



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA EN SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

ANÁLISIS DE FALLAS OPERATIVAS DE UN PROCESO DE CEMENTACIONES DE  
POZOS PETROLEROS CON SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DESDE UN ENFOQUE DE  
SISTEMAS COMPLEJOS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MARIA OROSELFIA SÁNCHEZ SÁNCHEZ

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F., OCTUBRE 2015.

JURADO ASIGNADO:

**Presidente:** DR. FELIPE LARA ROSANO  
**Secretario:** M.I. FRANCISCA SOLER ANGUIANO  
**Vocal:** DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA  
**1 er. Suplente:** M.I. JOSE ANTONIO RIVERA COLMENERO  
**2 do. Suplente:** DRA. ESTHER SEGURA PÉREZ

**Lugar o lugares donde se realizó la tesis:** Universidad Nacional Autónoma de México,  
Facultad de Ingeniería

TUTOR DE TESIS:

-----  
**DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA**

*Dedico esta tesis a mi familia, por todo el amor cada día me da.*

*A Carlos por creer siempre en mí, amarme, apoyarme, desvelarse conmigo, hacerme reír, aconsejarme. Por esas ideas y pláticas que siempre me inspiran.*

*A Isaac, mi hijo, por hacer de esta vida todo un reto y una experiencia totalmente distinta a lo que había conocido.*

*A mi mamá y a mi abue por todas sus oraciones para que sea feliz.*

*A mis suegros por todo su apoyo y cariño.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. Idalia Flores de la Mota, gracias por ser mi tutora durante la maestría, por todos sus consejos y apoyo académico y personal. Por la invitación a seguir preparándome.

Al Dr. Felipe Lara Rosano por la enseñanza de todos esos grandes temas y por tener la paciencia para explicar y apoyar cuando es necesario.

A la M.I. Francis Soler, a la Dra. Esther Segura y al M.I. José Antonio Colmenero por todas sus aportaciones, consejos y orientación cuando leyeron mi tesis.

Al M.I. Alberto Fuentes Maya por todo ese apoyo que me ha brindado y confianza profesional. Por su amistad incondicional y sin interés. Siempre invitándome a superarme más y a tomar nuevos retos.

A todos mis profesores durante la maestría, por sus clases, comentarios, exigencia y dedicación para que nosotros aprendamos.

A CONACyT por el apoyo económico para poder cursar mis estudios de maestría. Al posgrado de Ingeniería de la UNAM por el apoyo económico que me brindó para ir de congreso internacional a presentar mi trabajo de investigación. También al proyecto PAPIIT de la DGAPA con numero IN116012 por el apoyo económico.

A Marypaz Mungía por toda la ayuda administrativa y ánimos que me brindó para culminar mi tesis.

A mis amigos y compañeros que conocí durante esta aventura, con los que compartí preocupaciones, desvelos, bromas y risas. Montse, Blanquita, Mauricio, Javier, Miguel, JJ, Julio, Carlos, Israel, Oli, Roberto y Lulú gracias por todos los momentos compartidos.

## RESUMEN

Comúnmente las fallas operativas son tratadas utilizando herramientas estadísticas y analizándolas de manera aislada, es decir, se estudian las fallas que presenta un equipo, una máquina, etc., sin relacionarlas mucho con alguna otra parte del proceso al que pertenecen o a la organización. En esta investigación se tratan las fallas operativas con un enfoque sistémico, considerando que el incumplimiento de una parte de un proceso afecta completamente a una organización. Se toma como base el Servicio de Cementaciones de Pozos Petroleros de una empresa privada para realizar este trabajo.

Dentro del desarrollo de esta investigación, se propone una metodología que incluye el análisis de un sistema con la teoría de sistemas complejos y herramientas de investigación de operaciones. El uso de la simulación del proceso de cementaciones es clave en este trabajo, ya que permite determinar partes del sistema que coaccionan para que se origine falla operativa. La modelación matemática por otra parte, permite tratar de manera más específica una falla para finalmente optimizar.

Introducción .....	1
Capítulo I. Marco del problema.....	3
1.1 Problemática.....	3
1.2 Situación deseable.....	3
1.3 Problema planteado .....	3
1.4 Objeto de estudio y dimensión .....	4
1.5 Objetivos de investigación.....	4
1.6 Limitantes de la investigación .....	5
Capítulo II. Marco Teórico .....	6
2.1 Análisis de Fallas .....	6
2.2 Diagrama del Modelo del Diagnóstico Causal.....	7
2.3 Teoría Básica de Sistemas Complejos.....	9
2.3.1 ¿Cómo se define el sistema?.....	9
2.3.2 Método de descomposición y composición sistémica .....	11
2.4 Simulación .....	12
2.4.1 Simulación orientada a objetos (SOO) .....	13
2.4.2 Metodología de simulación .....	14
2.4.3 Simulación en Simio.....	17
Capítulo III. Metodología propuesta para un análisis de fallas .....	20
3.1 Análisis de fallas operativas en servicios.....	20
3.2 Definición del problema, elementos e interacciones.....	21
3.3 Obtención de datos y preparación.....	21
3.4 Determinación de fallas, causas e interrelaciones.....	21
3.5 Simulación del proceso completo .....	22
3.6 Construcción del modelo matemático .....	22
3.7 Análisis de resultados .....	22
3.8 Contribución del enfoque de complejidad.....	23
Capítulo IV. Definición del sistema: servicio de cementaciones desde un enfoque de complejidad.....	24
4.1 ¿Qué es una cementación? .....	24

4.2 Elementos del sistema.....	25
4.3 Suprasistemas y subsistemas .....	30
4.4 Entorno .....	33
4.5 Variables del sistema.....	34
4.6 Aspectos teleológicos.....	35
4.6.1 Atractores del sistema y cuencas de atracción .....	35
4.7 Bifurcaciones del sistema .....	36
4.8 Tipo de acoplamiento.....	36
4.9 Tipo de sistema teleológico.....	37
4.10 Descomposición sistémica del sistema .....	37
4.11 Composición sistémica del sistema.....	39
4.11.1 Análisis de importancia de resultados emergentes .....	39
4.12 El sistema definido.....	39
Capítulo V. Fallas operativas del servicio de cementaciones.....	41
5.1 Tipos de fallas operativas en el proceso de cementaciones.....	41
5.2 Clasificación de fallas operativas de acuerdo a su criticidad.....	42
5.3 Interrelación causal de fallas operativas.....	44
Capítulo VI. Simulación del sistema.....	45
6.1 Simulación del proceso de cementaciones en Simio.....	45
6.4 Análisis de resultados.....	57
Capítulo VII. Análisis de datos de demanda .....	58
7.1 ¿Los datos recopilados son suficientes? .....	58
7.2 Selección de los datos que se requieren para el modelo.....	59
7.3 Preparación de los datos para utilizarlos en el modelo .....	60
Capítulo VIII. Modelo matemático para un tipo de falla: Falta de personal.....	67
8.1 Creación del modelo matemático .....	67
8.2 Solución del modelo .....	69
8.3 Análisis de los resultados del modelo matemático.....	78
Conclusiones y trabajos futuros .....	79
REFERENCIAS .....	81





# Introducción

---

En México existe un cliente principal para muchas compañías de inversión del tipo privada en el giro petrolero. Es importante mencionarlo, ya que PEMEX tiene ciertas características que pueden marcar el desempeño de las empresas petroleras. Petróleos Mexicanos es el único que puede brindar trabajos a todas las compañías del tipo petrolero que existen en México. Si bien, las demás compañías se contratan entre sí cuando lo requieren, los contratos que siempre se buscan son los que brinda PEMEX. Actualmente con el nuevo gobierno, el país se ha abierto a la industria privada por lo que la cantidad de trabajo para empresas de este tipo aumentará. Así que es necesario que las compañías que ya se encuentran en el país trabajando y las que apenas entrarán, tengan un control absoluto de su proceso. La compañía que se tomará como base en esta investigación, tiene (en teoría) un control sobre el proceso con el que opera; pero en repetidas ocasiones los servicios entregados al cliente presentan fallas operativas que tienen costos altos. En el marco político, la apertura del país a nuevas formas de trabajo tiene un valor importante para el desarrollo tecnológico y económico siempre y cuando los servicios que se entreguen enfatizan el crecimiento del país y no solo permitan el enriquecimiento privado.

En cuanto a la compañía que se estudia en este trabajo, se puede decir que cuenta con muchas líneas de servicio de exploración y producción. Tiene presencia en el país desde hace más de 60 años. Por lo que tiene un sistema de administración bastante complejo e híbrido. Cuenta con certificaciones, ISO 9000, 14000 y 18000; pero eso no significa que tiene un control absoluto de sus procesos. Para este trabajo tomaremos uno de los aspectos de Calidad que por lo regular no es atribuido a esta área: Las fallas operativas. En la práctica este tipo de aspectos usualmente se abordan desde el área de operaciones. Sin embargo, si se está hablando de "mejora continua" es imposible no tomar en cuenta el control sobre las fallas que un proceso tiene ya que pueden desembocar en una entrega de un producto no conforme. Actualmente podemos encontrar una gran cantidad de información referente al tema de Calidad, como mejora continua, aprovechamiento de los recursos, eficiencia y control en los procesos, entre otras; pero muchas veces es tan amplio el tema que difícilmente podemos incurrir en pequeñas áreas de estudio que nos permitirán entender el funcionamiento de un sistema.

Comúnmente las fallas operativas dan evidencias, cuyo análisis expone las deficiencias en el sistema. Pueden tener diferentes áreas de origen, como producción, la selección de materiales y procedimientos de diseño u operación. Una vez que es posible conocer el origen y sobretodo el marco en el cuál se desarrolló la falla, es posible prevenirlas o

minimizarlas. En cualquier tipo de servicios el análisis y la planeación, son importantes para alcanzar las expectativas de los clientes. Sin embargo, también hay fallas cuya ocurrencia es importante mantener bajo control, ya que impactan directamente en los costos. Hoy en día, la mayoría de los enfoques de análisis de fallas se centran en los productos y no en los servicios. Aunque la literatura define al servicio también como un producto, las formas de tomar acción cuando uno y otro ha presentado una falla no son parecidas. En el caso del servicio de cementaciones, no podemos quitar del pozo petrolero el cemento ya colocado y fraguado e introducir un cemento nuevo, por lo que su forma de tratar las fallas en este proceso debe ser desde un punto de vista sistémico. Por ende, los servicios con fallas son más difíciles de tratar debido a la imposibilidad de realizar pruebas físicas cuando se produce un fallo.

En el área petrolera existen ciertos controles en los procesos que permiten entregar servicios de la forma acordada con el cliente y con sus requerimientos técnicos. Sin embargo, no es de extrañarse que grandes sumas de dinero tengan que ser pagadas cuando se incurre en un trabajo con fallas. El proceso operativo que da lugar a un servicio de cementaciones, incluye indicadores que pudieran ser críticos en las operaciones; pero son del tipo ambiental, dejando de lado lo que pudiera generar una falla operativa.

En cuanto a los costos de no calidad, es importante considerar los internos y los externos. Los costos internos se refieren a aquellos que son propios de la organización como los costos de materiales desperdiciados y su incidencia, es decir costos por fallas dentro del proceso. También se consideran los costos por uso de recursos humanos y materiales externos al proceso. Este último no es tan evidente y sucede debido a que en repetidas ocasiones las compañías toman contratos que no son capaces de cumplir y cuando llega la fecha de entrega del servicio, no cuentan con el personal o los equipos suficientes, entonces piden esos recursos a otras bases operativas; pero con un costo mucho más alto que si los tuvieran asignados al centro de costos correspondiente. Esta es una de las fallas que no afecta al cliente de forma directa por lo que son internos y la falta de planeación de recursos ante una demanda dada. Una vez que las causas de las fallas fueron identificadas (sobre todo las más críticas) las acciones que se tomen, podrán reflejarse en la minimización de costos. Por otro lado, los costos externos son aquellos que salen del proceso y por lo tanto es más difícil identificarlos y controlarlos. Sin embargo, en este caso podemos considerar los trabajos perdidos por una mala imagen debida a una gran cantidad de fallas, o bien los gastos ocasionados al cliente cuando se le entrega un servicio no conforme. Ninguno de estos dos últimos son fáciles de cuantificar. Sin embargo, si son identificadas las variables críticas consideradas como las posibles causas que ocasionan las fallas más críticas se pueden aplicar métodos duros para tratarlas y sobretodo minimizar los costos.

# Capítulo I. Marco del problema

---

El objetivo de este capítulo es definir el problema que se desea analizar en este trabajo de investigación. En el capítulo IV llamado Definición del sistema se detallará en qué consiste el servicio de cementaciones.

## **1.1 Problemática**

El área de Cementaciones de una empresa petrolera privada tiene actualmente fallas operativas de diferentes tipos que le generan costos de no calidad muy altos. Además de posibles pérdidas de trabajos futuros por inconformidad por parte del cliente. Si bien, los costos producidos por tiempo no productivo ó averías en los pozos petroleros son cuantificables, los costos por pérdidas de trabajos son más sutiles de considerar. El proceso incluye equipo, personal e instalaciones. Sin embargo, también se apoya en otras líneas que le dan soporte como mantenimiento y compras.

## **1.2 Situación deseable**

Los servicios de cementaciones presentan mínimas fallas operativas, las cuales no tienen alto impacto en las ganancias de la empresa. El proceso de cementaciones tiene bajo control todas las variables que causan fallas operativas con costos de no calidad e insatisfacción al cliente.

## **1.3 Problema planteado**

El problema puede ser entendido como la discrepancia entre lo real y lo deseado, es decir la brecha que existe entre estos dos estados. Es necesario el análisis del proceso de cementaciones de pozos petroleros, para conocer el estado cuando se entrega un servicio con fallas operativas. De esa forma, se podrán encontrar cuáles son las causas de cada falla y cómo se relacionan entre sí. Así mismo, se podrá definir su criticidad según su frecuencia de aparición y cómo influye cada una en un cada tipo de falla.

El problema que se tratará en esta investigación es:

*El proceso de cementaciones incurre en fallas operativas de altos costos. Las fallas suceden durante el proceso y después de que el servicio es entregado. Se considera un sistema complejo que tiene impacto en salud, seguridad, medio ambiente y calidad. No se conoce el conjunto de causas que provoca las fallas y por ello se pretende analizar este proceso*

Una vez que la brecha entre el estado actual y el estado deseado se ha sido definido, el sistema puede definirse.

## **1.4 Objeto de estudio y dimensión**

El objeto de estudio de esta investigación es el servicio de cementaciones de una empresa petrolera privada cuando presenta fallas operativas.

El servicio de cementaciones que se toma como referencia para esta investigación pertenece a una empresa petrolera privada transnacional que opera en México con siete diferentes bases a lo largo del país. Tiene en México presencia en la zona Marina que comprende a Cd. del Carmen, la zona Sur que incluye a Villahermosa, Comalcalco, Paraiso (en Tabasco) y en Reforma, Chiapas y en la zona Norte que abarca Poza Rica, Veracruz, Altamira y Reynosa en el Estado de Tamaulipas. Su cliente principal es PEMEX, sin embargo, esto no exime que brinde servicios a otras compañías de tipo privado.

Cuenta con varias líneas que son además de Cementaciones, Perforación, Registros, Fluidos, Lodos, entre otros servicios integrales petroleros. También incluye la venta de productos, que pudieran ser desde aditivos y herramientas hasta equipos más sofisticados. Sin embargo, para este punto solo se van a desarrollar los que atañen a Cementaciones. Los servicios principales que ofrece esta línea son: ventas de accesorios y servicios de cementaciones a pozos petroleros.

La plantilla de personal con el que actualmente brinda el servicio de cementaciones en todo el país es alrededor de 1000 empleados. Y se estima que tiene un ingreso promedio anual de 132 000 000 USD.

## **1.5 Objetivos de investigación**

Los objetivos de este trabajo de investigación son los siguientes:

General:

- ▶ Analizar un proceso de cementaciones de pozos petroleros que presenta fallas operativas y diseñar dos modelos, uno de optimización y otro de simulación para minimizar aquellas fallas que presentan mayor impacto en el proceso.

Particulares:

- ▶ Describir la situación actual en la que se encuentra el servicio de cementaciones con base en su proceso actual.
- ▶ Definir el proceso de cementaciones con la teoría básica de sistemas complejos para comprender sus interrelaciones, propiedades emergentes y variables.
- ▶ Distinguir, definir y priorizar las causas principales que originan fallas en el proceso de cementaciones.

- ▶ analizar el proceso de cementaciones en diferentes escenarios considerando cambios en las variables que se identifiquen como críticas a través del uso de simulación.
- ▶ Construir un modelo matemático que optimice el uso de recursos utilizados en el proceso de cementaciones para evitar una entrega de servicio con fallas operativas.
- ▶ Realizar recomendaciones con base en todo el aprendizaje obtenido en la investigación.

## **1.6 Limitantes de la investigación**

Existen ciertos desarrollos relacionados con el tema de investigación que podrían estar fuera del alcance de este trabajo, algunas son las siguientes:

- a) El tratamiento de fallas por medio de métodos difusos.
- b) Los enfoques estadísticos clásicos que se han utilizado para el tratamiento de fallas quedan fuera de alcance debido a que la información no está disponible.
- c) La metodología que se propone para desarrollar esta investigación, es con base en trabajos que guardan cierta relación con el tema, sin embargo, se ha combinado con técnicas de investigación de operaciones. Las metodologías existentes para tratar fallas operativas quedan fuera de este trabajo.

Sin duda alguna, cualquiera de los aspectos mencionados puede ser tratado en trabajos futuros.

# Capítulo II. Marco Teórico

---

En este capítulo se busca definir las bases teóricas que han sido utilizadas para desarrollar el trabajo de investigación. Se mencionan de forma somera las más importantes.

## 2.1 Análisis de Fallas

Comúnmente el análisis de fallas brinda evidencia de las deficiencias más importantes de un sistema. Una falla puede tener diferentes orígenes, como por ejemplo producción, selección de materiales, diseño o procedimientos de operación. Una vez que se conoce el origen, es posible prevenir o reducir al mínimo el riesgo de que una falla ocurra.

En cualquier tipo de servicios, es importante llegar a las expectativas de los clientes y en repetidas ocasiones, desde el diseño, preparación y servicio, una falla puede ocurrir. Ya sea que afecte o no al cliente. Sin embargo, es importante que el sistema de operación se encuentre bajo control, ya que cualquier defecto tiene un impacto directo en los costos. Más allá del aspecto económico, algunas fallas afectan la seguridad del cliente o de los empleados, el medio ambiente o incluso aspectos legales.

Los costos provocados por fallas, son comúnmente<sup>1</sup>:

- *Reparación o reemplazo*
- *Pérdida de ganancias mientras no se brinda el servicio*
- *Costos de reemplazo de servicio*
- *Costos de las consecuencias del daño*
- *Otras implicaciones (seguridad, pérdida de confianza, imagen y comercio)*

Hoy en día, la mayoría de los enfoques del análisis de fallas se centran en los productos y no en los servicios. Sin embargo, las fallas en los servicios son más difíciles de tratar debido a la imposibilidad de realizar pruebas físicas cuando se produce una falla. Por lo que es importante contar con una metodología que guíe el análisis. Un punto importante que se relaciona con lo anterior es, la disponibilidad de todos los datos necesarios. Aún con todos los detalles que pudieran faltar en el proceso del análisis de fallas, se sugiere al menos contestar las siguientes preguntas<sup>2</sup>:

---

<sup>1</sup> Paulo M.S.T. de Castro \*, A.A. Fernandes. Methodologies for failure analysis: a critical survey. Materials and Design **25** (2004) 117-123.

<sup>2</sup> Rossmanith HP. Structural failures – liability, learning from failures, technical insurance and legal consequences. Invited lecture 5th special chair AIB-Vin cote 1995, Vrije Universiteit Brussel, 21 February 1995.

*¿Qué pasó? ¿Dónde sucedió?, ¿Cómo ocurrió?, ¿Alguien lo causó? ¿Existe un responsable de lo que sucedió?, ¿Cuál es el costo de reparación o reemplazo?, ¿Cuáles son los daños ocasionados a todas las partes involucradas?*

Las respuestas a las preguntas anteriores, ayudan a obtener información de cada falla de forma objetiva. Y aunque están centradas en productos y no en servicios, la generalidad que brindan es de utilidad para entender aún más cada falla.

Una estructura general del análisis de fallas consiste en examinar las fallas de una en una, de manera que la información que se obtiene es mucha. Alternativamente algunos trabajos –aunque para productos o materiales- sugieren sintetizar las fallas en cuatro elementos<sup>3</sup>:

*Esfuerzo, Ambiente, Defectos y propiedades del material y la interacción entre todos estos elementos.*

Por lo regular, la información que existe sobre este tema, y las metodologías se centran en aspectos técnicos de las fallas. Sin embargo, las causas reales ocurren en la ejecución de los procedimientos, las deficiencias de comunicación y la confusión en la definición de las responsabilidades. Es imposible no pensar en el impacto del factor humano, sin embargo al existir una metodología difusa para tratar las fallas en servicios se tiene que realizar desde un enfoque sistémico y con herramientas que permitan dilucidar información importante para el proceso que se analiza.

Con la información analizada en esta sección, se elegirán herramientas que no solamente permitan utilizar la información después de la falla si no que permitan entender de manera conjunta el comportamiento de un sistema –en este caso el proceso de cementaciones de pozos- cuando un conjunto de fallas ocurre.

## **2.2 Diagrama del Modelo del Diagnóstico Causal<sup>4</sup>**

El diagrama del efecto causal es uno de los modelos teóricos más efectivos para expresar relaciones con incertidumbre. Un sistema de diagnóstico consiste en conocimiento basado en el sistema que se estudia que servirá para identificar todas las posibles causas de una falla que han sido observadas como síntomas. Un sistema que incluye varios elementos – como el proceso que se estudia en esta investigación – puede ser descompuesto en una

---

<sup>3</sup> Thomas JM. Industrial experience with structural failure. In: Wierzbicki T, Jones N, editors. Structural failure. John Wiley; 1989. p. 511–45

<sup>4</sup> Guo Li, Jianmin Gao, Fumin Chen. Construction of Causality Diagram Model for Diagnostics. IEEE. 2008.

jerarquía para que su análisis sea más sencillo. En un modelo de estructura por jerarquías, el nivel superior es organizado por subsistemas que a su vez se compone de sub-sistemas. Una falla ocurre en distintos niveles de un proceso. Un componente puede incluir más de una falla y a su vez un objeto identificado como causa puede desencadenar más de una falla. Desde el punto de vista estructural, puede existir una relación causal entre las formas de las fallas o bien que algunas causas se combinen en un mismo nivel y originen una falla. Cuando esta interacción ocurre, la influencia de cierto elemento puede causar una afectación en otro elemento e inmediatamente incurrir en una falla.

La construcción de este modelo conceptual, se basa en la descomposición del modelo complejo que se está analizando. Para que la visualización sea más sencilla, el tipo de falla se abrevia como (FM) mientras que el componente que contribuye a esta falla se denota como (C) tal como se muestra en la figura 2.1. En el lado izquierdo, se ilustra la relación causal lógica entre los tipos de falla, mientras que el lado derecho indica la descomposición jerárquica del sistema complejo. Las relaciones específicas de dependencia que existen entre el nodo falla y el nodo componente se denota como una línea punteada. A través del mapeo de procesos, el tipo de falla es asociada con el correspondiente componente.

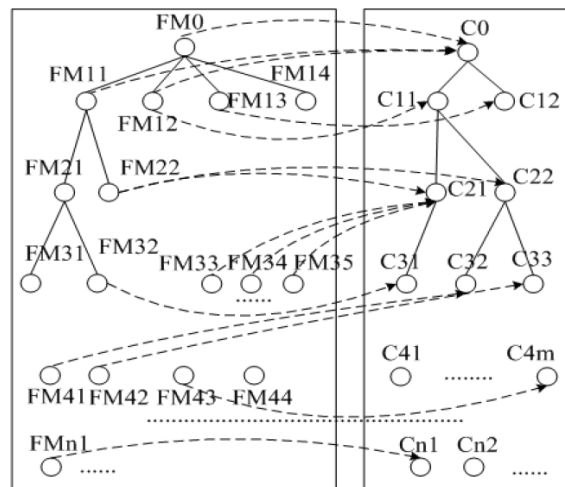


Fig. 2.1. Mapeo de fallas y causas

Una vez que se define el mapeo de fallas con jerarquías, se determina el conjunto de causas que se atribuyen a cada una de las fallas.



## 2.3 Teoría Básica de Sistemas Complejos

Generalmente se le da el nombre de sistemas complejos a aquellos que tienen muchos componentes y muchas interrelaciones o bien interdependencia entre los componentes.<sup>5</sup> Entonces definiendo un sistema complejo como:

*una estructura jerárquica de entidades compuestas por subsistemas interrelacionados a varios niveles. Cada uno de estos subsistemas está compuesto por subsistemas interrelacionados a nivel inferior, y así sucesivamente. Las interrelaciones a todos los niveles son no lineales y dinámicas y muchas veces circulares, llamadas retroalimentaciones.*<sup>6</sup>

Se entiende que un enfoque de sistemas complejos será aquel que se construya con base en la complejidad y considere todos los elementos de un sistema complejo sin dejar de entenderlo como una parte de un entorno o ambiente. Estos fenómenos pueden ser sociales, humanos u organizacionales. Cada campo define el sistema complejo de diferente forma, sin embargo, nunca se deja de lado el que ese sistema es parte de otro sistema mayor o varios que forman parte del universo.

La ventaja de utilizar el enfoque de sistemas complejos y por ende la teoría de la complejidad es que el sistema que se analiza no se ve como un punto aislado, sino como un elemento de un sistema mayor, lo que permite evitar miopías al momento de definir los objetivos del sistema -modelo que se va a crear- y con ello aplicar técnicas de simulación y optimización para intervenir en algún estado de interés de ese sistema.

### 2.3.1 ¿Cómo se define el sistema?<sup>7</sup>

Un sistema es un conjunto de elementos que se encuentran interrelacionados entre sí y que el comportamiento de cada uno de ellos puede afectar al comportamiento del todo. Regularmente, es difícil anticiparse a un estado futuro de un sistema sin embargo siempre se tiene una imagen deseada o un escenario deseado del sistema que se quiere analizar. Cuando se percibe una diferencia entre lo deseado y lo que se tiene en un estado actual, se tiene un problema, es decir un conflicto que se puede tratar de reducir, optimizar o analizar. Sin embargo, para que esta brecha se reduzca se tienen que realizar acciones que modifiquen el estado actual y que lleve el sistema al estado deseado.

---

<sup>5</sup> Tarride M, Complexity and complex systems. Historia, Ciencias, Salud. Manguinbos, II (1), págs.46-66. 1995.

<sup>6</sup> Lara Rosano, F. Teoría, métodos y modelos de la complejidad social I. Seminario de Investigación. CCADET.

<sup>7</sup> Lara Rosano, F. Metodología para la planeación de sistemas: un enfoque prospectivo. Dirección General de Planeación, Evaluación y Proyectos Académicos, UNAM. México, 1990.

Un problema tiene como característica que es un resultado de un proceso histórico o bien causal y también que es parte de un entorno natural o social donde surgió. Es por esto que un problema no puede ser solucionado si no se toman en cuenta todos los aspectos que lo afectan relevantemente lo que implica tener un enfoque totalizador. La problemática por otro lado es sólo un conjunto de percepciones que necesita ser procesada e interpretada con arreglo a ciertos esquemas conceptuales, es decir, de ella se extrae el problema que se quiere analizar.

Por medio de un proceso epistemológico se obtiene un objeto de estudio que será el modelo conceptual de la realidad donde se van a definir los problemas específicos que se van a tratar. El enfoque que se utiliza en este proceso es sistémico y tiene tres características principales:

1) Es holístico, toma en cuenta el problema total considerando todos los aspectos relevantes

2) Es transdisciplinario, porque al obligarse a considerar todos los aspectos del problema necesita auxiliarse de varias disciplinas distintas

3) Es dinámico, porque no solo estudia la génesis del problema a través del desarrollo histórico, si no que trata de proponer como soluciones procesos dinámicos que incluyen adaptaciones continuas, en vez de una solución fija y estática.

Cuando se analiza un sistema, se debe construir un modelo conceptual de la porción de la realidad relevante al problema, que incluya la definición del sistema y sus elementos, así como los entornos relevantes y relaciones que se establecen. Las principales definiciones a considerar son:

- Definir las variables del sistema. Incluir variables de estado, de control, de respuesta.
- Definir las restricciones del sistema. Que es determinar aquellas que son esenciales para definir los límites y alcances del espacio de soluciones factibles.
- Definir el entorno: incluir las variables incontrolables, que son aquellas que provienen del entorno y actúan sobre el sistema afectándolo y también definir la estructura del entorno en sí.
- Identificar los elementos intencionales, es decir, definir una concepción causal del sistema.
- Identificar los objetivos de los elementos intencionales. Algunos de ellos pueden ser las funciones que desempeña el sistema, los subsistemas, o los objetivos propios del suprasistema y de los subsistemas, los objetivos particulares de los elementos intencionales que pertenecen al sistema y que pertenecen al entorno.
- Definir la organización del sistema. que incluye el tipo de organización que es, el proceso con el que trabaja, la forma estructural, la estructura informal del sistema, sus políticas, etc.

### 2.3.2 Método de descomposición y composición sistémica<sup>8</sup>

El análisis de un sistema se puede realizar por medio de dos procedimientos de construcción sistémica: por composición y por descomposición. Los métodos anteriores producen dos tipos de representaciones sistémicas: compuesta e integral.

La construcción por *composición* consiste en determinar el sistema inicial y después comprender los elementos de ese sistema como una totalidad gobernada por leyes comunes. La siguiente etapa consiste en deducir las propiedades del sistema estudiando los componentes básicos. Estos componentes deben ser clasificados y después relacionarlos entre sí. Es decir, la idea básica es iniciar con los objetivos tácticos para conocer aquellos elementos que dan origen a resultados emergentes y con ello cumplir los objetivos estratégicos e identificar aquellos elementos del sistema que dan resultados emergentes y con ello se cumplen los objetivos finales para alcanzar finalmente la misión que se estableció para cierta organización<sup>9</sup>. La figura 2.2 muestra visualmente el proceso de composición.

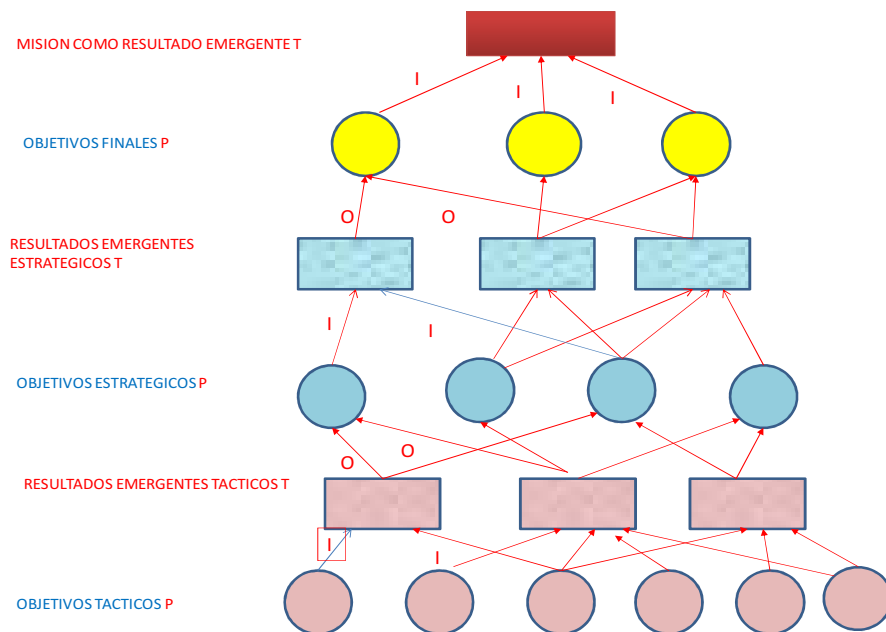


Fig. 2.2 Método por composición. Fuente: Teoría Básica de Sistemas Complejos Teleológicos CCADET.

Por otro lado, el método de descomposición sucede en forma inversa que el de construcción, es decir, se parte del sistema hacia sus componentes. Básicamente consiste en desmembrar el sistema en subsistemas, cuyas funciones y propiedades aseguren las

<sup>8</sup> Negroe, G. Papel de la planeación en el proceso de conducción. Universidad Nacional Autónoma de México. pp 10. 1980

<sup>9</sup> Lara, R. Teoría Básica de Sistemas Complejos Teleológicos. CCADET.

del sistema en su conjunto mediante una organización adecuada. Consta de dos partes, la parte externa y la parte interna. La primera establece el papel que juega el sistema en el suprasistema, definiendo los objetivos y funciones totales mientras que la interna establece estructuras funcionales que aseguren el funcionamiento del sistema, por medio de la cual se busca alcanzar ciertos objetivos dentro del suprasistema, definir las interrelaciones y funciones.

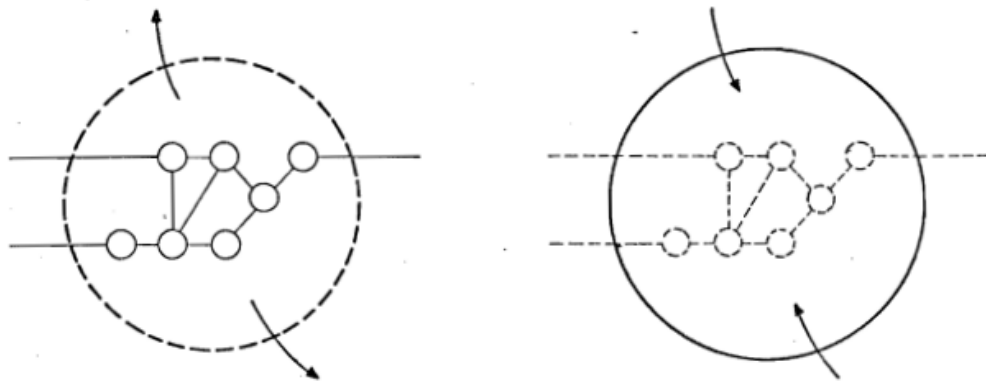


Fig. 2.3 Representación del sistema a través del proceso de construcción por composición y descomposición. Fuente: Teoría Básica de Sistemas Complejos Teleológicos CCADET.

## 2.4 Simulación

La simulación es entendida como una forma de imitar algún sistema del mundo real y puede ser utilizada para pronosticar el comportamiento futuro de un sistema y determinar cuáles acciones pueden ser tomadas para influir en ese comportamiento. Es por ello, que la simulación digital es de gran utilidad en procesos químicos, petroleros, de transporte, militares, sociales, etc. Podemos entender la simulación como una técnica de investigación o enseñanza que reproduce en forma semejante o aproximada los eventos reales y los procesos en ciertas condiciones de prueba<sup>10</sup>. Regularmente, la simulación es usada cuando se quiere analizar la complejidad de un sistema sin generar costos altos o tiempos prolongados - siempre y cuando los modelos sean prototipos de un modelo real - por lo que actualmente es muy utilizada para obtener información relevante del sistema que se quiere modelar. Además, es mucho más simple el control de ciertas condiciones del modelo en una simulación que en un sistema real que involucre personas, instalaciones, equipos, etc.

<sup>10</sup> Figueras J. Modelos de Simulación usando simio y redes de petri. Universidad Nacional Autónoma de México. pág. 2.

La importancia de definir el sistema de manera adecuada es debido a que un modelo de simulación que represente el problema o la situación real arrojará mejores resultados que otros modelos que no se hayan construido tomando en cuenta variables, parámetros o estados del sistema que sean relevantes para el modelo. Existen simulaciones de eventos continuos, discretos o mixtas en las que la diferencia entre ellas es la definición de los valores de las variables que utilizan. En un modelo discreto, las variables dependientes únicamente cambian sus valores en ciertas partes de la simulación, mientras que un modelo continuo puede tener como valor de la variable dependiente una función del tiempo. Cuando se habla de modelos combinados se refiere a aquellos modelos en donde las variables pueden cambiar de forma discreta o continua. En esta tesis, se utilizará un modelo de simulación combinado.

Además de la simulación por tipo de evento, se utilizan diferentes técnicas para abordar las simulaciones siendo una de ellas la simulación orientada a objetos que se explica en los siguientes apartados.

#### **2.4.1 Simulación orientada a objetos (SOO)<sup>11</sup>**

La simulación orientada a objetos (SOO) modela el comportamiento de objetos que interactúan en un periodo. Existen definiciones importantes dentro de este tema que muestran los beneficios de la construcción del modelo de simulación cuando se le da un enfoque orientado a objetos,

- Clase: Descripción de un grupo de objetos con propiedades similares, es decir se puede entender como un patrón y puede ser reutilizado
- Composición: Capacidad de definir nuevos modelos formados por submodelos anteriormente definidos y conectados entre sí.
- Especialización: Capacidad de definir nuevos modelos especializando otros ya existentes
- Parametrización: propiedades que pueden cambiarse para adaptar el modelo a sus diferentes aplicaciones.
- Herencia: Mecanismo para compartir información entre clases mediante la especialización
- Polimorfismo: Aquellas interfaces con estructuras equivalentes y que además tienen los mismos grados de libertad.

Prácticamente en la SOO el modelador crea objetos y especifica cuál va a ser el comportamiento de cada uno a través de la definición de sus parámetros. Los objetos se

---

<sup>11</sup> Joines J. and Roberts S. Object-Oriented Simulation. Handbook of Simulation, edited by Jerry Banks. North Carolina State University. Chapter 11. 1998. pp 397.

comunican entre sí, basándose en el modelo conceptual construido realizando la simulación completa del modelo por medio de la integración de todos los objetos.

Algunos de los objetivos de este tipo de simulación son:

- Simplificación en el diseño y realización del modelo al facilitar la modularidad,
- Agilizar el desarrollo de los modelos ya que se puede trabajar de forma independiente en diferentes partes del modelo,
- Facilitar el refinamiento, modificación y mantenimiento de los modelos.

Al modelar un modelo dinámico complejo, resulta conveniente hacerlo de forma modular, es decir, descomponer el sistema en partes y modelar las partes como submodelos. Esto ayuda a tener una interpretación visual de los objetos.

#### **2.4.2 Metodología de simulación<sup>12</sup>**

Es importante que se utilice una metodología para desarrollar la simulación debido a que es muy común que cuando se inicia un proyecto, sea muy sencillo perderse en la simulación misma sin importar si los objetivos han sido cumplidos o no. En este trabajo, se utiliza una metodología propuesta por Banks Jerry la cual es para eventos discretos y continuos. La figura 2.2 muestra la metodología y a continuación es explicada paso a paso.

*1. Definir el problema:* Cada simulación inicia con alguna problemática o estado. Si esta problemática la brinda quien posee el problema (cliente), el analista debe tener un gran cuidado para asegurarse que el problema ha sido claramente entendido. En otro caso, cuando el problema lo prepara el analista que simulará el sistema es importante que el cliente comprenda y esté de acuerdo con la simulación. Incluso con todas estas precauciones es posible que el problema necesite ser reformulado a medida que la simulación se desarrolla.

*2. Establecer objetivos y desarrollar un plan para el proyecto de simulación.* Otra forma de cumplir este paso es "preparar una propuesta de simulación". Este paso debe ser completado independientemente que su postura sea la de cliente o analista (ej. como un consultor externo o interno). Los objetivos indican lo que se tiene que responder con la simulación. El plan para el proyecto incluye los escenarios que se van a desarrollar. El plan para el estudio debe indicar los términos de tiempo que se van a requerir, el persona que se va a necesitar, así como requerimientos de hardware y software, los pasos de la investigación, los costos del estudio y formas de pago.

---

<sup>12</sup> Banks, Jerry. Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. John Wiley & Sons, Inc. pp. 15 - 18.

3. *Conceptualización del modelo.* El sistema real que se analiza es abstracto como modelo conceptual. Una serie de relaciones lógicas y matemáticas existen entre los componentes y la estructura del sistema. Se recomienda que se inicie con un modelo simple y que se vaya detallando hasta que se alcance la complejidad deseada. Las características especiales se pueden adicionar al final. El cliente debe estar involucrado en el proceso de la construcción del modelo, esto ayudará a mejorar los resultados del modelo conceptual. Cabe mencionar que el modelo conceptual también debe ser verificado y validado.

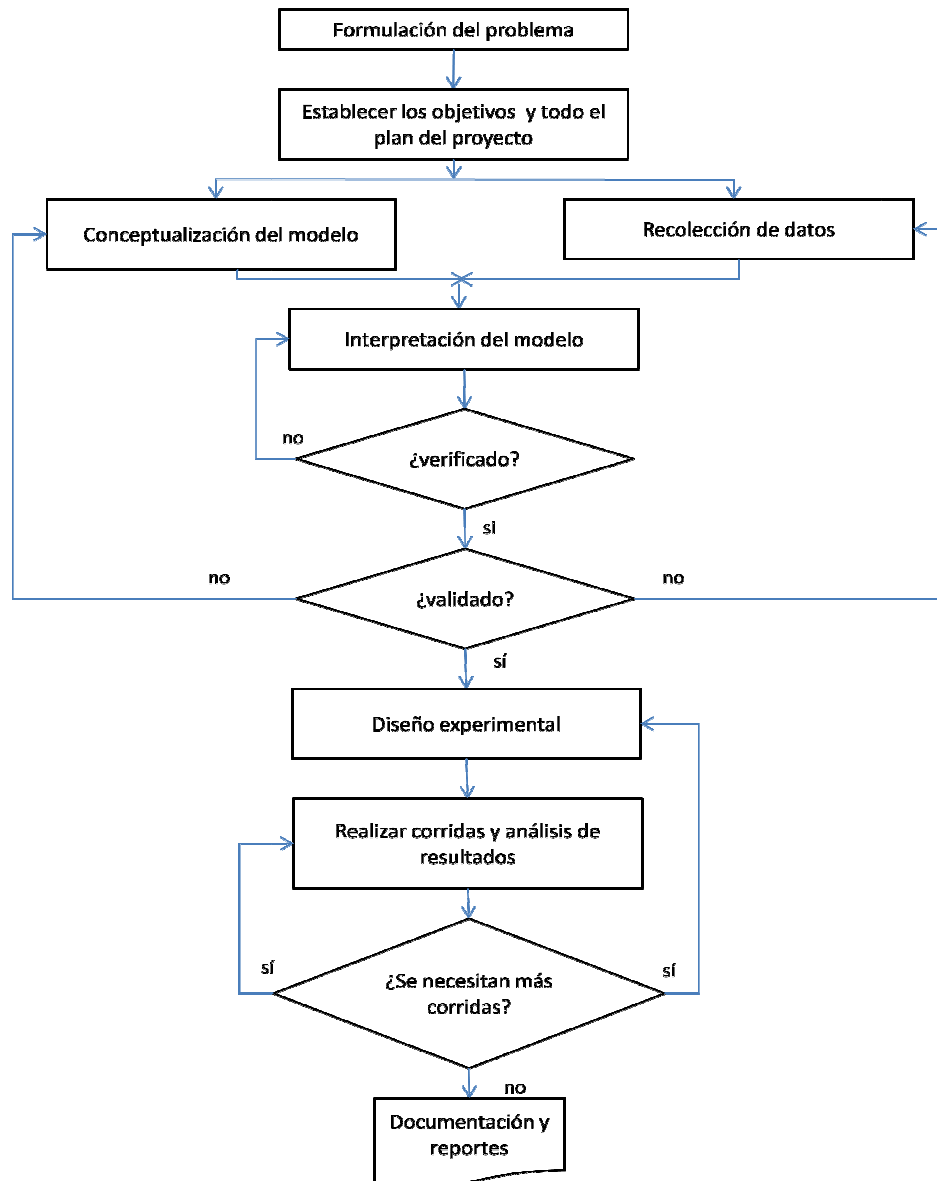


Fig 2.4. Metodología propuesta para eventos discretos y continuos. Fuente: Handbook of simulation, Banks Jerry.

4. *Recolección de datos:* Cuando la propuesta es "aceptada" se deben listar los requerimientos que se solicitarán al cliente. En la mejor de las circunstancias, el cliente puede recolectar los datos en el formato que se requiera para la simulación. Sin embargo, en varios casos el cliente entrega la información al analista y éste debe filtrarla para obtener lo que necesita.

5. *Programación del modelo:* El modelo conceptual construido en el paso 3 debe ser programado en el software o lenguaje elegido.

6. *Verificación del modelo:* La verificación consiste en revisar que el modelo opera correctamente. La pregunta en este paso es: "¿El modelo se ejecuta de manera apropiada?" Incluso en los modelos que plantean muchos libros de texto, es posible realizar una verificación. La verificación es una parte muy importante dentro de la metodología de simulación.

7. *Validación del modelo:* La validación consiste en determinar si el modelo representa el sistema real con una exactitud esperada. La pregunta ideal en este paso es: ¿El modelo podría sustituir el sistema real para cumplir los propósitos del experimento?. En caso de que exista un sistema ya definido llamado sistema base, una forma ideal de validar el modelo de simulación es compararlo con el existente. Existen muchos métodos y formas de realizar la validación. Cuando los resultados de la validación no son aceptables, es decir, no se cumple entonces se debe revisar si el modelo de simulación se ha planteado de forma correcta (paso 3) o bien si es necesario recolectar más datos (paso 4).

8. *Diseño experimental:* Para cada escenario que se va a simular, se necesitan tomar decisiones como por ejemplo tiempo de simulación, número de corridas o réplicas, etc.

9. *Ejecutar las corridas y analizar los resultados:* La realización de las corridas y el análisis de los correspondientes resultados son usados para estimar mediciones de comportamiento de los escenarios que fueron simulados.

10. *¿Se necesitan más corridas?:* Una vez que las corridas planeadas inicialmente fueron ejecutadas, el análisis de la simulación determina si es necesario que se simulen más escenarios. Esto es importante para determinar que los objetivos se hayan cumplido. En caso de que no sean suficientes, entonces se debe revisar el diseño experimental (paso 8) para determinar si es necesario aumentar el tiempo que se efectúa la simulación, si es necesario aumentar el número de corridas. También puede surgir el caso en el que simplemente se deban realizar más corridas (paso 9) para alcanzar los objetivos planteados.



11. *Documentación y reportes*: La documentación de todo el proceso es necesaria por numerosas razones. Por ejemplo, si la simulación será usada de nuevo por diferentes analistas es necesario que se entienda cómo opera el modelo y todos los detalles de reproducibilidad. También si el modelo es modificado, facilita todos los elementos que fueron cambiados y porqué. Los resultados deben mostrarse de una forma clara y concisa lo que ayudará a una mejor revisión de la formulación, las opciones que se ofrecen y el criterio de los modelos con los que se realizaron las comparaciones, los experimentos que se realizaron, etc.

### **2.4.3 Simulación en Simio**

Simio es una plataforma de simulación basada en objetos inteligentes, llamado así por sus siglas en inglés *simulation modeling framework based on intelligent objects*<sup>13</sup>. Los objetos inteligentes son construidos por los modeladores y pueden ser reutilizados en múltiples proyectos de simulación. Un objeto puede ser una máquina, un robot, un avión, un cliente, médico, tanque, autobús, barco o cualquier cosa que se necesite en el sistema que se está analizando. Un modelo se construye combinando objetos que representen los componentes físicos del sistema. Construir un objeto en Simio es equivalente a la construcción del modelo, por ende no existe diferencia entre un objeto y un modelo. Este concepto se refiere a un principio central en Simio: el de equivalencia.

#### **2.4.3.1 Características<sup>14</sup>**

- ✓ Es un programa joven, que utiliza avanzados enfoques de modelado que programas tradicionales como el Arena<sup>15</sup>, no cuenta con ellos.
- ✓ No requiere de conocimientos de un lenguaje de programación particular para la especificación de funcionalidades particulares del modelo desarrollado
- ✓ La interface gráfica es muy potente, lo cual hace que los modelos desarrollados sean fácilmente entendibles por personas ajenas al medio de modelado y simulación.

Simio ha sido producido por los desarrolladores originales del programa de simulación ARENA. En esencia, todos los objetos que se utilizan en el área de trabajo de SIMIO son objetos, pero toda la lógica propia del funcionamiento se rige por el uso de procesos.

Se compone principalmente de seis secciones:

---

<sup>13</sup> Dennis C.,Sturrock D. Introduction to Simio. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. 2009. Págs 314 – 321.

<sup>14</sup> Mújica M. A. Modelos de Simulación Usando Simio y Redes de Petri. Capítulo IV. Modelado de Redes de Petri en Simio. Primera edición. Octubre 2013. Págs. 101 - 105

<sup>15</sup> Arena Simulation Software.

*Facility view*: área de trabajo donde los modelos se desarrollan

*Área de procesos*: se utiliza para extender la funcionalidad de los objetos

*Área de definiciones*: donde se añaden las variables, propiedades y otros elementos

*Data*: se utiliza para llevar a cabo la definición de propiedades haciendo uso de tablas;

*Dashboard*: sirve para monitorear la evolución de los objetos en Simio

*Results*: es donde se pueden analizar los resultados.

### **2.4.3.2 Elementos útiles para la implementación<sup>16</sup>**

Los elementos más significativos de un modelo de simulación en Simio y que se utilizan para modelar un sistema son los siguientes:

Objetos fijos	Su ubicación es estática en el área de trabajo. Tienen asociados nodos o puertos por donde las entidades entran y salen de un objeto fijo. Entre ellos se pueden mencionar los objetos <i>Source</i> , <i>Server</i> y <i>Sink</i>
Conexiones (links)	Las conexiones definen un camino para las entidades y transportes entre dos nodos, y pueden ser unidireccionales o bidireccionales. Haciendo uso de las conexiones se pueden construir redes. Estas conexiones tienen un peso que puede ser utilizado para la selección de un camino, con base en el peso de cada conexión.
Nodos	Los nodos definen el punto inicial y final para una o más conexiones. Sirve también para modelar la intersección de múltiples conexiones de entrada y salida. Los nodos pueden definir los puntos de entrada y salida de un objeto fijo asociado.
Entidades	Son objetos que fluyen a través de las conexiones y entran y salen de los objetos; además pueden pertenecer a una red particular y seguir una secuencia de ruta específica. Las entidades son generadas por el objeto <i>Source</i> ; pero también pueden ser generadas a través del uso de un proceso interno al objeto y bajo condiciones específicas.
Estaciones	Es el sitio donde las entidades que fluyen pueden ubicarse en el objeto.
Atributos	Son asociados al modelo global como objeto <i>padre</i> o a los objetos que forman parte del modelo global. Tienen la característica que los

---

<sup>16</sup> Ibidem

valores que adquieren cambiarán a medida que se lleva a cabo la simulación

Propiedades

Se refiere a parámetros que definen la morfología del objeto, su objetivo principal es que estos parámetros sean definidos durante el proceso de desarrollo del modelo.

Fichas

Funciona para gobernar los pasos dentro del área de procesos. Gráficamente no se pueden ver, pero la ejecución de los diferentes procesos que definen el funcionamiento lógico de un objeto se lleva a cabo a través del flujo virtual de las fichas en los pasos que componen un proceso.

Las bases teóricas anteriores, servirán para la construcción del modelo de simulación del proceso que en esta investigación se analizará.

# Capítulo III. Metodología propuesta para un análisis de fallas

El objetivo de este capítulo es proponer y desarrollar una metodología para analizar las fallas operativas del proceso de cementaciones utilizando la simulación y la optimización como herramientas poderosas desde un enfoque de la teoría básica de sistemas complejos.

## 3.1 Análisis de fallas operativas en servicios

Actualmente los productos son considerados también como un servicio. Sin embargo, la forma de tratar fallas cuando un servicio ya fue entregado a un cliente difiere de cierta manera con las metodologías existentes para tratar fallas en productos. En el caso particular del servicio de cementaciones, una vez que el cemento ha sido colocado en el pozo petrolero, es imposible retirarlo o bien, reemplazarlo por otro. La figura 3.1 muestra la metodología de forma esquemática.

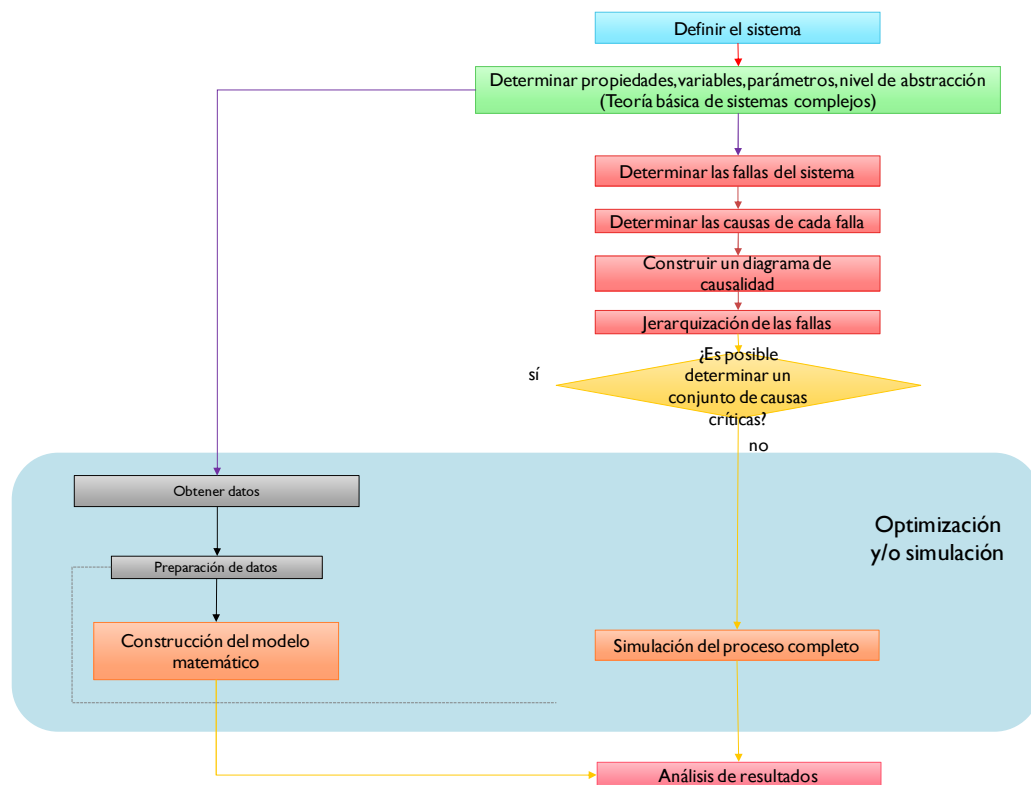


Fig. 3.1 Metodología propuesta para el análisis del proceso de cementaciones desde un enfoque de complejidad. Fuente: Elaboración propia.

Como parte de esta investigación, en los siguientes puntos se explica la metodología propuesta para analizar fallas en este tipo de servicios.

### **3.2 Definición del problema, elementos e interacciones.**

De manera inicial es importante que se defina la problemática en la que se encuentra el problema, para poder extraerlo y delinearlo y así establecer los objetivos del análisis. Se sugiere que una vez que haya sido planteado el problema específico que se va a tratar, sea visto como un sistema en el que existen elementos interactuando entre sí por lo que para este paso de la metodología se propone utilizar las bases de la teoría de sistemas complejos.

Principalmente se definen las interrelaciones más fuertes que existen entre los elementos y sobretodo identificar cómo afecta cada uno al sistema completo el comportamiento que presenta. Es importante también que se identifique cuál es el papel que juega el sistema en un suprasistema para poder definir los subsistemas funcionales que existen dentro del sistema. Además de lo anterior, es necesario que se defina el entorno del sistema y con esto determinar cuáles son los factores internos y externos que pueden ser amenazas u oportunidades para lograr los objetivos del sistema. En esta etapa se deben definir las variables de estado, de entrada y de salida para iniciar establecer los parámetros iniciales del sistema. Es importante que se puntualicen los factores que aceleran o retrasan la entropía.

### **3.3 Obtención de datos y preparación.**

Una parte importante de cualquier metodología es la recopilación de datos pero sobretodo contar con los datos preparados para utilizarlos. En ocasiones los datos son proporcionados por el cliente o bien por la empresa para la que se analizará el proceso; pero no necesariamente los datos se encuentran listos para usarse o serán de ayuda para trabajar con ellos.

El objetivo de este paso consiste en dejar los datos listos para utilizarse ya sea para construir un modelo matemático o bien un modelo de simulación. Todos los elementos importantes del sistema deben estar contenidos en los datos que se tienen para que se pueda proceder a colocar los valores correspondientes de cada parámetro.

### **3.4 Determinación de fallas, causas e interrelaciones.**

Este es uno de los pasos más importantes de la metodología y su objetivo consiste en identificar todas las fallas del sistema y las causas de cada una de ellas. Para determinar las causas de las fallas, cada una se tiene que tratar por separado para definir cada una de sus causas. Una vez que se determinaron los tipos de falla y sus causas, es importante

construir un diagrama en donde se interrelacionen las causas con las fallas pero de forma completa.

Por último, las fallas operativas deben ser jerarquizadas por algún criterio de criticidad. Este criterio se recomienda que se base en costos, en frecuencia o bien algún criterio que impacte al sistema.

A partir de los siguientes pasos se puede iniciar una simulación o una optimización, todo dependerá de los objetivos que se quieran lograr y sobretodo de los datos que se tengan disponibles. Para el caso específico de este trabajo primero se realizó la simulación del proceso de cementaciones completo ya que cualitativamente, muchas fallas operativas estaban presentes; pero no se conocían las partes del sistema que estaban involucradas. Una vez que la simulación se efectuó, se trató la parte del sistema que generaba más conflictos en los resultados finales por medio de un modelo matemático. No necesariamente se utilizan datos específicos de la simulación para alimentar el modelo matemático o viceversa. Sin embargo, sí están relacionadas debido a que se utilizan como herramientas de la investigación de operaciones que se complementan entre sí.

### **3.5 Simulación del proceso completo**

Una vez que se define el sistema con todos sus elementos, sus interrelaciones, variables y parámetros entonces se puede construir un modelo de simulación. Esta simulación ayudará a analizar el sistema completo. En el caso de esta investigación, el sistema es el servicio de cementaciones pero se analiza a través de su proceso. La simulación será en forma general y lo que busca es definir cuáles son los elementos críticos que impactan el sistema completo y sobretodo sus objetivos.

### **3.6 Construcción del modelo matemático**

Los modelos matemáticos funcionan para representar un sistema y sus relaciones incluyendo parámetros y variables que permitirán analizarlo. En este paso de la metodología propuesta, el fin es encontrar un modelo que represente las fallas operativas del sistema con el fin de minimizarlas.

### **3.7 Análisis de resultados**

Con los pasos anteriores, desde el análisis del sistema hasta la obtención de resultados permite conocer la dinámica del sistema y con ello identificar las fallas mas criticas que presenta el proceso de cementaciones. Es importante que esta metodología se cumpla para obtener resultados representativos y con base en ellos generar recomendaciones y aportaciones.

### 3.8 Contribución del enfoque de complejidad

La teoría básica de sistemas complejos permite establecer las interrelaciones críticas de un sistema que se estudia, pueden utilizarse técnicas de descomposición y composición o síntesis, es decir, partiendo desde un todo hasta llegar a cada uno de los elementos del sistema o bien en sentido contrario. Con estos tipos de alternativas se evalúa el impacto que tiene cada elemento en un estado global del sistema. Si se conocen los elementos y relaciones más importantes en el sistema que se desea estudiar, el modelado se fundamenta en variables y parámetros más sólidos y que representan mejor los objetivos del sistema. Esta contribución se puede ver en la figura 3.1.

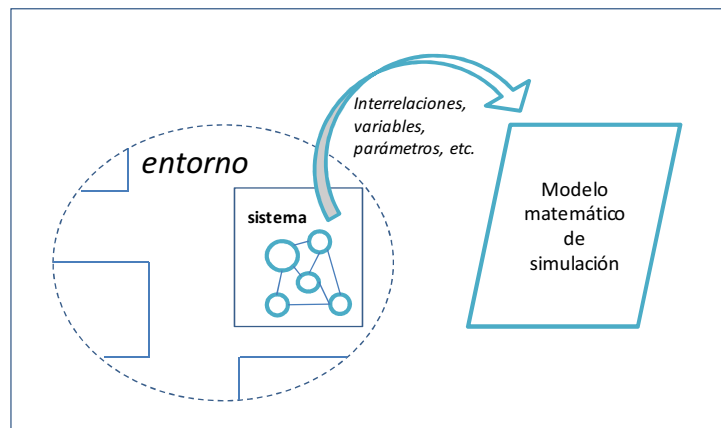


Fig. 3.1 Contribución del enfoque de sistemas complejos en una modelación de un sistema. Fuente: elaboración propia.

# Capítulo IV. Definición del sistema: servicio de cementaciones desde un enfoque de complejidad.

---

El objetivo de este capítulo es detallar en qué consiste una cementación y establecer el sistema que se va a estudiar, sus elementos, interrelaciones y subsistemas. En ese contexto se podrá definir aquellos elementos que impactan en los objetivos más importantes del sistema.

## 4.1 ¿Qué es una cementación?

Un trabajo de cementación es una operación de gran importancia durante la perforación de pozos petroleros. Principalmente ayuda a adherir las tuberías a la formación, estabilizar los pozos petroleros, prevenir colapsos y evitar la contaminación en la formación. Este trabajo es requerido en cada etapa de la perforación de un pozo e incluso es necesario para el cierre de un pozo cuando su utilidad ha terminado.

El proceso de cementaciones es complejo porque requiere un tiempo específico, personal con experiencia y materiales con altos costos. Además, cuando un trabajo de cementación es requerido, se necesita una planeación técnica para su ejecución. Primeramente, es necesario programar una cédula de bombeo que incluye una lechada de cemento diseñada únicamente para el pozo para el que se va a aplicar, así como personal y equipo específico. Cada pozo petrolero es distinto en cuanto a formación o temperatura. Pueden llegar a existir similitudes entre pozos cercanos, que comparten el mismo gradiente de temperatura o geología; pero nunca se tendrán dos pozos exactamente iguales. Es por esto que cada operación de cementaciones debe ser diseñada de acuerdo a necesidades propias de cada pozo petrolero.

Un trabajo de cementación ordinario, necesita básicamente los siguientes equipos: un mezclador cuya función es mezclar en la locación del pozo petrolero el agua con la mezcla de sólidos, una unidad de alta presión para el bombeo de los fluidos al pozo y un transportador de cemento a granel, que es donde se transportará la mezcla sólida de cemento y aditivos. Por otro lado, también se necesita una cuadrilla de personal muy especializada, la cual incluye un supervisor, tres operadores de unidades –o un operador por cada unidad-, tres asistentes de operadores –que ayudaran a los operadores-, y un ingeniero de operaciones que será el responsable de la operación. Por lo regular, se necesita solo una unidad de cada equipo, sin embargo, pueden cambiar las cantidades necesarias dependiendo de las características del pozo y de la operación que se realizará.



Algunas veces se requiere del bombeo de altos volúmenes de cemento o de baches espaciadores que demandan una gran cantidad de agua y aditivos para su preparación y por ende, más de un equipo de cada tipo. Las condiciones anteriores, también provocan que la cuadrilla conste de más personal. En general, el número de equipos y personal se planea con anticipación a la operación.

En repetidas ocasiones las compañías pueden aceptar una cantidad de trabajos mayor a la que podrían atender, desencadenando fallas por falta de personal, o bien de recursos materiales. Esto muestra la importancia de tener una política de respuesta a diferentes demandas de servicios de cementaciones, evitando así los altos costos debidos a fallas por malas decisiones.

Sin duda, una operación de cementaciones tiene impactos en seguridad, medio ambiente y calidad.

## **4.2 Elementos del sistema**

Para este trabajo se define como sistema focal al servicio de cementaciones a partir de la definición teórica. Con esto se establecen los elementos y la interacción entre ellos.

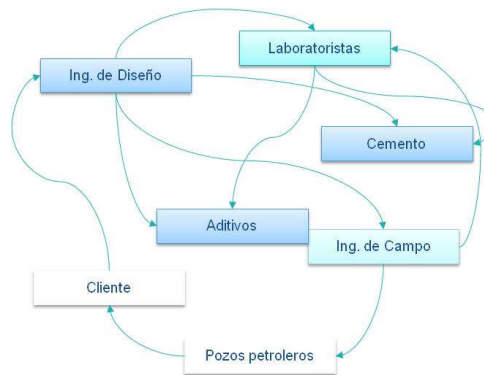
Cabe mencionar que las imágenes de los equipos no pueden ser incluidas en este trabajo debido a que se considera información confidencial de la empresa dueña del proceso.

Los elementos del sistema focal son los siguientes:

- *Cliente.*- En el caso del sistema que se está estudiando en este trabajo, únicamente habrá un cliente, el cual es Petróleos Mexicanos. Y su función como elemento del sistema es proveer los requerimientos y especificaciones de los servicios solicitados.
- *Pozos petroleros.*- Son todas aquellas locaciones en las que es posible que se realice un trabajo de cementaciones.
- *Personal de diseño.*- Se refiere a la persona que acude con el cliente cuando un servicio de cementaciones es requerido. El personal de diseño por lo general son ingenieros quienes solicitan toda la información necesaria para crear un diseño para el servicio de cementación. También se encargan de transferir las especificaciones de este trabajo a las distintas áreas internas en el proceso de cementaciones. Deben asegurarse de que todos los elementos necesarios para realizar la cementación en el pozo petrolero estarán disponibles cuando se requieran.
- *Laboratoristas.*- Se refiere a todo el personal del laboratorio que diseñará la prueba piloto de la lechada de cemento (Cemento y aditivos) que será bombeada en el pozo. También se encarga de realizar el control de calidad una vez que el lote de cemento fue cargado en la planta de cemento.

- *Equipo auxiliar de laboratorio.*- Este elemento incluye todos los equipos pequeños para poder analizar los diseños y las muestras que llegan al laboratorio.
- *Consistómetros.*- Se refiere al equipo crítico del laboratorio. En este equipo se define si el diseño propuesto cumple con los parámetros requeridos por el cliente o no.
- *Plantero.*- Es el empleado que se encarga de recibir las instrucciones de carga por parte del laboratorio. Su labor es preparar la cantidad necesaria de mezcla sólida de cemento y aditivos que el pozo petrolero requiere.
- *Tanque mezclador.*- Es un sistema de medición indispensable para la preparar la mezcla sólida de cemento y aditivos. La carga se realiza por lotes, y cada lote tiene una capacidad en toneladas. En caso de que una carga de cemento para un pozo en donde se realizará el servicio de cementaciones requiera más toneladas que las que se pueden cargar en el tanque mezclador, entonces se realizaran la cantidad de cargas necesarias para completar lo requerido.
- *Aditivos.*- Se refiere a la cantidad de aditivos que se tienen almacenados por un periodo.
- *Cemento.*- Se refiere a la cantidad de cemento que se tiene almacenado por un periodo.
- *Ingeniero de campo.*- Puede haber más de uno, dependiendo de las características del sistema. Su función es supervisar que el bombeo de los fluidos al pozo sean de acuerdo al diseño aceptado por el cliente.
- *Supervisor de campo.*- Se encarga de la parte operativa en el servicio de cementaciones. Es el que bombea los fluidos al pozo según la cédula de bombeo de diseño. También se encarga de la organización y acomodo de equipos y asignación de operadores a cada unidad.
- *Operadores.*- Es todo aquel recurso humano que opera los equipos utilizados en el pozo petrolero cuando el servicio de cementación se entrega.
- *UAP.*- Unidad de Alta Presión. Es uno de los equipos que siempre son requeridos en un servicio de cementación. Se puede necesitar más de una UAP. Este equipo lo que hace es bombear la mezcla de cemento y agua al pozo petrolero.
- *Batch Mixer.*- Es una mezcladora en donde se prepara la mezcla líquida necesaria que será mezclada con el cemento al momento del bombeo.
- *Silo Transportador de Cemento.*- Es un silo en donde se transporta la mezcla sólida de cemento que puede ser únicamente cemento o bien cemento y aditivos. Esta mezcla es la que fué preparada en el tanque mezclador.

Para este sistema se definen dos interrelaciones importantes que son las siguientes:



**Elementos:**

- Personal de diseño,
  - Laboratoristas,
    - Aditivos,
    - Cemento,
- Ingeniero de Campo
  - Cliente
  - Pozo petrolero

**Interrelación:**

El personal de diseño, se pone en contacto con el cliente para poder definir los requerimientos del pozo petrolero. Una vez que conocen los parámetros como gradiente de temperatura, profundidad, presión, etc., se solicita al laboratorista un diseño de una lechada de cemento que cumpla con los requerimientos técnicos. Esta lechada de cemento contiene agua, aditivos y cemento. Es necesario que el personal de diseño y los laboratoristas se aseguren de que existen los aditivos y cemento con los que se va a diseñar la lechada. Y sobretodo que estén disponibles para la fecha del servicio de cementación. Así mismo, el personal de diseño verifica la disponibilidad de recurso humano que en este caso es el ingeniero de campo. Una vez que el diseño ha sido terminado, se envía al cliente para su aceptación. Cuando se acepta, el personal de diseño se pone en contacto con el ingeniero de campo para acordar la cédula de bombeo que se va a ejecutar en el pozo petrolero. Cuando el ingeniero de campo llega al pozo petrolero, le explica los parámetros de trabajo al cliente para compararlos con la propuesta que fué aprobada.

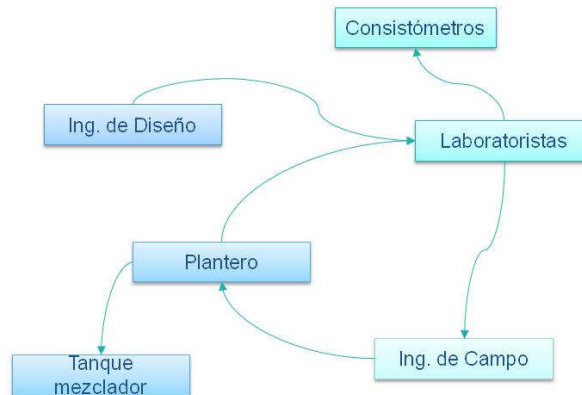
**Impacto de estos elementos en el sistema completo durante la interacción:**

1. Es evidente que si no existen pozos petroleros disponibles, no existe el servicio de cementación.
2. Si el personal de diseño no obtiene la información necesaria por parte del cliente y no la

notifica al laboratorista ni al ingeniero de campo correctamente, puede ocasionar una falla operativa en el servicio de cementaciones, como un cemento inconsistente o un tapón en el pozo petrolero lo que puede reflejarse en costos de no calidad.

3. Si los laboratoristas y el ingeniero de diseño no se aseguran que exista suficiente cantidad de los aditivos y cemento que se tomarán en cuenta en el diseño, puede suceder que el día que se tiene que entregar el servicio de cementaciones, se tengan retrasos en tiempo de entrega o bien que no se alcancen los parámetros requeridos para el pozo petrolero.

4. Si el personal de diseño no comunica de forma puntual al ingeniero de campo los detalles de la cédula de bombeo, puede ocasionar una insatisfacción de cliente.



**Elementos:**

- Laboratorista
- Consistómetros
- Ingeniero de Campo
  - Plantero
- Ingeniero de diseño

**Interrelación:**

Esta interrelación consiste en que el laboratorista ejecuta el diseño en el laboratorio y una vez que cumple con los parámetros que se requiere, se envía al Personal de Diseño y al Ingeniero de Campo asignado para esa operación. Cuando estos dos últimos aprueban el diseño, se envía la orden de carga al Plantero quién mezclará las cantidades necesarias para ejecutar el servicio de cementaciones. Una vez que la mezcla sólida está lista, una muestra de ese lote es enviada al laboratorio para control de calidad. En caso de que esta muestra no pase la prueba, se ajusta de nuevo si es posible por el laboratorio y se notifica al Ingeniero de

Campo y al Personal de Diseño para que de nuevo se solicite al Plantero la adición de aditivos. Una vez que este ajuste fue realizado en el lote de mezcla sólida, de nuevo se envía a control de calidad. Si pasa la prueba, entonces el ingeniero de campo es notificado que el lote de cemento está listo para ser enviado al pozo, si no es probable que un rediseño por parte del laboratorio sea necesario.

 Impacto de estos elementos en el sistema completo durante la interacción:

1. Si el diseño que el laboratorio envía al Ingeniero de Campo no es el mismo que éste solicitó cargar en la planta de cemento, entonces puede existir un desperdicio grande de material, además de retrasos en el tiempo de entrega del servicio de cementaciones.
2. Si la muestra del lote que envía la planta de cemento al laboratorio para el control de calidad no es representativa, entonces ese cemento será llevado al pozo para realizar el servicio causará problemas en el bombeo afectando la densidad de la mezcla y con ello entregando un servicio con fallas. Esto puede ser grave ya que puede incurrir en fallas que costarían lo mismo que la operación o bien una anulación de contrato.
- 3.- En el caso de que los consistómetros no se encuentren operando de manera correcta, o no sean suficientes. Se puede entregar un resultado de control de calidad erróneo y con ello tener el mismo impacto del punto anterior. La falta de disponibilidad de recursos tanto materiales como humanos puede incurrir en que el servicio de cementaciones no pueda ser entregado a tiempo.

A continuación se muestran los elementos del sistema definido como servicio de cementaciones y sus interrelaciones.

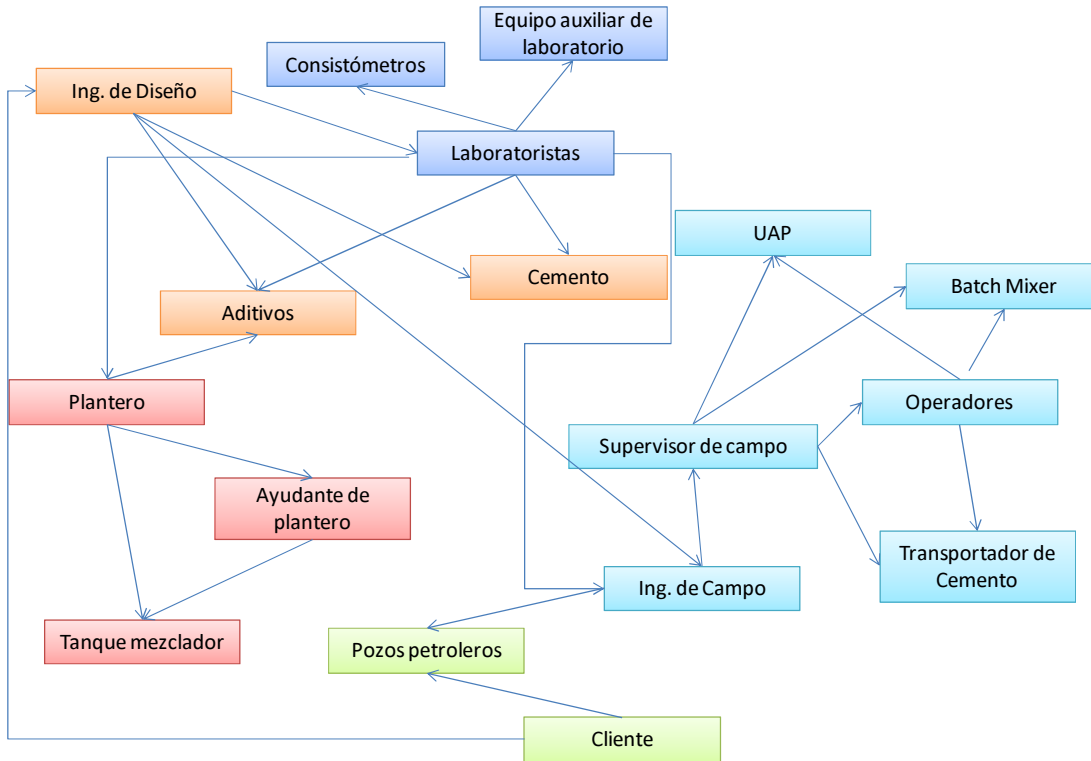


Fig.

4.1. Diagrama del servicio de cementaciones como sistema. Fuente: elaboración propia.

### 4.3 Suprasistemas y subsistemas

Se toma en cuenta que el servicio de cementaciones al ser necesario para el aprovechamiento de los recursos naturales del país, pertenece a un suprasistema de energía, en específico el del petróleo. A partir de ahí se encuentran los subsistemas de extracción, producción, exploración y perforación. Sin embargo, la cementaciones de pozos petroleros son utilizadas en perforación, extracción y producción por lo que a su vez es parte de todos esos subsistemas.

El siguiente diagrama muestra el sistema establecido como servicio de cementaciones dentro de los suprasistemas existentes.

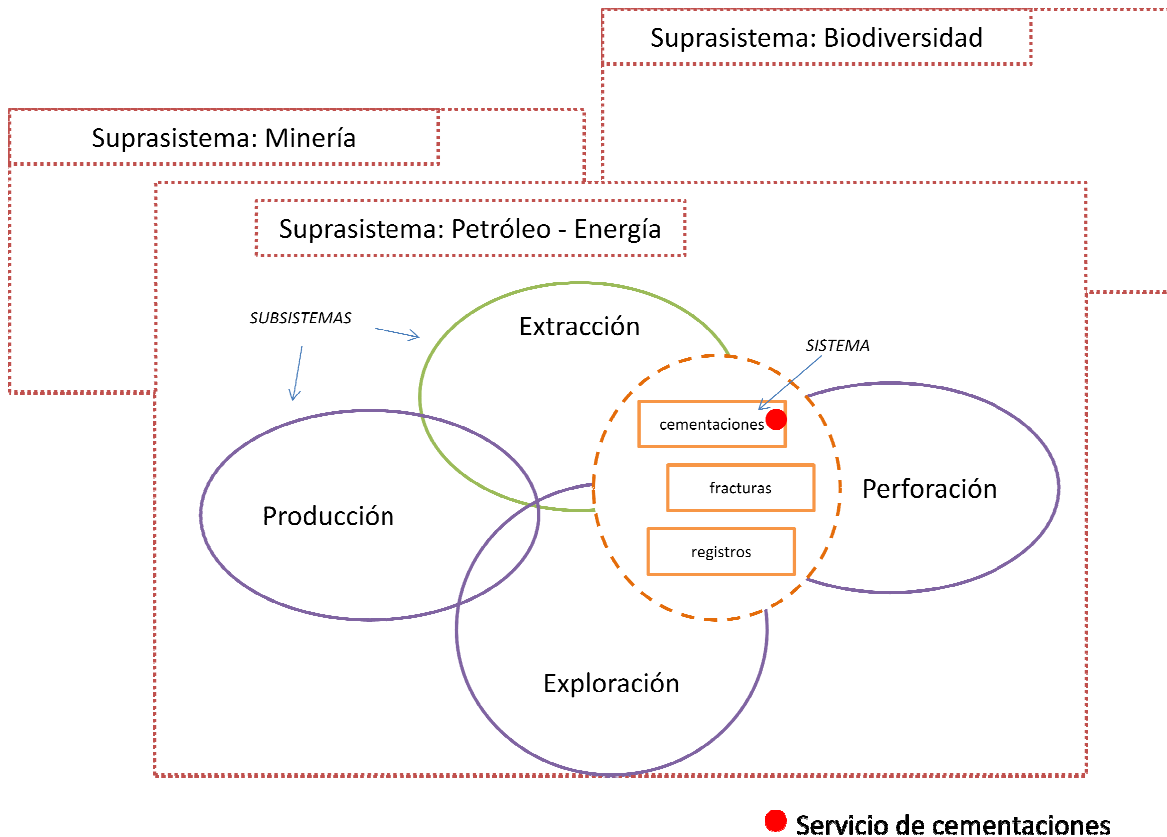


Fig 4.2 . Suprasistemas del servicio de cementaciones como sistema. Fuente: elaboración propia

Una vez que se define el sistema como el servicio de cementaciones, es necesario visualizar los subsistemas que existen dentro de ese sistema. Los elementos agrupados en los cuadros de color rojo, azul y naranja son aquellos subsistemas funcionales que se identifican dentro del sistema.

Los subsistemas funcionales que se identificaron para este sistema son los siguientes:

- Área de Diseño:

Esta área del proceso de cementaciones se encarga de recibir la solicitud del cliente para el trabajo y ponerse en contacto con él para conocer los detalles de la operación. También solicita todos los datos necesarios para poder elaborar una propuesta técnica y enviarla para aprobación. En esta propuesta técnica se incluye la cotización que a su vez involucra definir todos los recursos humanos y materiales para la operación.

- Laboratorio:

El laboratorio se encarga de emitir un diseño piloto para una orden de servicio. Principalmente el laboratorista diseña una lechada de cemento y utiliza todo el equipo auxiliar del laboratorio. Este equipo auxiliar consiste en mezcladores, viscosímetros y filtros prensa. Una vez que la muestra de ese diseño cumple con los parámetros en cada una de las pruebas ejecutadas en estos equipos, la muestra es probada finalmente en el consistómetro, el cuál evaluará el tiempo que esa lechada de cemento y aditivos va a permanecer bombeable, es decir fluida. Si el tiempo bombeable obtenido es el mismo que se requiere para la operación, entonces se envía el reporte al ingeniero de laboratorio. Otra de las actividades del laboratorio es realizar el control de calidad a las muestras que envíe planta de cemento. Esto consiste en realizarle las mismas pruebas que se ejecutan cuando se diseña por primera vez. Si al momento de comparar los resultados de la muestra de control de calidad con su correspondiente prueba piloto, existen discrepancias muy significativas, entonces se realizará un ajuste de ese lote o bien un rediseño completo. Si no, entonces el laboratorio valida el uso de ese lote para el servicio de cementaciones.

- Planta de cemento:

La planta de cemento recibe la orden de carga una vez que el diseño piloto está listo. El plantero revisa los requerimientos de aditivos y de cemento y envía una requisición al almacén. El auxiliar del plantero pesa las cantidades necesarias de aditivo y las introduce al tanque mezclador. El plantero inicia la mezcla en un tiempo de 45 minutos en promedio. Una vez que el lote está homogéneo, se obtiene una muestra y se envía al laboratorio para control de calidad. Si el laboratorio define que el lote es aceptable entonces se transfiere el lote al silo transportador de cemento. En caso contrario, se vuelven a añadir las cantidades necesarias de aditivos al lote y se repite el proceso. Cuando el lote ya no se puede ajustar, se descarga del tanque mezclador y se envía a una tolva de desperdicio. Los ayudantes de plantero deben ejecutar un proceso de limpieza del tanque mezclador y volver a pesar las cantidades de aditivo necesarias para que la mezcla se ejecute de nuevo.

- Logística:

Este subsistema inicia cuando el Ingeniero de Campo es asignado a una operación. La cuadrilla que se encargará de entregar el servicio de cementaciones se conforma por el supervisor de operaciones, los operadores de equipos y los equipos (UAP, Batch Mixer, Silo Transportador de Cemento). El supervisor de operaciones asigna a cada operador un equipo de cementaciones, si es necesario más de uno se notifica y se incluye. También se



supervisa que el operador tenga en condiciones operables cada uno de los equipos que se le asignaron. Cada operador es responsable de llevar todos los elementos necesarios relacionados al equipo y una vez que regresan del pozo petrolero, llevar el equipo a mantenimiento y limpieza para dejarlo operable para otra operación. Cuando todos los recursos se encuentran listos, la cuadrilla completa viaja al pozo petrolero para realizar la cementación. Una vez en la locación, el ingeniero de campo se pone en contacto con el cliente para definir el área en donde se acomodarán los equipos y se conectarán al pozo. Una vez que la operación se termina, los equipos se desconectan y el ingeniero de campo solicita la firma del cliente para posteriormente requerir el pago del servicio.

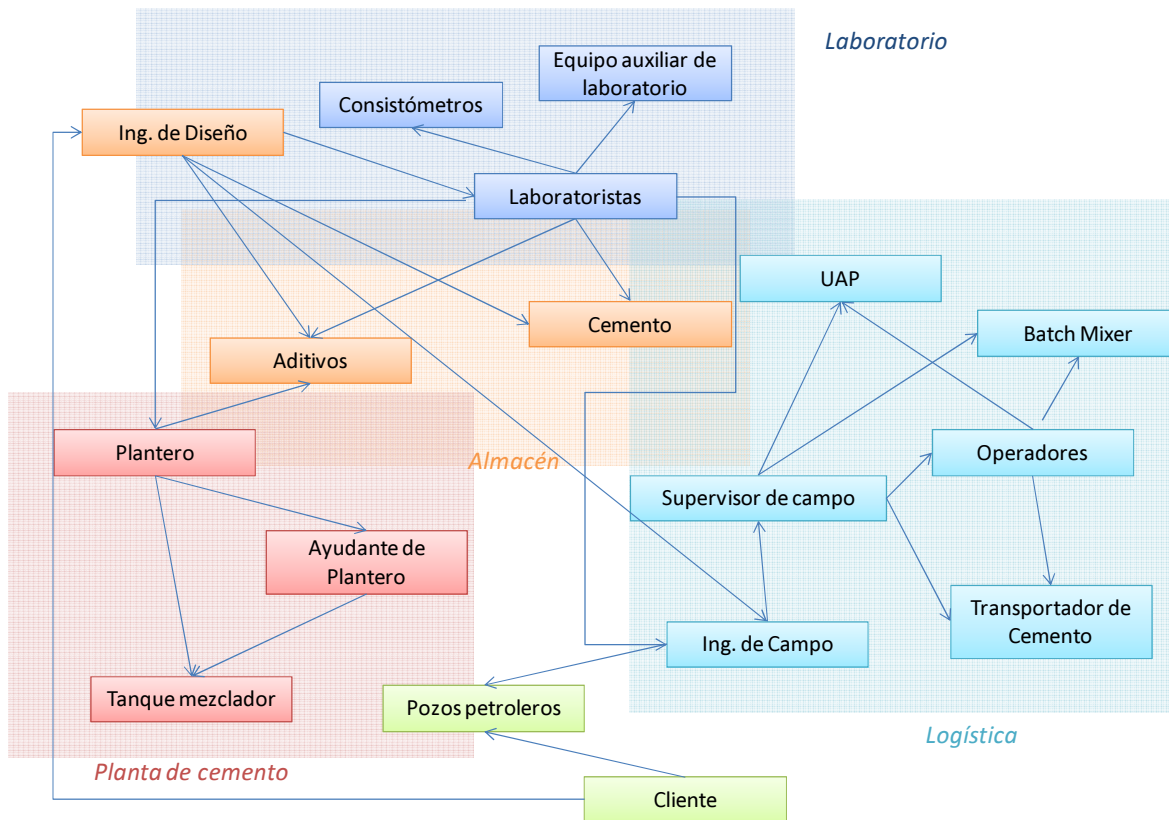


Fig. 4.3. Subsistemas funcionales del servicio de cementaciones como sistema. Fuente: elaboración propia

#### 4.4 Entorno

A partir del análisis anterior se define que el sistema en el que se va a trabajar tiene dos tipos de entorno.

- **El entorno activo** de nuestro sistema se puede referir a invitaciones u obligaciones requeridas por parte del cliente hacia las compañías que compiten con la empresa petrolera privada bajo análisis. También requerimientos legales y normativos que

apliquen al área de cementaciones. Estos requerimientos pueden ser de tipo técnico, como parámetros determinados para el servicio, cambios en especificaciones de equipos y recursos.

- **El entorno pasivo** del sistema definido es el grado de presencia que tenga la compañía en el sector petrolero. Y el presupuesto que se tenga para reinversión.

## 4.5 Variables del sistema

### Variables de entrada

- VARIABLES DE CONTROL:
  - Presupuesto de contratación de personal por periodo
  - Presupuesto para adquisición de equipos
  - Requisitos normativos
  - Tiempo de entrega del servicio
- VARIABLES DE INSUMOS:
  - Cantidad de aditivos adquiridos
  - Cantidad de cemento adquirido
- ENTRADAS CONTINGENTES EXÓGENAS:
  - Costo por operación que la competencia ofrece al cliente
  - Cantidad de contratos dados a empresas distintas
  - Oportunidades económicas laborales para el personal
  - Necesidad de uso de equipos de otras bases
  - Cantidad de trabajos por periodo
  - Inundaciones en base operativa
  - Robos durante el viaje al pozo petrolero o en la locación
  - Bloqueos durante el viaje al pozo petrolero
  - Accidentes en la brecha

### Variables de Salida

- Tiempo de entrega del servicio
- Número de ajustes realizados
- Número de rediseños realizados
- Cantidad de recursos externos utilizados
- Tiempo de entrega para una orden con rediseño
- Ganancias por periodo de tiempo
- Número de trabajos No conformes
- Costo por servicios de no calidad

### Variables de Estado

- Cantidad de personal contratado
- Cantidad de equipos disponibles
- Probabilidad de éxito de los diseños
- Cantidad de aditivos
- Cantidad de cemento

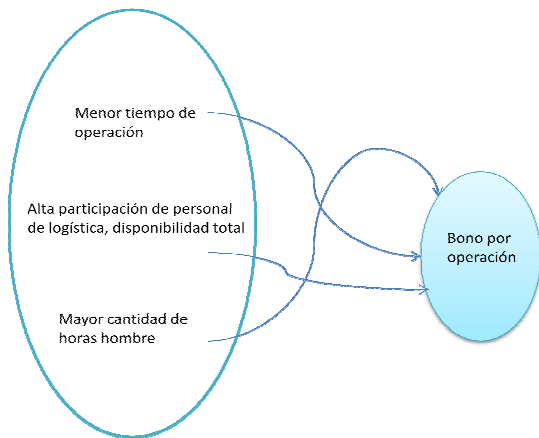
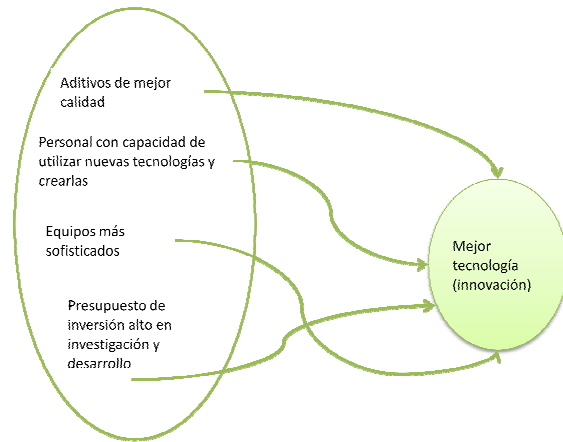
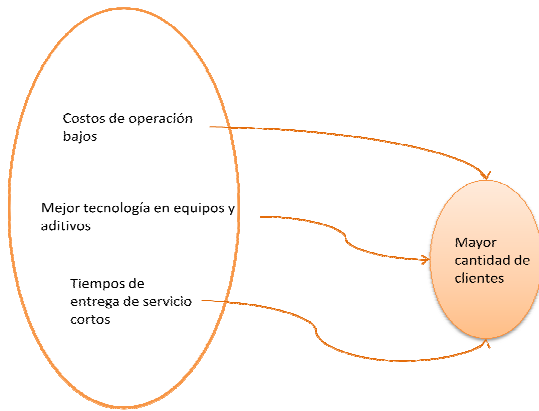
## 4.6 Aspectos teleológicos

Dentro del sistema los aspectos teleológicos son los siguientes, tomando en cuenta que cada uno tiene objetivos propios pero que son integrantes del sistema definido como servicio de cementaciones.

- El *cliente* como una organización, ya que sus objetivos son utilizar tecnologías a la vanguardia en las cementaciones; pero que las operaciones no tengan altos costos y como organización tenga altas ganancias.
- El *personal* que labora en el servicio pero considerando que ellos tienen objetivos personales como crecimiento profesional, obtener ingresos económicos, motivación y convivencia
- *Laboratoristas, Ingenieros de diseño, Supervisores, el personal de logística y el personal que trabaja en la planta de cementos.* Cada uno de ellos tiene objetivos de acuerdo a su área de trabajo y en muchas ocasiones son antagónicos, por ejemplo los laboratoristas siempre tratan de obtener el mejor diseño de la lechada de cemento pese a que a veces esto genera muchas horas hombre y el personal de logística siempre busca que la cantidad generada de horas hombre sea corta, además de que cada área cumpla con su trabajo lo más rápido posible. En el sistema real esto es un problema que se presenta frecuentemente.

### 4.6.1 Atractores del sistema y cuencas de atracción

Para identificar atractores del sistema, al momento de hacer el análisis se detectaron que existen dos atractores globales que son: tener mayor cantidad de clientes y contar con ventaja competitiva de tecnología e innovación. Pero dentro del proceso de cementaciones, existe un atractor más que son los bonos por operación que se le brinda al personal de logística. Una vez que se identificaron los atractores, se analizaron las características de cada estado obteniendo las cuencas de atracción como sigue:



#### 4.6.2 Atractores inerciales

Se identificó como atractor inercial: "obtención de un contrato con PEMEX por un periodo largo (ejemplo 5 años o 10 años); y esto podría afectar al futuro porque históricamente la compañía se ha estancado en cuanto a que no ha desarrollado mejores tecnologías o no ha invertido en mejores recursos personales para desarrollar ventajas competitivas y ser líder en el área de cementaciones (que es uno de sus objetivos).

#### 4.7 Bifurcaciones del sistema

Históricamente si han habido puntos en el tiempo donde se ha generado inestabilidad. La bifurcación más grave que hay es la pérdida de contratos, esto puede suceder porque el cliente ya no tiene presupuesto debido a que las ganancias de perforación no fueron las esperadas o bien por aspectos políticos. La siguiente bifurcación es que se pierdan operaciones debido a que no existe el equipo disponible o el personal para atender la demanda del cliente, otras bifurcaciones que no son tan graves como las anteriores pero que causan inestabilidad es cuando se tiene que pagar una penalización por tiempo de espera o bien alguna falla de cualquier otro tipo.

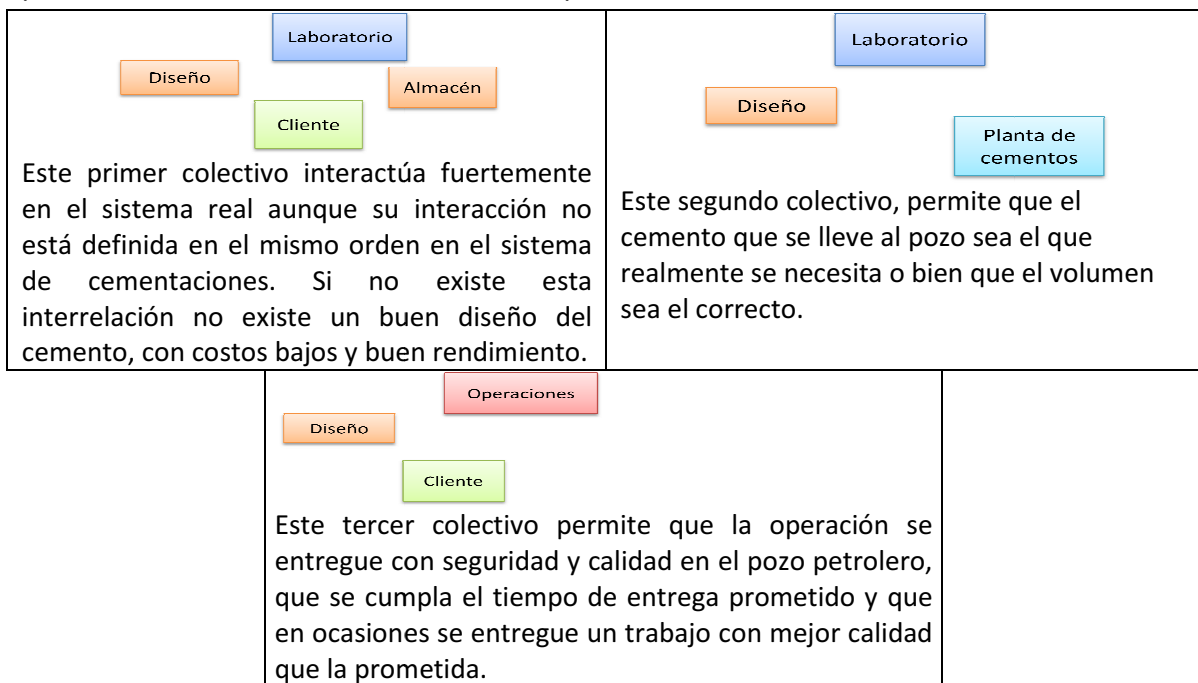
#### 4.8 Tipo de acoplamiento

Se considera que el tipo de acoplamiento que existe entre los integrantes del sistema es de tipo medio al borde del caos porque se tiene un sistema de gestión pero no está centralizado, es decir, existe un área que administra y planea pero eso no exige que cada área tiene que tomar acciones de acuerdo a los objetivos planteados de manera general, es decir también cada área hace su planeación. El sistema real cuenta con un sistema de gestión híbrido que considera salud y seguridad, calidad y medio ambiente. El proceso de

cementaciones está definido de tal forma que si por ejemplo el área de laboratorio se atrasa en el diseño, no necesariamente logística que está después va a tener el mismo retraso, de forma intermedia, la planta de cementos puede mitigar ese retraso de tal forma que la orden de servicio que se está procesando puede llegar en tiempo al pozo petrolero. Es decir, la acción de cada parte del proceso si puede llegar a afectar a la que sigue pero, de forma moderada y dando oportunidad a que se adapte, no se asegura un daño en cascada.

#### 4.9 Tipo de sistema teleológico

El servicio de cementaciones es un sistema colectivo, donde los colectivos que lo integran son los siguientes. Se agrupan en ese orden para poder ejecutar el trabajo aunque el proceso de cementaciones no los identifique.



#### 4.10 Descomposición sistémica del sistema

##### Niveles de descomposición y propiedades emergentes

Para el sistema que se está estudiando se identificaron principalmente dos niveles de descomposición que es el externo o estratégico, donde la empresa tiene contacto con el medio ambiente, por medio de organizaciones, el gremio petrolero y el gobierno. Y el segundo es el nivel interno ( o táctico) que básicamente son los elementos del proceso de cementaciones que es la estructura funcional interna del servicio de cementaciones. A continuación se visualizan los niveles. Se considera que las propiedades emergentes son aquellas que sin la interacción existente no podrían lograrse.

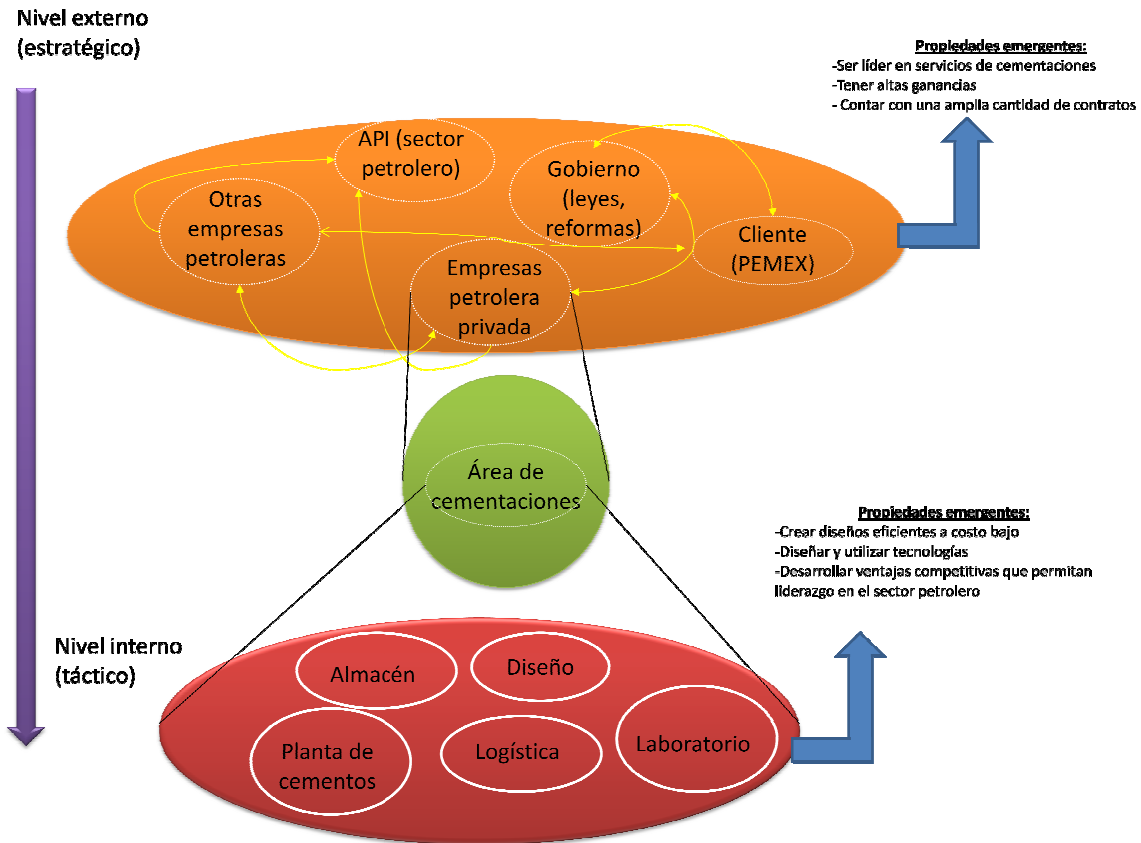


Fig. 4.4 Descomposición del servicio de cementaciones. Fuente: elaboración propia

Las *propiedades emergentes* (además de las que se muestran en el diagrama) son las siguientes de acuerdo a la interacción de los correspondientes elementos en el nivel interno (táctico):

- Elementos: Laboratorio, diseño, almacén. Propiedades emergentes: Construyen diseños de cements eficientes y a bajos costos.
- Elementos: Laboratorio, planta de cemento, ingenieros de campo. Propiedades emergentes: Se cargan grandes volúmenes de cemento en un tiempo menor al esperado, disminuyendo mermas de material.
- Elementos: UAP, Supervisores, Ingenieros de campo (parte de logística). Propiedades emergentes: Le dan al cliente confianza, al grado que la operación la deja totalmente en manos de la compañía privada.

## **4.11 Composición sistémica del sistema**

Los objetivos de los elementos teleológicos son:

- Laboratoristas: Diseñar lechadas de cemento que satisfagan los parámetros requeridos para el pozo petrolero.
- Diseño: Establecer una cédula de bombeo con presiones óptimas para realizar la cementación.
- Planta de cementos: Preparar el volumen necesario de la mezcla sólida de cemento que el laboratorio ha diseñado.
- Almacén: Contar con todos los aditivos en condiciones óptimas para usarlos en el pozo petrolero
- Logística: Movilizar todos los recursos materiales y humanos al pozo petrolero para bombear los fluidos correspondientes al pozo petrolero.

### **4.11.1 Análisis de importancia de resultados emergentes**

Una vez que se identifican los resultados emergentes que genera el cumplimiento de los objetivos tácticos, es sencillo darse cuenta que es una vía segura para lograr la misión de la compañía. Si bien estos resultados emergentes son pocos; ya que los resultados como tal del proceso son bastantes pero difieren totalmente de los emergentes, el hecho de que exista una interrelación fuerte entre ciertos elementos permite que estos resultados ocurran y con ello el logro de los objetivos estratégicos. Es importante mencionar, que la misión de la compañía casi siempre se ve difícil de lograr; pero estableciendo el sistema de esta forma es sencillo ver que es algo que si se puede obtener como un resultado final como logro de la sinergia y apoyo de toda la pirámide organizacional. Este análisis se puede visualizar en la figura 4.5.

### **4.12 El sistema definido**

Gracias a la aplicación de la teoría básica de sistemas complejos, se puede decir que ya se cuenta con el sistema bien definido, es decir, se conocen los elementos relevantes del servicio de cementaciones, las interrelaciones, sus variables, y hacia a donde se dirige según sus objetivos por lo que ya se pueden aplicar herramientas como la simulación y la optimización de forma más puntual. Además, ya se jerarquizaron las fallas operativas que son más críticas por lo que se tratarán usando simulación y optimización.

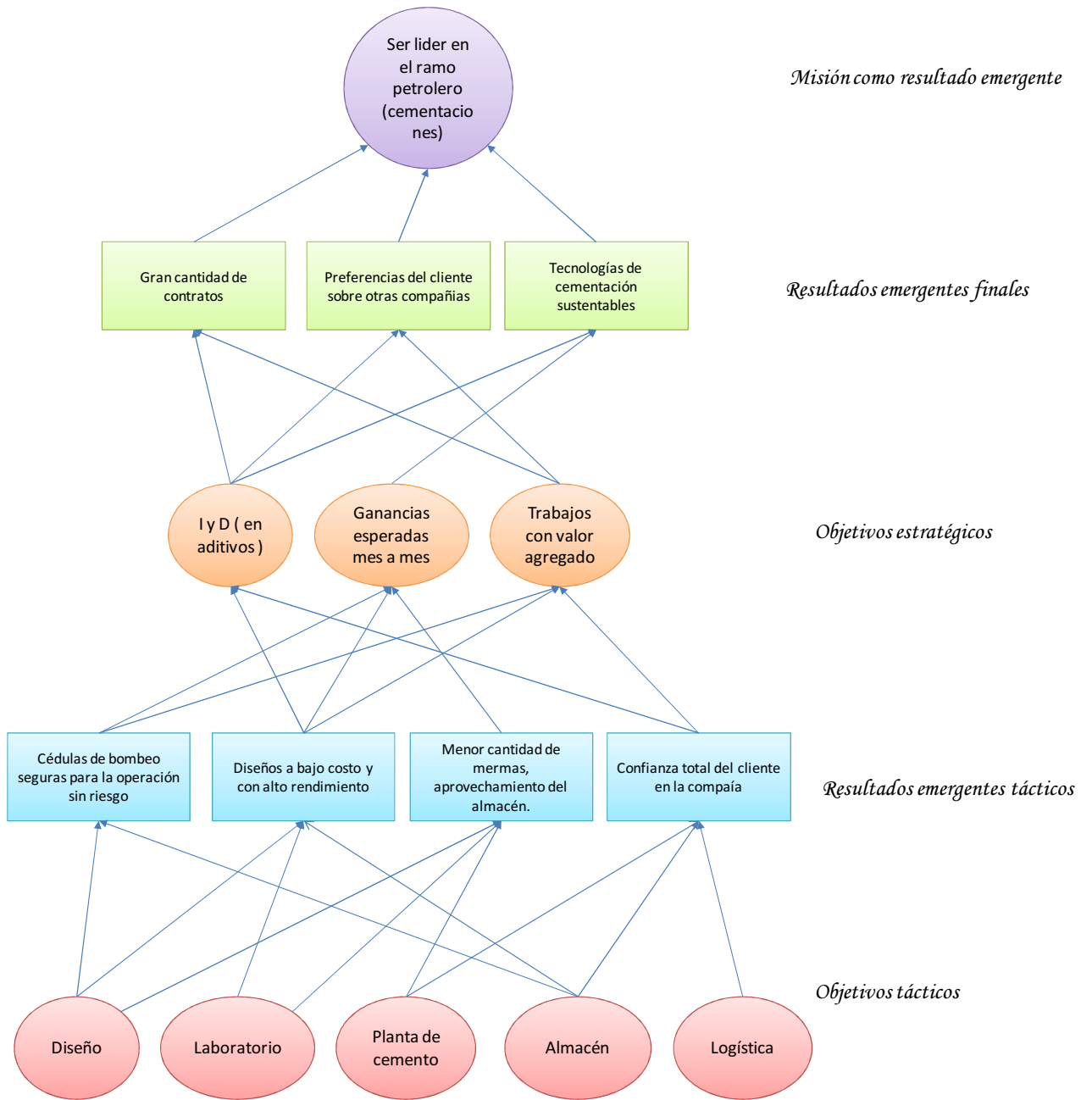


Fig. 4.5 Composición del servicio de cementaciones. Fuente: elaboración propia.



# Capítulo V. Fallas operativas del servicio de cementaciones.

---

El objetivo de este capítulo es distinguir y definir las fallas operativas. Sin embargo, también es necesaria su jerarquización.

## 5.1 Tipos de fallas operativas en el proceso de cementaciones.

De acuerdo con los registros de la compañía petrolera, se tiene una gran cantidad de fallas operativas. La información con la que se trabaja, es correspondiente a un año de operaciones y pertenece a la región norte que comprende Poza Rica - Veracruz y Reynosa. Es necesario mencionar que los registros que actualmente tienen están incompletos en cuanto a algunos costos, fechas y definiciones.

Principalmente existen dos tipos de fallas operativas, las que generan un cobro de una penalización por un tiempo de espera y las que no. El costo por hora de inactividad del equipo de perforación se encuentra estipulado por contrato. Existen algunos casos en los que la falla afecta tanto al cliente que la penalización puede ser incluso de una operación de "remediación" sin que el cliente haga ningún cargo a la compañía.

Debido a que centrar únicamente las fallas en dos tipos podría no dar ninguna información sobre el proceso, se utilizarán todas aquellas fallas que pudieran ocasionar una penalización o no. A continuación se muestra la clasificación de fallas más relevantes debido a su incidencia:

- **No disponibilidad de equipo:** Esta falla se refiere a cuando la compañía no cuenta con el equipo disponible o necesario para ejecutar el servicio de cementaciones. Esta no disponibilidad de equipo puede surgir en cualquier parte del proceso.
- **No disponibilidad de personal:** De forma muy similar a la falla anterior, esta falla surge cuando no se cuenta con el personal para la entrega de un servicio de cementaciones. Esta no disponibilidad de personal puede surgir en cualquier parte del proceso.
- **Falla de la herramienta del equipo de perforación:** Por lo regular las herramientas de perforación se entregan por parte de un proveedor. Sin embargo, es necesario que el personal de la compañía se asegure que la herramienta está en condiciones operables. La responsabilidad de los materiales que se utilicen en el servicio de

cementaciones es responsabilidad directa de la compañía ya que absorbe todos los costos de penalización.

- **Falla del equipo de cementación:** Esta falla se refiere a cuando cualquier equipo utilizado en la entrega del servicio o durante el proceso presenta alguna falla mecánica o por mal uso o manejo.
- **Falla de personal:** Se refiere a cuando el personal que entrega el servicio o bien participa en el proceso de cementaciones tiene algún error o descuido.
- **Insatisfacción del cliente:** Se debe a una molestia por parte del cliente por diferentes razones, las más comunes son:  
cuestiones de seguridad, el bombeo de los fluidos no se realiza con respecto al diseño, el trabajo se inició tarde, se llega tarde al pozo, etc.  
Por lo regular las insatisfacciones del cliente se originan en el pozo petrolero, pero no se exime que la causa sea en los procesos anteriores a la entrega.
- **Inconsistencia del cemento:** Una vez que la lechada de cemento fue colocada en el pozo petrolero. El pozo se cierra durante un periodo de tiempo determinado para que tome consistencia. Una vez abierto, el cliente introduce herramienta para reconocer esa consistencia. En caso de que el cemento no haya "fraguado" durante el tiempo que la compañía estableció, entonces esta falla se origina. Cabe mencionar que es una de las que tienen mayor impacto en costos y en imagen.
- **Otras:** En este punto se incluyen algunas fallas que se refieren a la pérdida de la cuadrilla en la carretera para llegar al pozo, cuando el cliente solicita el servicio con retraso, cuando se olvida un aditivo, o bien cuando algún propietario de una parte del camino al pozo fue afectado por el cliente y por lo tanto impide el paso.

Debido a que son varias fallas las que se presentan y cada una tiene distintas causas de ocurrencia, el siguiente diagrama muestra las relaciones causales que existen entre todas ellas.

## 5.2 Clasificación de fallas operativas de acuerdo a su criticidad.

Como se puede observar, existe un gran número de fallas y causas para esta investigación por lo que se vuelve complejo tratarlas todas juntas. De esta manera, se estableció un criterio de criticidad para realizar la jerarquización. Si existiera el caso en el que se

tuvieran datos suficientes para determinar el grado de influencia que tiene cada causa sobre cada falla, se podrían utilizar métodos duros para obtener esta jerarquización. Sin embargo, para esta investigación no se tienen.

Los criterios de criticidad establecidos fueron los siguientes:

**1. ¿El trabajo se realizó?** Se refiere a que si las causas fueron tales que la falla impidió que el servicio de cementaciones fuera entregado, por lo que no se realizó.

**2. ¿El trabajo fue pagado?** Se refiere a aquellos casos en los que la falla tiene tal impacto en el cliente que el trabajo no se paga. Este caso no incluye pero tampoco excluye aquellas situaciones en las que aparte de que el trabajo no es pagado por el cliente, la compañía debe ejecutar otro servicio sin ningún costo.

**3. ¿Se cobró una penalización por tiempo de espera?** Este criterio se refiere a que el cliente hace un cargo de alguna penalización por inactividad del equipo de perforación.

Con base en los criterios anteriores, se realiza una clasificación de fallas operativas que se muestra en la tabla siguiente:

Tipo	Fallas	criterios de criticidad			
		¿Se realiza el trabajo?	¿se paga el trabajo?	¿se cobra tiempo de espera?	
Con tiempo de espera	No disponibilidad de equipos	NO	NO	SI/NO	
	No disponibilidad de personal	NO	NO	SI/NO	
	Por falla en herramientas	SI	SI	SI	
	Por falla en equipo	SI/NO	SI/NO	SI/NO	
	Falla de personal	SI	SI	NO	
	Otros	Pérdida en el camino	SI	SI	SI
		Llamado tarde	SI	SI	NO
Desfase de tiempo		SI	SI	SI	
Olvido de aditivo		SI	SI	SI	
	Afectación a rancho	SI	SI	NO	
Sin tiempo de espera	Falla de personal	SI	SI	NO	
	Falla en equipo	SI	SI	NO	
	Insatisfacción del cliente	SI	SI	NO	
	Cemento inconsistente	SI	NO	SI/NO	

En la tabla anterior, se muestra claramente que únicamente dos fallas son las que provocan que un servicio de cementaciones no sea entregado ni pagado por lo que son las más críticas.

El problema tiene una gran cantidad de elementos, por lo que si se aborda de forma completa se vuelve muy difícil de manejar ya que es complejo. Debido a esto, se va a utilizar simulación únicamente para tratar la falla de "no disponibilidad de equipos" y la falla de "no disponibilidad de personal".

### 5.3 Interrelación causal de fallas operativas

Con base en las herramientas teóricas encontradas y especificadas en el capítulo dos, se estable el siguiente diagrama causal para todos los tipos de falla y todas sus posibles causas e interrelaciones.

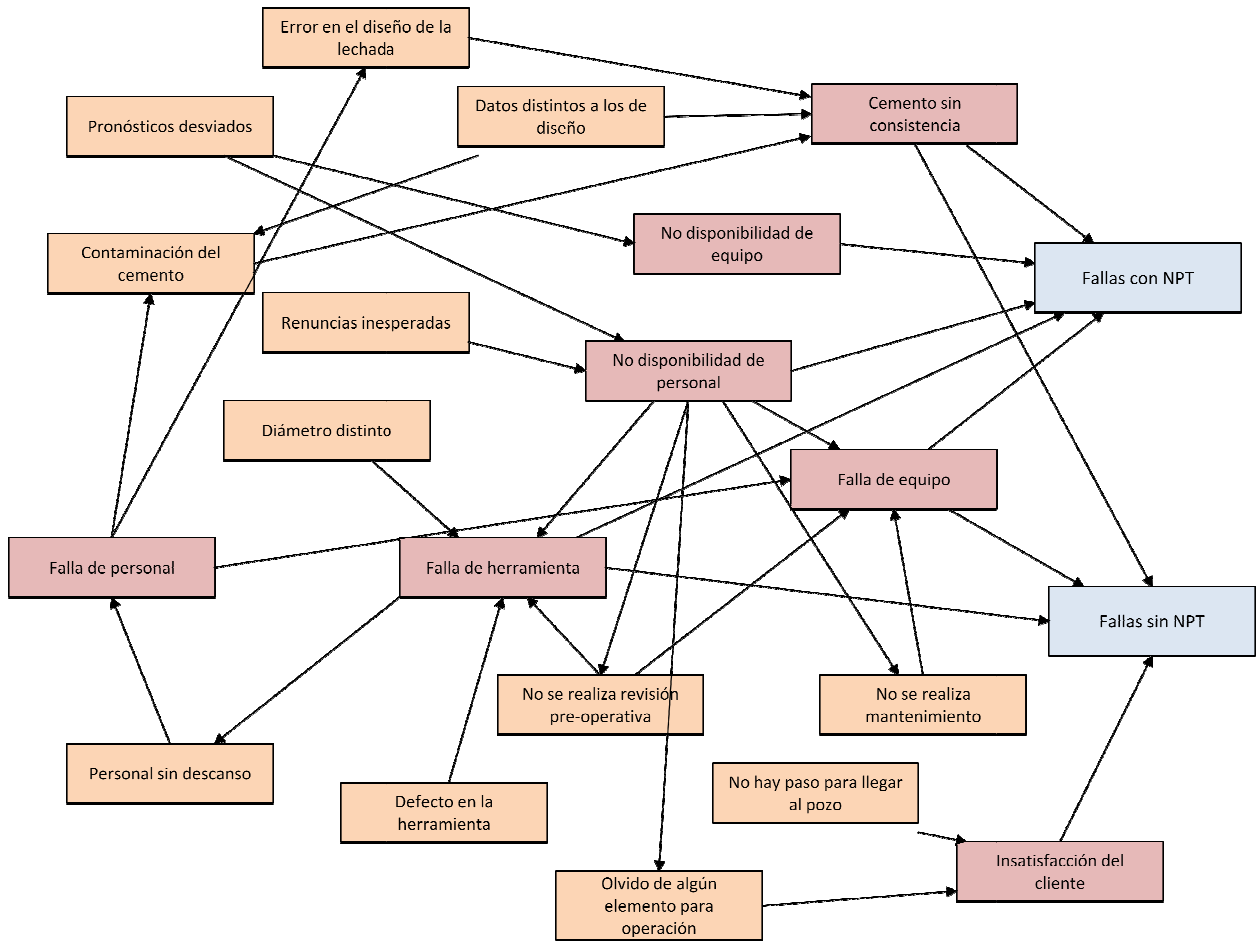


Fig. 5.1 Diagrama de relación causal entre las fallas dentro del proceso de cementaciones.

Fuente: Elaboración propia.

# Capítulo VI. Simulación del sistema.

El objetivo de este capítulo es desarrollar la simulación del proceso de cementaciones de pozos petroleros. Así mismo, conocer mejor el sistema a detalle y en algunos casos donde presenta cierta cantidad de fallas operativas como rediseños, ajustes de parámetros, y retrasos en entrega del mismo servicio.

## 6.1 Simulación del proceso de cementaciones en Simio.

El uso de la simulación puede proveer de una gran cantidad de información sobre el proceso de cementaciones. Para esta instancia, se utilizará la plataforma de SiMIO para analizar cómo la disponibilidad de equipo y personal contribuye a tener retrasos en el cumplimiento de los servicios de cementación.

El modelo conceptual de simulación que se utilizará, está representado esquemáticamente en la siguiente figura. El modelo contempla ambos tipos de trabajos que el servicio de cementaciones incluye: trabajos de cementación y trabajos de bombeo.

Como se puede notar, los trabajos de cementación requieren una etapa de diseño del cemento antes de que se envíen los recursos materiales y humanos al pozo petrolero. Mientras que el segundo tipo de trabajo solo considera el envío de Unidades de Alta Presión (UAP) y un supervisor. Es importante mencionar, que el modelo de simulación que se propone en este capítulo no se construyó a detalle, ya que únicamente considera elementos críticos del proceso de cementaciones. Se considera que el uso de este nivel de detalle de modelo conceptual no afectan los resultados del proceso de cementaciones.

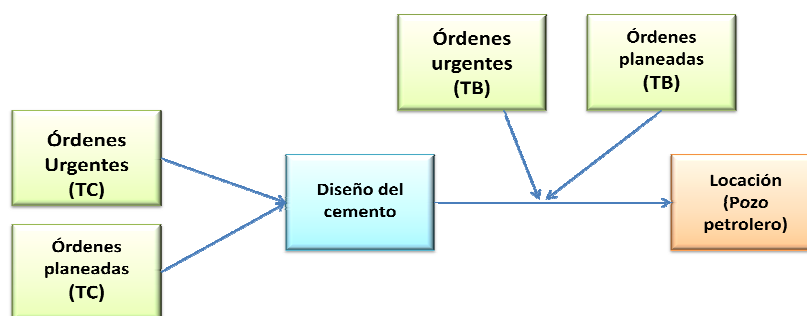


Fig 6.1 . Modelo conceptual de simulación propuesto para el servicio de cementaciones.

Fuente: elaboración propia.

El diseño del cemento consiste en una serie de pasos representados en la siguiente figura 6.2. El técnico de laboratorio recibe la orden en la que se especifican los parámetros de la lechada de cemento y prepara el diseño que será enviado a los consistómetro. Si algunos

parámetros no se cumplen, el proceso se repite ajustando el diseño una y otra vez. Cuando el diseño alcanzó los parámetros solicitados por el cliente, se solicita a la planta de cemento que sea preparado de acuerdo a las toneladas necesarias para el pozo petrolero. Una vez que se completa la mezcla en la planta de cemento, se envía una muestra al laboratorio para efectuar el control de calidad. Una vez que el laboratorio delibera la carga de cemento, la mezcla sólida está lista para ser enviada al pozo. En caso contrario, el laboratorio ajusta ese lote y envía nuevamente instrucciones a la planta de cemento para que la mezcla sólida sea ajustada con las cantidades necesarias. Cuando un lote de mezcla sólida (cemento y aditivos) falla más de dos veces, la situación más probable es que ya no se pueda volver a ajustar por lo que se tiene que realizar un rediseño completo.

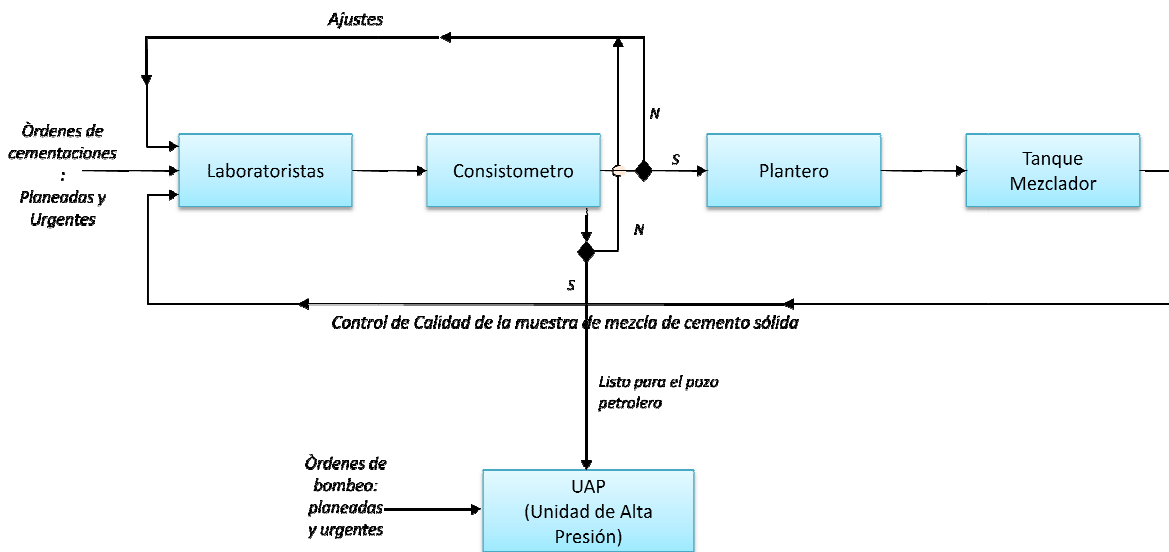


Fig 6.2 Modelo conceptual desarrollado para la simulación del proceso de cementaciones en SiMIO. Fuente: elaboración propia.

Dentro la programación en Simio, para el modelo se utilizaron tres de sus plataformas: *Facility, Processes y Definitions*. La plataforma de *Results* no fué utilizada debido a que en esta simulación se buscaba encontrar casos en los que el proceso de cementaciones ocasionaba una falla en el servicio de cementaciones, por ejemplo un retraso, rediseños, entre otros. Y para analizar estos casos o tipos de fallas, es necesario que se analicen casos extremos por lo que se configuró un reporte adecuado para los resultados buscados. En el caso de la plataforma *Data* no se manejaron tablas ni datos programados para la simulación. Para la entidad del modelo establecido, las plataformas que fueron utilizadas fueron *Processes y Definitions*. Una vez establecido el modelo en Simio y los parámetros correspondientes, cada uno de los objetos se programó de acuerdo al proceso de cementaciones.

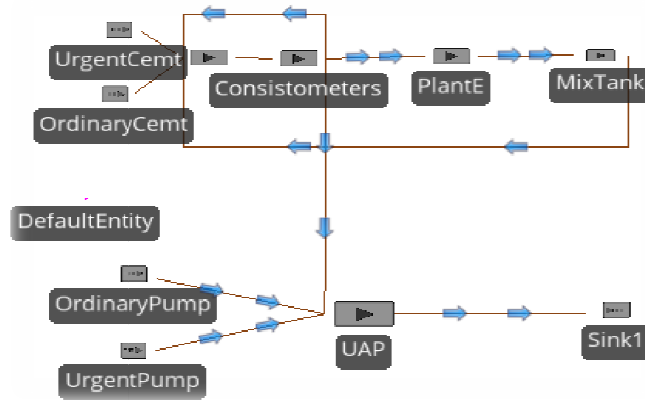


Fig 6.3. Layout del proceso de cementaciones en SiMIO en la plataforma *Facility* del modelo. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se detallan los elementos (objetos) que son parte de la simulación:

- *Laboratoristas*.- Se refiere a todo el personal del laboratorio que diseñará la prueba piloto de la lechada de cemento (Cemento y aditivos) que será bombeada en el pozo. También se encarga de realizar el control de calidad una vez que el lote de cemento fue cargado en la planta de cemento.
- *Consistómetros*.- Se refiere al equipo crítico del laboratorio. En este equipo se define si el diseño propuesto cumple con los parámetros requeridos por el cliente o no.
- *Plantero*.- Es el empleado que se encarga de recibir las instrucciones de carga por parte del laboratorio. Su labor es preparar la cantidad necesaria de mezcla sólida de cemento y aditivos que el pozo petrolero requiere.
- *Tanque mezclador*.- Es un sistema de medición indispensable para la preparar la mezcla sólida de cemento y aditivos. La carga se realiza por lotes, y cada lote tiene una capacidad en toneladas. En caso de que una carga de cemento para un pozo en donde se realizará el servicio de cementaciones requiera más toneladas que las que se pueden cargar en el tanque mezclador, entonces se realizarán la cantidad de cargas necesarias para completar lo requerido.
- *UAP*.- Unidad de Alta Presión. Es uno de los equipos que siempre son requeridos en un servicio de cementación. Se puede necesitar más de una UAP. Este equipo lo que hace es bombear la mezcla de cemento y agua al pozo petrolero.

Para configurar las plataforma de *processes* se utilizaron las siguientes operaciones: decide, assign y execute. Y de esta manera se programaron los siguientes procesos para identificar si las órdenes necesitaron rediseños o bien, varios ajustes.

**Define Color.-** Asigna un valor a la orden dependiendo de las fallas en diseño que ha presentado. Una vez que el color es asignado, establece el tiempo de laboratorio que esa orden utilizará para poder ser procesada.

**DefineTiempo.-** Identifica la fecha de entrada de la orden al sistema, es decir, cuando entra al objeto "laboratorista"

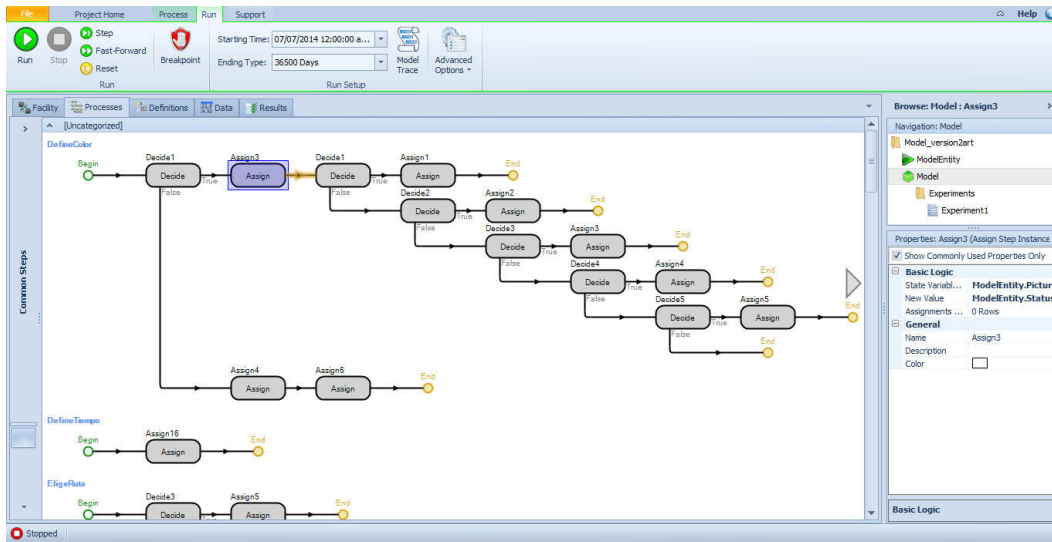


Fig 6.4. Visualización de procesos DefineColor y DefineTiempo en la plataforma Processes de Simio. Fuente: Elaboración propia.

**EligeRuta.-** Este proceso contiene las probabilidades establecidas para que la orden tome cada path (ruta) que puede llegar a tomar la orden. Estos pesos corresponden a las probabilidades de falla de cada evento.

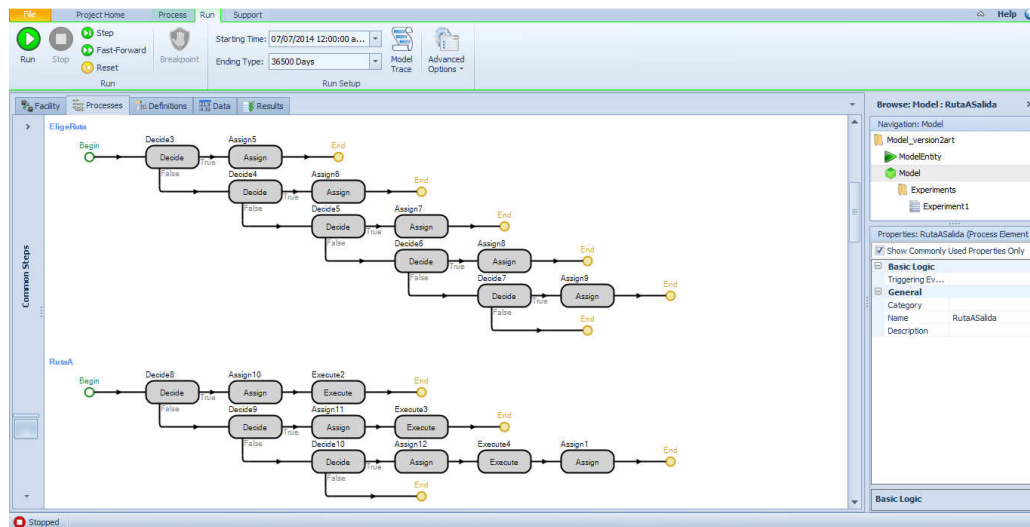


Fig 6.5. Visualización de procesos EligeRuta y RutaA en la plataforma Processes de Simio. Fuente: Elaboración propia.



*RutaA.*- Se refiere a la asignación del color si la orden necesita el primer ajuste después de que se ha diseñado. También asigna un color si la orden que entra experimentará el primer control de calidad, es decir que proviene de planta de cementos. O bien, si la orden ya ha sido ajustada previamente y se necesita revisión del tiempo bombeable. Así mismo, existe un proceso llamado *RutaASalida* que identifica si la orden una vez procesada anteriormente, necesita rediseño.

*RutaB.*- Identifica si la orden necesita un rediseño completo.

*RutaC.*- Identifica si la orden ha sido enviada a utilización de UAP.

*RutaD.*- Identifica si se va a procesar un control de calidad o bien ya ha sido ajustada por el objeto "laboratorista" y solo necesita revisar el tiempo bombeable.

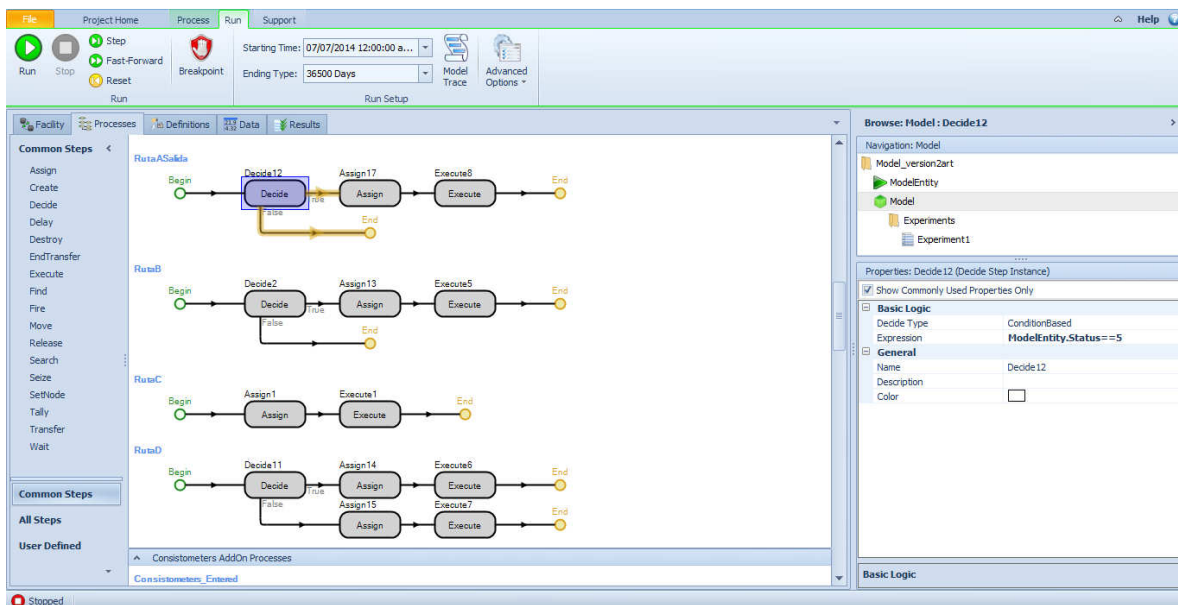


Fig 6.6. Visualización de procesos RutaASaida, RutaB, RutaC y RutaD en la plataforma Processes de Simio. Fuente: Elaboración propia.

Los procesos anteriores determinan el seguimiento de cada una de las órdenes en las áreas correspondientes de laboratorio, planta de cementos y UAP. Además con la ayuda de otros procesos definidos dentro de la simulación para determinar el tiempo que cada orden de servicio permanece ejecutándose en cada objeto, se pudieron obtener los resultados que en la siguiente sección se muestran.

Una parte importante de esta simulación es la definición de las variables de estado para permitir la obtención de tiempos si uno de los elementos se retrasa. Esto forma parte de lo que buscamos ya que el impacto que tiene cada área se necesita conocer para poder

determinar las fallas operativas que pueden impactar al servicio de cementaciones. Para este modelo se definieron las siguientes variables:

Name	Object Type	Display Name
States (Inherited)		
Picture	Real State Variable	Picture
Animation	String State Variable	Animation
Tlab	Real State Variable	Tlab
Status	Integer State Variable	Status
TPlantE	Real State Variable	TPlantE
AWeight	Real State Variable	AWeight
BWeight	Real State Variable	BWeight
Inicio	Real State Variable	Inicio
tJAP	Real State Variable	tJAP
NumAjustesPlanta	Integer State Variable	NumAjustesPlanta
NumAjusteTB	Integer State Variable	NumAjusteTB
TUsoTotalCons	Real State Variable	TUsoTotalCons
TUsoTotalMixTank	Real State Variable	TUsoTotalMixTank
TUsoTotalUAP	Real State Variable	TUsoTotalUAP
TEsperaTotalLab	Real State Variable	TEsperaTotalLab
TEsperaTotalCons	Real State Variable	TEsperaTotalCons
TEsperaTotalMixTank	Real State Variable	TEsperaTotalMixTank
TEsperaTotalUAP	Real State Variable	TEsperaTotalUAP
NumRedisenos	Integer State Variable	NumRedisenos
t1	Real State Variable	t1
t2	Real State Variable	t2
TUsoTotalLab	Real State Variable	TUsoTotalLab
TEsperaPlantE	Real State Variable	TEsperaPlantE
TUsoPlantE	Real State Variable	TUsoPlantE

Fig 6.7. Variables de estado definidas para la simulación. Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros que se consideran para este modelo son los siguientes:

<i>Frecuencia de órdenes planeadas de TC y TB:</i>	Se considera como tiempo constante. Se asume que la probabilidad de llegada entre órdenes es de tipo exponencial.
<i>Frecuencia de órdenes urgentes de TC y TB:</i>	
<i>Capacidad de Laboralista, Consistómetros, Plantero, Tanque mezclador, UAP:</i>	Indica cuántas órdenes pueden ser procesadas al mismo tiempo
<i>Tiempo de procesamiento de Laboralista, Consistómetros, Plantero, Tanque mezclador:</i>	Indica el tiempo necesario para procesar una orden. Estos valores se tomaron como fijos.
<i>Tiempo de procesamiento de UAP:</i>	Tiempo necesario para procesar una orden en la unidad de alta presión (UAP) Se considera que este valor puede ser diferente para un trabajo de cementación que para un trabajo de bombeo.
<i>Probabilidad de falla de diseño*:</i>	Asigna una probabilidad de que la orden sea ajustada durante el diseño.
<i>Probabilidad de falla de inspección*:</i>	Asigna una probabilidad de que la mezcla sólida de cemento necesite ser ajustada.
<i>Probabilidad de falla en ajuste de lote (control de calidad)*:</i>	Probabilidad de que el ajuste de la mezcla sólida de cemento halla fallado en el siguiente control de calidad
<i>Probabilidad de rediseño*:</i>	Probabilidad de falla asignada en la inspección del segundo control de calidad y reinicio de diseño completo.

\*Las probabilidades son definidas con base en datos históricos.

Una vez que los parámetros más importantes con los que se realiza la simulación han sido explicados, la siguiente tabla muestra los valores que cada uno toma dentro de la simulación del proceso de cementaciones:

Parámetro	Valor
Frecuencia de órdenes planeadas TC	1 por día
Frecuencia de órdenes planeadas TB	1 cada 2 días
Frecuencia de órdenes urgentes TC	1 cada 2 días
Frecuencia de órdenes urgentes TB	1 por día
Capacidad de Laboratorista	1 orden a la vez
Capacidad de Consistómetro	1 orden a la vez
Capacidad de Plantero	1 orden a la vez
Capacidad de Tanque mezclador	1 orden a la vez
Capacidad de UAP	7 ordenes a la vez
Tiempo de procesamiento de Laboratorista	1 hora
Tiempo de procesamiento del Consistómetro	1.5 horas
Tiempo de procesamiento del Plantero	45 minutos
Tiempo de procesamiento del Tanque mezclador	1 hora
Tiempo de procesamiento de UAP en TC	Aleatorio entre 24-48 horas
Tiempo de procesamiento de UAP en TB	Aleatorio entre 24-72 horas
Probabilidad de falla en diseño de cemento (Primera Vez)	50%
Probabilidad de falla de diseño (Después de la primera vez)	20%
Probabilidad de falla en inspección	10%
Probabilidad de falla en lote ajustado	5%
Probabilidad de rediseño	5%

Tabla 6.1. Valores de cada parámetro de la simulación del proceso de cementaciones.

Fuente: elaboración propia.

Otro aspecto importante dentro de la simulación es establecer la lógica de selección para las órdenes que llegan al sistema. Se considerará que las órdenes se atiendan de acuerdo a la fecha en la que llegaron, es decir el sistema procesa primero las órdenes más antiguas con el fin de terminar lo más pronto posible cada una de las órdenes y que el tiempo de entrega de la orden no sea excesivo. Además de esta consideración básica para el sistema, también los trabajos de cementación (TC) tienen prioridad sobre los trabajos de bombeo (TB).

### 6.1.1. Diseño de experimentos

Se crearon diferentes escenarios para esta simulación, cada uno con alrededor de 10 réplicas. Cabe mencionar que el periodo en el que se corrió cada uno fue de 100 años ya que era el tiempo en el que el sistema se estabilizaba y brindaba resultados confiables. Antes de este tiempo los resultados variaban de 1 a 10 o a 50 años. Algunos de los experimentos que se realizaron se muestran en la siguiente figura.

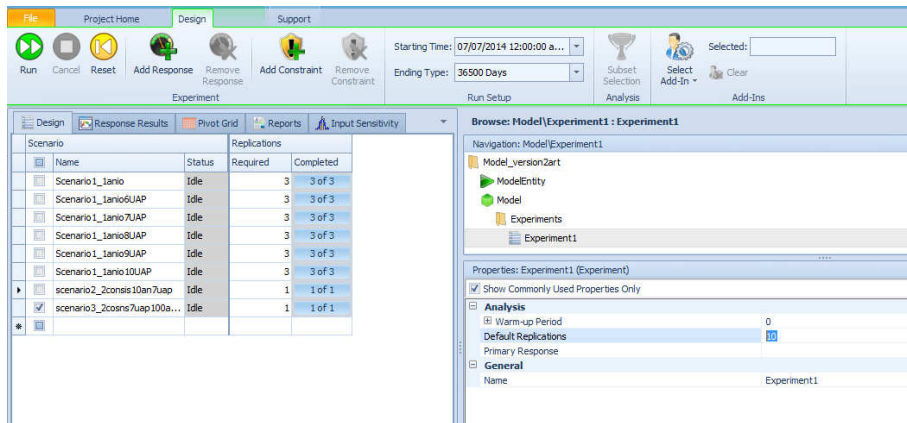


Fig 6.8. Algunos experimentos creados para la simulación. Fuente: Elaboración propia.

Principalmente se fueron analizando escenarios donde se tenían diferentes combinaciones de capacidades en los elementos críticos del sistema en varios periodos de tiempo.

## 6.2 Verificación y validación del modelo de simulación.

Para la verificación del modelo se realizaron varias pruebas que permiten asegurar que el modelo de simulación creado para el proceso de cementaciones sigue la lógica de comportamiento del proceso que realmente opera.

De acuerdo a Kleijnen, 1995, se realizaron las siguientes pruebas:

**Verificación de la estructura del modelo:** Esta prueba consiste en ejecutar el modelo de simulación y de manera visual asegurarse que el comportamiento de las órdenes de servicio (entidades) siguen la lógica del sistema real. Esta lógica respeta el orden de cada uno de las áreas de cementaciones, la orden primero ingresa al área de laboratorio y hasta que se ajusta pasa a la planta de cementos. Una vez que ejecuta el tiempo estimado de carga, se envía de nuevo al laboratorio para el control de calidad y una vez que pasa este control se procesa con una UAP. De lo contrario, cumple con todas las rutas determinadas con base en el proceso real de cementaciones.

**Verificación de los parámetros:** En este punto, se revisó que todos los valores de los parámetros determinados para la simulación estuvieran correctamente cargados dentro del modelo para que la simulación se efectuara de forma correcta.

**Prueba de condiciones extremas:** El fin de esta prueba fue constatar la efectividad de los procesos de toma de decisiones del sistema. Como se explicó, la orden puede ser seleccionada de acuerdo a ciertas prioridades establecidas de acuerdo a la fecha en la que

se generó. Entonces, lo que se realizó fue, ejecutar una gran cantidad de órdenes para que se generaran una gran cantidad de fechas y se verificó que el modelo respetara la jerarquía del proceso, es decir a qué área debe ir primero y el seguimiento consecutivo y así mismo que cumpliera con la prioridad de selección por fecha de llegada.

**Pruebas de comportamiento del modelo:** En este caso, en la primer "corrida" de simulación que se realizó los resultados que se analizaron fueron la cantidad de órdenes que habían presentado ningún ajuste, más de un ajuste de tiempo bombeable o bien un rediseño. Estas cantidades guardan cierta relación con las probabilidades de fallas asociadas a estos eventos y programadas en el modelo. Además de esto, se hicieron cambios en las capacidades de cada uno de los objetos del modelo para analizar que los resultados de la simulación tuvieran la lógica de comportamiento correcta.

Una vez que la verificación de varios aspectos del modelo de simulación fué realizada, se llevó a cabo la validación. Esta validación consistió en lo siguiente:

**Validación del modelo conceptual:** Se comparó la estructura del modelo conceptual de simulación que se propuso con los procesos de cementaciones con los que actualmente trabaja la empresa petrolera privada. En estos procesos se detalla toda la trayectoria que debe seguir cada orden de servicio según el tipo de trabajo que sea, es decir, de cementaciones o de bombeo. Por lo que el modelo conceptual cumple todos los aspectos contenidos en los procesos documentados.

**Validación del modelo de simulación:** La validación del modelo de simulación consistió en comparar algunos resultados de la simulación con datos históricos que corresponden a la empresa petrolera. El número real de órdenes de Trabajos de Bombeo y Cementaciones tuvieron una media de 94 órdenes requeridas por mes. Nuestro modelo generó alrededor de 90 órdenes por mes. Por lo que se determina que es aceptable el modelo que se está utilizando para el proceso de cementaciones.

### **6.3 Resultados obtenidos con el modelo de simulación propuesto.**

Gracias a la simulación realizada, se pudo entender en gran medida la dinámica del proceso de cementaciones. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Tiempo de entrega de Trabajos de Cementación (TC) y Trabajos de Bombeo (TB)
- Tiempo total de espera por cada tipo de orden
- Relación entre la cantidad de equipo disponible en el sistema y el total de tiempo de entrega de servicio.

- Información acerca de órdenes que presentaron ajustes y rediseños.

A continuación se presentan los resultados de cada uno de los puntos anteriores:

El tiempo de entrega total de los trabajos es un aspecto que se debe conocer ya que refleja el comportamiento del sistema complejo. Este tiempo de entrega se va a ver afectado si existen retrasos en alguna orden, si existen ajustes o rediseños o bien si no se tiene la cantidad de recursos humanos y materiales necesarios para atender a cierta demanda. Es por ello que se diseñaron varios experimentos y replicas en Simio para poder analizar cada uno de los elementos críticos del proceso.

En primer lugar, se determinó que el elemento más crítico es las UAP's. La cantidad que se tengan disponibles de este material es crucial ya que el tiempo de utilización es bastante alto y además este recurso es utilizado tanto en los trabajos de bombeo como en los trabajos de simulación. Se realizó el análisis en tiempo total de entrega del 50 % de las órdenes, el 90 % y del 100 %. La siguiente tabla muestra el tiempo en horas de acuerdo al tipo de trabajo y al número de UAP's que se fueron variando en el modelo.

No. UAP	CJ			PJ		
	50%	90%	100%	50%	90%	100%
5	54	68	96	392	812	1160
6	49	62	83	55	90	174
7	47	57	80	50	70	122
8	46	56	80	48	68	88
9	45	56	76	48	67	74
10	45	55	75	48	66	74

Tabla 6.2. Tiempo total de entrega (en horas) del 50, 90 y 100 por ciento de las órdenes de acuerdo a cada tipo de trabajo y según la cantidad de UAP's disponibles.

Por lo que se puede analizar en los resultados obtenidos, según la demanda de órdenes de servicio que la empresa espera tener una cantidad mayor a siete UAP's no impacta demasiado en el tiempo total de entrega. Cabe mencionar que los trabajos de cementación brindan mayor cantidad de ganancia a la empresa sobre los trabajos de bombeo.

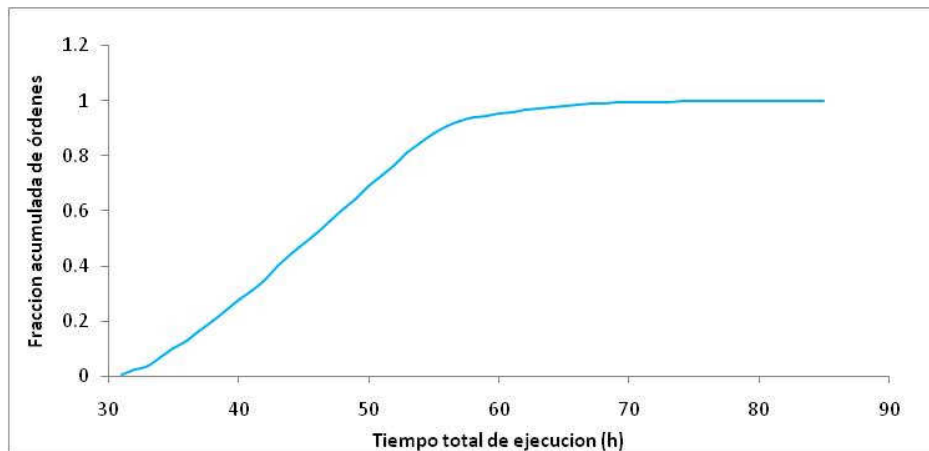
Una vez que se tomó la decisión de establecer siete UAP's en el sistema, se analizó cómo afecta la cantidad de consistómetros que se deben tener disponibles. La siguiente tabla muestra el tiempo total de servicio en horas.

No. Consistómetros	TC		
	50%	90%	100%
1	47	57	80
2	45	56	83
3	45	56	83

Tabla 6.3. Tiempo total de entrega (en horas) del 50, 90 y 100 por ciento de las órdenes variando el número de consistómetros para trabajos de cementación.

Como se puede observar en la tabla anterior, la variación entre dos y tres consistómetros no es notable en el tiempo total de entrega.

Debido a que los trabajos de cementaciones tienen mayor prioridad que los trabajos de bombeo, la siguiente figura muestra el porcentaje de trabajos entregados en cierto tiempo. Nótese que el 50 % de las órdenes de servicio de cementaciones son entregados antes de 50 horas Pero con 10 horas más, se tiene un cumplimiento de entrega de un 90 %. Entonces, de acuerdo con este resultado, tal vez la compañía podría considerar a nivel contractual un tiempo de entrega no menor a 60 horas para evitar cualquier penalización.



Gráfica 6.1 . Relación de cantidad de órdenes entregadas con respecto al tiempo total de ejecución en horas. Se considera que el sistema tiene disponibles siete UAP's y dos consistómetros.

Debido a que los trabajos de cementaciones son los únicos que requieren un diseño previo del cemento que se va a introducir al pozo, este tipo de trabajo es el único que puede requerir algún tipo de ajuste o rediseño. La siguiente tabla muestra que la mayor cantidad de las órdenes requieren entre 0 y 2 ajustes en el área de laboratorio y un solo ajuste una vez que fué cargado el lote por la planta de cementos. Y el evento más frecuente (89 órdenes lo presentaron) es un ajuste en el laboratorio y un ajuste después

de que se cargó. Los resultados muestran que el 40 % de las órdenes requieren un solo ajustes de tiempo bombeable. Además la cantidad de ajustes que se requieren una vez que la planta de cementos envía la muestra para el control de calidad, recurrentemente es uno solo. Estos datos son importantes ya que impactan directamente en el tiempo total de entrega de las órdenes de servicio.

Número de ajustes de tiempo	Ajustes de planta de cementos			totales	%
	1	2	3		
0	58	6	2	66	0.2578125
1	89	14	0	103	<b>0.40234375</b>
2	52	8	0	60	0.234375
3	16	2	1	19	0.07421875
4	6	0	0	6	0.0234375
5	1	0	0	1	0.00390625
6	1	0	0	1	0.00390625
<b>Totales</b>	223	30	3		
<b>%</b>	<b>0.87109375</b>	0.1171875	0.01171875		

Tabla 6.4. Combinaciones más comunes de ajustes en el área de diseño (laboratorio) y planta de cementos.

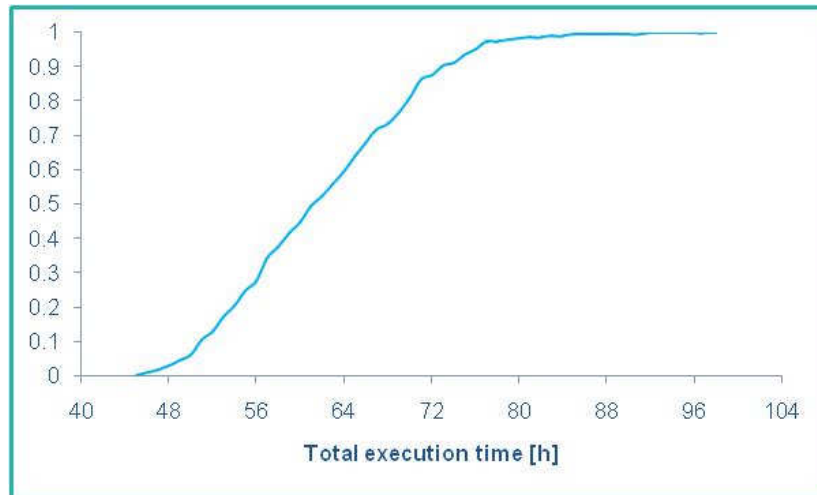
Una vez que los ajustes más comunes fueron encontrados, es importante analizar los tiempos totales de entrega de servicios máximos y mínimos que se generan con este evento. La siguiente tabla muestra el tiempo total máximo y mínimo en horas. Si bien, en la tabla pasada se analizaba que el más recurrente era un ajuste de diseño y un ajuste una vez que fue cargado el lote de la mezcla sólida, se observa que el tiempo máximo de las ordenes que presentan esta característica es de 83 horas y el mínimo es de 50 horas. Por lo que este resultado nos indica que las órdenes que presenten estos ajustes se entregaran en un estimado de 3 días por lo que muy posiblemente cause una penalización a la empresa.

Número de ajustes de tiempo	Ajustes de planta de cementos
	1
0	73
	45
1	83
	50
2	84
	50

Tabla 6.5. Tiempos máximos y mínimos (en horas) del tiempo total de entrega de las órdenes con la combinación de ajustes más comunes.

Finalmente, para aquellas órdenes de servicio de trabajos de cementación que requieren un rediseño completo se observa que el 50 % se entrega en 61 horas (aproximadamente 2.5 días) mientras que el 90 % se entrega en 73 horas (aproximadamente 3 días).





Gráfica. 6.6 Tiempo total de ejecución para trabajos que requieren rediseño. Fuente: elaboración propia.

Los resultados anteriores son importantes para determinar aspectos contractuales ya que cada hora que el cliente espera por la entrega del trabajo tiene un costo de 350 dólares sobre el monto del trabajo. Así que conocer cómo se comporta el sistema y cómo impacta cada evento sobre el tiempo total de entrega es una herramienta necesaria para determinar aspectos técnicos como cantidad de recursos materiales y humanos y también eficiencia de cada uno de los elementos del proceso de cementaciones.

#### 6.4 Análisis de resultados.

De acuerdo con los puntos anteriores, se pueden obtener varios datos sobre cómo cada elemento impacta directamente en el tiempo total de entrega del servicio de cementaciones. Si bien, ya se analizó el sistema desde un enfoque de complejidad y también se analizaron todas las fallas del sistema, se ha determinado que sería imposible incluir todas las fallas operativas que presenta el servicio de cementaciones en el mundo real, por lo que según los análisis de descomposición y composición se encuentra que hay ciertas fallas que afectan a la misión de la compañía y por lo tanto son las más graves. Se encontró por medio del análisis de criticidad y causalidad de fallas que hay algunas fallas que son dependientes de otras por lo que la que más impacta es aquella que genera penalizaciones por parte del cliente. La simulación ha servido para analizar de mejor forma los elementos más críticos del servicio de cementaciones y con ello cuanto impacta cada elemento (de manera cuantitativa) sobre el objetivo general del sistema. En el siguiente capítulo se pretende analizar de manera más específica una de las fallas que más impacta y que obviamente genera cobro por tiempo de espera.

# Capítulo VII. Análisis de datos de demanda

---

El objetivo de este capítulo es analizar los datos que se tienen disponibles para la investigación, además de prepararlos para su uso.

## 7.1 ¿Los datos recopilados son suficientes?

Es necesario establecer esta pregunta una vez que se han recopilado los datos para el análisis del sistema que se estableció ya que es necesario que siempre evaluemos si los datos que se tienen son suficientes para trabajar el caso y sobre todo para obtener los objetivos establecidos. Para el caso en el que no sean suficientes los datos con los que se cuentan, sí se considera necesario realizar un análisis extra para determinar si el costo de obtener esos datos adicionales es mayor al beneficio que se puede obtener de ellos. Si no genera un costo mayor al beneficio, se recomienda recopilar registros para su análisis. En el caso contrario la acción a tomar sería utilizar los datos que se tengan y hacer uso de las herramientas que sean necesarias para su análisis y uso.

En el modelo matemático que se planteará en el capítulo VIII se basa en la parte de logística del modelo de simulación (visualmente se ve como UAP). En el mundo real, las UAP's no pueden ir al pozo petrolero si no van con una cuadrilla de personal y a la vez, el supervisor es el elemento más indispensable de la cuadrilla por lo que se modelará el impacto que tiene (en costos) no tener los suficientes supervisores disponibles para un trabajo ya sea de bombeo o de cementación.

En el caso estudiado en este proyecto se ha determinado que los datos son suficientes en su mayoría. Sin embargo, hacen falta datos de costo de personal, específicamente de los supervisores que es lo estudiado en este alcance del problema. Por lo que se determina que es necesario pedirlos a la empresa ya que el beneficio es mayor que el costo. Los datos que se han pedido son los siguientes:

Salario base mensual	\$ 7000.00 M/N	Horas de promedio de operación pumping/bombeo	12 h
Horas promedio de operación cmt	8 h	Costos por personal foráneo por día	\$ 4000.00 M/N

*\*Tiempo extra: Se paga triple la hora.*

Tabla 7.1. Datos adicionales. Fuente: Empresa petrolera privada

Con los datos anteriores ya puede considerarse como suficiente los datos recopilados para poder modelar.

## 7.2 Selección de los datos que se requieren para el modelo

Debido a que no todos los datos son siempre útiles, es pertinente discernir entre los datos que se van a usar y los que no. La diferencia entre los pasos anteriores en los que se realizaba un análisis de datos es que en este paso es más enfocado a los datos específicos.

Los datos que han sido recibidos para trabajarse en este proyecto y con esta problemática en específico son los registros de 1 año completo de trabajo en forma de un reporte gerencial (scorecard). En esta tabla se detallan todos los registros correspondientes de un año. Tiene aspectos de seguridad, ambientales, administración de personal, calidad en el servicio y aspectos financieros. No se rebela el nombre de la empresa por condiciones de confidencialidad. También contiene datos de la demanda mensual de ese año tanto de los trabajos de cementación y de bombeo. La ganancia pronosticada en ese año y su desviación con respecto a lo presentado en ese año. En el anexo 1 se incluye esta tabla omitiendo datos por confidencialidad.

Sin embargo, los objetivos del problema ya han sido establecidos, para lo que es necesario determinar cuáles son los datos necesarios y cuáles datos se omitirán para aislar el sistema que aquí se estudia. No necesariamente se induce que se realizará de forma aislada, pero sí se define un límite en los datos para iniciar con un modelo simple que represente de forma suficiente al problema.

Del reporte gerencial se utilizarán solamente el número de operaciones de cementación y de bombeo, por lo que los demás datos no serán considerados.

Para trabajos de cementación:

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Trabajos	33	29	42	48	47	59	51	46	56	53	47	64

Para trabajos de bombeo:

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Trabajos	51	46	56	53	47	64	77	32	10	46	35	28

### 7.3 Preparación de los datos para utilizarlos en el modelo

Como no siempre los datos que se tienen están listos para ser usados (al menos en el caso particular que aquí se estudia) es conveniente preparar el sistema para poder tener datos que nos puedan dar la información que se necesita para poder crear el modelo, es decir, procesar la información. En el desarrollo de la metodología se explicará paso por paso lo que se realizó.

Debido a que se ha planteado que uno de los objetivos es justamente definir cuántos elementos del sistema contratados (humanos y materiales) se necesitan disponibles en la base operativa para las operaciones de cementación y bombeo, es necesario determinar primero cuál es la demanda que se tendrá de cada uno de estos servicios. Sin embargo, el problema no puede aislarse por cada tipo de operación, ya que los supervisores realizan ambos tipos de trabajo de forma rotatoria. No se tienen especialistas en una operación, sino que están capacitados para cualquier trabajo que ordenen.

Como el problema no es sencillo debido a que involucra dos situaciones distintas de forma dependiente es menester la preparación del sistema de datos. Por lo que primero se realiza una estimación de trabajos por día para cada mes del año.

Se utiliza la distribución de Poisson que ayudará a estimar la probabilidad de que se requieran trabajos de alguno de los 2 tipos en un periodo de 1 mes. Entonces, la probabilidad de tener cierta cantidad de trabajos durante cierto periodo de tiempo está definida por:

$$P(x, \lambda) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$$

Donde:

$P(x, \lambda)$  = probabilidad de que ocurran  $x$  éxitos,  
cuando el número promedio de ocurrencia  
de ellos es  $\lambda$ .

Por lo que para la preparación de estos datos se procede de la siguiente forma:

Primero se obtiene el cociente del número de operaciones de cada tipo de trabajo por el número de días de cada mes. De esta forma se obtiene el número de operaciones promedio de cada tipo de trabajo por día:

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Trabajos de cementing	33	29	42	48	47	59	51	46	56	53	47	64
Trabajos de pumping	51	46	56	53	47	64	77	32	10	46	35	28

días en el mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Cemnting/día	1.064516129	1.03571429	1.35483871	1.6	1.51612903	1.96666667	1.64516129	1.48387097	1.86666667	1.70967742	1.56666667	2.06451613
Pumping/día	1.64516129	1.64285714	1.80645161	1.76666667	1.51612903	2.13333333	2.48387097	1.03225806	0.33333333	1.48387097	1.16666667	0.90322581

Debido a que el planteamiento del problema define que los costos se tienen que minimizar de manera conjunta, y una vez obtenida la relación anterior, se obtiene la probabilidad de que se pudieran presentar las diferentes combinaciones de trabajos en un día. Para calcular este dato se utiliza una distribución de probabilidad de Poisson, obteniéndose los siguientes datos:

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
19	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
21	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
22	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
23	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
25	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
26	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
27	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
28	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
29	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
30	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
31	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Tabla 7.2. Probabilidad de ocurrencia de cada evento por día

Históricamente no han existido más de seis trabajos de cementación o de bombeo por día, es por ello que se realiza una combinación de los posibles eventos de cero a seis trabajos.

La tabla anterior, lo que genera son los pesos o las ponderaciones que se necesitan para realizar el modelo matemático.



<ul style="list-style-type: none"> <li>• Límite superior:</li> </ul> $d_{ij}^+ = \text{redondear}(\bar{d}_{ij} + \varepsilon)$ <p>donde:</p> <p><math>\varepsilon</math> = el menor valor posible de tal forma que se cumpla el número de días de cada mes. En el caso particular de este modelo, el valor se ubica entre 0.2 y 0.3</p> <p><math>\bar{d}_{ij}</math> = días promedio en los que se presenta cada evento por cada mes</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Límite inferior</li> </ul> $d_{ij}^- = \text{redondear}(\bar{d}_{ij} - \varepsilon)$ <p>donde:</p> <p><math>\varepsilon</math> = el menor valor posible de tal forma que se cumpla el número de días de cada mes. En el caso particular de este modelo, el valor se ubica entre 0.2 y 0.3</p> <p><math>\bar{d}_{ij}</math> = días promedio en los que se presenta cada evento por cada mes</p>
--	---

Eventos posibles		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
# Trabajos de cementing	0	2	2	2	1	2	1	1	3	4	2	2	2
# Trabajos de pumping	0	4	3	3	2	2	1	2	3	1	2	2	2
	0	3	3	2	2	2	1	2	2	0	2	2	1
	0	2	2	2	1	1	1	2	1	0	1	1	0
	0	4	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0
	0	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	2	2	2	2	1	1	4	7	2	3	3
	1	1	4	3	4	3	4	2	4	2	4	4	3
	1	2	3	3	3	3	2	3	2	1	3	2	2
	1	3	2	2	2	2	2	2	1	0	1	1	1
	1	4	1	1	1	1	1	2	0	0	1	0	0
	1	5	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
	1	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	2	0	1	1	2	2	1	1	3	6	2	3	4
	2	1	2	2	2	3	2	2	3	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
	2	3	1	1	1	2	1	2	1	0	1	1	1
	2	4	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0
	2	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	2	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	3	0	1	1	1	1	1	1	2	4	1	1	3
	3	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2
	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	3	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0
	3	4	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0
	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
	4	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4	2	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
	4	3	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
	4	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 7.4. Límite superior de días promedio por cada evento por mes

Eventos posibles		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
Trabajos de cementing	Trabajos de pumping	0	2	2	1	1	1	0	0	2	3	1	2	1
0	1	3	3	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	1
0	0	2	3	2	2	1	2	1	1	1	0	1	1	0
0	3	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	2	2	1	1	2	1	1	4	6	2	3	3	3
1	1	3	3	3	3	3	2	2	4	2	3	3	3	3
1	1	2	3	2	3	2	2	2	2	0	2	2	2	1
1	3	1	1	1	1	1	1	2	0	0	1	1	1	0
1	4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	2	1	0	3	5	2	2	3	3
2	2	1	2	2	2	2	2	1	3	2	2	3	3	3
2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	0	2	1	1	1
2	2	3	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
2	4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3	1	1	2	2
3	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
3	2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	3	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 7.5. Límite inferior de días promedio por cada evento por mes

Con los datos anteriores obtenidos ya se tiene un sistema de datos más representativos. Sin embargo es necesario crear una tabla de datos que cumpla ciertos requerimientos. Esta tabla es importante de obtener, porque de esta forma se obtendrán los días totales por mes que el evento puede suceder. Por lo que es necesario maximizar la probabilidad de los días de ocurrencia del evento conjunto, la cual representa la ocurrencia de  $i$  trabajos de cementación con  $j$  trabajos de bombeo o pumping.

Es necesario maximizar mes con mes. Por lo que las restricciones que debe cumplir el modelo son:

- Que la sumatoria de días de ocurrencia del evento posible, sea igual al número de días por mes.
- Que el número de días de ocurrencia del evento posible sea menor que los días calculados en el límite superior y mayor que los días calculados en el límite inferior.
- Que los días de ocurrencia por mes multiplicados por el número de trabajos de cementaciones, sea igual al número total de cementaciones realizadas en el mes.
- Que los días de ocurrencia por mes multiplicados por el número de trabajos de bombeo o pumping, sea igual al número total de bombeo o pumping realizados en el mes.



Por ende, el modelo queda planteado de la siguiente forma:

$$\max z = \sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^6 p_{ij} d_{ij}^{(m)}$$

*s.a.*

$$\sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^6 d_{ij} = D_m$$

$$d_{ij} \leq d_{ij}^+$$

$$d_{ij} \geq d_{ij}^-$$

$$\sum_{j=0}^6 \sum_{i=0}^6 id_{ij} = T_{cmt}$$

$$\sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^6 jd_{ij} = T_{pump}$$

$$p_{ij}, d_{ij} \geq 0$$

Donde:

$i$  = trabajos de cementación, tomando valores de 0 a 6

$j$  = trabajos de pumping o bombeo, tomando valores de 0 a 6

$p_{ij}$  = probabilidad de ocurrencia de cada evento

$d_{ij}$  = número de días

$D_m$  = días totales del mes optimizado

$T_{cmt}$  = Trabajos históricos totales de cementaciones

$T_{pump}$  = Trabajos históricos totales de pumping o bombeo

Es importante resaltar que la optimización se hace mes a mes con el fin de obtener el número de días totales correspondientes a cada evento. Con el modelo matemático anterior se obtiene la siguiente tabla utilizando Solver de Excel:

i		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	Totales
0	0	2	2	1	1	1	2.095E-11	0	2	3	1	2	1	16
0	1	3	3	3	2	2	1	1	2	1	2	2	2	23
0	2	3	3	2	2	2	1	2	1	0	1	1	1	19
0	3	1	1	1	1	1	1	2	1	0	0	1	0	10
0	4	1	4.3854E-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	2	2	2	1	2	1	1	4	7	2	3	3	30
1	1	4	3	4	3	4	2	2	4	2	4	4	4	39
1	2	3	3	3	3	2	2	3	2	0	3	2	2	28
1	3	2	2	2	2	1	1	2	1	0	1	1	1	16
1	4	1	1	0	0	1	1	2	0	0	1	0	0	7
1	5	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	3
1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	2	1	0	3	6	2	2	4	24
2	1	2	1	2	3	3	2	2	3	2	3	3	3	29
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4.3471E-11	2	2	2	22
2	3	1	1	1	2	1	2	2	1	0	1	0	0	12
2	4	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	5
2	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
2	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	1	1	0	1	4	1	1	2	11
3	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	18
3	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	13
3	3	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	8
3	4	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	5
3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	3.5189E-11	0	1	1	0	3.2912E-11	1	3
4	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	7
4	2	0	0	1	1	1	1	7.0608E-11	0	0	8.5721E-11	1	1	6
4	3	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	4
4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2
5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dias		31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
Cementaciones		33	29	42	48	47	59	51	46	56	53	47	64	
Pumpings		51	46	56	53	47	64	77	32	10	46	35	28	
F.O.		2.16584028	1.984901	1.841391	1.675381	1.857251	1.291254	1.419033	2.309314	3.850909	1.828425	2.045136	2.087584	

Tabla 7.6. Número de días totales por cada mes por cada evento.

Con la tabla anterior, se puede considerar que ya los datos fueron procesados y analizados para utilizarse en la creación del modelo que satisfaga los objetivos.

# Capítulo VIII. Modelo matemático para un tipo de falla: Falta de personal

---

El objetivo de este capítulo es la formulación y la solución de un modelo matemático para uno de los tipos de falla más importantes que es la no disponibilidad de personal que por lo regular provoca una de las fallas con más impacto de cobro de tiempo de espera.

## 8.1 Creación del modelo matemático

Una de las fallas operativas con mayor impacto monetario es el tiempo de espera causado por no tener personal disponible en la base operativa cuando se requiere una operación. Como se ha mencionado en otros capítulos, la demanda presenta fluctuaciones debido a presupuesto gubernamental, competencia, preferencias del cliente, etc. Actualmente, una cuadrilla de trabajo (recursos humanos) se compone de un supervisor, un ingeniero de campo, tres operadores y tres asistentes de operación. Sin embargo, la cantidad de personal varía según el volumen de cemento que se va a bombear al pozo. En caso de no tener un supervisor disponible para una operación, ésta no se efectúa. Debido a esto, se sugiere conocer el número de supervisores que debe tener contratados y disponibles para una de las bases operativas minimizando los costos, para cubrir la demanda existente de operaciones tanto de cementaciones de pozos petroleros como bombeo de fluidos al pozo. Considerando el costo adicional que genera el pago de horas extra y también la posibilidad de pedir supervisores de otras bases para cubrir los requerimientos de 1 año.

Como no siempre los datos están preparados para ser utilizados, es necesario procesar esta información de manera que sea utilizable para el problema que se va a modelar.

Primeramente, se preparan los datos de la tabla 1 que corresponden a los costos que genera tener personal de supervisión.

De la tabla 1 del capítulo VI se obtiene lo siguiente:

El costo por hora de supervisor es: \$ 29.00 M/N

Cuando aplica el pago de horas extra, solo se permite como máximo un pago de 8 horas. Y debido a que es el triple de la hora, se establece como máximo:

- 2 medios turnos de hora extra: \$ 700.00 M/N
- 1 medio turno de hora extra: \$ 350.00 M/N.

Se considera un costo por tener a un supervisor de base por año de:

$$(\$ 7\,000.00 \text{ M/N} / \text{ por mes}) * (12 \text{ meses}) = \$ 84\,000.00 \text{ M/N por año.}$$

Del análisis de pagos a los supervisores, se obtiene que:

$$1 \text{ medio turno de hora extra: } \$ 350.00 \text{ M/N.}$$

Y el número de horas extras máximas pagadas es de 8 horas, por lo que por practicidad se estable que es máximo 2 medios turnos por empleado.

Se sabe que cada trabajo de cementación dura en promedio 8 horas, por lo que se tomará para este modelo un valor de 2 medios turnos. Y para pumping o bombeo se tiene una duración de 12 horas, por lo que se utilizará un valor de 3 medios turnos.

La empresa ha estipulado en sus políticas que se requieren al menos 5 600 horas de supervisores al año dedicadas al mantenimiento preventivo de los equipos, es decir, 1 400 medios turnos.

También se tiene como dato que el costo de un supervisor que sea de otra base es de \$ 4000.00 diarios que considera gastos de comida, hospedaje, transporte y sueldo.

Con todas las consideraciones anteriores, se formula el siguiente modelo:

$$\min z = C_b x_b + \sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^6 350 \cdot e_{ij} \cdot d_{ij} + \sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^6 4000 \cdot f_{ij} \cdot d_{ij}$$

*s.a.*

$$e_{ij} \leq 2x_b$$

$$R_{ij} = \begin{cases} 2i + 3j & d_{ij} \neq 0 \\ 0 & d_{ij} = 0 \end{cases}$$

$$2x_b + e_{ij} + 2f_{ij} \geq R_{ij}$$

$$\sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^6 (2x_b + e_{ij} + 2f_{ij} - R_{ij}) d_{ij} \geq 1400$$

$$x_b, e_{ij}, f_{ij}, d_{ij}, R_{ij} \geq 0 \quad i, j = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

donde :

$C_b$  = costo de supervisor por año

$x_b$  = número de supervisores contratados y disponibles en la base

$e_{ij}$  = número de medios turnos (4 horas) necesarios en la situación i,j

$f_{ij}$  = número de personal foráneo necesario en la situación i,j

$R_{ij}$  = número de medios turnos requeridos para satisfacer la situación i,j

## 8.2 Solución del modelo

Con el modelo ya planteado, se obtienen un total de 99 restricciones y 99 variables.

Debido a que la probabilidad de ciertos eventos es muy baja, se considera como despreciable, por lo que únicamente se ingresan 75 variables y 75 restricciones en una tabla de parámetros en Excel y se resuelve por Solver obteniendo lo siguiente:

F.O Minimizar **563850** M/N por año

Supervisores de Base  $x_b$  **6**  
 costo personal base por año 84000

i	j	dij	R(ij)	e(ij)	f(ij)
Trabajos de cementing	Trabajos de pumping	Totales en el año	Medios tiempos requeridos por día	Variables de medios tiempos extra	Variables de personal foraneo
0	0	16	0	0	0
0	1	23	3	0	0
0	2	19	6	0	0
0	3	10	9	0	0
0	4	1	12	0	0
0	5	0	0	0	0
0	6	0	0	0	0
1	0	30	2	0	0
1	1	39	5	0	0
1	2	28	8	0	0
1	3	16	11	0	0
1	4	7	14	2	0
1	5	3	17	5	0
1	6	0	0	0	0
2	0	24	4	0	0
2	1	29	7	0	0
2	2	22	10	0	0
2	3	12	13	1	0
2	4	5	16	4	0
2	5	2	19	7	0
2	6	0	0	0	0
3	0	11	6	0	0
3	1	18	9	0	0
3	2	13	12	0	0
3	3	8	15	3	0
3	4	5	18	6	0
3	5	0	0	0	0
3	6	0	0	0	0
4	0	3	8	0	0
4	1	7	11	0	0
4	2	6	14	2	0
4	3	4	17	5	0
4	4	1	20	8	0
4	5	0	0	0	0
4	6	0	0	0	0
5	0	1	10	0	0
5	1	2	13	1	0

Tabla 8.1. Resultados obtenidos de la cantidad de medios turnos requeridos, cantidad de supervisores en la base, número de medios turnos extra pagados en la situación i,j y número de personal foráneo requerido. Además de los costos mínimos totales por año.



El mismo modelo utilizado para resolver el problema planteado inicialmente se utiliza para este apartado, solo fijando la variable  $x_b$  desde 1 hasta 12.

Se plantea en Excel de la siguiente forma:

	A	B	C
1			
2			
3	F.O Min		1008000
4			
5			
6			
7			
8	Supervisores de Base	$x_b$	12
9	costo personal base por año	84000	
10			

Fig. 8.1. Ejemplo de resultado de F.O. para 12 supervisores de base

De la misma forma que para obtener resultados del modelo se ingresan las variables y vigilando el cumplimiento de las mismas restricciones. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Personal de base	Costo por falta o exceso
0	8372000
1	5791150
2	3210650
3	1283550
4	841300
5	607250
6	563850
7	614250
8	681450
9	757400
10	840000
11	924000
12	1008000

Tabla 8.3. Costo en M.N. por trabajador por año en la base operativa

Como resultado del modelo anterior, se tiene que tener 6 supervisores de base y disponibles es el óptimo para cubrir la demanda del año estudiado. Sin embargo, para facilitar el análisis de estos datos se grafica como sigue:

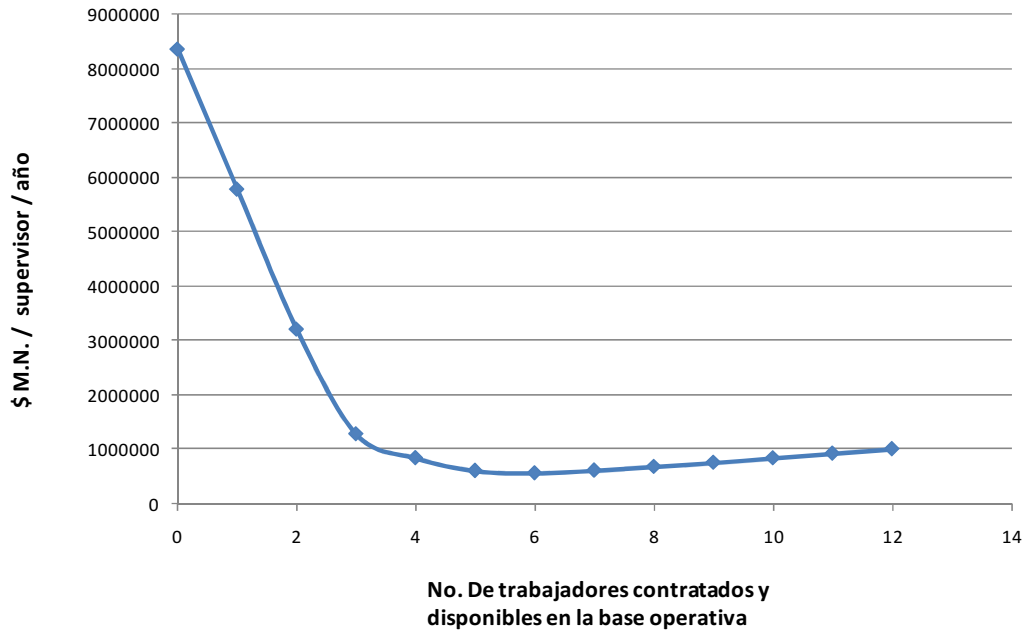


Grafico 8.1. Costo en M.N. por cada supervisor contratado y disponible por año

Por lo que se puede apreciar en la gráfica anterior, tener menos personal disponible y contratado en la base impacta muy fuerte en los costos; por el contrario, si se tiene 2 supervisores contratados y disponibles además del óptimo no aumenta demasiado en los costos anuales.

Es necesario analizar esto de forma estadística para conocer de manera más puntual ¿cuál es el costo de tener menos personal y más que el óptimo obtenido de 6 supervisores?

Para responder a la pregunta anterior, resulta muy conveniente determinar la pendiente de la recta. Solo que se realizará en 2 partes ya que sus comportamientos son distintos.

Se realiza el siguiente procedimiento:

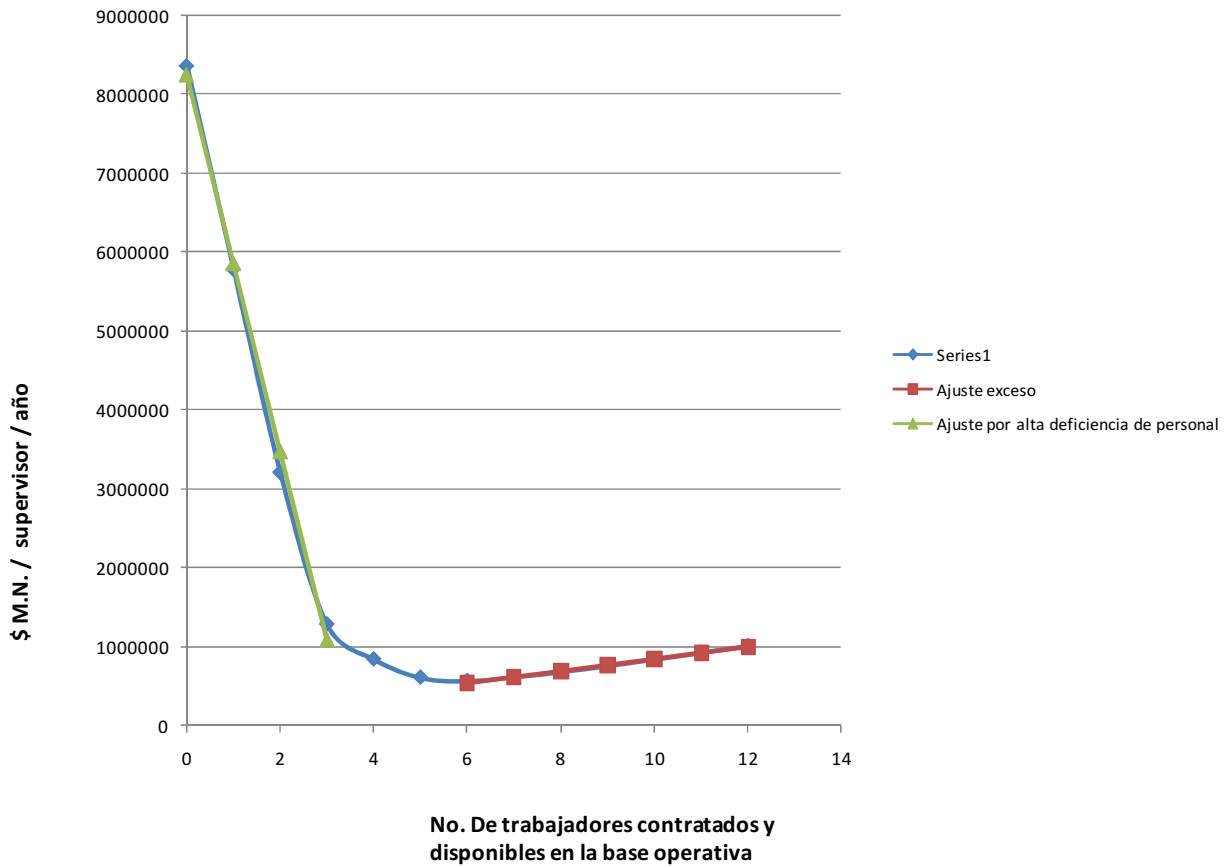




( x )	( y )
0	8241215
1	5856630
2	3472045
3	1087460
6	543725
7	619100
8	694475
9	769850
10	845225
11	920600
12	995975

**Tabla 10.** Costos respectivos a personal de exceso y faltantes de acuerdo al ajuste de la recta

Con base en esos datos obtenidos, se ajusta la siguiente recta:



**Gráfico 8.2.** Ajuste de costos de personal de exceso y faltante

De acuerdo a los valores de las respectivas pendientes se puede entender que para el caso de tener personal el exceso, el costo anual de contar con 1 supervisor de más es de \$ 75 375.00 M/N. Sin embargo, el escenario contrario que es tener personal de menos es bastante alto, \$ 2 384 585.00 ya que no tener el personal necesario disponible puede ocasionar pedir supervisores prestados de otras bases, lo cual aumenta el costo total anual.

Por lo tanto, como el óptimo para este problema es de 6 supervisores contratados y disponibles en la base operativa, si se tienen 7 u 8 que equivaldrían a 1 o 2 supervisores “de más” no tiene un impacto comparable con el de no contar con el personal necesario que asciende a más de 2 millones de pesos.

El siguiente análisis que se realiza es diseñar una política de acción para todos los casos posibles, no solo considerando los casos probables. El modelo que soluciona el problema planteado, se realiza con base en la probabilidad de ocurrencia de los escenarios. Sin embargo, hay situaciones que se determina como una probabilidad insignificante y por lo tanto el modelo no las considera para su solución. En este apartado, la idea es realizar esas consideraciones para visualizar cómo cambiaría el curso de acción o bien cuál es el camino a seguir.

Se utiliza el mismo modelo base, la tabla siguiente es la que se introduce. Solo se establece que cada situación  $i,j$ , es decir  $d_{i,j}$  es igual a 1, por lo tanto, se toman en cuenta todas las situaciones posibles:

Trabajos de cementing	Trabajos de pumping	Totales en el año
0	0	1
0	1	1
0	2	1
0	3	1
0	4	1
0	5	1
0	6	1
1	0	1
1	1	1
1	2	1
1	3	1
1	4	1
1	5	1
1	6	1
2	0	1
2	1	1
2	2	1
2	3	1
2	4	1
2	5	1
2	6	1
3	0	1
3	1	1
3	2	1
3	3	1
3	4	1
3	5	1
3	6	1
4	0	1
4	1	1
4	2	1
4	3	1
4	4	1
4	5	1
4	6	1
5	0	1
5	1	1
5	2	1
5	3	1
5	4	1
5	5	1
5	6	1
6	0	1
6	1	1
6	2	1
6	3	1
6	4	1
6	5	1
6	6	1

Tabla 8.11. Tabla de parámetros para análisis

Con los resultados obtenidos en Excel se obtiene la siguiente tabla comparativa:

Trabajos de cementing	Trabajos de pumping	Totales en el año	SITUACIÓN NORMAL		SITUACIÓN ANÓMALA	
			Variables de medios tiempos extra	Variables de personal foraneo	Variables de medios tiempos extra	Variables de personal foraneo
0	0	16	0	0	0	0
0	1	23	0	0	0	0
0	2	19	0	0	0	0
0	3	10	0	0	0	0
0	4	1	0	0	0	0
0	5	0	0	0	3	0
0	6	0	0	0	6	0
1	0	30	0	0	0	0
1	1	39	0	0	0	0
1	2	28	0	0	0	0
1	3	16	0	0	0	0
1	4	7	2	0	2	0
1	5	3	5	0	5	0
1	6	0	0	0	8	0
2	0	24	0	0	0	0
2	1	29	0	0	0	0
2	2	22	0	0	0	0
2	3	12	1	0	1	0
2	4	5	4	0	4	0
2	5	2	7	0	7	0
2	6	0	0	0	10	0
3	0	11	0	0	0	0
3	1	18	0	0	0	0
3	2	13	0	0	0	0
3	3	8	3	0	3	0
3	4	5	6	0	6	0
3	5	0	0	0	9	0
3	6	0	0	0	12	2.2715E-10
4	0	3	0	0	0	0
4	1	7	0	0	0	0
4	2	6	2	0	2	0
4	3	4	5	0	5	0
4	4	1	8	0	8	0
4	5	0	0	0	11	0
4	6	0	0	0	12	1
5	0	1	0	0	0	0
5	1	2	1	0	1	0
5	2	0	0	0	4	0
5	3	0	0	0	7	0
5	4	0	0	0	10	0
5	5	0	0	0	11	1
5	6	0	0	0	12	2
6	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	3	0
6	2	0	0	0	6	0
6	3	0	0	0	9	0
6	4	0	0	0	12	2.2715E-10
6	5	0	0	0	11	2
6	6	0	0	0	12	3

Tabla 8.12. Tabla comparativa de resultados entre situación normal y situaciones anómalas.

En la tabla anterior, se pueden observar diversas situaciones que en el modelo inicial no se habían considerado ya que la probabilidad de ocurrencia era muy baja. Sin embargo, este

análisis, permite considerar un plan de acción en diferentes eventualidades. La tabla 12 muestra en sombreado las situaciones que cambian con respecto al problema planteado inicialmente.

Es notable que para ciertos casos es necesario solicitar personal foráneo, como es para un día que se tengan 4 cementaciones y 6 bombeos, 5 cementaciones y 5 bombeos, 6 cementaciones y 5 bombeos y 6 cementaciones y 6 bombeos. Aunque de acuerdo a los cálculos de probabilidad inicialmente realizados estas situaciones son casi improbables, y también de acuerdo a la experiencia, no se exime la posibilidad de ocurrencia. Es por ello que en esta parte del análisis se toma en cuenta.

Con base en todo lo anterior, el costo mínimo esperado es \$ 563 850.00 M/N por un año. Considerando un total de 6 supervisores que deben estar contratados y disponibles en la base operativa. Esperando pagar a lo largo del año 44 medios turnos de horas extra, que se traduce a 176 horas extras de forma triple. Y no requiriendo ni una sola vez solicitar el apoyo de un supervisor de una base externa. Todo lo anterior para comportamientos de demanda similares a la información recibida.

### **8.3 Análisis de los resultados del modelo matemático**

El modelo matemático además de resultados puntuales acerca de los costos de contratación de una cantidad determinada de supervisores, proporcionó una idea de cómo se puede mitigar la falla de no contar con el personal suficiente para atender una demanda específica. En este capítulo se muestra otra forma de analizar las situaciones que podrían resultar más costosas para la compañía privada. No solo es importante obtener información numérica, sino idear formas sencillas tanto de planteamiento como de resolución de problemas reales para poder tomar mejores decisiones en el sistema real.

# Conclusiones y trabajos futuros

---

Durante la investigación previa al desarrollo de este trabajo, se encontró que actualmente la forma de tratar las fallas en un producto y un servicio es totalmente distinta entre sí y que la mayoría de las metodologías se basan en herramientas estadísticas. Regularmente se mitigan aquellas fallas que son frecuentes pese a que no siempre sean las más críticas para el sistema.

Para lo anterior, se construyó una metodología para tratar fallas en servicios petroleros usando un enfoque de sistemas complejos y herramientas de la investigación de operaciones como la simulación de eventos discretos y continuos y la optimización para minimizar las fallas operativas. Esta metodología también incorpora el cumplimiento de la metodología de simulación en los pasos donde es requerida.

La aportación de una metodología de este tipo es que las fallas no son aisladas entre sí, sino que se analizan de manera conjunta, sistémica.

El enfoque de sistemas complejos contribuye en la definición del sistema de forma puntual, ya que permite identificar las interrelaciones de los elementos y sus partes críticas para lograr objetivos estratégicos que busca principalmente el sistema.

La simulación se utilizó para analizar el sistema completo (con todas sus variables, parámetros, lógica de funcionamiento) y con ello conocer mejor su comportamiento. Una vez realizada esta simulación, se identificaron las partes que causan impacto total en el sistema ocasionando fallas de forma permanente. Esta información es relevante ya que se pueden realizar recomendaciones precisas y de gran valor para los dueños del proceso de cementaciones.

Otro aspecto importante de la simulación fue la definición de los indicadores que ayudan a recopilar la información numérica que es de utilidad, por ejemplo los estados críticos del sistema y aquellos eventos que puedan causar conflictos al sistema. En este caso, la definición de los escenarios es de gran impacto ya que en este trabajo se enfocaron principalmente en la combinación de diferentes capacidades de los recursos del proceso simulado.

Una vez que la información de la simulación se obtuvo, la construcción de un modelo matemático permitió acotar aún más el problema que se está tratando en esta investigación e incorporar otros aspectos que no habían sido analizados como los costos de personal. Además, la resolución del modelo matemático por medio de herramientas muy básicas como Excel permite que en el sistema real sea alcanzable el análisis por esta forma por su sencillez sin que existan problemas por el lenguaje de programación.

Reflexionar aspectos como cuál es el beneficio de tener mayor o menor cantidad de personal en ciertas situaciones fue muy sencillo utilizando herramientas estadísticas. Si bien, los resultados de la simulación como tal no fueron utilizados en el modelo matemático, éstas dos técnicas fueron complementarias para tratar dos fallas distintas que pertenecían a la falla principal que es el cobro de tiempo de espera.

La forma en la que se desarrolló esta investigación permitió utilizar la investigación de operaciones como una herramienta para el análisis de un problema real. Sin embargo, existen diferentes formas de abordar un problema dependiendo de las habilidades y conocimientos del analista. Este trabajo puede servir como un precedente o avance para aplicar otro tipo de herramienta en el tratamiento de fallas operativas en servicios petroleros.



# REFERENCIAS

---

- Ackoff, R.L. *El paradigma de Ackoff. Una administración sistémica*. Limusa Wiley. Mexico, 2010
- Ackoff, R.L. *Redesigning the future: a systems approach to societal problems*. John Wiley & Sons. Nueva York, EU, 1974.
- Alamilla J.L., Sosa E., Sánchez-Magaña C.A., Andrade-Valencia R., Contreras A., 2013, Failure analysis and mechanical performance of an oil pipeline. *Materials and Design*, 50, 766 – 773.
- Banks, Jerry. *Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. John Wiley & Sons, Inc. pp. 15 - 18.
- Barbolla, R., Cerdá, E. y Sanz, P. (2001) *Optimización. Cuestiones, ejercicios y aplicaciones a la economía*. Madrid: Prentice Hall
- Brown, J.E., 2009. Identifying cost reduction and performance improvement opportunities through simulation. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 2145-2153.
- Dennis C.,Sturrock D. Introduction to Simio. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. 2009. Págs 314 – 321.
- De Castro P., Fernandes.A.A. 2004. Methodologies for failure analysis: a critical survey. *Materials and Design*, 25, 117-123
- Figueras J. *Modelos de Simulación usando simio y redes de petri*. Universidad Nacional Autónoma de México. pág. 2.
- Guo Li, Jianmin Gao, Fumin Chen. Construction of Causality Diagram Model for Diagnostics. *IEEE*. 2008.
- Hillier, F. and Lieberman, G. (2005) *Introduction to Operation Research*. New York: McGraw-Hill, Edición 8.
- Hung, J.Y., Park, N.J., George, K.M., Park, N., 2013. Modeling and Analysis of Repair and Maintenance Processes in Fault Tolerance Systems. *IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems (DFT)*, 2-4 Oct. 2013, New York City, NY.261-265.
- Información de la empresa petrolera privada.
- Kleijnen J., 1995. Verification and Validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 82, 145-162.
- Kumbale, M., Hardiman, R., Makarov, Y., 2008. A methodology for simulating power system vulnerability to cascading failures in the steady state. *European Transactions on Electrical Power*, 18, 802-808.
- Lara-Rosano, F. *Complejidad en las Organizaciones*. México, 2011.

- Lara Rosano, F. *Metodología para la planeación de sistemas: un enfoque prospectivo*. Dirección General de Planeación, Evaluación y Proyectos Académicos, UNAM. México, 1990.
- Lara Rosano, F. Teoría, métodos y modelos de la complejidad social I. Seminario de Investigación. CCADET.
- Marion, R. *The edge of organization: chaos and complexity theories of formal social systems*. Sage Publications. Thousand Oaks, CA, 1999.
- Morecroft, J., Stearman, J., *Modeling for learning organizations*. Productivity Press. Portland, Oregon. 1994.
- Mújica M. A. Modelos de Simulación Usando Simio y Redes de Petri. Capítulo IV. Modelado de Redes de Petri en Simio. Primera edición. Octubre 2013. Págs. 101 - 105
- Musselman, K.J. (1992). Conducting a Successful Simulation Project. Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, 115-121.
- Muñoz C., Rodolfo V.,(2011). Investigación de Operaciones. McGraw-Hill, Interamericana. Edición 6.
- Negroe, G. (1980). Papel de la planeación en el proceso de conducción. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pasman, H.J., Knegtering, B., Rogers, W.J., 2013. A holistic approach to control process safety risks: Possible ways forward. Reliability Engineering and System Safety, 117, 21-29.
- Paulo M.S.T. de Castro \* , A.A. Fernandes. Methodologies for failure analysis: a critical survey. Materials and Design 25 (2004) 117-123.
- Pegden, C.D., Sturrock, L.L.C., 2011. Introduction to Simio. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 11-14 Dec, Phoenix, AZ., 29-38.
- Rossmanith HP. Structural failures – liability, learning from failures, technical insurance and legal consequences. Invited lecture 5th special chair AIB-Vin cotte 1995, Vrije Universiteit Brussel, 21 February 1995.
- Sadowski, R. The Simulation Process: Avoiding the problems and pitfalls. Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference.
- Senge, P. La quinta disciplina. Granica, 1995
- Tarride M, Complexity and complex systems. Historia, Ciencias, Salud. Manguinbos, II (1), pp 46-66. 1995.
- Thomas JM. Industrial experience with structural failure. In: Wierzbicki T, Jones N, editors. Structural failure. John Wiley; 1989. p. 511–45
- Zhang, K., Wu, R., Ning, J., Zhang, X., Du, H., 2011. Using Simio for Wartime Casualty Treatment Simulation. *IEEE*, 322-325.