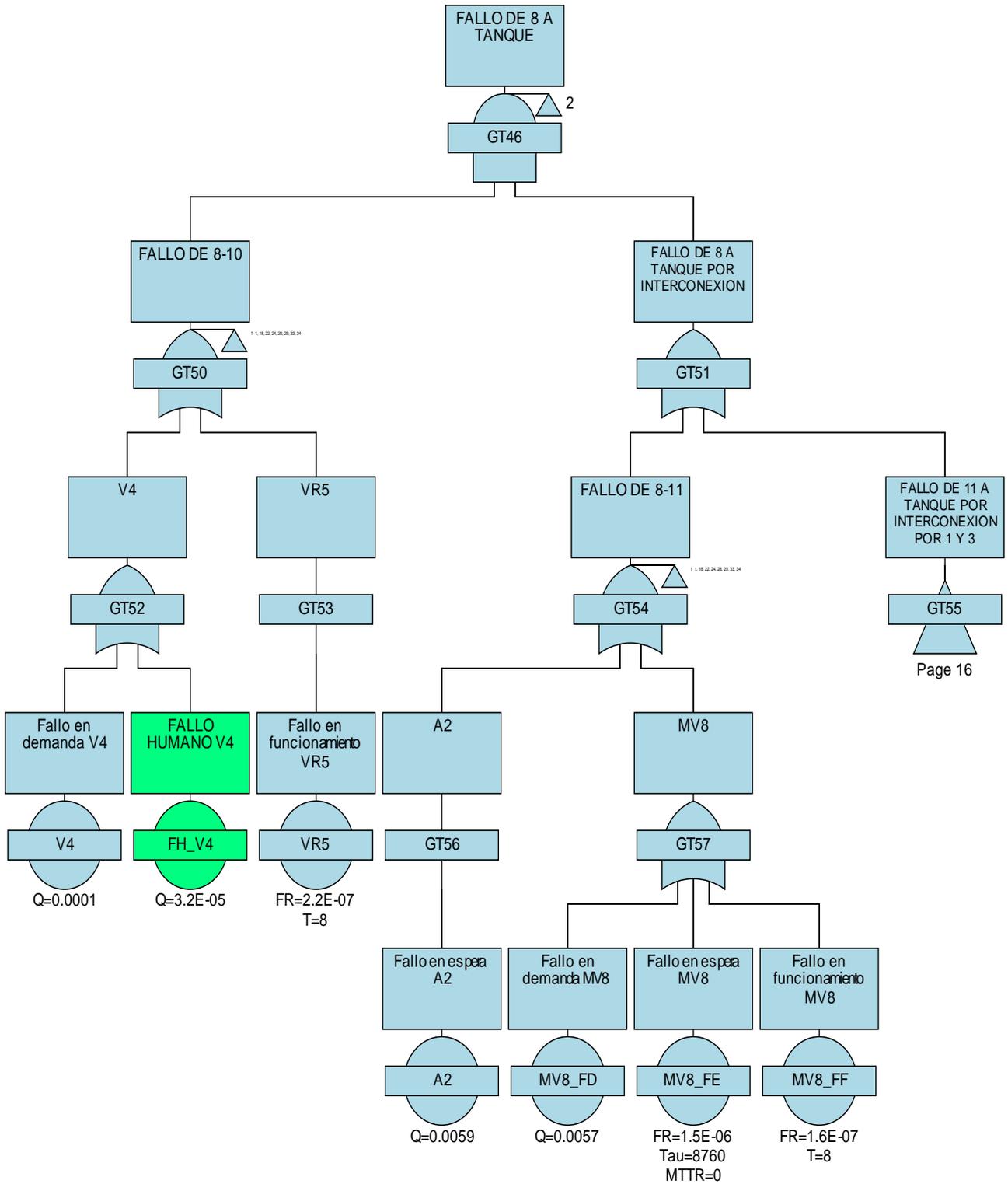


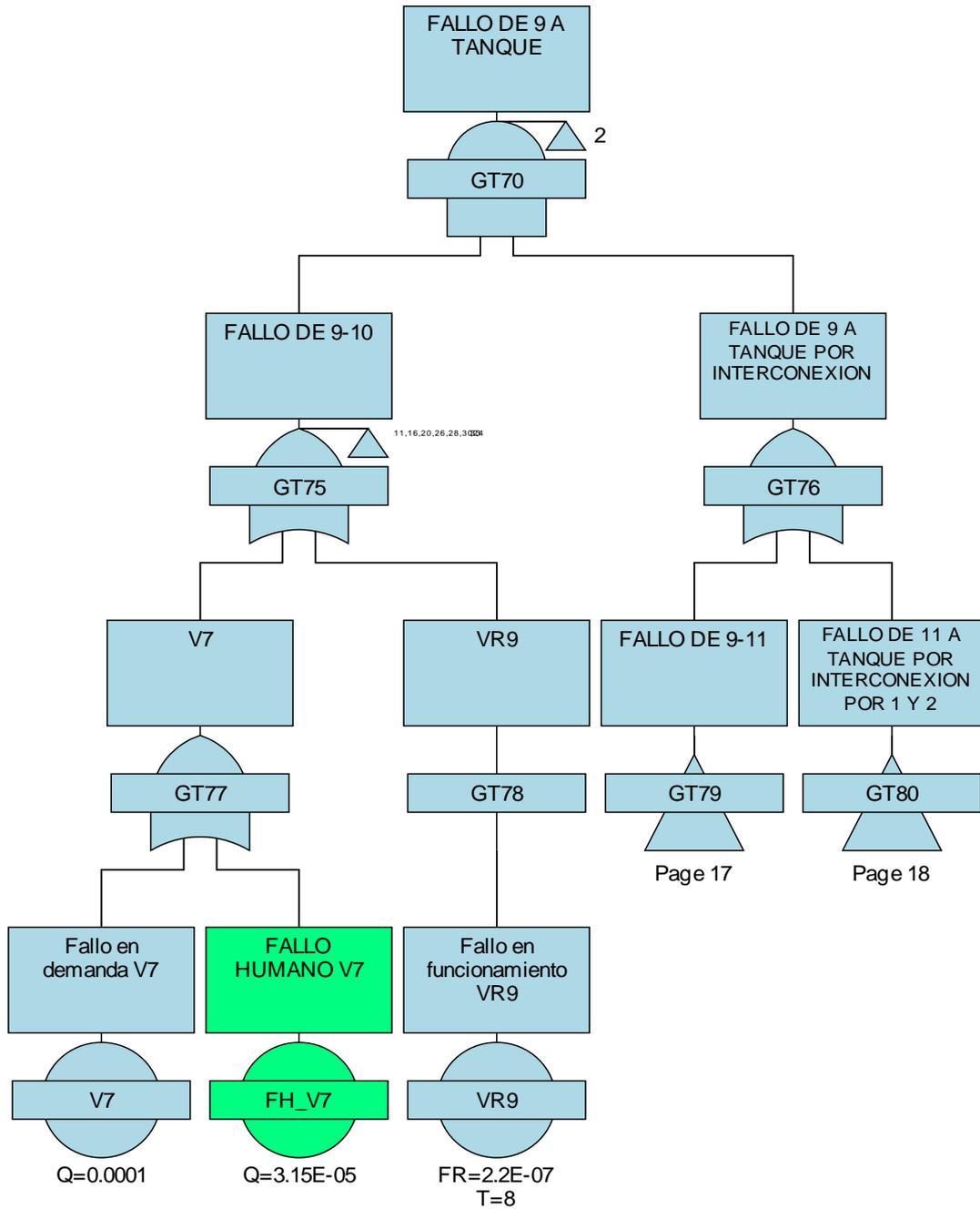


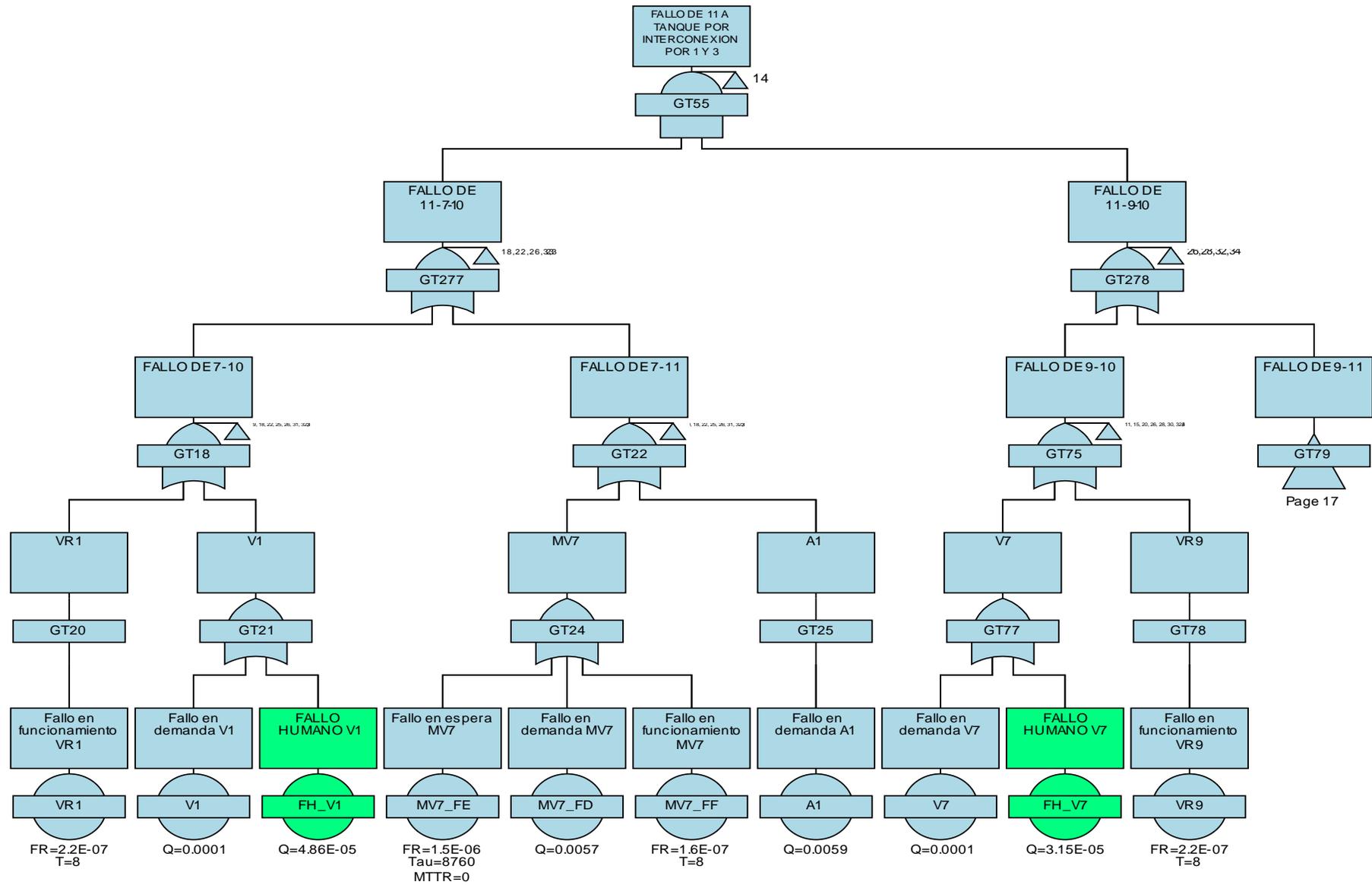


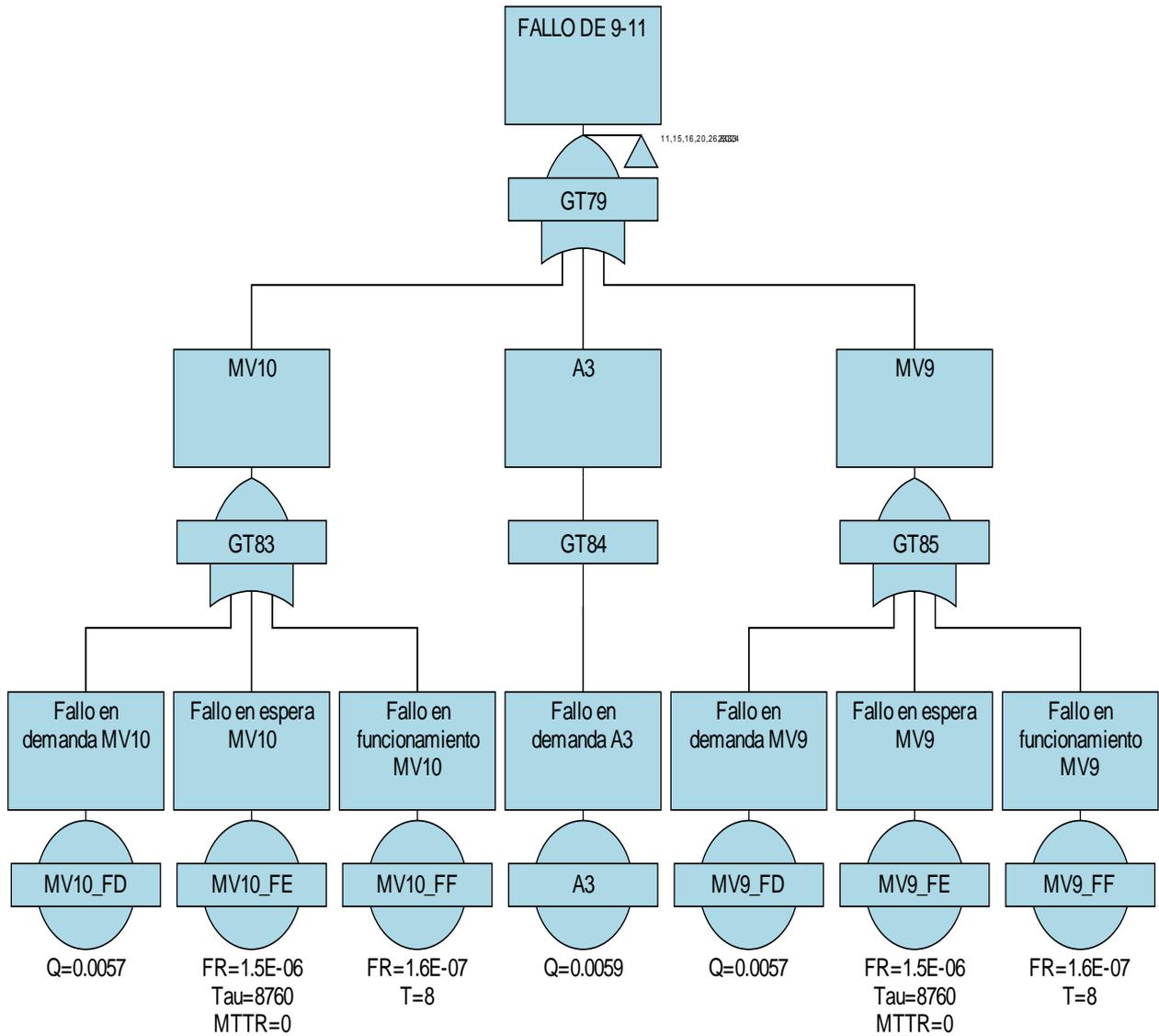




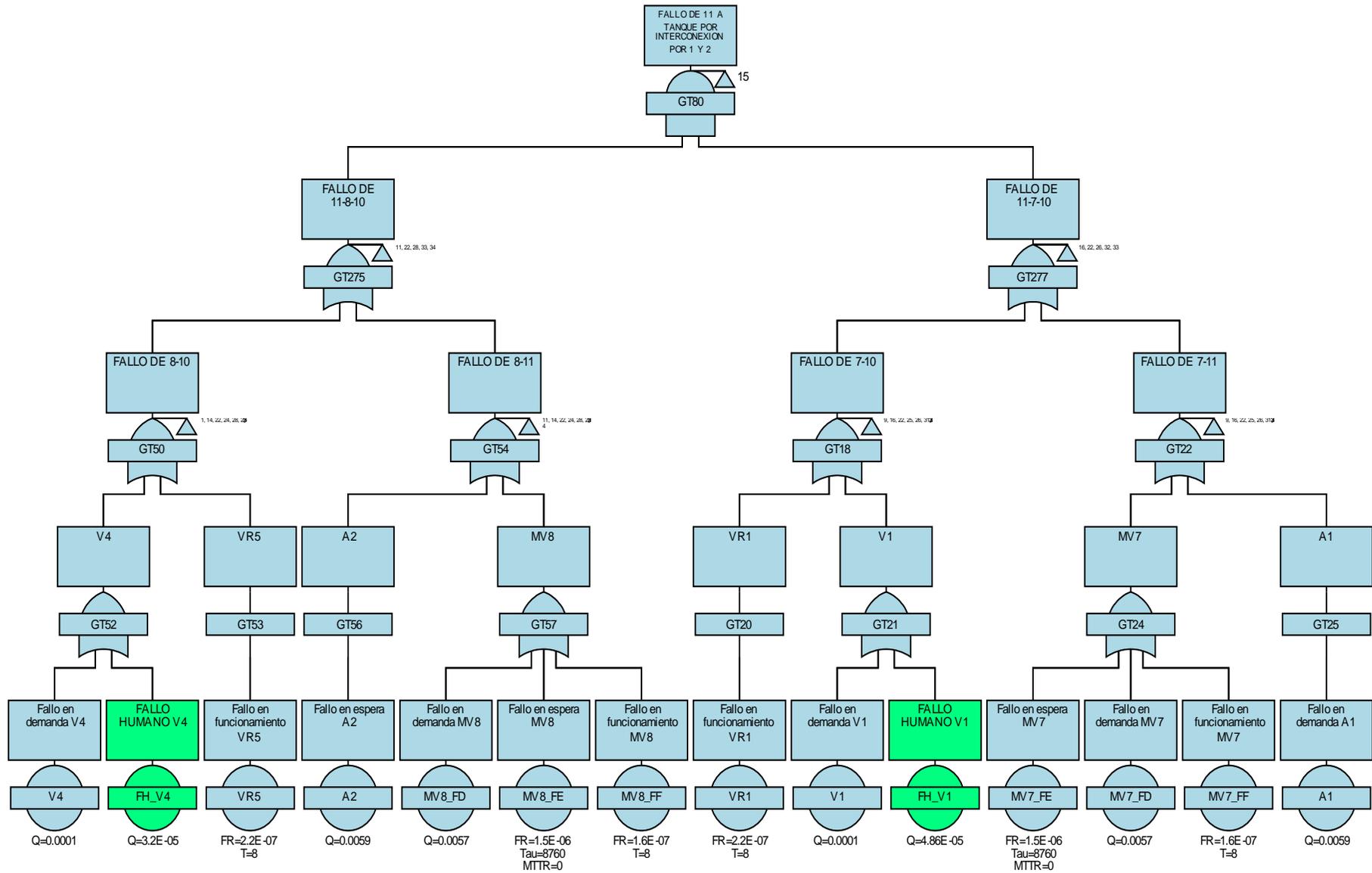


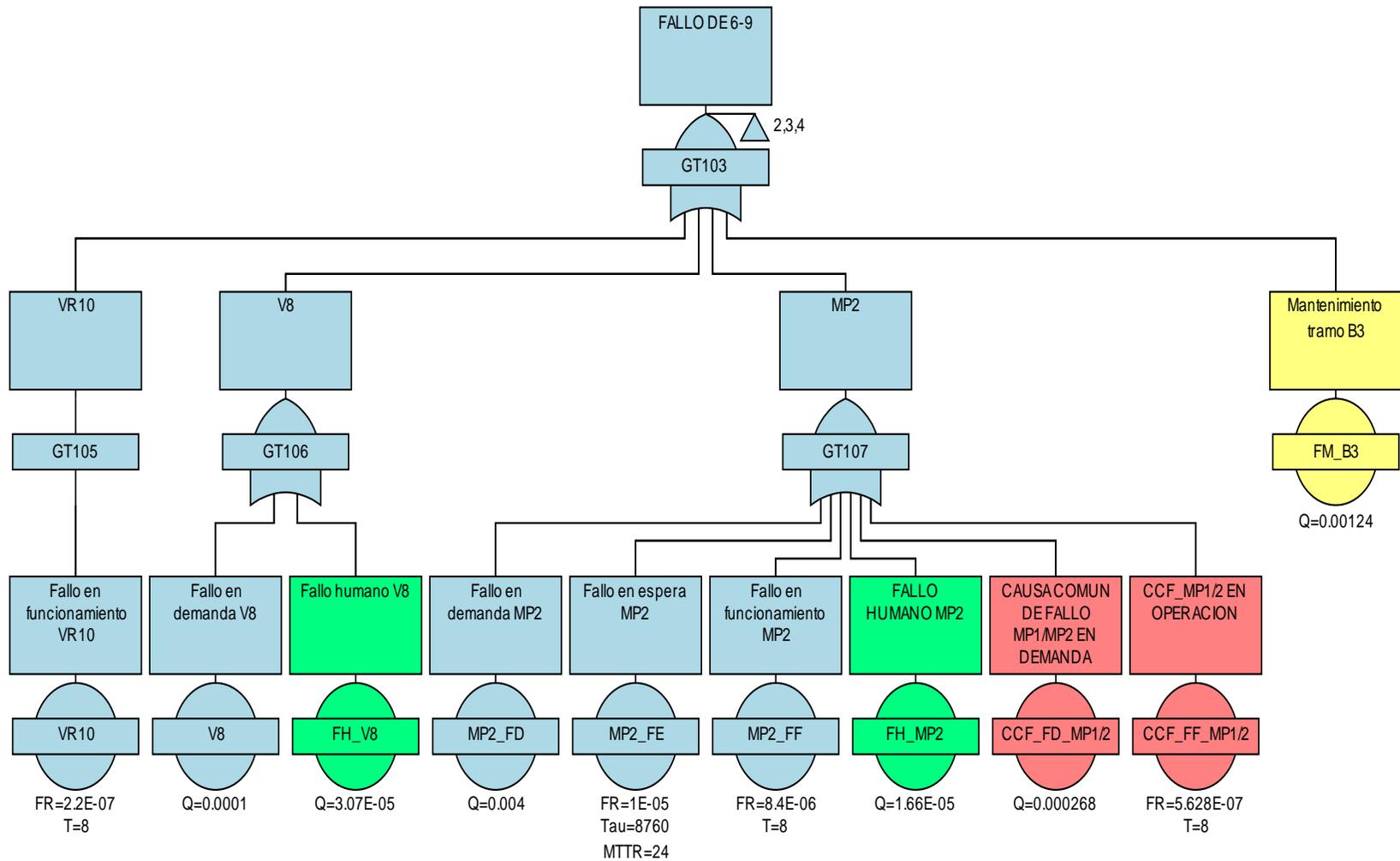


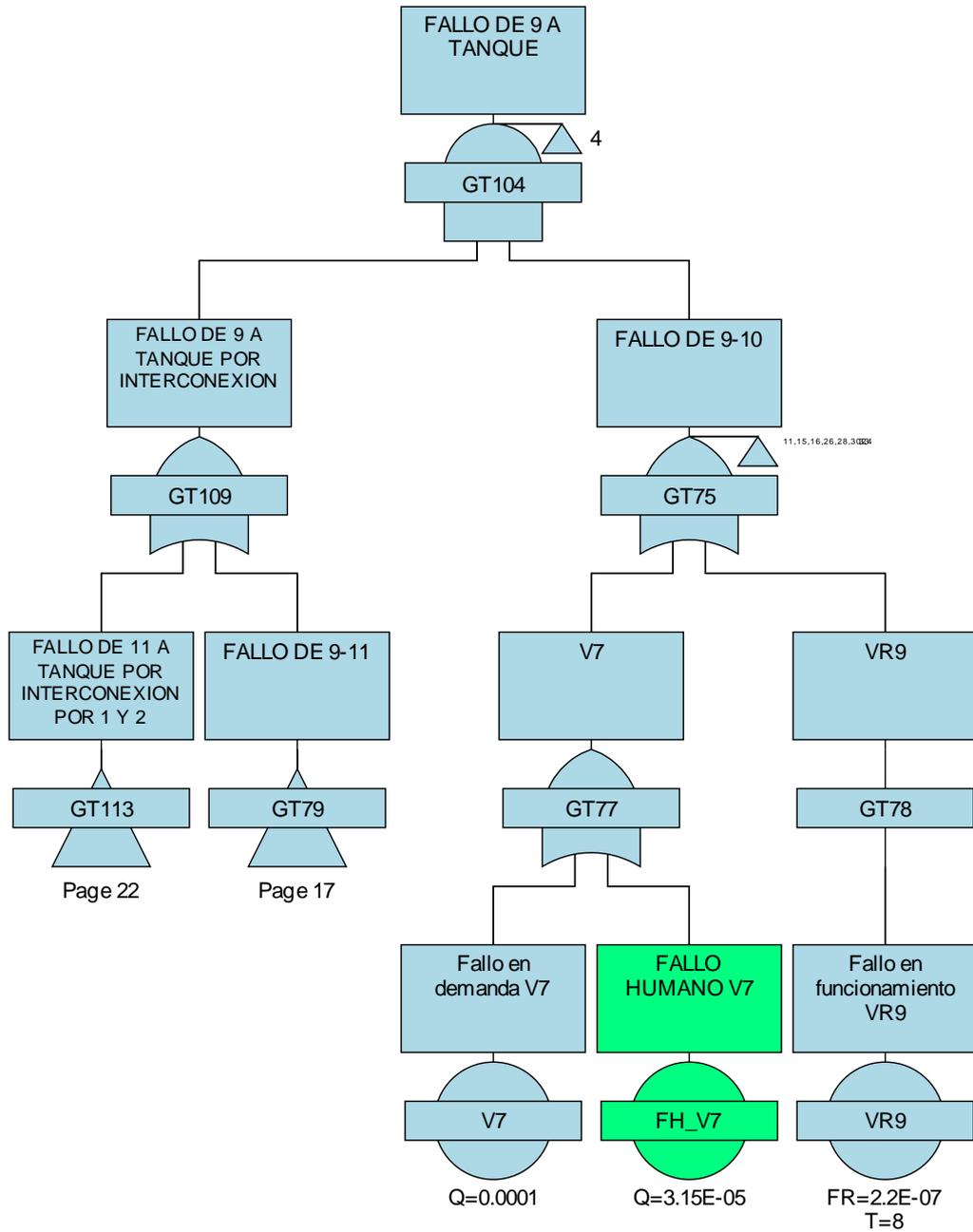




Mejora de la disponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar de un reactor de agua a presión

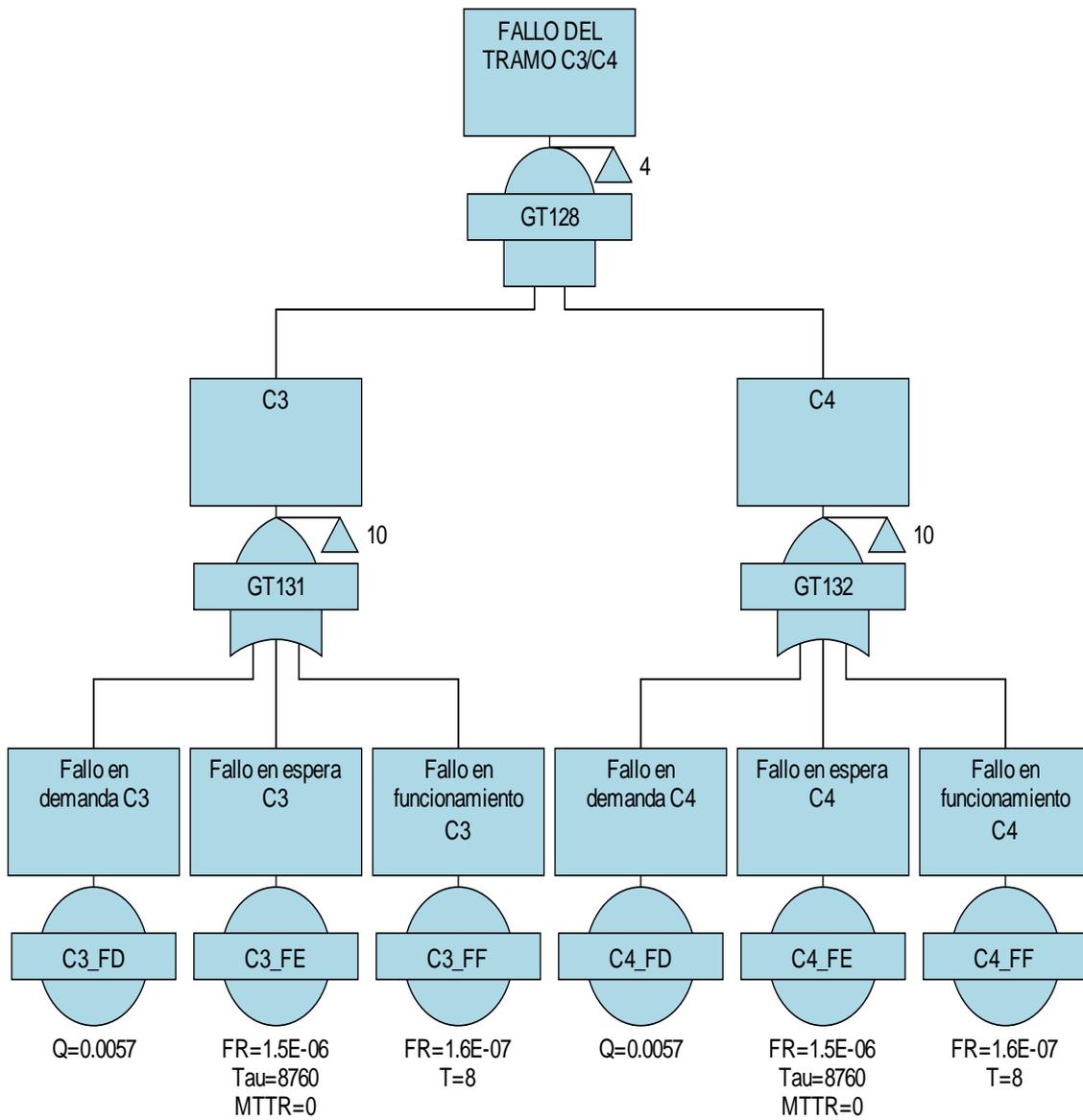




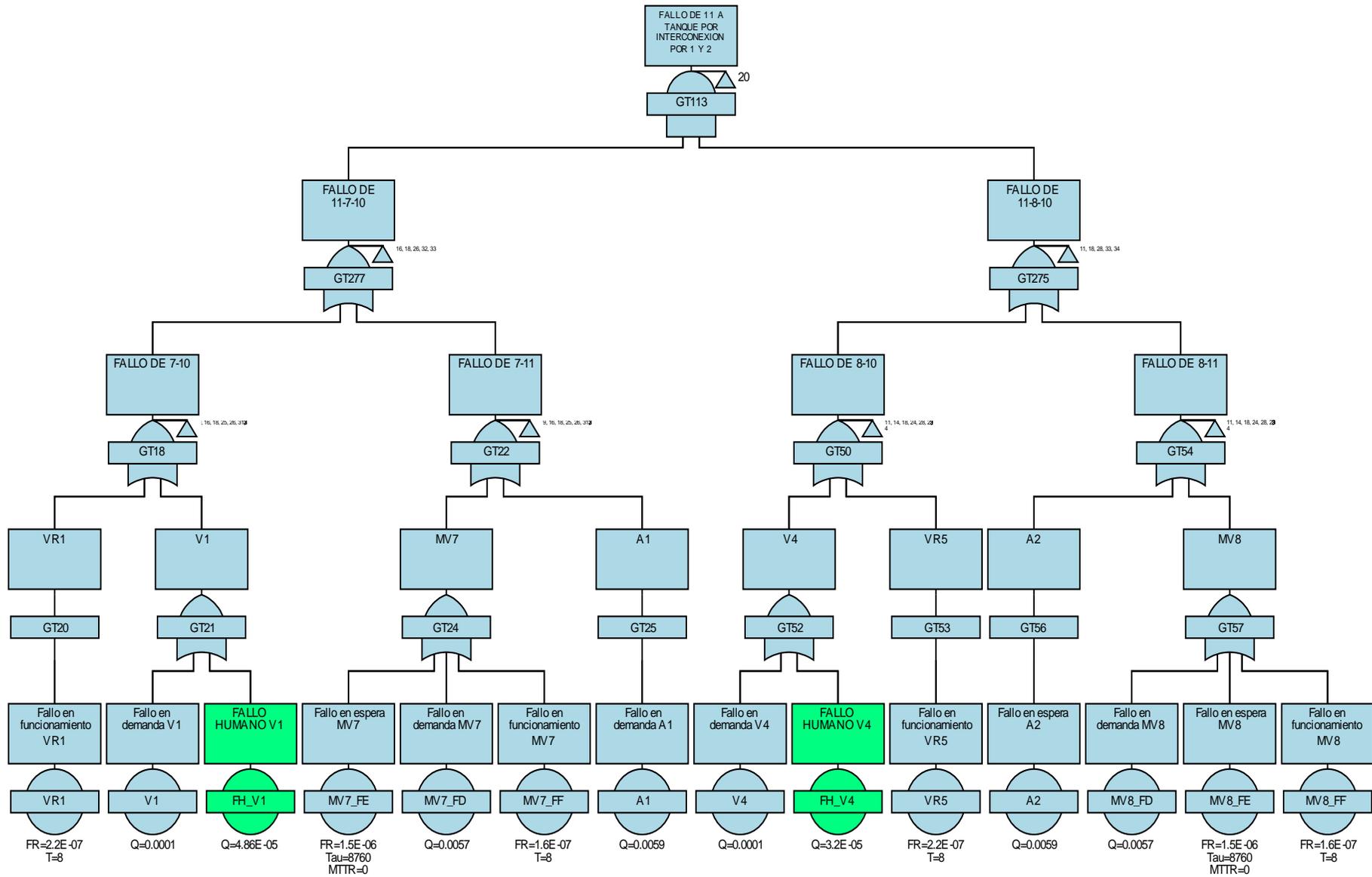


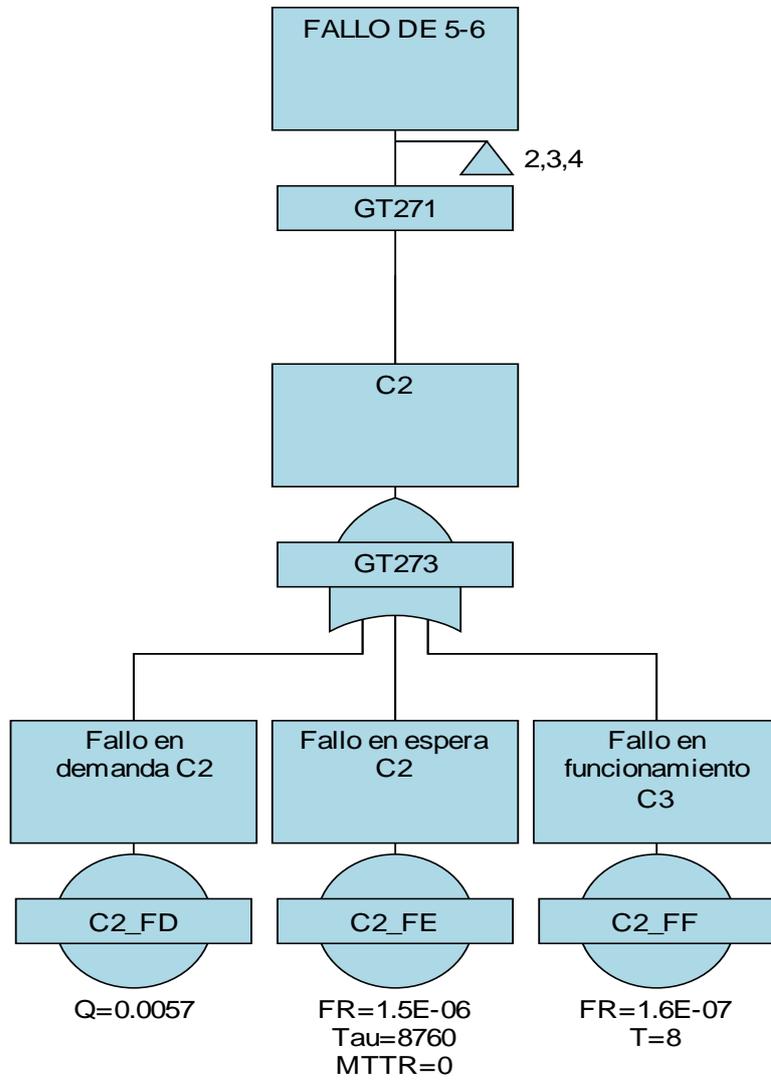
Page 22

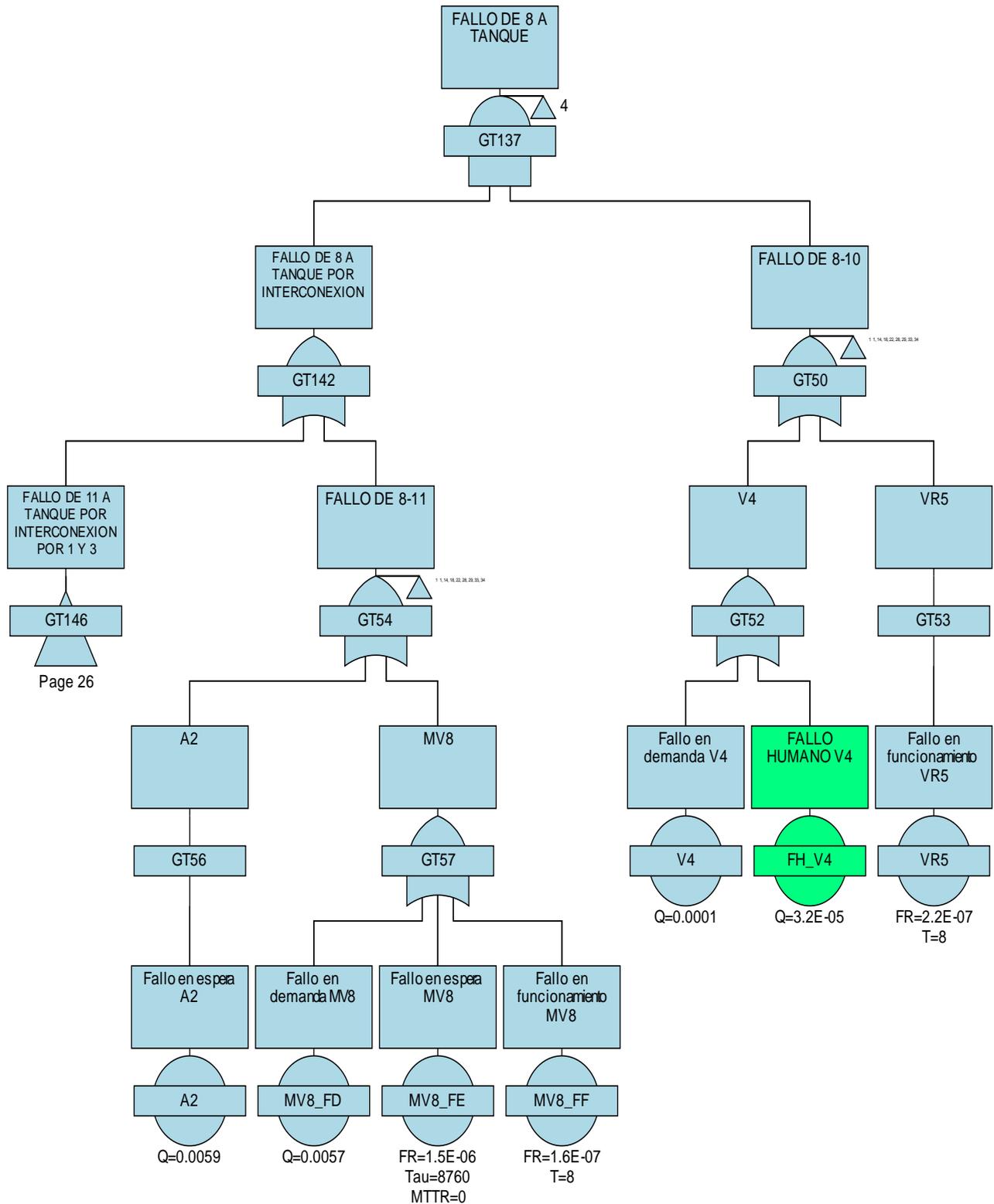
Page 17



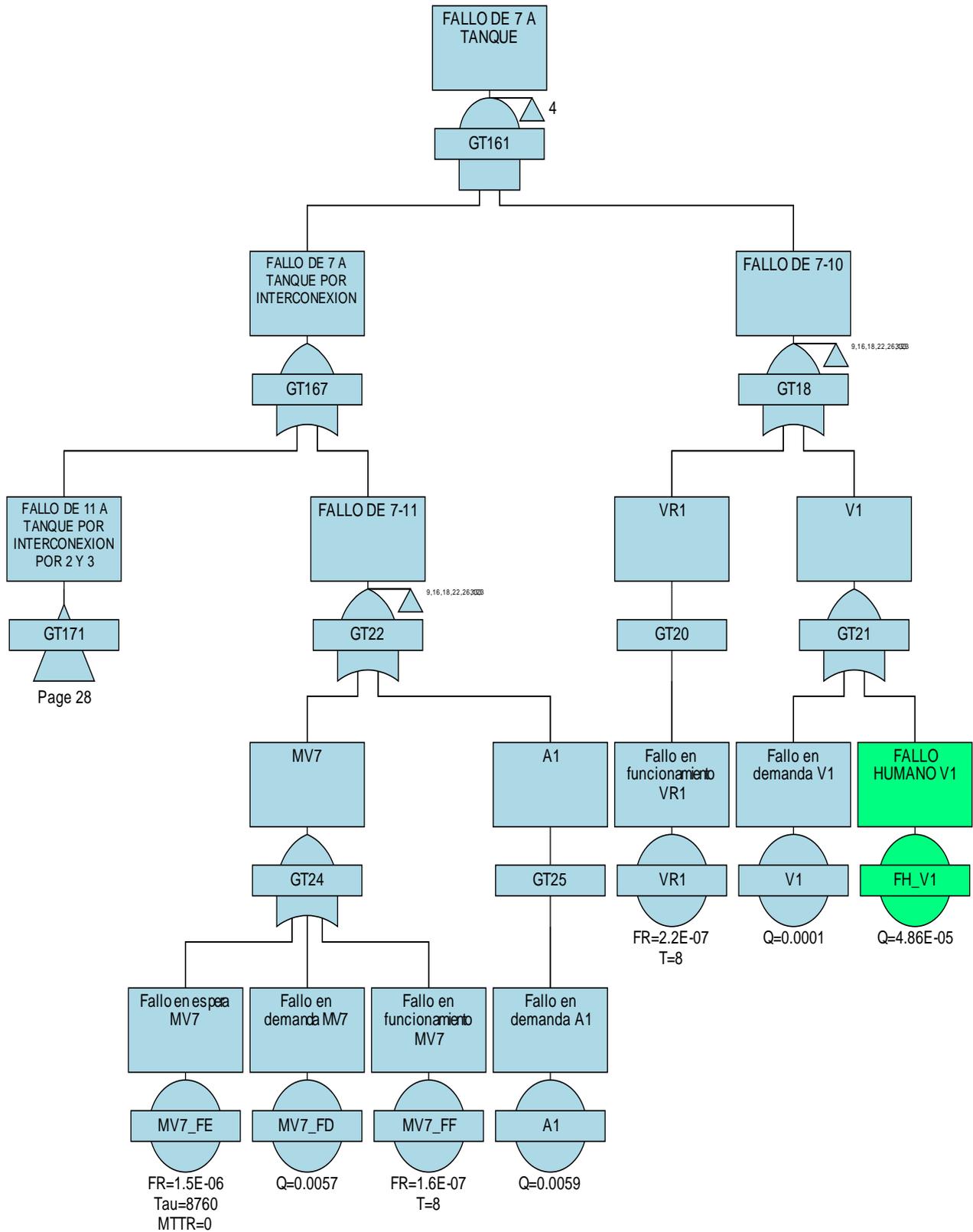
Mejora de la disponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar de un reactor de agua a presión



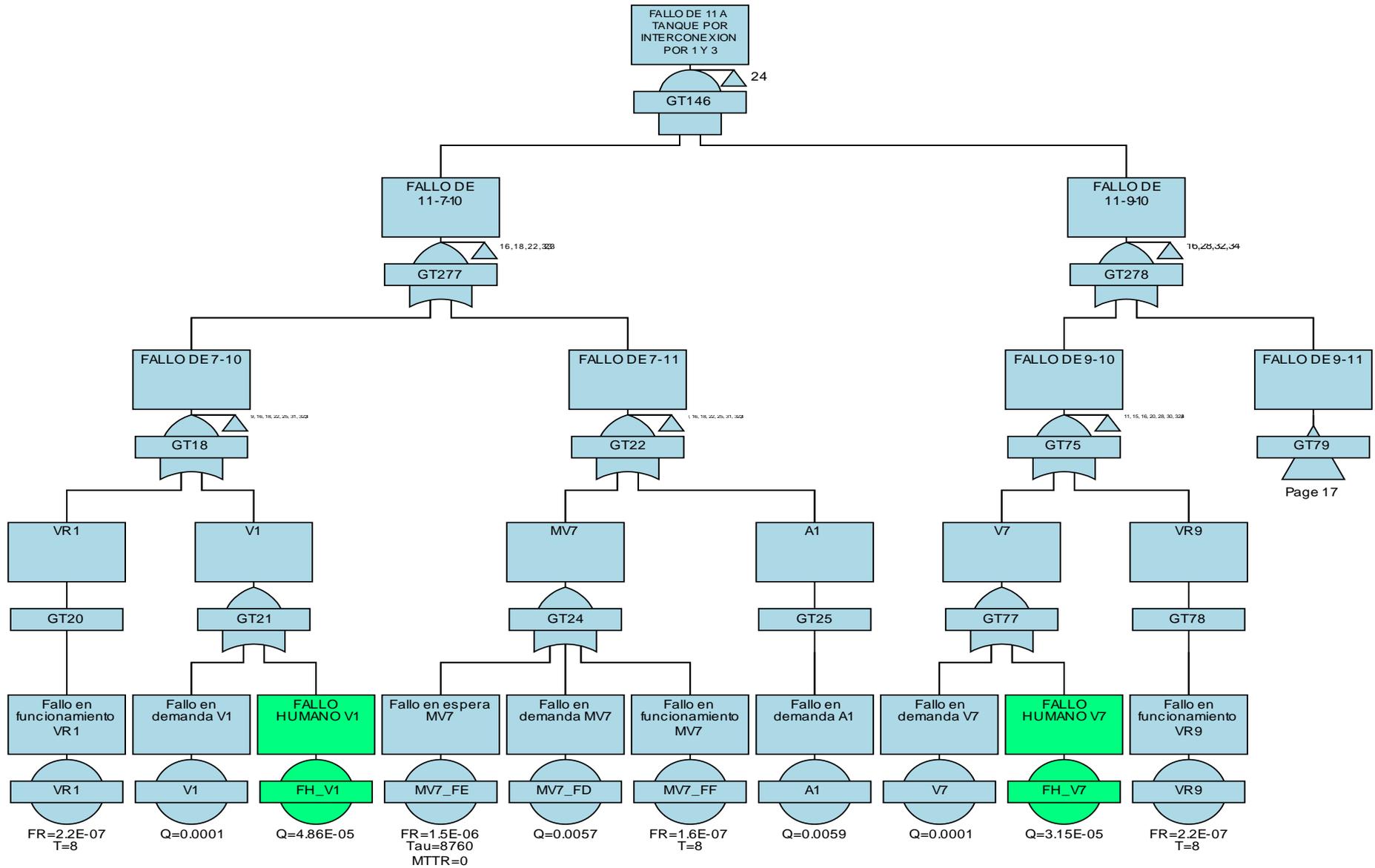


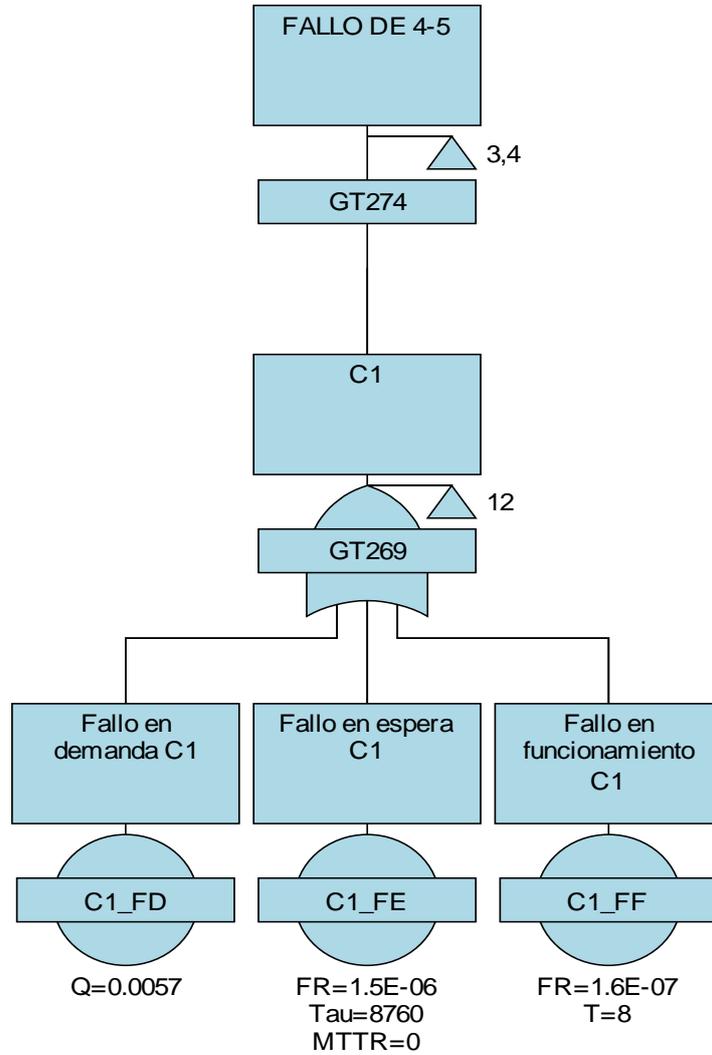


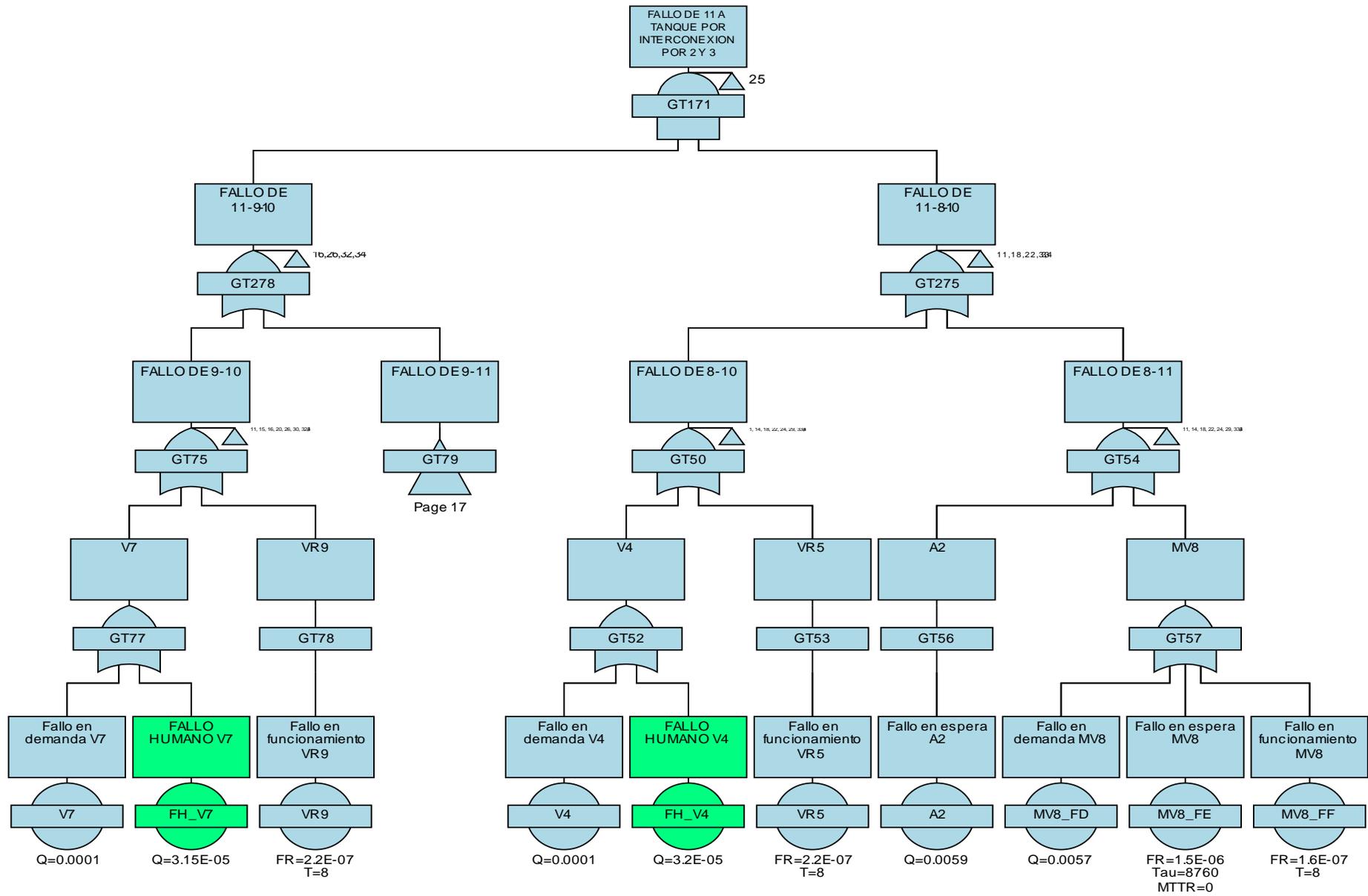
Page 26

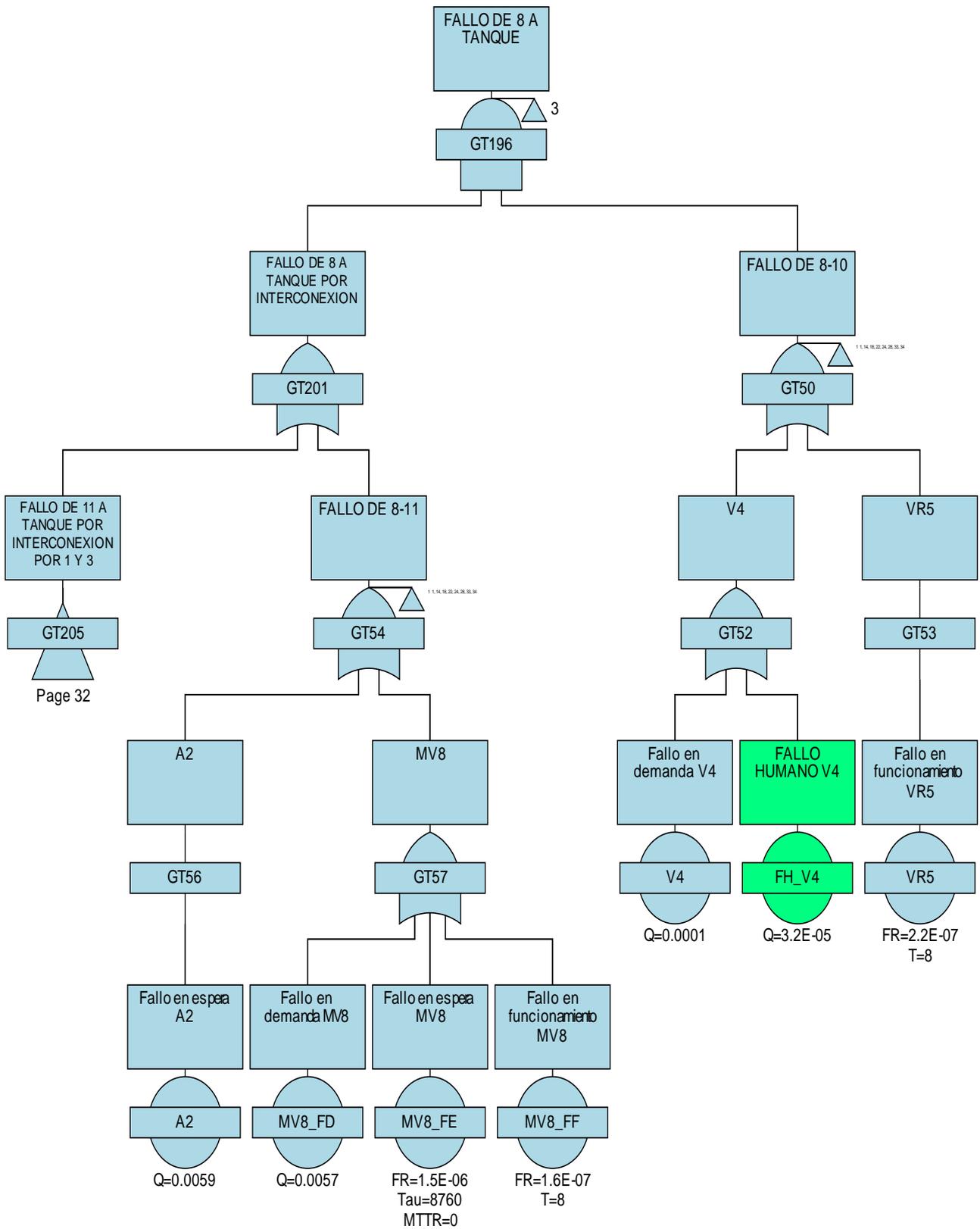


Page 28

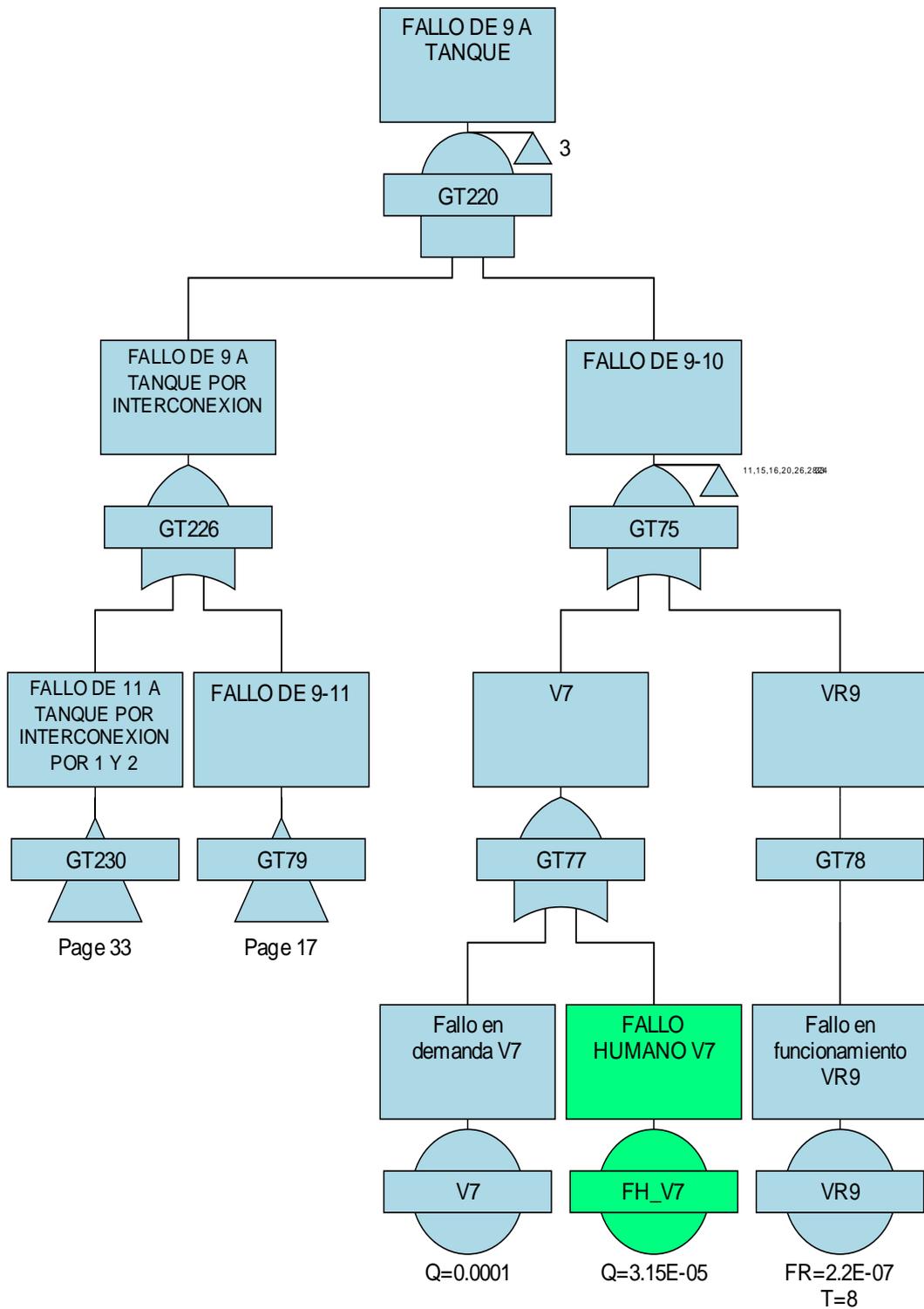


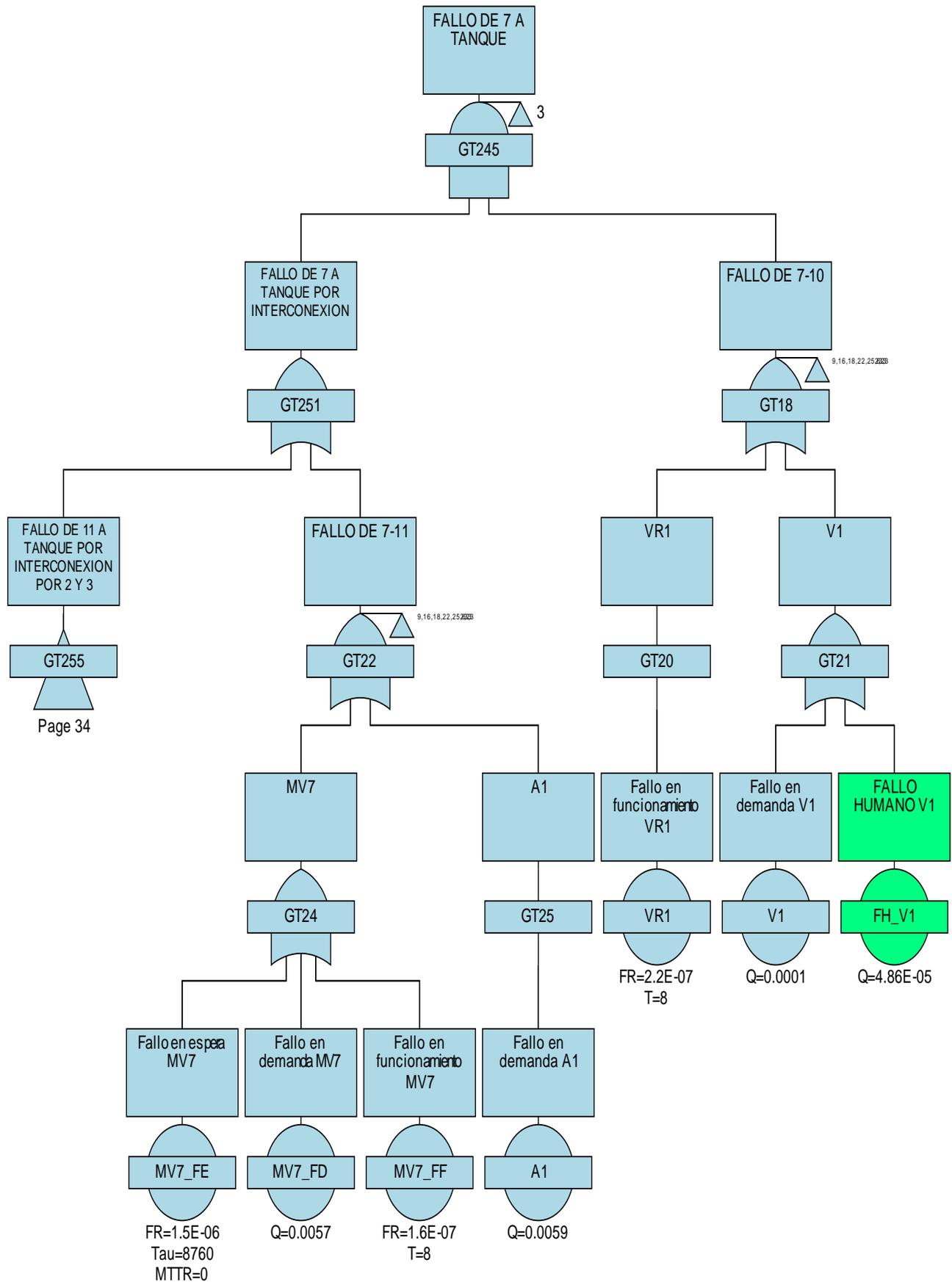


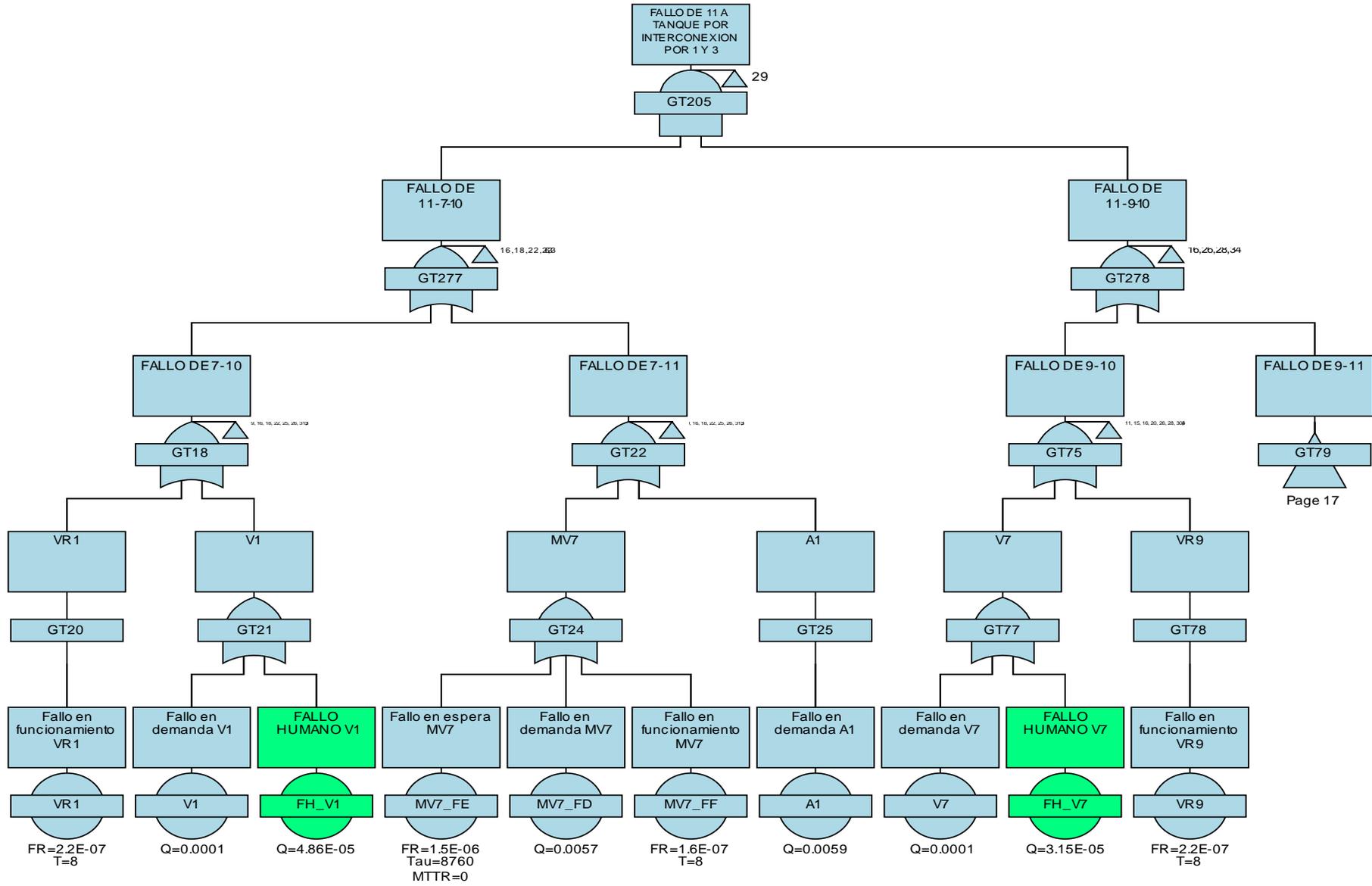




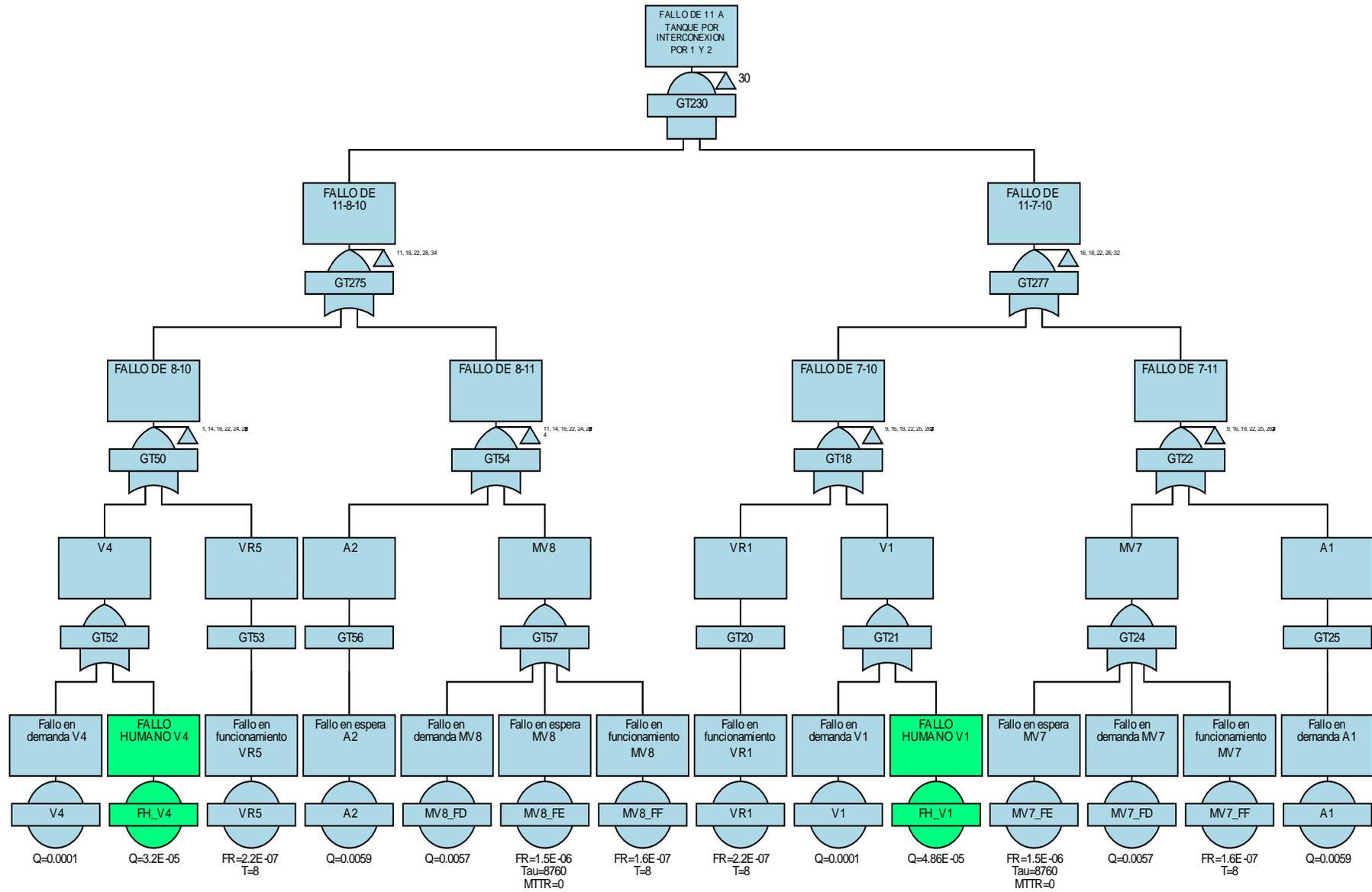
Page 32

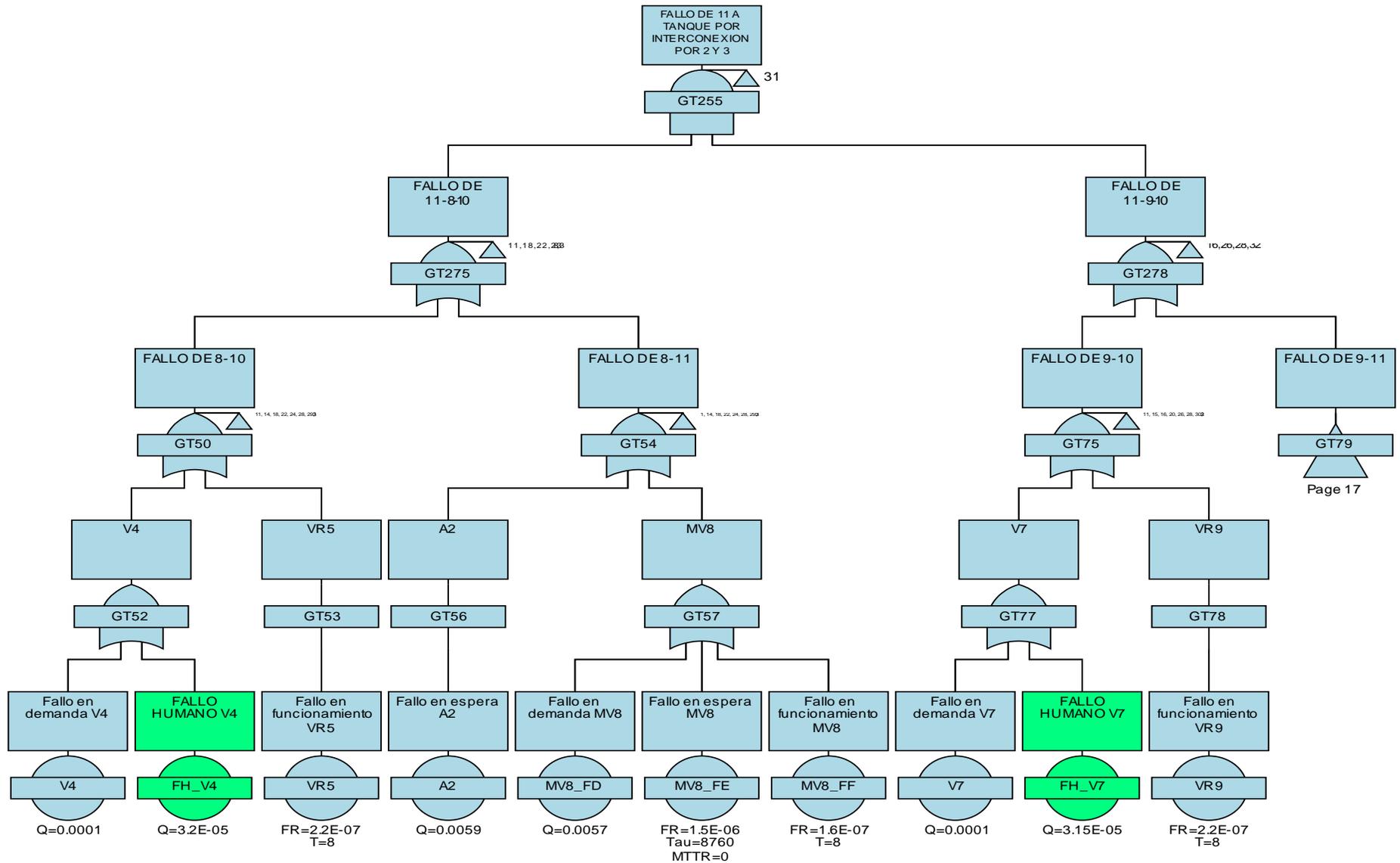






Mejora de la disponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar de un reactor de agua a presión





PRESUPUESTO

1.INTRODUCCIÓN

El siguiente apartado tiene como objetivo realizar una valoración económica de los costes que se le imputan al presente trabajo de final de grado. Para ello, en primer lugar han de estudiadas cada una de las partes de las que consta el trabajo. Se ha de valorar tanto el material empleado, como el desgaste de los equipos. Por otro lado, se ha de tener en cuenta el personal necesario para llevar a cabo el trabajo y el necesario para analizar los resultados obtenidos. A continuación se indican los puntos que se han considerado a la hora de realizar el presupuesto del trabajo.

- **Personal**

El proceso para la consecución del trabajo consta de una primera etapa en la que se realiza un estudio del sistema de alimentación de agua auxiliar y su correspondiente modelado probabilista para el cálculo de la disponibilidad. Acto seguido se desarrolla una siguiente etapa en la que se analiza la sensibilidad de los diferentes sucesos básicos que influyen en el cálculo de la disponibilidad, se lleva a cabo el análisis de los resultados obtenidos y se plantean una serie de medidas de mejora. Esta carga de trabajo es ejecutada por un Técnico de laboratorio.

Para contabilizar el coste del personal que interviene en el proyecto, se han de tener en cuenta los honorarios medios anuales en bruto de cada uno de los trabajadores. A continuación se ha de contabilizar cuál es el coste real que le supone a la empresa cada uno de ellos aplicando el porcentaje adicional de seguridad social (29,1%) que ha de abonar. Según el coste mensual y las horas trabajadas al mes se calcula el coste horario que supone el personal necesario para completar el procedimiento. Por otro lado, se han de tener en cuenta las horas de trabajo necesarias de cada uno de los trabajadores para completar el proyecto. Teniendo en cuenta el porcentaje de dedicación necesario para cada uno de ellos, se calcula el coste total que supone el personal en dicho proyecto.

- **Equipamiento**

En cuanto a los equipos necesarios para poder realizar el trabajo, se han de tener en cuenta tanto los equipos físicos (hardware), por ejemplo ordenadores, como los software empleados (Isograph Reliability Workbench, procesador de texto).

Para asignar el coste que supone el equipamiento para el proyecto se ha de considerar el tiempo de amortización o tiempo de vida útil de los equipos. Es una forma de valorar económicamente el consumo o desgaste de los equipos debido a su uso. En este caso, para calcular el coste de amortización se aplica la siguiente fórmula:

$$A = \frac{C \cdot t \cdot n}{T}$$

siendo:

C: coste de adquisición del equipo (€).

t: tiempo de uso del equipo en el proyecto (años).

n : nivel de uso del equipo (en base 1).

T : periodo de vida útil de un equipo.

- **Fungibles**

El material fungible es aquel que se consume durante la realización de un proyecto. Es decir, es el material que una vez utilizado durante el trabajo se considera consumido y por tanto no va a volver a utilizarse. Se encuentran en este campo materiales como bolígrafos, papel y grapas.

En la consecución de este proyecto el coste por material fungible es poco relevante por lo que en el presupuesto se expresan todos los materiales consumibles utilizados como un todo.

2.PRESUPUESTO

A continuación se va a presentar el presupuesto detallado con todos los costes asociados al proyecto realizado. Se muestran los diferentes cuadros de precios para cada tipo de coste con la justificación de los mismos.

PERSONAL

En primer lugar se muestra en la Tabla1 el coste horario del trabajador para la empresa. Con esto, la cantidad d horas empleadas durante la realización del trabajo y el porcentaje de dedicación, se calcula el coste final del personal de la empresa.

Tabla 1. Coste horario del personal para la empresa

Personal	Honorarios brutos (€/año)	Coste para empresa (€/año)	Coste para empresa (€/mes)	Coste empresa (€/h)
Técnico laboratorio	20663,18	26676,17	2223,01	14,82

Tabla 2. Cuadro de precios del personal que interviene en el trabajo

Personal	Coste empresa (€/h)	Cantidad (h)	Dedicación	Coste (€)
Técnico laboratorio	14,82	300	100%	4446,00
			TOTAL	4446,00 €

EQUIPAMIENTO

Los equipos empleados durante el desarrollo del trabajo tienen un coste asociado que se muestra en la Tabla 3. Se tienen en cuenta los equipos necesarios para la realización del trabajo, ya sean equipos físicos (hardware) o software.

Tabla 3. Cuadro de precios del equipamiento principal necesario en el proyecto

Equipos	Coste adquisición (€/ud)	Tiempo vida útil (años)	Tiempo uso proyecto (h)	Nivel uso	Coste (€)
Ordenador personal	1.000,00	4	300	100%	136.98

Isograph Reliability Workbench	700,00	4	300	75%	71,92
				TOTAL	208,9 €

FUNGIBLES

A continuación se va a detallar los costes que suponen todos los fungibles, en este caso, debido a que no se trata de un coste de gran relevancia, se muestran todos los costes por materiales fungibles de manera conjunta.

Tabla 4. Cuadro de precios del material fungible empleado en el proyecto

Materiales	Coste adquisición (€)	Coste (€)
Fungibles	30,00	30,00
TOTAL		30,00 €

PRESUPUESTO FINAL

Una vez conocido el coste asociado al personal, el equipamiento y el material fungible, se ha de calcular el coste real del proyecto completo. Para ello se calcula en primer lugar el Presupuesto de Ejecución Material (PEM), que se corresponde con la suma de los costes totales que suponen las distintas partidas presentadas anteriormente. Sin embargo, los gastos generales de luz, agua, mobiliario, y material adicional que también se consume durante la realización del proyecto no son considerados en el PEM. De este modo los Gastos Generales se calculan como un 15% del PEM y se incluyen en el Presupuesto de Inversión. El Presupuesto de Inversión es, por tanto, la suma del Presupuesto de Ejecución Material más los Gastos Generales. Para finalizar, al Presupuesto de Inversión se le ha de aplicar el 21% de IVA y se obtiene el Presupuesto Total del proyecto. Cabe destacar que se trata de un proyecto sin fines lucrativos, destinado exclusivamente para la Universidad Politécnica de Valencia. En este caso no cabría aplicar el sobrecoste debido al Beneficio Industrial (6%), ya que no se pretende obtener un beneficio económico con el proyecto. Finalmente el presupuesto quedaría como muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Presupuesto final del proyecto de investigación

Concepto		Coste total (€)
Personal		4446,00 €
Equipos		208.9 €
Fungibles (material, reactivos, trazadores, ...)		30,00€
Presupuesto de Ejecución Material (PEM)		4684.9 €
Gastos Generales (15%)	702,74€	
Presupuesto de inversión		5387.64 €
IVA (21%)	1131.40 €	
Presupuesto TOTAL		<u>6519 €</u>

Por tanto, el Presupuesto Total del proyecto “Mejora de la disponibilidad del sistema de alimentación de agua auxiliar de un reactor de agua a presión” asciende a:

Seis mil quinientos diecinueve

Valencia, julio 2015.

Fdo. Guillem Romero Aràmbul.